

**UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ**

**Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales y  
de Telecomunicación**



**Gestión de Recursos Radio para  
Sistemas de Comunicaciones  
Vehiculares LTE-V2X**

**Autor: Rafael Molina Masegosa  
Director: Dr. Javier Manuel Gozávez Sempere  
Codirector: Dr. Miguel Sepulcre Ribes**

**Tesis Doctoral presentada en la Universidad Miguel Hernández para  
la obtención del título de Doctor del Programa de Doctorado en  
Tecnologías Industriales y de Telecomunicación**

**2020**



La presente tesis doctoral está sustentada por un compendio de trabajos previamente publicados o aceptados para publicación, acorde con la normativa de la Universidad Miguel Hernández de Elche. El cuerpo de la tesis queda constituido por los artículos cuyas referencias bibliográficas e indicios de calidad se indican a continuación.

Artículos en revistas de impacto, indexadas según JCR Science Edition:

- *LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications.* [45]  
R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez  
**IEEE Vehicular Technology Magazine**  
Vol 12, pp. 30-39 (Diciembre 2017).  
ISSN: 1556-6072. Editorial: IEEE  
**Factor de impacto JCR-SCI: 6.038, Cuartil Q1**  
DOI: 10.1109/MVT.2017.2752798
- *Geo-Based Scheduling for C-V2X Networks.* [51]  
R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre, J. Gozalvez  
**IEEE Transactions on Vehicular Technology**  
Vol 68, Issue 9, pp. 8397-8407 (Junio 2019).  
ISSN: 0018-9545. Editorial: IEEE  
**Factor de impacto JCR-SCI: 5.339, Cuartil Q1**  
DOI: 10.1109/TVT.2019.2924698
- *Empirical Models for the Realistic Generation of Cooperative Awareness Messages in Vehicular Networks.* [47]  
R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre, J. Gozalvez, F. Berens, V. Martinez  
**IEEE Transactions on Vehicular Technology**  
Vol 69, Issue 5, pp. 5713-5717 (Marzo 2020).  
ISSN: 0018-9545. Editorial: IEEE  
**Factor de impacto JCR-SCI: 5.339, Cuartil Q1**  
DOI: 10.1109/TVT.2020.2979232
- *Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation with Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size.* [39]  
R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre, J. Gozalvez  
**IEEE Access (En revisión)**  
ISSN: 2169-3536. Editorial: IEEE  
**Factor de impacto JCR-SCI: 4.098, Cuartil Q1**

Artículos derivados de comunicaciones en congresos internacionales con revisión por pares y comité científico de prestigio, publicados en editoriales de prestigio internacionales:

- *System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and its Distributed Scheduling* [43]  
R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez  
**2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**  
4-7 Junio 2017 (Sydney, NSW, Australia).  
ISBN: 978-1-5090-5932-4. Editorial: IEEE  
DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108463
- *An IEEE 802.11p-Assisted LTE-V Scheduling for Reliable Multi-Link V2X Communications* [52]  
R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, M. Sepulcre  
**2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)**  
27-30 Agosto 2018 (Chicago, IL, USA).  
ISBN: 978-1-5386-6358-5. Editorial: IEEE  
DOI: 10.1109/VTCFall.2018.8690760
- *Configuration of the C-V2X Mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communication* [40]  
R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, M. Sepulcre  
**2018 14th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN)**  
6-8 Diciembre 2018 (Shenyang, China).  
ISBN: 978-1-7281-0548-2. Editorial: IEEE  
DOI: 10.1109/MSN.2018.00014



**UNIVERSITAS**  
*Miguel Hernández*

**AUTORIZACIÓN DE PRESENTACIÓN DE TESIS DOCTORAL  
POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES**

Director: Dr. Javier Manuel Gozávez Sempere

Codirector: Dr. Miguel Sepulcre Ribes

Título de la tesis: ***Gestión de Recursos Radio para Sistemas de Comunicaciones  
Vehiculares LTE-V2X***

Autor: Rafael Molina Masegosa

Programa de doctorado en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Universidad Miguel Hernández de Elche

El director y codirector de la tesis reseñada AUTORIZAN SU PRESENTACIÓN EN LA  
MODALIDAD DE COMPENDIO DE PUBLICACIONES.

En Elche, a 1 de Julio de 2020

Fdo. Dr. Javier Manuel Gozávez Sempere

Fdo. Dr. Miguel Sepulcre Ribes





## INFORME DEL COORDINADOR DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Dr. D. ÓSCAR REINOSO GARCÍA, coordinador del Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación (TECNIT) de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

### CERTIFICA

Que el trabajo realizado por D. RAFAEL MOLINA MASEGOSA titulado ***Gestión de Recursos Radio para Sistemas de Comunicaciones Vehiculares LTE-V2X*** ha sido dirigido por el Dr. D. JAVIER MANUEL GOZÁLVEZ SEMPERE y codirigido por el Dr. D. MIGUEL SEPULCRE RIBES, y se encuentra en condiciones de ser leído y defendido como Tesis Doctoral ante el correspondiente tribunal en la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Lo que firmo para los efectos oportunos.

En Elche, a 1 de Julio de 2020

Fdo. Dr. D. Óscar Reinoso García  
Coordinador del Programa de Doctorado en  
Tecnologías Industriales y de Telecomunicación (TECNIT)





# Financiación

El trabajo realizado en esta tesis ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Economía y Competitividad y fondos FEDER mediante las ayudas de Promoción de Empleo Juvenil (PEJ-2014-A-33622), los proyectos TEC2014-5716-R y TEC2017-88612; por la Universidad Miguel Hernández mediante las Ayudas para la Formación de Personal Investigador; y por la Generalitat Valenciana mediante el proyecto AICO/2018/095.



## *Agradecimientos*

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres y mi hermana todo el apoyo a todos los niveles que me han dado durante estos años, sin el cual nada de esto habría sido posible. También a mis tíos, mi prima y mis abuelos por su apoyo y cariño incondicional y por ser inmejorables como familia. Agradezco también a Laura el ánimo y cariño que me ha dado durante estos años y haber estado siempre en los momentos difíciles, incluyendo estos últimos meses en los que ha sido la mejor compañera de confinamiento. Todas las cosas que he ido consiguiendo a lo largo de mi vida se sustentan en el apoyo y cariño de toda mi familia, así que una parte de esta tesis es de cada uno de ellos.

Agradezco también a todos mis amigos toda su compañía y montones de momentos juntos, ese amplio rango de buenas experiencias y situaciones vividas con ellos que han sido imprescindibles para mantener a raya el estrés y tener siempre la motivación suficiente para seguir. Quiero recordar también a todos los compañeros y amigos de mi época universitaria en Granada, y dar las gracias también a todas las personas que me han acompañado y ofrecido su apoyo durante los años que he estado viviendo en Elche.

Quiero reconocer también la labor de todos los profesionales de la educación que han contribuido a mi formación, en el colegio Natalio Rivas y el IES La Sagra en Huéscar, en la Universidad de Granada y en la Universidad de Elche, por su ejemplo de vocación y esfuerzo, que es la base imprescindible para que cada día sigamos poco a poco avanzando hacia una sociedad mejor.

Por supuesto, me gustaría agradecer a mis directores de tesis Javier y Miguel todo el apoyo y empeño que han puesto en que este trabajo salga adelante, por preocuparse tanto por mi aprendizaje como por mi bienestar, por saber sacar lo mejor de mí como investigador, y por estar siempre dispuestos a ayudarme en cualquier cosa. También a mis compañeros Jesús, Manuel, Baldo, Mari Carmen, Sergio, Jose Ramón, Dani Valero, Dani Sempere, Alejandro Correa, Alejandro Molina, Jan, Juanje, Gokul, Jose David, Guille y Rubén por todos los buenos momentos y haber hecho tan amenos estos años de trabajo en el grupo Uwicore.

Por último, me gustaría reconocer a todos los investigadores y científicos de España, que llevan a cabo con gran vocación y sacrificios personales un trabajo de trascendental (y demasiadas veces no reconocida) importancia en la sociedad, como es la investigación, el desarrollo y la innovación.



# Resumen

Las comunicaciones V2X (*Vehicle to Everything*) proveerán a los vehículos de la capacidad de intercambiar información entre ellos directamente, además de con la infraestructura vial, con peatones, y con servidores de red mediante nodos de infraestructura. Esta tecnología mejorará la seguridad vial y la eficiencia del tráfico al dotar a cada vehículo de un mayor conocimiento del contexto (posición, dirección, velocidad, etc.) de los vehículos que lo rodean. Además, será una parte crucial para el vehículo autónomo, al posibilitar aplicaciones avanzadas como la coordinación de maniobras. El estándar IEEE 802.11p ha sido desarrollado durante los últimos años para dar soporte a las comunicaciones V2X. Como alternativa a IEEE 802.11p, el *Third Generation Partnership Project* (3GPP) publicó en septiembre de 2016 el primer estándar de comunicaciones celulares que incluye soporte para comunicaciones V2X basadas en LTE. A esta tecnología se le conoce en la literatura como LTE-V2X, LTE-V, o *Cellular V2X*. El estándar LTE-V2X está diseñado para utilizar la interfaz directa de LTE (*LTE Sidelink* o PC5), y para satisfacer los requisitos de las comunicaciones V2X. Algunos estudios indican que LTE-V2X puede alcanzar un mejor rendimiento a nivel de capa física que IEEE 802.11p. Sin embargo, mientras que IEEE 802.11p ha alcanzado ya un alto grado de desarrollo debido a que se han llevado a cabo durante los últimos años numerosos estudios para su comprensión y desarrollo, LTE-V2X es una tecnología cuyo desarrollo se encuentra aún en fases tempranas.

En el estándar de LTE-V2X se reutiliza la capa física de LTE celular, pero se especifican dos nuevos modos de funcionamiento. Por un lado, se especifica un modo centralizado (LTE-V2X modo 3), en el cual los vehículos transmiten directamente entre ellos utilizando la interfaz PC5 (*Sidelink*), pero la gestión de recursos radio la lleva a cabo la estación base. Por otro lado, se especifica un modo distribuido y autónomo (LTE-V2X modo 4), con el cual los vehículos no requieren de la asistencia de la red celular para seleccionar los recursos donde transmitir. El trabajo desarrollado en esta tesis se centra en LTE-V2X modo 4, puesto que es el modo de referencia al no poder depender las comunicaciones V2X de la disponibilidad de cobertura celular, y al que nos referiremos simplemente como LTE-V2X en adelante. El mecanismo de gestión de recursos radio distribuido y autónomo, responsable de evitar que las transmisiones de los distintos vehículos se interfieran entre sí produciendo errores de transmisión, es crítico para el funcionamiento de LTE-V2X a nivel de sistema.

Debido a la reciente estandarización de LTE-V2X, el comportamiento de este mecanismo de gestión de recursos no ha sido analizado exhaustivamente. Además, varios de los aspectos que deja el estándar a libre implementación y configuración no han sido debidamente estudiados y optimizados. Por otro lado,

existe aún la necesidad de una comparativa neutral y detallada de LTE-V2X con IEEE 802.11p a nivel de sistema y considerando fuentes de datos realistas y acordes a los estándares definidos por la industria de la automoción. Esta comparativa es necesaria para que las entidades públicas reguladoras y la industria comparen el rendimiento y funcionamiento de estas tecnologías en escenarios realistas, más allá de su rendimiento a nivel de capa física.

El trabajo presentado en esta tesis está enfocado en el estudio exhaustivo y desarrollo de LTE-V2X, con especial énfasis en su mecanismo de gestión de recursos radio distribuido. Como parte de este trabajo, ha sido fundamental la temprana implementación de una plataforma de simulación que implementa de forma precisa las comunicaciones LTE-V2X, y que nos ha permitido realizar los primeros estudios de dimensionado y análisis del funcionamiento de LTE-V2X a nivel de sistema en la comunidad científica. Estos análisis nos han revelado que existen algunas ineficiencias en el mecanismo de gestión de recursos radio, que indican la existencia de margen de mejora. Tras este primer dimensionado, se ha realizado un análisis de los aspectos configurables del estándar LTE-V2X. Hemos analizado la configuración óptima razonando los resultados obtenidos para cada aspecto configurable, concluyendo que una correcta configuración es esencial para maximizar el rendimiento del mecanismo de gestión de recursos estandarizado. Para la evaluación a nivel de sistema las comunicaciones V2X, se ha desarrollado también el primer modelo de generación de mensajes acorde a los estándares definidos por la industria de la automoción, y que captura las características del tráfico de comunicaciones generado de forma realista. Este modelo permitirá realizar estudios más precisos del funcionamiento de las comunicaciones V2X que los realizados hasta la fecha y que se han basado en modelos de generación de mensajes simplificados sin reflejar de forma adecuada las características del tráfico de comunicaciones V2X. Empleando tanto el modelo de generación de mensajes realista como otros modelos más simplificados, esta tesis doctoral realiza el primer análisis comparativo neutral, detallado y en condiciones realistas de LTE-V2X e IEEE 802.11p, las dos tecnologías que compiten actualmente por dar soporte a las nuevas aplicaciones de vehículo conectado y autónomo. Esta comparativa es de gran interés en los ámbitos regulatorios, industriales y científicos.

A partir de los análisis y desarrollos realizados, hemos propuesto modificaciones y evoluciones del mecanismo de gestión de recursos radio de LTE-V2X para mejorar su funcionamiento. Nuestras propuestas van desde mejoras menores al mecanismo de gestión estandarizado, hasta la propuesta de nuevos mecanismos de gestión de recursos radio distribuidos para minimizar las ineficiencias del mecanismo estandarizado. Entre estos nuevos mecanismos se encuentra una técnica de colaboración entre las tecnologías LTE-V2X e IEEE 802.11p en un hipotético futuro escenario en el que ambas tecnologías acaben coexistiendo, y todos los vehículos utilicen ambas. Estas propuestas están diseñadas para evitar las ineficiencias del mecanismo de gestión de recursos radio de LTE-V2X y contribuir en su evolución hacia la futura tecnología 5G-V2X.

# Abstract

V2X (*Vehicle to Everything*) communications will enable the dynamic exchange of information between vehicles, and between vehicles and road side infrastructure units and pedestrians, as well as with Internet servers through infrastructure nodes or base stations. This technology will improve road safety and traffic efficiency by providing vehicles with a better knowledge of their driving context. V2X communications will be also key for autonomous vehicles since it will improve their awareness even beyond their sensors' field of view and will allow the development of advanced applications such as cooperative driving or sensing. The IEEE 802.11p standard has been developed during the last years to support the requirements of V2X communications. As an alternative to IEEE 802.11p, the *Third Generation Partnership Project (3GPP)* published in September 2016 the first cellular communications standard that includes support for LTE-based V2X communications. This technology is referred to as LTE-V2X, LTE-V or Cellular V2X. The LTE-V2X standard utilizes LTE's direct interface (*LTE Sidelink* or PC5), in order to satisfy the requirements of V2X communications. Some studies claim that LTE-V2X can achieve better performance than IEEE 802.11p at physical layer. However, while IEEE 802.11p has been extensively evaluated and tested, the development of LTE-V2X is at its early stages and requires further study.

The LTE-V2X standard reutilizes the cellular LTE physical layer but specifies two new operating modes. It includes a centralized mode (LTE-V2X mode 3), with which the messages are transmitted directly between vehicles but the base station performs the radio resource management. The standard also includes a distributed and autonomous mode (LTE-V2X mode 4), with which vehicles do not need the assistance of cellular infrastructure to select radio resources for their transmissions. For this mode, the standard introduces a new distributed and autonomous scheme to schedule and manage the radio resources, which is critical to avoid interferences between vehicles. The work presented in this thesis focus in LTE-V2X mode 4, since it is the baseline mode because V2X communications cannot depend on cellular coverage availability.

Due to the recent standardization of LTE-V2X, the operation and performance of this new radio resource management system has not been extensively analyzed. Furthermore, the standard leaves some configurable aspects up to implementation that need to be studied and optimized. Additionally, currently there is still the need for a neutral and detailed comparative study between LTE-V2X and IEEE 802.11p under realistic conditions and considering realistic data sources that are consistent with the standards defined by the automotive industry. This study is needed by standardization bodies,

regulation agencies and industry to compare the operation of both technologies in realistic scenarios.

In this context, this thesis extensively studies and evaluates the performance and operation of LTE-V2X, with particular attention to its distributed radio resource management system. To this aim, the author has implemented a simulation platform in order to realistically evaluate the performance and operation of LTE-V2X at the system level. This platform has been fundamental to perform the first dimensioning analysis of LTE-V2X in the scientific community. This analysis has revealed the inefficiencies of the standardized radio resource management system of LTE-V2X, showing possible room for improvement. For the realistic evaluation of V2X communications, this thesis has also created a model for the generation of V2X messages following the standards created by the automotive industry. The proposed model embeds the characteristics of the communications traffic in vehicular networks more realistically than the simplified models that have been usually utilized in the community. Using the realistic and simplified message generation models, we have conducted the first neutral, detailed and realistic comparative analysis between LTE-V2X and IEEE 802.11p. This comparative study is of great interest for regulatory, industrial and scientific entities.

The findings led us to propose enhancements to the standardized radio resource management for LTE-V2X. Our proposals include modifications to the current LTE-V2X standard that improves its performance as well as the proposal of new scheduling schemes. This includes a collaboration between LTE-V2X and IEEE 802.11p technologies in a possible future scenario where both technologies coexist. These proposals are designed to avoid the inefficiencies of the radio management mechanisms of LTE-V2X and contribute to its future evolution towards 5G-V2X.



# Índice de Contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>xi</b>
<b>Índice de Contenido</b> .....	<b>xv</b>
<b>Listado de figuras</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Listado de tablas</b> .....	<b>xx</b>
<b>Listado de abreviaturas</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivos .....	3
1.2. Estructura y resumen de la tesis .....	5
1.2.1. Organización en capítulos.....	5
1.2.2. Materiales y métodos .....	5
1.2.3. Resultados y discusión .....	6
<b>2. Comunicaciones V2X</b> .....	<b>9</b>
2.1. Introducción .....	9
2.2. Arquitectura de comunicaciones ITS.....	9
2.3. Tráfico en comunicaciones V2X .....	10
2.4. Estándar IEEE 802.11p .....	12
2.5. Estándar 3GPP LTE-V2X .....	14
<b>3. Entorno de simulación</b> .....	<b>19</b>
3.1. Introducción .....	19
3.2. Plataforma de simulación .....	19
3.3. Modelado del canal radio y capa física .....	22
3.4. Escenarios de simulación .....	24
3.4.1. Escenarios de tráfico vehicular.....	24
3.4.2. Modelo de generación de paquetes .....	25
3.4.3. Configuración de IEEE 802.11p y LTE-V2X.....	26
3.5. Métricas de rendimiento y funcionamiento.....	27
<b>4. Análisis y configuración de LTE-V2X</b> .....	<b>31</b>
4.1. Introducción .....	31
4.2. Dimensionado y análisis de LTE-V2X.....	31
4.3. Optimización de la configuración de LTE-V2X.....	34
4.3.1. Probabilidad $P$ .....	34

4.3.2.	<i>RSRP threshold</i> .....	35
4.3.3.	Potencia de transmisión .....	37
4.3.4.	Transmisión redundante .....	38
4.3.5.	MCS y subcanalización.....	38
4.4.	Conclusiones y resultados adicionales .....	40
<b>5.</b>	<b>Modelo CAM empírico .....</b>	<b>45</b>
5.1.	Introducción .....	45
5.2.	Generación del modelo.....	47
5.3.	Validación del modelo.....	51
5.4.	Conclusiones y resultados adicionales.....	53
<b>6.</b>	<b>Comparativa entre LTE-V2X e IEEE 802.11p.....</b>	<b>55</b>
6.1.	Introducción .....	55
6.2.	Parámetros de evaluación .....	56
6.3.	Ineficiencias de LTE-V2X.....	57
6.3.1.	Reselecciones adicionales .....	58
6.3.2.	Subcanales no utilizados por variación de tamaño.....	60
6.3.3.	Reservas de subcanales no utilizadas.....	61
6.4.	Comparativa a nivel de sistema.....	62
6.5.	Conclusiones y resultados adicionales.....	68
<b>7.</b>	<b>Propuestas para la mejora de la gestión de recursos radio en LTE-V2X .....</b>	<b>71</b>
7.1.	Introducción .....	71
7.2.	Modificaciones al algoritmo estandarizado .....	72
7.2.1.	<i>Sensing Window</i> modificada .....	72
7.2.2.	Reserva distinta para distintos tamaños de paquete .....	73
7.3.	Algoritmo de selección de recursos basado en geolocalización .....	74
7.3.1.	Descripción del algoritmo <i>Geo-Based Scheduling</i> .....	75
7.3.2.	Modelo analítico de <i>Geo-Based Scheduling</i> .....	78
7.3.3.	Evaluación.....	79
7.4.	Coexistencia entre LTE-V2X y IEEE 802.11p.....	82
7.4.1.	Posibilidad de colaboración entre tecnologías .....	82
7.4.2.	Gestión de recursos para LTE-V2X asistida por IEEE 802.11p .....	84
7.5.	Conclusiones y resultados adicionales.....	87
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y líneas de investigación futuras .....</b>	<b>91</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>97</b>
	<b>Anexo A. Publicaciones .....</b>	<b>101</b>

# Listado de figuras

Figura 1. Arquitectura de Comunicaciones ITS definida por ETSI [18].....	10
Figura 2. Condiciones de generación de CAM.....	11
Figura 3. Problema de terminal oculto .....	14
Figura 4. División en subtramas temporales y RBs en frecuencia de LTE ....	15
Figura 5. División en subcanales para transmisión de SCI y TB en LTE-V2X .....	16
Figura 6. Algoritmo Sensing-Based SPS para selección de recursos en LTE-V2X modo 4 .....	18
Figura 7. Módulo en OMNET++ del vehículo implementado con cuatro interfaces radio. ....	20
Figura 8. Ratio de entrega de paquetes en función de la distancia utilizando el modelo analítico y el entorno de simulación de LTE-V2X (detalles en [28]) ..	22
Figura 9. Escenario de autopista. ....	24
Figura 10. Escenario urbano. ....	25
Figura 11. Medición de CBR .....	29
Figura 12. PDR de gestión de recursos Sensing-Based SPS y aleatoria en autopista.....	32
Figura 13. Errores por tipo de Sensing-Based SPS en autopista.....	33
Figura 14. PDR de Sensing-Based SPS y selección aleatoria en escenario urbano.....	33
Figura 15. Evaluación del parámetro P en LTE-V2X.....	35
Figura 16. Evaluación de RSRP threshold en LTE-V2X .....	36
Figura 17. PDR de Sensing-Based SPS separando los pasos 2 y 3 .....	37
Figura 18. Evaluación de potencia de transmisión en LTE-V2X .....	37
Figura 19. Evaluación de transmisión redundante en LTE-V2X.....	38
Figura 20. Aumento de MCS que no supone un descenso en la carga si no se ajusta la subcanalización.....	39
Figura 21. Evaluación de MCS junto a subcanalización en LTE-V2X.....	40
Figura 22. Tamaño e intervalo entre CAMs de 120 muestras consecutivas obtenidas en pruebas de campo por Volkswagen [17].....	45
Figura 23. Función de distribución de probabilidad de tamaño e intervalo entre CAMs obtenidas en pruebas de campo por Volkswagen [17] .....	46

Figura 24. Jitter en traza de autopista obtenida pruebas de campo por Volkswagen [17] .....	48
Figura 25. Autocorrelación de la traza original y las trazas generadas con el modelo con varios valores de $m$ (escenario autopista de Volkswagen).....	51
Figura 26. PDF conjunta del intervalo y tamaño de CAM para la traza original y traza generada (escenario autopista de Volkswagen) .....	52
Figura 27. Correlación cruzada entre tamaños e intervalos de CAM (escenario autopista Volkswagen).....	53
Figura 28. Aumento del riesgo de colisión debido al incremento de reselecciones. Más reselecciones suponen mayor solapamiento entre Selection Windows.....	58
Figura 29. Reselección extra por tamaño.....	59
Figura 30. Reselección extra por latencia. ....	60
Figura 31. Subcanales no utilizados por variación de tamaño. ....	61
Figura 32. Reservas de subcanales no utilizadas.....	62
Figura 34. PDR usando el modelo simplificado con 200ms entre CAMs. (a) 60veh/km, (b) 120veh/km, (c) 200veh/km, (d) 400veh/km.....	63
Figura 33. PDR usando el modelo CAM empírico. (a) 60veh/km, (b) 120veh/km, (c) 200veh/km, (d) 400veh/km.....	63
Figura 35. Errores por propagación y colisión en IEEE 802.11p y LTE-V2X usando el modelo empírico.....	65
Figura 36. Medidas de ineficiencias en LTE-V2X para cada estrategia de selección de RRI .....	67
Figura 37. Evaluación de IEEE 802.11p igualando su capa física a la de LTE-V2X.....	68
Figura 38. PDR de LTE-V2X con variaciones en Sensing Window (50pps, 120veh/km) .....	73
Figura 39. PDR con Sensing-Based SPS modificado para no realizar reservas en los paquetes más grandes. (transmisión redundante, 120veh/km) .....	74
Figura 40. Principio básico de Geo-Based Scheduling .....	76
Figura 41. Funcionamiento del mecanismo de gestión de recursos Geo-Based Scheduling .....	77
Figura 42. Ejemplo de colapso del mecanismo de gestión sin transmisiones aleatorizadas. ....	78
Figura 43. Asignación de PosIndex para cola virtual en dos sentidos .....	78
Figura 44. PDR de LTE-V2X utilizando Geo-Based Scheduling según el modelo analítico y las simulaciones realizadas (vehículos transmitiendo a 10pps)....	79
Figura 45. Porcentaje de vehículos que intercambian su posición en la cola virtual en cada Pool, junto a porcentaje de errores de estimación de PosIndex. Escenario 120veh/km y 10pps. ....	80
Figura 46. PDR utilizado el algoritmo propuesto (Geo-Based) y el algoritmo estandarizado (Sensing-Based SPS). Tasa de generación 10pps.....	80

Figura 47. Errores por colisión y propagación.....	81
Figura 48. PDR utilizado el algoritmo propuesto (Geo-Based) y el algoritmo estandarizado (Sensing-Based SPS) para aplicaciones de vehículo autónomo. Escenario 60veh/km y 50pps. ....	82
Figura 49. Mecanismo de gestión de recursos propuesto para LTE-V2X asistido por IEEE 802.11p.....	84
Figura 50. PDR con transmisiones redundantes de IEEE 802.11p y LTE-V2X en escenario urbano .....	86
Figura 51. Errores por colisión y Half dúplex de la interfaz LTE-V2X en condiciones NLOS. Sin retransmisión. ....	87

# Listado de tablas

Tabla 1. Parámetros de configuración de LTE-V2X y IEEE 802.11p.....	27
Tabla 2. Configuración de MCS y subcanales utilizada para paquetes de 190 bytes.....	39
Tabla 3. Desviación estándar del jitter para distintos escenarios.....	50
Tabla 4. Divergencia KL y distancia de variación total entre las trazas originales y las generadas con el modelo .....	53
Tabla 5. Número de subcanales de 10RBs para cada tamaño de paquete en LTE-V2X.....	57
Tabla 6. CBR en IEEE 802.11p y LTE-V2X utilizando los dos modelos de generación.....	64
Tabla 7. Ratios de reselecciones en LTE-V2X con modelo empírico.....	66
Tabla 8. Subcanales y reservas no utilizadas en LTE-V2X con modelo empírico .....	66
Tabla 9. Distancia a la cual se garantiza una PDR de 0.9.....	82
Tabla 10. Distancia a la que se consigue una PDR de 0.9 con transmisión redundante IEEE 802.11p + LTE-V2X .....	86

# Listado de abreviaturas

3GPP	Third Generation Partnership Project
BSS	Basic service set
C2C-CC	Car to Car Communication Consortium
CAM	Cooperative Awareness Message
CBR	Channel Busy Ratio
CCA	Clear Channel Assessment
CDF	Cumulative Distribution Function
CR	Coding Rate
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSR	Candidate Single-subframe Resource
C-V2X	Cellular Vehicle to Everything
CW	Contention Window
D2D	Device to Device
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
DIFS	Distributed Inter Frame Space
DFN	Direct Frame Number
DMRS	Demodulation Reference Signal
DSRC	Dedicated short-range communications
EIFS	Extended Inter Frame Space
eNB	Evolved Node B
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
HF	High frequency
IBE	In-Band Emissions
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITS	Intelligent Transportation Systems
ITU	International Telecommunication Union
LF	Low Frequency
LOS	Line of sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-V2X	Long Term Evolution based Vehicle to Everything
LUT	Look-Up Table
MAC	Medium Access Control
MCS	Modulation and Codification Scheme
NLOS	Non-Line of Sight
NR	New Radio
OCB	Outside the Context of a BSS

OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PDF	Probability Density Function
PDR	Packet Delivery Ratio
PDU	Protocol Data Unit
PER	Packet Error Rate
PIR	Packet Inter-Reception time
pps	Paquetes por segundo
PSCCH	Physical Sidelink Control Channel
PSSCH	Physical Sidelink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RB	Resource Block
RRI	Resource Reservation Interval
RSRP	Reference Signal Received Power
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SAI	Sistema de Alimentación Ininterrumpida
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCI	Sidelink Control Information
SINR	Signal to Interference plus Noise ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
SPS	Semi-Persistent Scheduling
TB	Transport Block
TS	Technical Specification
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2N	Vehicle to Network
V2P	Vehicle to Pedestrian
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to Everything



# 1. Introducción

Las comunicaciones vehiculares, comúnmente conocidas como comunicaciones V2X (*Vehicle-to-everything*), tienen como propósito proveer a los vehículos de la capacidad de intercambiar información entre ellos (comunicaciones vehículo a vehículo o V2V) o con infraestructuras (vehículo a infraestructura, V2I), peatones (vehículo a peatón, V2P), o puntos de acceso hacia servidores en la nube (Vehículo a red, V2N), dedicados a gestión de tráfico o a información y entretenimiento. Este intercambio de información es el pilar fundamental de las aplicaciones para el denominado “vehículo conectado”, la incipiente innovación dentro del mundo del automóvil, que permitirá a los conductores obtener información y advertencias en tiempo real del entorno [1]. Además, las comunicaciones V2X serán un componente fundamental para las futuras aplicaciones de conducción autónoma, al posibilitar el intercambio de información sobre el entorno y proveer de un medio para la negociación durante las maniobras cooperativas entre vehículos. Esta tecnología complementa y extiende la capacidad de otro tipo de sensores como cámaras, radar o lidar, al ser posible obtener información mediante comunicaciones V2X sin línea de visión directa, es decir, a través de edificios u otros vehículos.

En Europa y Estados Unidos, parte de la banda 5.9GHz está reservada para las comunicaciones V2X. La primera tecnología radio en ser desarrollada y estandarizada para operar en esta banda fue IEEE 802.11p, en el año 2010 [2]. Esta tecnología es una adaptación de IEEE 802.11, comúnmente comercializada como Wi-Fi, para entornos vehiculares, siendo la base de los estándares ITS-G5 en Europa y DSRC en Estados Unidos. IEEE 802.11p ha sido ampliamente desarrollada y testada durante la última década, alcanzando un grado de madurez suficiente desde hace unos años para su despliegue. De hecho, algunas empresas automovilísticas ya han anunciado su intención de instalar sistemas de comunicaciones V2X basadas en IEEE 802.11p en algunos de sus vehículos en los próximos años, de la mano de fabricantes de equipos de comunicaciones como NXP Semiconductors o Cohda Wireless<sup>1</sup>. Por otra parte, a finales del año 2016 el *Third Generation Partnership Project* (3GPP) finalizó la primera estandarización de comunicaciones V2X basada en la tecnología móvil celular como parte de su *Release 14* [4]. Esta tecnología es una adaptación de la tecnología LTE-D2D [5], que soportaba aplicaciones que requerían comunicación directa entre terminales (llamada *Sidelink* o interfaz PC5) sin pasar por la estación base. Esta nueva tecnología es denominada como LTE-V2X, aunque comúnmente también se utiliza LTE-V o *Cellular V2X* (C-V2X) para referirse a ella. Importantes compañías de telecomunicaciones como Qualcomm, Ericsson o

---

<sup>1</sup> Incluso Volkswagen ya comercializa actualmente el modelo Golf 8, lanzado en 2019, con tecnología IEEE 802.11p integrada [3].

Huawei, además de otras compañías automovilísticas como Ford o Audi apoyan el desarrollo con vistas a un futuro despliegue de LTE-V2X, alegando que consigue un mayor rango de transmisión que IEEE 802.11p y que tiene un proyecto de evolución marcado hacia comunicaciones 5G-V2X [6]. Sin embargo, en la actualidad LTE-V2X aún no ha sido estudiada, optimizada y testeada con el detalle suficiente y necesario para alcanzar la madurez requerida para su despliegue. En concreto, pese a estar demostrado en algunos estudios como [7] que el rendimiento a nivel de enlace (capa física) de LTE-V2X es superior al de IEEE 802.11p, no existen suficientes evidencias de que esta tendencia se mantenga a nivel de sistema, donde es crucial una eficiente gestión de los recursos radio a nivel MAC (*Medium Access Control*). Dicha gestión es todavía más importante si tenemos en cuenta que puede haber una gran cantidad de nodos o vehículos transmitiendo simultáneamente, y estos deben ser capaces de seleccionar sus canales de comunicación de forma organizada y autónoma para evitar así colisiones en las comunicaciones.

Como resultado del reciente surgimiento de LTE-V2X, existen en la actualidad dos tecnologías candidatas a soportar las aplicaciones de vehículo conectado. Esto ha suscitado una carrera entre IEEE 802.11p y LTE-V2X para determinar cuál será la tecnología hegemónica en el despliegue de los primeros vehículos conectados. Ambas tecnologías están apoyadas por distintas compañías de la automoción y las telecomunicaciones. Sin embargo, IEEE 802.11p y LTE-V2X no son interoperables, con lo que un vehículo equipado con un dispositivo de comunicaciones de una tecnología no podría comunicarse con todos los vehículos que utilicen sólo la otra. En este contexto, nos encontramos en pleno proceso de regulación por parte de las instituciones en Europa [8]. Esta regulación es necesaria para garantizar que en el futuro todos los vehículos puedan intercambiar información entre ellos de manera eficiente. La solución pasará por decantarse por una de las dos tecnologías para todos los vehículos, o bien ambas funcionando simultáneamente en canales distintos dentro de la banda de 5.9GHz. No obstante, esta solución deberá estar motivada por un estudio exhaustivo de ambas tecnologías que permita comprender mejor el rendimiento alcanzable por LTE-V2X. Es, por tanto, crucial el punto de vista y la neutralidad de la comunidad académica en la evaluación y comprensión del funcionamiento de LTE-V2X, incluyendo la búsqueda de ineficiencias y posibles mejoras, de forma equivalente al análisis y desarrollo que la propia comunidad ha realizado ya sobre IEEE 802.11p. De esta manera, además de apoyar a las compañías para mejorar el progreso, madurez y fiabilidad de LTE-V2X, se conseguirá apoyar a las instituciones regulatorias en la elección del paradigma que ofrezca el mejor rédito para la seguridad vial.

El trabajo llevado a cabo en esta tesis tiene su comienzo con el proceso final de estandarización de LTE-V2X y el inicio de su evaluación, validación y desarrollo. El trabajo se ha centrado en la gestión de recursos radio y el rendimiento a nivel de sistema de LTE-V2X y ha sido pionero al posibilitar una mejor y más exhaustiva comprensión del rendimiento y funcionamiento de LTE-V2X. Gracias al exhaustivo estudio realizado, los objetivos alcanzados y

detallados en el siguiente apartado han tenido un notable impacto a nivel académico e industrial<sup>2</sup>.

## 1.1. Objetivos

Para llevar a cabo un análisis de las comunicaciones LTE-V2X, el primer objetivo es la comprensión a fondo del estándar publicado por el 3GPP [11]. El seguimiento del proceso de estandarización previo a la publicación del estándar es crucial para su comprensión en etapas tempranas de desarrollo, incluso antes de su publicación final. Este proceso de estandarización se realiza mediante reuniones periódicas de los grupos de trabajo del 3GPP. En estas reuniones, las compañías asociadas al 3GPP realizan propuestas que son discutidas para llegar a acuerdos que hacen progresar la estandarización. Tanto las propuestas como las discusiones y acuerdos están a libre disposición en el repositorio público del 3GPP [12].

Con un nivel de comprensión alto del estándar, el análisis exhaustivo de LTE-V2X pasa por la implementación de un entorno de simulación para realizar evaluaciones a nivel de sistema. Si bien, en el inicio de esta tesis, existen algunos simuladores de código abierto que permiten modelar tanto la movilidad de vehículos como la transmisión mediante la tecnología IEEE 802.11p, la tecnología LTE-V2X no está implementada en ningún repositorio público debido a su reciente estandarización. El siguiente paso es, por tanto, la implementación y desarrollo de la interfaz LTE-V2X en un entorno de simulación para redes vehiculares. Esta implementación será completamente compatible con el estándar. Además, deberá ser modular para posibilitar su evolución en el marco de esta tesis doctoral para cumplir los objetivos que aquí se describen. También se deberán implementar nuevas métricas en el entorno de simulación que permitirán analizar en detalle el funcionamiento de las comunicaciones LTE-V2X.

A continuación, y utilizando el entorno de simulación creado, el siguiente objetivo será el análisis de rendimiento para la identificación de fortalezas y debilidades de LTE-V2X. El foco estará en el algoritmo de gestión de recursos radio propuesto en el estándar, puesto que de ello depende la capacidad de comunicación de los vehículos en un contexto en el que deberán compartir recursos y seleccionar y gestionar los canales de comunicación sin apoyo o coordinación de la red celular, es decir, de forma autónoma y distribuida. LTE-V2X reutiliza buena parte de las bases de la tecnología celular LTE, incluyendo la estructura tiempo-frecuencia que ha demostrado tener un buen rendimiento cuando existe un nodo (la estación base) que organiza y gestiona los canales de comunicación. La extensión a un entorno vehicular y distribuido requería en el

---

<sup>2</sup> Las publicaciones producidas durante el desarrollo de esta tesis han sido referenciadas en más de 300 trabajos (según Google Scholar), incluyendo una referencia en el estándar ETSI TS 103 613 [10]. También han sido objeto de la *keynote* titulada “Towards a Multi-Technology V2X Ecosystem for Supporting Connected and Automated Driving” presentada por el profesor Javier Gozávez (co-director de esta tesis) en la conferencia internacional *IEEE Vehicular Networking Conference 2019*.

momento de iniciar la tesis una evaluación exhaustiva que permitiera una mejor comprensión del funcionamiento y rendimiento alcanzable de LTE-V2X dada la reciente publicación del estándar. Esta evaluación permitirá identificar también posibles aspectos mejorables y estudiar con detalle numerosos aspectos que el estándar deja abiertos a la implementación. Estos aspectos, incluyendo el valor de algunos parámetros particulares del mecanismo de gestión de recursos radio, pueden hacer variar el rendimiento de LTE-V2X considerablemente. Deben, por tanto, ser encontradas las configuraciones óptimas para los aspectos no definidos, lo cual supondrá por sí mismo un avance en el desarrollo de LTE-V2X.

Una vez optimizada la operación de LTE-V2X dentro del estándar, será interesante comparar su rendimiento con el de IEEE 802.11p. Es importante que la comparativa sea lo más realista posible, teniendo en cuenta cualquier aspecto que pueda interferir en una comparación justa de las dos tecnologías candidatas. Será también necesario realizar esta comparativa en las distintas condiciones y escenarios posibles que puedan alterar el rendimiento de ambas tecnologías. Por ejemplo, distintas densidades de vehículos o distintos modelos de tráfico de comunicaciones a nivel de aplicación. Es necesario utilizar un modelo de generación de mensajes, a nivel de aplicación, fiel a las características del tráfico para vehículo conectado, puesto que tendrá un notable impacto en la eficiencia de la gestión de recursos radio distribuida y autónoma por parte de los vehículos. Deberemos también analizar en detalle las causas de las tendencias obtenidas para poner de relieve las imperfecciones de cada tecnología y el margen de mejora en cada aspecto.

El estudio exhaustivo y realista de LTE-V2X permitirá también proponer mejoras o soluciones alternativas al mecanismo estandarizado de gestión de recursos, que debe ser capaz de soportar el funcionamiento coordinado en un elevado número de nodos. El objetivo en este caso será, en primer lugar, mejorar la gestión de recursos estandarizada mediante modificaciones al estándar, pero manteniendo la mayor parte de su especificación. Estas variaciones propuestas, al no suponer cambios profundos, estarán muy alineadas con el diseño de LTE-V2X por parte de la industria en los grupos de trabajo del 3GPP. Sin embargo, las mejoras siguiendo esta filosofía estarán limitadas, al ser sólo versiones del mismo mecanismo de gestión de recursos.

Por otro lado, idearemos, implementaremos y evaluaremos mecanismos de gestión de recursos para LTE-V2X alternativos, no basados en el estándar, que permitan ir un paso más allá y mejorar el diseño de futuros estándares. En este caso, los mecanismos de gestión de recursos propuestos estarán diseñados desde cero en su mayor parte, por lo que compartirán pocas características con el mecanismo estandarizado. Esto permitirá aprovechar mejor el margen de mejora que deja el estándar respecto a la gestión de recursos y que ha sido identificado por el autor en el estudio y análisis exhaustivo de LTE-V2X. Para desarrollar los nuevos mecanismos propuestos, intentaremos aprovechar la información de contexto que los vehículos comparten entre sí y la naturaleza del movimiento que sigue el tráfico vial. Utilizando esta información, el objetivo consistirá en una ordenación distribuida y autónoma de las transmisiones de los vehículos, de forma más determinista que en el mecanismo estandarizado.

Además, consideraremos la posibilidad de un hipotético caso en que IEEE 802.11p y LTE-V2X coexistieran para proponer a la comunidad la posible colaboración entre ambas tecnologías, ejemplificando esta asociación con una gestión de recursos radio colaborativa.

## 1.2. Estructura y resumen de la tesis

### 1.2.1. Organización en capítulos

Este documento está estructurado en capítulos que resumen el trabajo realizado y contribuciones científicas producidas por el autor de esta tesis, incluyendo los resultados más importantes obtenidos, junto con una discusión de los mismos. Además, se incluyen sendos capítulos para introducir la base teórica (estándares) y el entorno de simulación utilizados. En la introducción de cada capítulo de resultados se incluirá una referencia a las publicaciones que incluyen, detallan y amplían dichos resultados. Al final de cada capítulo se incluirá un apartado de resumen y conclusiones, que también reseñará y listará los resultados y aspectos no descritos en detalle en ese capítulo, y que pueden ser encontrados en las publicaciones originales para mayor detalle. Además, los apartados 1.2.2 y 1.2.3 contienen una breve sinopsis de los materiales utilizados y resultados obtenidos, relacionando su contenido con el de los capítulos. El contenido de los capítulos es el siguiente. El capítulo 2 expone una introducción teórica a las comunicaciones y estándares V2X, mientras que el capítulo 3 describe el entorno de simulación implementado en esta tesis doctoral. Los capítulos 4 a 7 desarrollan las contribuciones científicas de esta tesis y los resultados obtenidos, incluyendo su motivación y discusión. Las conclusiones finales obtenidas, así como las posibles continuaciones a este trabajo y líneas de investigación futuras, son expuestas en el capítulo 8. Finalmente, en el Anexo A se adjunta una copia de los artículos publicados incluidos en esta tesis por compendio.

### 1.2.2. Materiales y métodos

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, hemos estudiado la información de los requisitos y funcionamiento de las comunicaciones V2X a partir de los estándares pertinentes y la literatura científica. Por un lado, el estándar de generación de mensajes *Cooperative Awareness Message* (CAM) [13] define los mensajes con información de contexto (posición, velocidad, etc.) transmitidos en modo *broadcast* por un vehículo de manera continua. Este estándar está definido por ETSI. Por otro lado, el conjunto de estándares de la *Release 14* del 3GPP [11] especifican el funcionamiento de LTE-V2X en todos sus aspectos, mientras que el estándar del IEEE [2] incluye los aspectos tenidos en cuenta sobre IEEE 802.11p, necesarios para la comparativa de ambas. El contenido más relevante de estos estándares para esta tesis está resumido en el capítulo 2.

Las evaluaciones han sido llevadas a cabo mediante un entorno de simulación. Es reseñable que, durante el transcurso del trabajo de esta tesis, LTE-V2X estaba recientemente estandarizada, con lo que aún no existían prototipos comerciales, ni pruebas de campo en el estado del arte. Todas las evaluaciones de esta tecnología en esta tesis han sido llevadas a cabo mediante una plataforma de simulación implementada por el autor a partir del simulador *Veins* [14]. *Veins* integra la movilidad realista del simulador de tráfico vehicular SUMO [15] con el entorno de simulación basado en eventos para redes OMNET++ [16]. En *Veins*, los vehículos constan de una interfaz IEEE 802.11p, a la que hemos añadido la implementación propia de otra interfaz LTE-V2X siguiendo el estándar. En nuestra implementación es posible, incluso, la transmisión redundante por ambas tecnologías al mismo tiempo en diferentes canales en frecuencia. Las simulaciones en esta plataforma pueden proveer de todas las estadísticas y resultados necesarios para nuestros análisis. Una descripción detallada del entorno de simulación, escenarios y parámetros utilizados, y métricas obtenidas, puede encontrarse en el capítulo 3.

Adicionalmente, para la creación de un modelo empírico de generación de mensajes CAM utilizamos trazas generadas en pruebas de campo realizadas por Volkswagen y Renault. El laboratorio UWICORE es el único grupo de investigación académico con el que, a día de hoy, se han compartido estas trazas. La obtención de las trazas es descrita en [17], y sigue el estándar CAM de ETSI [13] para la generación de mensajes, dependiendo esta generación del movimiento de los vehículos por escenarios de conducción reales.

El equipamiento que posee el laboratorio UWICORE, utilizado para las evaluaciones realizadas, incluye un clúster informático propio de alto rendimiento formado por 24 servidores de alta gama multi-procesador, con más de 250 CPUs, más de 500GB de RAM y más de 27TB de capacidad de almacenamiento. Para su protección cuenta con un sistema de alimentación SAI con apagado automático, así como sensores de temperatura y humedad para la continua monitorización del ambiente. Utilizando un sistema de gestión de procesos especializado para trabajos de computación intensivos, el clúster ofrece unas capacidades excelentes para la ejecución de simulaciones a gran escala y con un elevado nivel de complejidad, como las realizadas en el marco de esta tesis doctoral.

### 1.2.3. Resultados y discusión

El primer resultado ha sido la elaboración de un entorno de simulación para comunicaciones LTE-V2X, el cual ha resultado fundamental para el desarrollo del resto del trabajo realizado. Como hemos indicado en 1.2.2 y extendemos en el capítulo 3, nuestra implementación fue la primera en la comunidad académica que soporta evaluaciones de LTE-V2X, e incluye un alto nivel de detalle en la implementación de aspectos como la movilidad vehicular, generación de paquetes y la gestión de recursos distribuida y autónoma por parte de los vehículos. Gracias al trabajo realizado para incorporar de forma pionera la funcionalidad recién especificada de LTE-V2X, el resto de los



resultados obtenidos son una referencia destacada para el desarrollo de esta tecnología.

Utilizando el simulador implementado, se ha analizado a fondo el funcionamiento de LTE-V2X cuantificando sus beneficios y también sus ineficiencias a nivel MAC, como por ejemplo la pérdida de información debido a las interferencias o colisiones. El algoritmo de gestión de recursos está basado en reservas de recursos radio periódicas y semipersistentes. Los recursos para cada reserva son escogidos mediante el sensado de las transmisiones de otros vehículos recibidas anteriormente. El problema de terminal oculto debido al límite de sensado, unido a la ineficiencia de las reselecciones de recursos provoca que se observe un número significativo de errores por colisión, el cual se incrementa al aumentar la carga del canal. Este resultado muestra que existe margen de mejora, y que el estudio de la configuración del algoritmo de gestión de recursos es necesario para optimizar el rendimiento en cada escenario. En el capítulo 4 se presenta el análisis del funcionamiento de LTE-V2X, cuantificando los errores de transmisión por tipo de error (propagación, colisión, o *half dúplex*), y analizando la relevancia de los parámetros de configuración de LTE-V2X descritos en el apartado 2.5. Los resultados muestran que, pese a que una configuración errónea de estos parámetros resulta en una peor fiabilidad de las comunicaciones, no existe una configuración que evite significativamente la degradación de rendimiento con el aumento de carga. Esto indica que el mecanismo de gestión de recursos radio, tal y como está estandarizado, puede ser mejorado.

Para realizar una comparativa entre LTE-V2X e IEEE 802.11p es necesario un modelado preciso y realista del tráfico a transmitir para aplicaciones de vehículo conectado, puesto que las características del tráfico generado pueden influir de distintas formas en el rendimiento de los mecanismos de gestión de recursos de ambas tecnologías. El modelo de generación de tráfico utilizado comúnmente en la evaluación de comunicaciones V2X (tanto LTE-V2X como IEEE 802.11p por separado) se basa en la generación de paquetes de un tamaño fijo, de entre 200 y 300 bytes, con un periodo entre paquetes también fijo, normalmente de 100ms entre dos paquetes consecutivos. Este modelo es una simplificación del tráfico real generado en aplicaciones de vehículo conectado, y se utiliza por su simplicidad y facilidad de implementación. Sin embargo, en [17] se analizan unas trazas de CAM generadas en pruebas de campo en base al movimiento del vehículo (como define el estándar), y se muestra que el periodo entre mensajes y el tamaño no son estrictamente fijos en la generación en un escenario de conducción real. La variación de periodo y tamaño es relevante en la comparativa entre tecnologías dado que no afecta de la misma manera a la gestión de recursos de IEEE 802.11p y LTE-V2X. En este contexto, esta tesis ha creado los primeros modelos de generación de tráfico CAM basados en las trazas referenciadas en [17]. Estos modelos son los primeros disponibles en la comunidad científica basados en pruebas de campo experimentales, implementando de forma precisa los patrones de generación de paquetes. Los modelos utilizan fuentes de Markov de orden  $m$  que mantienen un buen nivel

de usabilidad<sup>3</sup>. Estos modelos han sido publicados en un repositorio público para su uso en la comunidad, y las variaciones en periodo y tamaño que se obtienen han sido validadas con las trazas reales. Todo el proceso de creación y validación de los modelos se encuentra en capítulo 5.

Utilizando el modelo de generación de CAM empírico que hemos desarrollado, realizamos una comparativa entre IEEE 802.11p y LTE-V2X. Esta comparativa incluye la optimización de algunos parámetros de IEEE 802.11p y otros de LTE-V2X que están relacionados con la variación de periodo y tamaño de CAM. Los parámetros seleccionados en ambas tecnologías garantizan, por tanto, que existe igualdad de condiciones para que la comparativa sea lo más justa posible. En la comparativa se observa que LTE-V2X tiene una fiabilidad superior en escenarios con baja carga del canal y a largas distancias, debido al mejor rendimiento de su capa física. Sin embargo, con el aumento de la carga en el canal debido a una mayor densidad de vehículos, ambas tecnologías experimentan un aumento de errores por colisión, siendo este aumento más patente en LTE-V2X. Como consecuencia, LTE-V2X acaba teniendo un peor rendimiento que IEEE 802.11p en escenarios de media y alta densidad. Esto es debido a que, mientras que en IEEE 802.11p sólo afecta el problema de terminal oculto para provocar el aumento de colisiones, en LTE-V2X se suman una serie de ineficiencias inherentes al mecanismo de gestión de recursos y la reserva semipersistente de recursos. Más allá de la comparativa, estas ineficiencias de LTE-V2X son analizadas en profundidad, llegando a la conclusión de que no pueden ser eliminadas mediante la variación de parámetros puesto que, en todos los casos observados, la reducción del efecto de unas ineficiencias conlleva inevitablemente el aumento del efecto de otras. La comparativa y el exhaustivo análisis asociado a ella es desgranada en el capítulo 6.

Por último, en el capítulo 7 se proponen varias alternativas al algoritmo de gestión de recursos de LTE-V2X. Por un lado, obtenemos una mejora significativa realizando varias reservas por separado para distintos tamaños de paquete, especialmente en escenarios de alta carga. Haciendo otras modificaciones menores al estándar las variaciones en rendimiento han resultado poco significativas. Por otro lado, se propone un algoritmo de gestión de recursos ordenada basado en el orden de los vehículos de una carretera. Este algoritmo produce mejoras muy significativas al rendimiento de LTE-V2X en este escenario. También se propone un algoritmo de gestión de recursos colaborativo con IEEE 802.11p para escenarios urbanos, que también supone una mejora para aplicaciones de vehículo autónomo. Además, este algoritmo plantea a la comunidad la posible colaboración entre IEEE 802.11p y LTE-V2X en el hipotético y posible caso de coexistencia entre ambas tecnologías.

---

<sup>3</sup> Evaluar las comunicaciones en un escenario realista suficientemente amplio para considerar el movimiento y maniobras reales de los vehículos en un tramo realista, y abarcando suficientes densidades de tráfico para el estudio, resulta inabarcable computacionalmente. De ahí que en la comunidad siempre sean utilizados hasta ahora modelos simplificados que puedan ser implementados en escenarios simples.



## 2. Comunicaciones V2X

### 2.1. Introducción

En este capítulo describimos el funcionamiento de las comunicaciones V2X y los estándares que las detallan. Esta descripción será fundamental para la realización de la tesis, dado que constituye el punto de partida sobre el que se construirá el simulador y se desarrollarán los diferentes estudios de evaluación, configuración y optimización de las comunicaciones V2X. El riguroso seguimiento de los estándares ha sido clave para que el estudio realizado sea preciso y tenga un alto impacto en la comunidad científica y en los propios procesos de estandarización. Partiremos describiendo la arquitectura de comunicaciones ITS definida por ETSI (apartado 2.2), que define las diferentes capas de la pila de protocolos y sirve de marco general para el estudio de las comunicaciones V2X. A continuación, describiremos el tráfico generado por las capas superiores (apartado 2.2), dado que dicho tráfico tendrá un alto impacto en el rendimiento y la configuración de las comunicaciones V2X. Por ejemplo, la generación de mensajes de mayor o menor tamaño y con mayor o menor periodicidad, afectará significativamente a la forma en la que las tecnologías de comunicación V2X gestionan los recursos radio. Finalmente, presentaremos el funcionamiento de las dos tecnologías estudiadas en esta tesis, IEEE 802.11p y LTE-V2X (apartados 2.3 y 2.4), que abarcan la capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC) de la pila de protocolos. Estudiaremos con especial atención sus mecanismos de gestión de recursos radio. El conocimiento detallado de estas tecnologías ha sido fundamental para analizar su rendimiento en el marco de esta tesis doctoral.

### 2.2. Arquitectura de comunicaciones ITS

El trabajo realizado hace uso de la arquitectura de comunicaciones ITS definida por ETSI [18] (Figura 1. Arquitectura de Comunicaciones ITS definida por ETSI [18].), que considera diferentes protocolos en las capas de Red y Transporte, así como la posibilidad de utilizar diferentes tecnologías de comunicación en la capa de Acceso. Las aplicaciones son independientes de las tecnologías de comunicación, la capa Red y los protocolos de Transporte. La capa *Facilities* implementa un conjunto de funcionalidades comunes y estructuras de datos para dar soporte a las aplicaciones. Es en dicha capa donde reside buena parte de la inteligencia del sistema, y donde, por ejemplo, se genera el tráfico de datos necesario para las aplicaciones. Todas las aplicaciones ITS utilizan la información transmitida en los mensajes estandarizados de la capa *Facilities*.

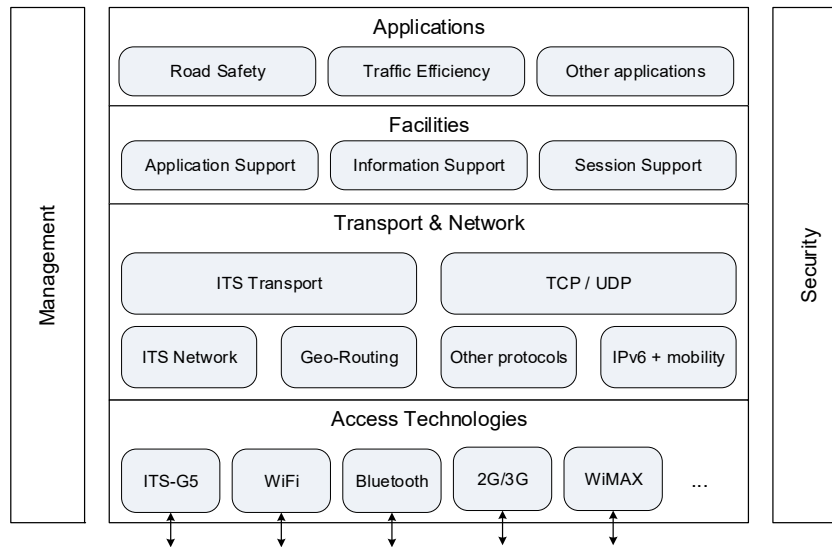


Figura 1. Arquitectura de Comunicaciones ITS definida por ETSI [18].

### 2.3. Tráfico en comunicaciones V2X

Las aplicaciones dependientes de las comunicaciones V2X utilizan la información de contexto intercambiada entre los vehículos y demás elementos de la vía. Esta información se transmite en modo *broadcast* para que pueda ser recibida por todos los vehículos. Los dos mensajes principales son *Cooperative Awareness Message* (CAM) y *Decentralized Environmental Notification Message* (DENM). CAM es un mensaje transmitido de manera reiterada, con periodos que varían entre 100 milisegundos y 1 segundo, que incluye información de contexto como posición o velocidad de un vehículo, para ser tenida en cuenta por los demás vehículos. Por su parte, DENM es transmitido eventualmente, para informar de una señal de emergencia o indicación en la vía. Este trabajo, siguiendo la tendencia en la comunidad, está centrado en la transmisión de CAM entre vehículos, por ser los mensajes que suponen la mayor parte de la carga en el canal, y porque la mayoría de aplicaciones de vehículo conectado dependen de la correcta transmisión de estos mensajes. El estándar de CAM está definido por ETSI en [13], y es independiente de la tecnología utilizada para las capas de acceso radio (IEEE 802.11p o LTE-V2X)

La generación de CAM está asociada al movimiento del vehículo transmisor. El estado del vehículo (posición, velocidad y dirección) es comprobado periódicamente. El periodo entre comprobaciones ( $T_{CheckCamGen}$ ) está definido en el estándar con un máximo de 100ms, es decir, al menos 10 comprobaciones por segundo. En cada comprobación, se evalúa si se ha cumplido alguna de las siguientes condiciones desde la generación del último CAM:

- 1) La distancia entre la posición actual del vehículo y la incluida en el CAM anterior es mayor de 4m (Figura 2.a).
- 2) La diferencia absoluta entre la velocidad actual y la incluida en el CAM anterior supera 0.5m/s (Figura 2.b).

- 3) La diferencia absoluta entre la dirección actual y la incluida en el CAM anterior es mayor de  $4^\circ$  (Figura 2.c).
- 4) El tiempo transcurrido desde la generación del último CAM es igual o mayor que 1s.

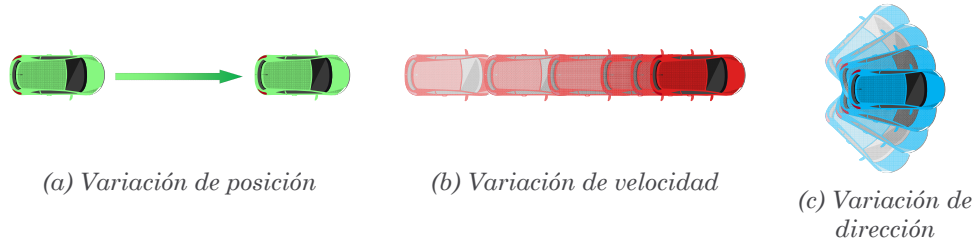


Figura 2. Condiciones de generación de CAM

En caso de cumplirse una de estas condiciones, el CAM se genera. Si no se cumple ninguna, se espera otro periodo  $T\_CheckCamGen$  hasta la siguiente comprobación. El formato de un CAM contiene una serie de contenedores obligatorios y opcionales. Además, los contenedores comprenden varios elementos (*Data Elements*, DE) obligatorios y opcionales [13]:

- 1) *ITS PDU header*. Cabecera que contiene la versión del protocolo, tipo de mensaje y un identificador del vehículo.
- 2) *Basic container*. Contiene el tipo de vehículo y la última posición geográfica del vehículo al generar el CAM.
- 3) *High frequency (HF) container*. Contiene información dinámica del vehículo, como velocidad, aceleración o dirección.
- 4) *Low frequency (LF) container*. Contiene información estática del vehículo como una serie de las últimas posiciones geográficas (*Path History*) o el estado de las luces exteriores.
- 5) *Special containers*: Utilizados por vehículos especiales como vehículos de emergencias o mercancías peligrosas.

Los contenedores *ITS PDU header* y *Basic container* son obligatorios y tienen tamaño fijo. *HF container* es obligatorio, pero 7 de sus 16 DEs son opcionales, por lo que su tamaño puede variar. *LF container* es opcional, y normalmente se transmite con una menor frecuencia que los contenedores obligatorios. Consta de 3 DEs, incluyendo el *Path History*. El número de entradas en el *Path History* varía dependiendo del movimiento del vehículo y la implementación, por lo que el tamaño del *LF container* también es variable. Además de los contenedores, un certificado de seguridad es añadido cada vez que un nuevo vehículo es detectado o una vez por segundo. Como resultado, el tamaño del CAM puede variar entre 200 y 800 bytes, y depende de la implementación por la inclusión de elementos y contenedores opcionales. Ejemplos de implementaciones son el *profile 1.4* del *Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC)* [19], y *SCOOP release 1.2* [20]. En cuanto a los requisitos de latencia y fiabilidad, dependen de la aplicación. Para la mayoría de las aplicaciones de vehículo conectado se considera suficiente una latencia de 100ms, con un porcentaje de paquetes entregados correctamente del 90% [21]. El rango de transmisión requerido varía entre los 300m requeridos en escenarios de alta velocidad en autopista,

hasta los 50m en escenarios urbanos [21]. Sin embargo, estos requisitos son estimados, siendo común en el análisis de comunicaciones V2X para vehículo conectado establecer un requisito de 100ms de latencia estricto, y a partir de ahí evaluar la fiabilidad de la transmisión, en ratio de paquetes correctamente transmitidos, en función de la distancia entre el transmisor y el receptor.

## 2.4. Estándar IEEE 802.11p

La primera tecnología de acceso radio en estandarizarse con el propósito de dar soporte a los requisitos de las comunicaciones V2X es IEEE 802.11p [2]. Su funcionamiento está basado en IEEE 802.11a [22]. Utiliza la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), con 52 subportadoras de las cuales 48 están dedicadas a la transmisión de datos y 4 a señales piloto. IEEE 802.11p utiliza canales de 10MHz. Utiliza una duración de símbolo OFDM de 8 $\mu$ s, incluyendo un prefijo cíclico de 1.6 $\mu$ s, una duración suficiente para enfrentar el problema de desplazamiento Doppler en frecuencia debido a las altas velocidades. Las modulaciones soportadas son BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM, con *coding rate* de 1/2, 2/3 y 3/4, dando como resultado tasas de transmisión de datos desde 3Mbps hasta 27Mbps. Si bien el estándar soporta potencias de transmisión de hasta 33dBm, los equipos reales suelen tener una potencia máxima de 23dBm.

Los equipos radio en IEEE 802.11p transmiten en un modo *ad-hoc* llamado *outside the context of a BSS* (OCB), de manera más simplificada a IEEE 802.11. Dicho modo deja de utilizar procedimientos como escaneo de canal, autenticación y asociación [22], evitando retardos innecesarios para las redes vehiculares en la transmisión de paquetes. Para el acceso al medio (capa MAC), IEEE 802.11p utiliza acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones (CSMA/CA). El funcionamiento de CSMA/CA se basa en el sensado del medio antes de transmitir. De esta forma, si en el momento de generación de un paquete, el nodo transmisor advierte el canal ocupado por la transmisión de otros nodos, la transmisión es pospuesta. El *CCA threshold* es el umbral de intensidad de señal recibida (RSSI) a partir del cual se considera el canal ocupado en CSMA/CA. Su valor debe ser superior a la sensibilidad del receptor. El nodo debe esperar a que el canal vuelva a estar desocupado. Cuando vuelva a estarlo, el nodo esperará un tiempo de contención para evitar que varios nodos transmitan justo en el momento en que se desocupa el canal, dado que todos ellos detectan el canal como ocupado. Este tiempo de contención se calcula multiplicando el parámetro *aSlotTime* por un número entero seleccionado aleatoriamente en el intervalo [0,CW]; CW es llamado la ventana de contención (*Contention Window*). Para la transmisión de paquetes en modo *broadcast* en un canal de 10MHz,  $CW=aCW_{min}=15$  y  $aSlotTime=13\mu s$ . El nodo disminuye el tiempo de contención cuando sensa el canal como desocupado por más de un periodo llamado DIFS (*Distributed InterFrame Space*) si el último paquete ha sido recibido correctamente, o por más de un periodo llamado EIFS (*Extended InterFrame Space*) si el último paquete no ha sido recibido correctamente. El nodo puede transmitir cuando el tiempo de contención llega a cero. Si el canal vuelve a estar ocupado antes de que transcurra el tiempo de

contención, se establece un nuevo tiempo de contención hasta que el canal sea desocupado de nuevo.

Un aspecto importante no incluido en el estándar IEEE 802.11p, es el llamado *Capture Effect*. El *Capture Effect* es una funcionalidad añadida a los equipos reales de IEEE 802.11p [23], y tiene que ver con el modo de recepción en esta tecnología. En IEEE 802.11p, el nodo en recepción busca continuamente un patrón de señal llamado preámbulo, transmitido siempre antes de cada paquete. Si este preámbulo es recibido, el receptor trata de recibir y demodular el paquete que le sigue hasta que termina. El momento de finalización está indicado en la cabecera del paquete, transmitida justo después del preámbulo. La comprobación CRC de los bits recibidos mostrará si el paquete ha sido correctamente recibido o ha de descartarse. Sin embargo, en el proceso de recepción de un paquete, el nodo no será capaz de intentar recibir otros paquetes que comiencen a transmitirse antes del final. Esto es debido a que el nodo no se encontrará buscando el preámbulo. Si un vehículo empieza a transmitir un paquete en estas circunstancias con un nivel de señal más alto que el del paquete en proceso de recepción, provocará el error de dicho paquete por interferencia y tampoco podrá ser recibido por no haber sido escuchado su preámbulo. En conclusión, ninguno de los dos paquetes es recibido correctamente. Si el RSSI experimenta un incremento superior a un umbral llamado *Capture Threshold* (usualmente 10dB [23]), el paquete que se estaba recibiendo es descartado, ya que se asume que no se va a recibir correctamente debido a la interferencia. Instantáneamente, se busca el preámbulo del nuevo paquete transmitido con mayor intensidad de señal, prosiguiendo a tratar de recibirlo. De esta manera, en lugar de descartarse ambos paquetes, se logra recibir uno de los dos correctamente, el de mayor nivel de señal.

El principal obstáculo para el mecanismo de gestión de recursos de IEEE 802.11p basado en CSMA/CA es el llamado problema de terminal oculto, conocido para todas las variantes de IEEE 802.11 con CSMA/CA y que también afecta a otros mecanismos de gestión de recursos basados en sensado del canal, como el de LTE-V2X. Debido al terminal oculto, dos nodos podrían transmitir simultáneamente y provocar la colisión de sus transmisiones, impidiendo la correcta recepción por un tercer nodo en modo de recepción. Este problema se da cuando el nodo receptor se encuentra en el rango de transmisión de los dos nodos transmisores, situado entre ellos, pero a su vez los nodos transmisores se encuentran suficientemente alejados como para no detectarse mutuamente. Como ejemplo, en la Figura 3, la transmisión del nodo A no es detectada por el nodo B y viceversa, por lo que ambos nodos transmiten al mismo tiempo al no detectar el canal como ocupado. Sin embargo, el nodo C se encuentra en el rango de transmisión de ambos nodos, con lo que, desde su punto de vista, las transmisiones de A y B colisionarán produciendo errores debido a la interferencia.

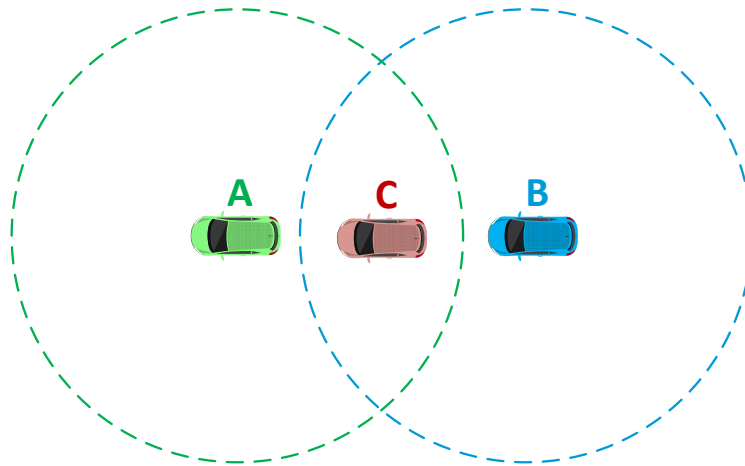


Figura 3. Problema de terminal oculto

## 2.5. Estándar 3GPP LTE-V2X

3GPP publicó, como uno de los elementos de su *Release 14*, la estandarización de comunicaciones V2X basadas en LTE [4]. A este tipo de comunicaciones se le conoce en la literatura como LTE-V2X, LTE-V, o *Cellular V2X*. Este estándar está pensado para soportar aplicaciones de vehículo conectado. En este estándar, las transmisiones entre vehículos se realizan mediante la interfaz directa de LTE, llamada PC5 o *Sidelink*. *Release 14* especifica dos nuevos modos de comunicación para LTE-V2X. Por un lado, existe un modo asistido por la red celular (LTE-V2X modo 3), en el que, a pesar de que la comunicación se realiza de forma directa entre dos vehículos, es la estación base (eNB) la que indica a cada nodo los recursos radio donde debe transmitir en tiempo y frecuencia. Por otro lado, se especifica un modo distribuido y no asistido por la red celular (LTE-V2X modo 4), en el cuál cada vehículo escoge de forma autónoma los recursos donde transmitir sin ningún tipo de asistencia por parte de la infraestructura celular. En la actualidad, la implementación real de LTE-V2X modo 3 no está clara debido a que depende de la actualización y servicio de estaciones base, gestionadas por los operadores. De hecho, el algoritmo de gestión de recursos en LTE-V2X modo 3 no está estandarizado y se deja a libre implementación del eNB. Además, las comunicaciones V2X no pueden depender de la disponibilidad de cobertura celular para funcionar dado que serán un elemento clave para la seguridad vial. Por lo tanto, deberán estar disponibles en todo momento, incluso en áreas o situaciones sin cobertura celular muy comunes en carreteras. Por todo ello, LTE-V2X modo 4 se considera el modo de referencia en la actualidad para los primeros prototipos de vehículo conectado. En el resto de esta tesis, nos referimos simplemente como LTE-V2X a este modo 4 por simplicidad.

LTE-V2X reutiliza en parte la capa física en las comunicaciones LTE celulares. Así, utiliza para transmitir acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA), como el enlace de subida (*Uplink*) de LTE. Al igual que en LTE celular, LTE-V2X divide la línea temporal en subtramas de 1 ms sincronizadas entre todos los vehículos, constando cada subtrama de 14



símbolos. El ancho en frecuencia del canal también está dividido en *Resource Blocks* (RBs) de 180 kHz, conteniendo 12 subportadoras cada RB, y una separación entre subportadoras de 15 kHz. En la Figura 4 está representada la división en subtramas y RBs de LTE, reutilizada en LTE-V2X. Las modulaciones soportadas son QPSK y 16-QAM, aunque en *Release 15* se añadió el soporte para 64-QAM. Para la codificación del canal se utiliza *Turbo Coding*, de forma que el estándar establece hasta 20 esquemas de modulación y codificación (MCS, *Modulation and Coding Schemes*) según la modulación y el ratio de codificación (CR) [24]. Para impedir la degradación del rendimiento a nivel de enlace que infiere el efecto Doppler a altas velocidades, en LTE-V2X se ha aumentado de 2 a 4 el número de símbolos dedicados a la transmisión de señales de referencia para demodulación (DMRS, *Demodulation Reference Signals*). Las DMRS se transmiten en el tercer, sexto, noveno y duodécimo símbolo de cada subtrama, en todas las subportadoras [25]. Se soportan los canales con ancho de 10MHz y 20 MHz. La potencia máxima de transmisión especificada es 23dBm.

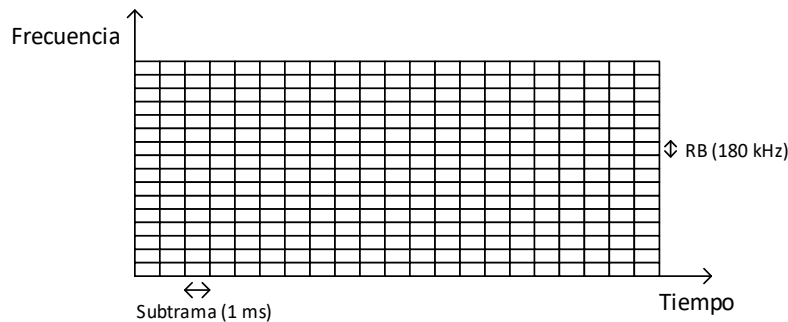


Figura 4. División en subtramas temporales y RBs en frecuencia de LTE

En LTE-V2X, el canal está dividido, además, en subcanales. Un subcanal se define como un conjunto de RBs consecutivos en frecuencia dentro de una misma subtrama. El número de RBs por subcanal y número de subcanales es configurable. Los datos de los mensajes (por ejemplo, CAM) son transmitidos en *Transport Blocks* (TBs), y los recursos donde pueden ser transmitidos son denominados *Physical Sidelink Shared Channel* (PSSCH). Por otro lado, la información de control se transmite en mensajes *Sidelink Control Information* (SCI), sobre el *Physical Sidelink Control Channel* (PSSCH). Un TB contiene un paquete correspondiente a un CAM (u otro tipo de mensaje) completo, y puede ocupar uno o varios subcanales. El SCI tiene un formato definido, y transporta la información necesaria para recibir y decodificar el TB, incluido el MCS que utiliza y los subcanales que ocupa. Cada TB tiene un SCI asociado, y ambos se transmiten en la misma subtrama. La Figura 5 representa la división en subcanales de LTE-V2X, y la transmisión de algunos paquetes, considerando un escenario en el que el canal se divide en 3 subcanales.

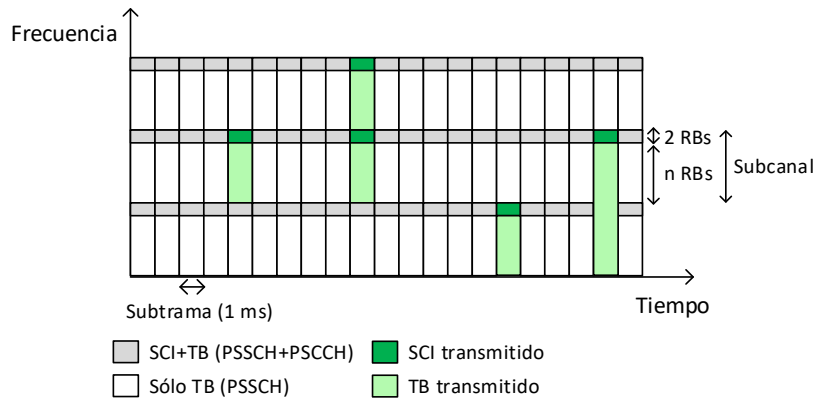


Figura 5. División en subcanales para transmisión de SCI y TB en LTE-V2X

En LTE-V2X modo 4 los nodos seleccionan de forma autónoma los recursos donde transmitir. Por esta razón, LTE-V2X es capaz de operar fuera de la cobertura celular. Sin embargo, LTE-V2X modo 4 incluye una serie de parámetros configurables que pueden ser definidos por la red celular si el vehículo se encuentra dentro de cobertura. En caso de situarse fuera de cobertura, o en cobertura de una red celular que no ofrezca soporte de configuración para LTE-V2X, los vehículos deben utilizar valores preconfigurados para estos parámetros. Estos parámetros incluyen, entre otros, la frecuencia de portadora del canal, elección de referencias de sincronización, número de subcanales y número de RBs por subcanal. El estándar del 3GPP no especifica un valor concreto para estos parámetros, aunque algunos de sus valores por defecto son discutidos en [10].

El algoritmo utilizado por los vehículos para seleccionar los recursos donde transmitir está especificado en el estándar *Release 14* [24][26], se denomina *Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling* (SPS). En *Sensing-Based SPS*, los vehículos reservan los recursos seleccionados para la transmisión de varios paquetes consecutivos. El número de paquetes consecutivos por los que son seleccionados los recursos viene dado por un contador llamado *Reselection Counter*. El *Reselection Counter* se establece a un valor aleatorio entre 5 y 15 cada vez que se seleccionan nuevos recursos para transmitir. Con cada paquete transmitido, el *Reselection Counter* se decrementa en uno. Al llegar a cero, el vehículo debe reaseleccionar recursos para transmitir con probabilidad  $(1-P)$ .  $P$  es un parámetro configurable entre 0 y 0.8, donde un valor más alto de  $P$  hace que el vehículo pueda mantener reservados los mismos recursos por más tiempo [27]. En el caso de que el tamaño de un paquete generado exceda la capacidad de los recursos reservados, el vehículo debe reaseleccionar recursos obligatoriamente. Equivalentemente, es necesario hacer una nueva reserva si la reserva actual no puede satisfacer el requisito de latencia del paquete generado (100ms para CAM). Además, el algoritmo puede ser configurado para transmitir cada mensaje dos veces redundantemente (retransmisión). El proceso para reaseleccionar nuevos recursos sigue tres pasos, descritos a continuación y representados en la Figura 6.

- *Paso 1.* Cuando un vehículo  $V$  debe seleccionar nuevos recursos, todos los recursos entre el momento de generación del paquete  $T$  y el límite



impuesto por la latencia máxima (menor o igual a 100ms), son considerados aptos para transmitir. A este periodo se le denomina ventana de selección (*Selection Window*). Dentro de *Selection Window*,  $V$  identifica los recursos candidatos (*Candidate Single-Subframe Resources*, CSRs). Un CSR es definido como un grupo de subcanales adyacentes dentro de una misma subtrama dentro de los cuales cabe la transmisión del paquete completo (SCI más TB).

- *Paso 2.* El vehículo  $V$  ha sentido todos los paquetes dentro de la ventana de sentido (*Sensing Window*), que incluye las 1000 subtramas (un segundo) anteriores a  $T$ . El vehículo crea una lista  $L_1$  con todos los CSRs dentro de *Selection Window* excepto algunos excluidos que deben cumplir dos condiciones. La primera condición es que  $V$  haya recibido correctamente en *Sensing Window* un SCI transmitido por otro vehículo, indicando que utilizará dicho CSR a la vez que  $V$  necesita transmitir alguno de sus siguientes paquetes. Esto es posible gracias a que la reserva es indicada a otros vehículos en el SCI. La segunda condición es que  $V$  mida una potencia de señal de referencia recibida (RSRP)<sup>4</sup>, en los RBs utilizados para transmitir el TB asociado al SCI recibido, que supere un umbral. Este umbral es denominado *RSRP threshold*, y es un parámetro de *Sensing-Based SPS*. Como ejemplo, el CSR 1 en la Figura 6 es excluido de  $L_1$ , puesto que ha recibido un SCI en  $T_{CSR1}-100\text{ms}$  indicando que ese CSR va a estar ocupado y el TB asociado supera el *RSRP threshold*. Al finalizar de ejecutar el Paso 2,  $L_1$  debe incluir al menos el 20% del total de CSRs dentro de *Selection Window*. Si esto no se cumple, el Paso 2 se repite hasta que se supere el 20%, y *RSRP threshold* es aumentado 3dB en cada iteración.
- *Paso 3.* El vehículo  $V$  crea una segunda lista de CSRs  $L_2$ . El número de CSRs en  $L_2$  debe ser igual al 20% de los CSRs en *Selection Window*. Los CSRs que componen  $L_2$  son aquellos incluidos en  $L_1$  que han experimentado un menor indicador de nivel de señal recibida (RSSI) en el conjunto de subtramas anteriores definidas por  $T_{CSR2}-100 \cdot j$  ( $j \in \mathbb{N}$ ,  $1 \leq j \leq 10$ ). En la Figura 6, CSR 2 será incluido en  $L_2$  si pertenece al 20% de CSRs no excluidos en el paso 2 con mayor RSSI promedio. Finalmente, para la transmisión se escoge aleatoriamente un CSR dentro de  $L_2$ . Como dato adicional, en LTE-V2X es posible configurar la retransmisión de todos los paquetes, en un SCI+TB duplicado. En este caso, son escogidos aleatoriamente dos CSRs de  $L_2$ , con la condición de que ambos no se encuentren en la misma subtrama.

---

<sup>4</sup> RSRP mide la potencia sólo del TB asociado al SCI recibido, excluyendo interferencias y ruido, al contrario que RSSI que mide toda la potencia recibida. La medida de RSRP es posible utilizando la señal de referencia específica del SCI recibido, que identifica al emisor con una secuencia única y está incluida también en el TB.

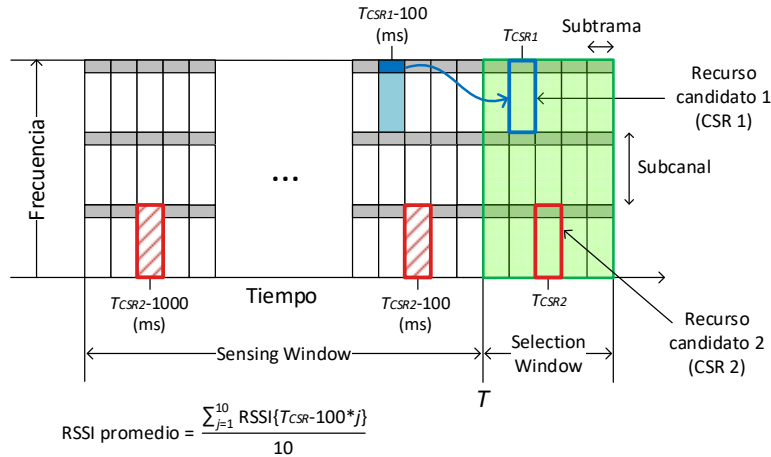


Figura 6. Algoritmo Sensing-Based SPS para selección de recursos en LTE-V2X modo 4

*Sensing-Based SPS* soporta reservas de múltiplos de 100ms hasta 1s como intervalo entre reservas. Esto corresponde a tasas de 10 paquetes por segundo (pps) hasta 1pps. Como caso especial, también se soportan intervalos de 50ms y 20ms (20pps y 50pps respectivamente). En estos casos especiales, hay algunas diferencias. Por un lado, el *Reselection Counter* es seleccionado aleatoriamente entre 10 y 30 para 20pps, y entre 25 y 75 para 50pps. Por otro lado, en el Paso 3, el RSSI promedio es  $T_{CSR}-T_{IP}j$ , donde  $T_{IP}$  es una variable con valor 50 para 20pps y 20 para 50pps, y la variable  $j$  toma todos los valores entre 1 y 20 para 20pps, y entre 1 y 50 para 50pps.

El CSR seleccionado se reservará hasta que ocurra una nueva reelección, siendo la separación entre reservas el llamado *Resource Reservation Interval* (RRI). El valor de RRI a escoger puede ser 20ms, 50ms, 100ms, o múltiplo de 100ms. Aunque el estándar del 3GPP no indica el valor concreto de RRI escogido (se deja a libre implementación [26]), el RRI debe estar lo más adaptado posible al tráfico generado para un mejor funcionamiento del algoritmo *Sensing-Based SPS*. Los vehículos incluirán en todos los SCI el valor de RRI escogido, de forma que los demás vehículos excluirán la siguiente reserva en sus reelecciones. Es necesario destacar que el RRI incluido en el SCI reserva los subcanales sólo para la siguiente transmisión y no para todas las siguientes transmisiones hasta el agotamiento del *Reselection Counter*. Como excepción, el valor de RRI se pondrá a 0 en la última transmisión tras agotar el *Reselection Counter*, de forma que los demás vehículos no excluyan los subcanales empleados hasta ahora por el vehículo transmisor.

## 3. Entorno de simulación

### 3.1. Introducción

La evaluación del rendimiento de las comunicaciones V2X, tanto utilizando los modelos de gestión de recursos estandarizados como nuevas propuestas llevadas a cabo en esta tesis, requiere el empleo de una plataforma de simulación. Sin embargo, en el inicio del trabajo en el marco de esta tesis no existía un entorno de simulación de código abierto para poder realizar nuestras evaluaciones, debido a la reciente estandarización de las comunicaciones LTE-V2X. Las empresas implicadas en la estandarización en el 3GPP poseen sus propios entornos de simulación privados, pero establecen unos supuestos de simulación comunes. Por tanto, una de las tareas más significativas en el inicio de esta tesis ha resultado la implementación de un nuevo y preciso simulador de LTE-V2X no existente en la comunidad. En este capítulo se describe dicha plataforma en el apartado 3.2. El modelado de la capa física se presenta en el apartado 3.3 dada su influencia en el rendimiento de las comunicaciones V2X. Los escenarios de simulación se presentan en el apartado 3.4, incluyendo tanto los escenarios de tráfico, como los modelos de generación de mensajes implementados y los parámetros principales de las tecnologías de comunicación IEEE 802.11p y LTE-V2X. Finalmente, el apartado 3.5 presenta las métricas de rendimiento y funcionamiento implementadas en la plataforma, y que ayudarán a cuantificar de forma precisa el rendimiento de las comunicaciones V2X.

### 3.2. Plataforma de simulación

La plataforma de simulación desarrollada se ha basado en la plataforma existente *Veins* [14]. *Veins* integra la simulación de comunicaciones IEEE 802.11p en el *framework* de simulación de redes OMNET++ [16] con el simulador de movilidad del tráfico SUMO [15]. Tomando como base el código de *Veins*, hemos implementado un simulador propio de redes vehiculares heterogéneas. Concretamente, en nuestro entorno de simulación han sido implementadas cuatro interfaces radio (dos IEEE 802.11p y dos LTE-V2X, incluyendo) para los vehículos, de forma que es posible seleccionar transmisión por una de ellas, o redundantemente por dos o más interfaces en canales distintos. También ha sido implementada la capa de aplicación, con posibilidad de escoger entre varios modelos de generación de paquetes.

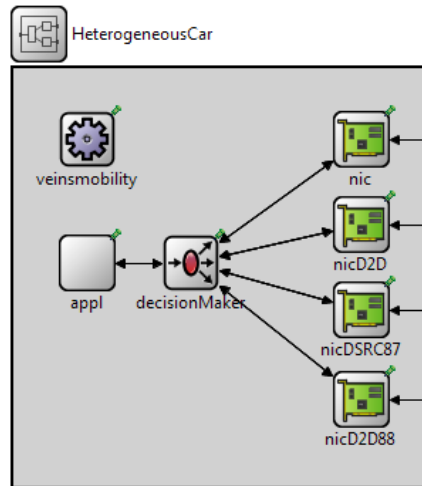


Figura 7. Módulo en OMNET++ del vehículo implementado con cuatro interfaces radio.

Mientras que la implementación de la interfaz IEEE 802.11p sí ha sido reutilizada de *Veins*, el funcionamiento de la interfaz LTE-V2X ha sido completamente implementado como parte de esta tesis. El mecanismo de gestión de recursos estandarizado, *Sensing-Based SPS* (descrito en el apartado 2.5), es implementado de manera precisa. Sin embargo, ha sido añadida la posibilidad de utilizar mecanismos de gestión de recursos alternativos para evaluar sus posibilidades, e incluso parametrizar variaciones en el algoritmo estandarizado. A continuación, listamos las funcionalidades más importantes implementadas en el simulador como parte de este trabajo.

- Módulo de sincronización global a nivel de subtrama entre los vehículos para implementar la división temporal de LTE. Este módulo provee a los vehículos de los instantes de inicio y final de cada subtrama en la simulación, necesario para la transmisión y recepción con la interfaz radio LTE-V2X. También es posible establecer una sincronización adicional a nivel de periodos de varias subtramas, de forma que todos los vehículos conozcan el inicio y final de dichos periodos y utilicen el mismo. Los periodos de varias subtramas son utilizados en nuestras propuestas de gestión de recursos para LTE-V2X en el capítulo 7.
- División de ancho de canal en RBs de 180kHz según la capa física de LTE para la interfaz LTE-V2X. Esto incluye la posibilidad de seleccionar sólo algunos RBs para transmitir un paquete, dependiendo de su tamaño.
- Implementación del módulo *Decider* para la capa física de la interfaz LTE-V2X. El módulo *Decider* es el encargado de gestionar la recepción a nivel de capa física en el simulador, decidiendo qué transmisiones se reciben correctamente y cuales fallan. Su funcionamiento es distinto al de a interfaz IEEE 802.11p incluida en *Veins*, donde las transmisiones no tienen una división temporal ni en frecuencia. Hemos implementado el *Decider* de LTE-V2X de forma que la recepción y gestión de interferencias provenientes de otros vehículos se estructuren en subtramas temporales y RBs en frecuencia.

- Implementación de la capa física y modelado del canal, tanto para la interfaz IEEE 802.11p como para LTE-V2X. Es importante que ambas tecnologías sean evaluadas en igualdad de condiciones. En el apartado 3.3 detallamos el modelado de capa física para las dos tecnologías, IEEE 802.11p y LTE-V2X.
- Posibilidad de utilizar el modelo de capa física de LTE-V2X en la interfaz IEEE 802.11p. Con esta funcionalidad conseguiremos una comparativa a nivel MAC independientemente de la capa física, uno de los resultados del capítulo 6.
- Implementación de la estructura de división en subcanales de LTE-V2X. Esto incluye el tamaño de subcanales parametrizable (al no existir un tamaño fijo especificado por el estándar), transmisión por separado de SCI y TB en la misma subtrama, y recepción de la información de control incluida en los SCI transmitidos en los dos primeros RBs de cada subcanal.
- Implementación del algoritmo de gestión de recursos estandarizado para LTE-V2X, *Sensing-Based SPS*. El estándar ha sido seguido cuidadosamente para soportar la gestión de recursos independientemente del modelo de generación de tráfico a nivel de aplicación utilizado. Además, realizamos una implementación modular, de forma que puedan ser evaluadas modificaciones al algoritmo propuestas en esta tesis, y mecanismos de gestión de recursos alternativos (Véase capítulo 7).
- Mediante parámetros de simulación introducidos en el simulador, es posible modificar la configuración que el estándar de LTE-V2X deja abierta. Estos aspectos configurables de LTE-V2X, junto con los aspectos configurables de IEEE 802.11p ya implementados en *Veins*, son mencionados en el apartado 3.4.3.
- Inclusión del *Capture Effect* en la interfaz IEEE 802.11p, parametrizable para poder activarlo o desactivarlo en las simulaciones. El *Capture Effect* no está incluido en la implementación de *Veins*, pero es común encontrarlo en equipos IEEE 802.11p comerciales.
- Programación de módulo *DecisionMaker* para decidir cuál, o cuáles de las interfaces radio son utilizadas en cada simulación. Es posible utilizar una interfaz IEEE 802.11p o una LTE-V2X por separado, una de cada tecnología al mismo tiempo en canales distintos de forma redundante (véase apartado 7.4), o dos interfaces iguales al mismo tiempo.
- Creación de los escenarios vehiculares en SUMO para utilizarlos con el módulo de movilidad de *Veins*. Incluimos escenarios de autopista con diferentes densidades y un escenario urbano, detallados en el apartado 3.4.1.
- Implementación de la generación de tráfico de comunicaciones V2X en la capa de aplicación, siguiendo distintos modelos de generación de paquetes especificados en el apartado 3.4.2.
- Implementación en el simulador de la adquisición de todas las métricas utilizadas en nuestros análisis, incluyendo las estadísticas generales

que definimos en el apartado 3.5 y las métricas específicas de cada estudio.

Es importante destacar que la implementación de la interfaz LTE-V2X ha sido validada con un modelo de rendimiento analítico, verificando su correcto funcionamiento. El trabajo relacionado con esta tesis [28], con participación del autor de esta tesis, expone un modelo analítico del rendimiento a nivel de sistema de LTE-V2X. En [28] se modelan los errores de transmisión de diversos tipos que ocurren utilizando LTE-V2X en un escenario simple. El modelo analítico calcula los errores medios de transmisión debidos a atenuación de la señal por el canal e interferencias de vehículos que transmiten al mismo tiempo. Las fórmulas que componen el modelo analítico han sido deducidas mediante el estudio y caracterización de los distintos fenómenos que provocan dichos errores, como las reelecciones del algoritmo *Sensing-Based SPS* y el problema de terminal oculto. Como muestra la Figura 8, las simulaciones obtenidas en nuestro entorno de simulación quedan validadas por los resultados analíticos en las condiciones evaluadas, si bien el modelo analítico no es válido para soportar la complejidad en variables de las evaluaciones realizadas en esta tesis (por ejemplo, la generación de mensajes con varios tamaños de paquete).

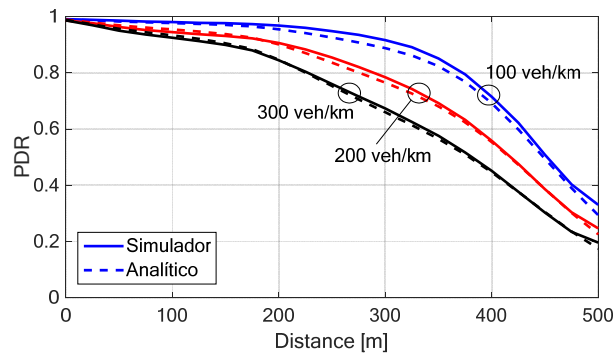


Figura 8. Ratio de entrega de paquetes en función de la distancia utilizando el modelo analítico y el entorno de simulación de LTE-V2X (detalles en [28])

### 3.3. Modelado del canal radio y capa física

Para modelar el canal radio, tanto para LTE-V2X como para IEEE 802.11p, se han seguido los supuestos de simulación descritos por el 3GPP en [4]. Estos supuestos son independientes de la tecnología (al utilizar ambas la misma banda de frecuencias) y los resumimos a continuación.

El modelo de *pathloss* especificado en [4] es el modelo WINNER+B1 [29], en su versión LOS (*Line of sight*, con línea de visión directa) para escenarios de autopista, y en versión *Manhattan* para escenario urbano con edificios. En el caso urbano, son también tenidas en cuenta en WINNER+ B1 las transmisiones entre vehículos sin línea de visión directa (NLOS) debido a la obstaculización de edificios. Para el uso de estos modelos se establece una altura de la antena, tanto emisora como receptora, de 1.5m. En caso de

distancia entre transmisor y receptor menor de 3m, se utiliza el *pathloss* a 3m según el modelo.

Los modelos de *shadowing* y *fading* también siguen los supuestos de [4]. El *shadowing* sigue una distribución normal logarítmica con desviación estándar de 3dB en condiciones LOS y 4dB en condiciones NLOS. Se establece una cierta correlación espacial para el *shadowing*, aunque no está exactamente definida por la localización de los vehículos, sino por la variación de distancia entre cada pareja de vehículos posible. Así, para cada posible pareja de vehículos en el escenario  $(i,j)$ , es generado un valor inicial de *shadowing*  $S_{i,j}(0)$  siguiendo la distribución normal logarítmica mencionada. A partir del valor inicial, el valor de *shadowing* es actualizado cada 100ms de simulación, de forma que en el instante  $100 \cdot n$  ms, el valor del *shadowing* viene dado por:

$$S_{i,j}(n) = e^{-D/D_{corr}} \cdot S_{i,j}(n-1) + \sqrt{1 - e^{-2D/D_{corr}}} \cdot S_{i,j}^n(n) \quad (1)$$

donde  $D$  es la variación de distancia entre la pareja de vehículos  $i,j$  desde la última actualización, es decir, desde el instante  $100 \cdot (n-1)$  ms hasta el instante  $100 \cdot n$  ms.  $D_{corr}$  es la distancia de decorrelación, establecida en 25m para escenarios de autopista y 10m para escenarios urbanos.  $S_{i,j}(n-1)$  es el valor de *shadowing* en la última actualización, mientras que  $S_{i,j}^n(n)$  es un valor nuevo siguiendo la distribución normal logarítmica definida. Este método de correlación de *shadowing* hace que la variación del valor de *shadowing* no cambie abruptamente a medida que transmisor y receptor se desplazan. El modelo de *fading* requerido según [4] es el definido por ITU en [30].

La interfaz LTE-V2X, al contrario que IEEE 802.11p, utiliza división en frecuencia. Las transmisiones en LTE-V2X utilizan sólo un conjunto de RBs dentro de una subtrama para transmitir, con lo que las transmisiones utilizan una parte del ancho de banda total. Sin embargo, los equipos reales no tienen un filtro perfecto en frecuencia, con lo que existen transmisiones residuales en los RBs no utilizados para transmitir el paquete. Para modelar este efecto, se implementa el modelo de emisiones residuales en RBs no utilizados de la misma subtrama en que se transmite. Este modelo es llamado *In-band emissions* (IBE) y se especifica en [4].

Para incluir en la simulación a nivel de sistema el rendimiento a nivel de capa física de las tecnologías estudiadas, utilizamos tablas de consulta (*Look-Up Tables*, LUT) del ratio de error de paquetes (*Packet Error Rate*, PER) en función de la SINR recibida. Este modo de implementación de la capa física es común en los simuladores de redes inalámbricas a nivel de sistema como *Veins*. Las LUT utilizadas son diferentes para IEEE 802.11p y LTE-V2X y están extraídas de [7] [31] y [32].



## 3.4. Escenarios de simulación

### 3.4.1. Escenarios de tráfico vehicular

La movilidad de los vehículos en el entorno de simulación, integrada con SUMO, es reutilizada totalmente de *Veins*, si bien los escenarios de tráfico de vehículos utilizados como entrada a SUMO han sido creados como parte de esta tesis. Estos escenarios están basados en los usados en los grupos de estandarización del 3GPP [4].

Por un lado, el escenario de autopista implementado consiste en un tramo recto de autopista con tres carriles en cada sentido (Figura 9). El ancho de cada carril es 4m, y la longitud del tramo de autopista es 5km, de los cuáles se utilizan sólo los 2km centrales para tomar estadísticas para evitar efectos de frontera. Los vehículos trazan un recorrido partiendo desde ambos extremos hasta el extremo opuesto, apareciendo y desapareciendo en dichos extremos de forma que el escenario mantiene una densidad de vehículos constante. Sin embargo, la distribución de vehículos no es totalmente uniforme porque la aparición de vehículos nuevos al escenario sigue una distribución de Poisson y los vehículos siguen un movimiento establecido por el simulador de tráfico SUMO. En este caso de escenario de autopista consideramos cuatro variantes:

- Escenario 60veh/km (vehículos por kilómetro): Los vehículos circulan a 140km/h. Se corresponde con el escenario *Highway Fast* definido por el 3GPP en [4].
- Escenario 120veh/km: Los vehículos circulan a 70km/h. Se corresponde con el escenario '*Highway Slow*' definido en [4].
- Escenario 200veh/km: Al igual que el escenario 120veh/km, los vehículos circulan a 70km/h.
- Escenario 400veh/km: Los vehículos circulan a 70km/h, pero en este caso hay 5 carriles en cada sentido.

Es destacable que todos estos escenarios se corresponden a un nivel de servicio C según [33]. El nivel de servicio C está definido como flujo de vehículos sin bloqueo, aunque la libertad de maniobra es restringida y los cambios de carril requieren bastante vigilancia y cuidado por parte del conductor. Por tanto, ninguno corresponde a escenarios congestionados (atascos).

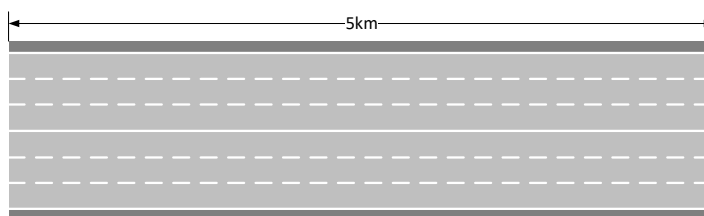


Figura 9. Escenario de autopista.

Por otro lado, en algunas evaluaciones hemos utilizado un escenario urbano compuesto por bloques de edificios rectangulares. Este escenario es denominado *Manhattan layout* [4]. Los bloques son como los especificados en [4] para las evaluaciones del 3GPP, con una distancia entre intersecciones de



433m en dirección norte-sur y 250m en dirección este-oeste, formando bloques de 250×433m. Las calles están formadas por 2 carriles en cada sentido (4 en total), con 3,5m de ancho cada carril, más 3m de acera a cada lado de la calle (Figura 10). El escenario completo en nuestra implementación consiste en 9×7 bloques, que suponen un tamaño total del escenario de 2250×3031m. Para las estadísticas obtenidas sólo se toma en cuenta el rendimiento de las comunicaciones experimentado por vehículos que se encuentren en una de las calles adyacentes a los nueve (3×3) bloques centrales. En este escenario sólo utilizamos una variante, en la que hay una densidad media de 90veh/km y los vehículos se mueven a 15km/h de velocidad media, aunque esta velocidad es muy variable debida a las maniobras y paradas de los vehículos en las intersecciones realizadas por SUMO. La movilidad y posicionamiento de vehículos se realiza mediante el script *random.py* de SUMO, el cual genera vehículos periódicamente con una ruta aleatoria por todo el escenario.

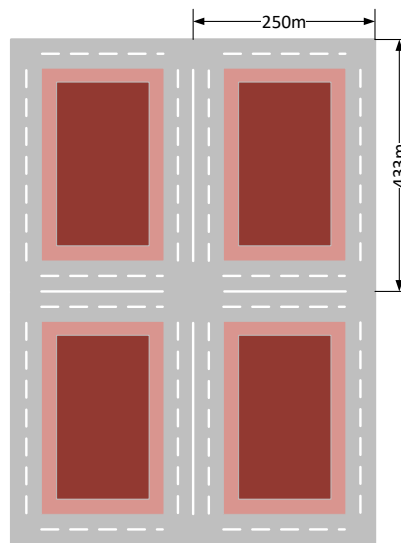


Figura 10. Escenario urbano.

### 3.4.2. Modelo de generación de paquetes

En prácticamente la totalidad de los estudios sobre comunicaciones V2X (por ejemplo [34]-[37]), el modelo de generación de paquetes utilizado es una simplificación del modelo real de generación de CAM descrito en el apartado 2.3. Esta simplificación considera una generación periódica, con intervalo constante entre paquetes, además de un tamaño de paquete fijo de, normalmente, 200 ó 300 bytes. El 3GPP utiliza un modelo similar, donde el intervalo entre paquetes también es fijo pero el tamaño varía entre paquetes de 190 bytes llamados HF (*High Frequency*) y paquetes de 300 bytes llamados LF (*Low Frequency*). El modelo del 3GPP repite una serie de un LF seguido de cuatro HFs consecutivos, separados por 100ms [4], lo que supone la transmisión de 10 paquetes por segundo (pps). En nuestros análisis y evaluaciones sobre LTE-V2X, utilizaremos, como norma general, este modelo especificado por el 3GPP. Si bien en algunos aspectos utilizaremos, por simplicidad, un solo tamaño de paquete si esto no afecta a las conclusiones

obtenidas. Llamaremos ‘modelo 3GPP’ al modelo utilizado por el 3GPP con dos tamaños de paquete, y ‘modelo simplificado’ al modelo con un solo tamaño de paquete. También utilizaremos intervalos entre paquete menores, de 50ms y 20ms, correspondientes a aplicaciones para vehículo autónomo, que tienen unos requisitos más avanzados, como tasas de transmisión de hasta 50pps [38]. Por otra parte, este modelo simplificado no modela de forma adecuada la generación CAM definida en el estándar para una comparativa entre IEEE 802.11p y LTE-V2X, ya que las variaciones en tamaño y frecuencia de generación de paquetes afectan de forma distinta a ambas tecnologías. Por ello, en el capítulo 5 mostramos el proceso de creación de un modelo de generación basado en trazas empíricas que tiene en cuenta dichas variaciones.

### 3.4.3. Configuración de IEEE 802.11p y LTE-V2X

En este apartado mostramos los valores usados para los principales parámetros configurables, tanto para LTE-V2X como para IEEE 802.11p. Respecto a las configuraciones comunes, hemos utilizado siempre un canal dedicado de 10MHz que se corresponde con 50RBs en frecuencia para LTE-V2X. La potencia de transmisión utilizada es 23dBm, mientras que la figura de ruido es de 9dB. Los niveles de sensibilidad del receptor son los mínimos definidos en los respectivos estándares (ver Tabla 1), aunque en las evaluaciones del capítulo 6 se utilizan también niveles de sensibilidad de equipos reales.

Para LTE-V2X, hemos utilizado para las evaluaciones principalmente dos configuraciones de subcanalización distintas, que siguen la tendencia de los grupos de trabajo del 3GPP [10][31]. Por un lado, hemos utilizado la configuración de 4 subcanales de 12RBs cada subcanal (en evaluaciones para capítulos 4 y 7). En esta configuración, utilizamos el MCS 6 (QPSK, CR ~0.5) para los paquetes de 300bytes de forma que ocupan 2 subcanales, mientras que utilizaremos el MCS 8 (QPSK, CR~0.7) para paquetes de 190 bytes, que ocuparán un subcanal. Por otro lado, utilizaremos la configuración de 5 subcanales de 10RBs cada uno (en evaluaciones para el capítulo 6). En esta configuración, todos los paquetes serán transmitidos con MCS 6 (QPSK, CR ~0.5), de forma que los paquetes de 190 bytes ocuparán 2 subcanales, y los paquetes de 300 bytes ocuparán 3 subcanales. Aparte de la subcanalización, existen diferentes parámetros configurables en LTE-V2X. Por defecto, estableceremos el *RSRP threshold*, por norma general, a -140dBm. El parámetro *P* (probabilidad de mantener reserva tras agotar el *Reselection Counter*) se establece en esta tesis por defecto a 0. Asimismo, como punto de referencia, no será utilizada la retransmisión de LTE-V2X. Sin embargo, estos parámetros serán evaluados en el apartado 4.3 para justificar su valor, no especificado en el estándar. Para el valor del intervalo de reserva (RRI), utilizamos el mismo valor que el intervalo entre paquetes generados. No obstante, en el capítulo 6 se incluye un análisis de estrategias de selección de RRI para el modelo empírico de intervalo variable utilizado.

Entre los aspectos configurables de la interfaz IEEE 802.11p se encuentran la utilización del *Capture Effect* y el *CCA threshold*. La utilización del *Capture*

*Effect* es usual en los equipos reales de IEEE 802.11p [23]. El mínimo aumento de RSSI para abandonar la recepción debido al *Capture Effect* es comúnmente establecido a 10dB en implementaciones [23]. En [39] evaluamos la mejora del *Capture Effect* en nuestros escenarios. El valor de *CCA threshold* que utilizaremos será de 0.5dB por encima del nivel de sensibilidad. En [40] también mostramos que esta es la mejor configuración de *CCA threshold*.

La Tabla 1 resume los parámetros de configuración de LTE-V2X y IEEE 802.11p, además de los valores utilizados.

PARÁMETRO	LTE-V2X	IEEE 802.11p
Potencia de transmisión	23dBm	23dBm
Ancho de canal	10MHz	10MHz
MCS	MCS 6 (QPSK ~0.5), MCS 8 (QPSK ~0.7)	QPSK 0.5 (6Mbps)
Nivel de sensibilidad	-90.4dBm (Mínimo estándar) 103.5dBm (Prototipo real [41])	-85dBm (Mínimo estándar) -92dBm (Equipo comercial [42])
Umbral Capture Effect	N/A	10dB
CCA threshold	N/A	0.5dB sobre el nivel de sensibilidad
Número de subcanales	4, 5	N/A
RBs por subcanal	12, 10	N/A
P	0	N/A
RSRP threshold	-140dBm	N/A
Retransmisión de paquetes	No	N/A
RRI	Igual al intervalo entre paquetes	N/A

Tabla 1. Parámetros de configuración de LTE-V2X y IEEE 802.11p

### 3.5. Métricas de rendimiento y funcionamiento

El entorno de simulación produce archivos de datos o *logs* en bruto, que son tratados con MATLAB para la obtención de las métricas y estadísticas necesarias para nuestros análisis. A continuación, describimos las métricas básicas utilizadas, si bien otras métricas más específicas serán descritas en los siguientes capítulos junto a los resultados y discusión de los mismos.

- *Packet Delivery Ratio* (PDR). Se define como el ratio promedio de paquetes recibidos correctamente (sin ningún fallo) respecto al total de paquetes enviados. Se representa en función de la distancia entre el vehículo emisor y el receptor. Esta métrica es muy utilizada en los estudios de comunicaciones V2X para analizar la fiabilidad, y en particular en el proceso de estandarización del 3GPP.

- *Packet Inter-Reception time (PIR)*. Se define como el tiempo transcurrido entre dos paquetes recibidos correctamente de forma consecutiva procedentes del mismo vehículo transmisor. Sirve para analizar la existencia de posibles errores de comunicación entre dos vehículos persistentes en el tiempo. Esta métrica es importante porque los errores persistentes en el tiempo entre dos vehículos pueden suponer un peligro en aplicaciones de seguridad vial, aunque respecto a la fiabilidad del total de las transmisiones del escenario (representada con la PDR) no supongan un porcentaje significativo. Es por ello que, para representar el PIR debemos tratar de observar los casos más improbables en los que el PIR entre dos vehículos es alto, pero hay buena fiabilidad media en el escenario a nivel de PDR. Por tanto, representaremos el PIR en forma de función de distribución acumulada (CDF) para todas las transmisiones entre dos vehículos con una distancia entre emisor y receptor de hasta 100m. A menos de 100m se presupone una alta fiabilidad a las comunicaciones V2X.
- Ratio de errores de transmisión separados por tipo de error. Estas métricas complementan a la PDR, siendo en este caso el ratio promedio de paquetes no recibidos correctamente, debido a cada tipo de fallo, respecto al total de paquetes enviados por los demás vehículos. También está representado respecto a la distancia entre emisor y receptor. Los tipos de error son los siguientes:
  - *Half dúplex*. El paquete no ha sido recibido correctamente debido a que el potencial receptor se encontraba transmitiendo en ese instante. Este error se produce en LTE-V2X, cuando dos vehículos transmiten en la misma subtrama temporal, aunque sea en distintos subcanales en frecuencia.
  - *Propagación*. El paquete no ha sido recibido correctamente debido a que la potencia de señal recibida es demasiado baja para superar el umbral de sensibilidad y el ruido térmico en el receptor hace que haya una SNR demasiado baja. Este tipo de errores excluye los errores por *Half dúplex*, es decir, si la transmisión de un paquete ha sido contabilizada como error por *Half dúplex*, no podrá ser de nuevo considerada como error de propagación.
  - *Colisión*. El paquete no ha sido recibido correctamente porque las interferencias de otros vehículos han producido que la SINR sea demasiado baja para poder ser decodificados. En el caso de IEEE 802.11p, este tipo de error también incluye aquellos paquetes que no se han intentado recibir porque se estaba recibiendo otro paquete y no se ha superado el umbral para el *Capture Effect*. Este tipo de error excluye los contabilizados como *Half dúplex* o propagación.
  - *No SCI*. Este tipo de error solo se produce para LTE-V2X. Se produce cuando el TB se podría recibir correctamente sin sufrir ninguno de los errores anteriores, pero la transmisión del SCI ha

fallado. Es poco probable que ocurra puesto que, de producirse un error para recibir el SCI, lo más común es que dicho error se produzca también en el TB.

- *Channel Busy Ratio (CBR)*. Sirve para evaluar la carga del canal. Según los estándares de IEEE 802.11p y LTE-V2X, se evalúa de distinta forma para cada tecnología, aunque en ambas se mide por periodos. Mostraremos el valor promedio de todas las mediciones (periodos) de todos los vehículos. En IEEE 802.11p (Figura 11.a) la CBR es el ratio entre el tiempo dentro de cada periodo que se detecta el canal ocupado (el RSSI está por encima del *CCA threshold*) y la duración total del periodo. En LTE-V (Figura 11.b) la CBR es el ratio entre los subcanales que superan un umbral de RSSI configurable (que estableceremos 0.5dB por encima del umbral de sensibilidad) respecto al total de subcanales dentro de todas las subtramas en el periodo.

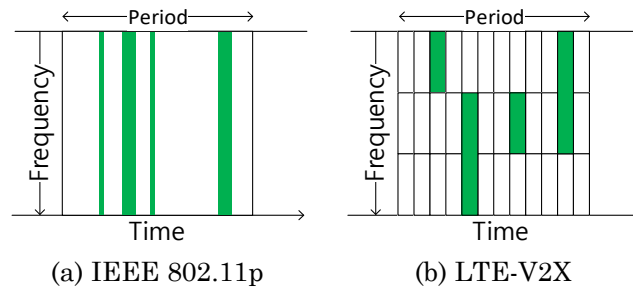


Figura 11. Medición de CBR



## 4. Análisis y configuración de LTE-V2X

### 4.1. Introducción

Dado que LTE-V2X es una tecnología recientemente estandarizada, el primer objetivo es realizar un análisis del rendimiento de las comunicaciones V2V basadas en este nuevo estándar, incluido su algoritmo de gestión de recursos distribuido *Sensing-Based SPS*. Concretamente, pretendemos realizar una primera evaluación para valorar tanto las ventajas que ofrece el algoritmo *Sensing-Based SPS*, como los errores que puede presentar y el margen de mejora que suponen estos errores. Una vez realizada esta primera evaluación, será necesario optimizar la configuración de LTE-V2X. *Sensing-Based SPS* tiene algunos aspectos configurables que pueden afectar en gran medida a su rendimiento. Estos aspectos configurables no están definidos en el estándar, sino que el estándar los deja a libre implementación. Nuestro objetivo es, no sólo encontrar la configuración óptima de cada uno de estos aspectos, sino comprender como afectan al comportamiento de LTE-V2X en profundidad. Este análisis del rendimiento y configuración de LTE-V2X ha sido de gran utilidad para la comunidad, ya que las publicaciones realizadas y resumidas en este capítulo fueron pioneras en la realización de dicho análisis, además de contar con un alto grado de precisión en el modelado y la evaluación. En nuestras publicaciones de conferencias [43] y [44] detallamos las primeras evaluaciones y dimensionado de LTE-V2X, cuyos resultados y discusión resumimos en el apartado 4.2. El análisis de configuración de LTE-V2X se desarrolla en nuestra publicación en conferencia [40] y nuestro artículo en revista [45]. El apartado 4.3 resume nuestros estudios sobre configuración de LTE-V2X, englobando también una discusión y descripción del funcionamiento de LTE-V2X que apoya la comprensión del funcionamiento de los aspectos configurables. Finalmente, en el apartado 4.4 presentamos las conclusiones obtenidas en los estudios expuestos en este capítulo, además de una lista con otros resultados y detalles que han sido excluidos de este resumen y pueden encontrarse en nuestras publicaciones [40], [43]-[45] (adjuntadas en el Anexo A).

### 4.2. Dimensionado y análisis de LTE-V2X

En este apartado mostramos un dimensionado y primera evaluación del estándar LTE-V2X. Para ello se mostrarán los principales resultados obtenidos en simulaciones. Estos resultados incluyen, por un lado, resultados del rendimiento general que ofrecen las comunicaciones LTE-V2X en varios

escenarios, y por otro lado resultados que profundizan en el análisis, como tipos de errores de transmisión. Además, incluimos un estudio comparativo en el que en lugar de usar *Sensing-Based SPS* se utiliza una selección aleatoria de recursos, para evaluar la mejora que produce la selección de recursos distribuida y autónoma estandarizada en lugar de la opción trivial de una selección de recursos aleatoria que se utiliza, por ejemplo, en las comunicaciones LTE-D2D [5].

Una de las principales métricas de rendimiento habitualmente utilizada es la PDR en función de la distancia entre el transmisor y el receptor, dado que cuantifica la fiabilidad de las comunicaciones. La Figura 12 compara la PDR que se obtiene con el mecanismo *Sensing-Based SPS* estandarizado en LTE-V2X y un mecanismo de selección aleatoria (*Random* en la Figura 12). Dicha figura presenta los resultados para una tasa de generación de paquetes de 10pps y 50pps, utilizando el modelo de generación de CAMs del 3GPP, en el escenario de autopista con densidad 120veh/km. En el caso de 10pps, observamos que la ganancia que obtiene *Sensing-Based SPS* respecto a una selección aleatoria es significativa, especialmente a distancias cortas y medias. Sin embargo, con 50pps, la sobrecarga en el canal hace que el rendimiento de *Sensing-Based SPS* decaiga, siendo incluso superado por la selección aleatoria a partir de 150m.

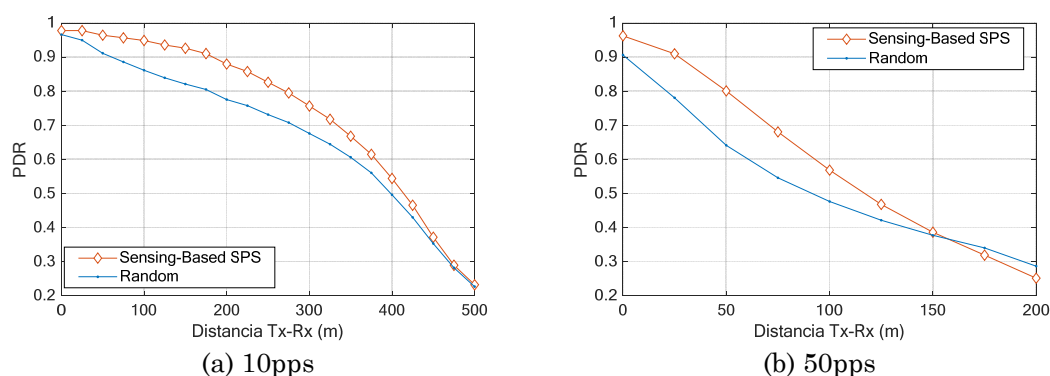


Figura 12. PDR de gestión de recursos *Sensing-Based SPS* y aleatoria en autopista

Para explicar las tendencias observadas en la Figura 12, analizamos los errores de transmisión que ocurren en estos escenarios para *Sensing-Based SPS*. La Figura 13 representa el ratio de errores de transmisión por tipo de fallo, tal y como se explica en el apartado 3.5. Como podemos observar, los errores por propagación aumentan con la distancia debido a las pérdidas producidas por la separación entre transmisor y receptor, y como es de esperar son independientes de la carga en el canal (10pps o 50pps). Observamos cómo, tanto para 10pps como para 50pps, los errores por colisión son muy significativos, lo que indica que existe margen de mejora en la gestión de recursos radio. Nótese que la bajada de errores por colisión observada en la Figura 13 a distancias largas no es debida a una menor probabilidad de colisión a esas distancias, sino al aumento de errores por propagación. Como definimos en el apartado 3.4, un paquete transmitido sólo puede ser contabilizado como error por un tipo de error. Sólo se contabiliza un error por colisión si la transmisión no ha fallado por *Half dúplex* o propagación, pero ha fallado por la interferencia debida a la



colisión con otro paquete. De ahí que en la gráfica decaigan los errores por colisión a largas distancias y aumenten los errores por propagación. En cuanto a los errores por *Half dúplex*, se observa que varían poco con la distancia, y están en torno al 1% para 10pps y 5% para 50pps. Estos porcentajes vienen de la probabilidad de que dos vehículos coincidan en la misma subtrama al transmitir. Con una tasa de generación de 10pps se transmite en una subtrama de cada 100 (cada 100ms), de ahí que, asumiendo que hay vehículos transmitiendo en todas las subtramas, se coincida en la misma subtrama con 1/100 de ellos, el 1%. De forma equivalente, con 50pps cada vehículo transmite un paquete cada 20 subtramas (20ms), con lo que los vehículos que transmiten en la misma subtrama son 1/20 del total, el 5%. Los errores por la no recepción del SCI (*no SA* en Figura 13) son despreciables, puesto que existen pocos casos en los que falle la recepción del SCI y a la vez no falle la del TB, dado que existe una alta correlación entre ambas transmisiones al ser transmitidas en RBs adyacentes y en la misma subtrama.

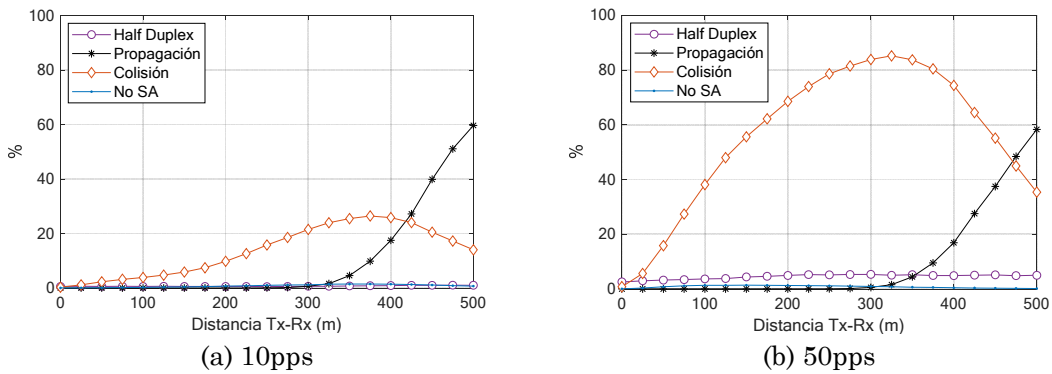


Figura 13. Errores por tipo de Sensing-Based SPS en autopista

Para un escenario urbano, observamos las mismas tendencias, aunque con menos diferencia entre *Sensing-Based SPS* y selección aleatoria debido a menor rango de transmisión en escenarios urbanos y la obstrucción de edificios (transmisiones NLOS), que restan importancia a la gestión de recursos. La Figura 14 incluye la PDR en el escenario urbano, con una tasa de generación de paquetes de 10pps.

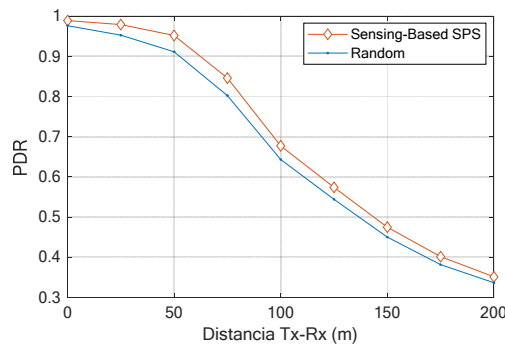


Figura 14. PDR de Sensing-Based SPS y selección aleatoria en escenario urbano

En conclusión, el mecanismo de gestión de recursos estandarizado para LTE-V2X, *Sensing-Based SPS*, es efectivo y consigue mejorar el rendimiento

respecto a una selección de recursos aleatoria. Sin embargo, la gestión de recursos no es óptima y produce algunos errores por colisión y *Half dúplex* en distancias más cercanas que el límite impuesto por la propagación a nivel de capa física. Los errores por colisión aumentan considerablemente con la carga en el canal, mientras que los errores por *Half dúplex* son significativos especialmente para altas tasas de generación de paquetes.

### 4.3. Optimización de la configuración de LTE-V2X

Una vez realizado un primer análisis del rendimiento de LTE-V2X, el objetivo de este apartado es realizar un análisis de los parámetros configurables de LTE-V2X y su algoritmo de gestión de recursos *Sensing-Based SPS*. Además, este estudio intenta añadir una comprensión más profunda del funcionamiento de dicho algoritmo y sus parámetros. Para ello, se incidirá durante el análisis en la extracción de conclusiones buscando el trasfondo real de los comportamientos observados en los resultados obtenidos, en lugar de limitarnos a exponer el valor óptimo de cada parámetro en cada escenario evaluado. Dividimos este apartado en subapartados dedicados al estudio de cada aspecto configurable por separado.

#### 4.3.1. Probabilidad $P$

Como primer parámetro a evaluar, consideramos la probabilidad  $P$  de volver a seleccionar el mismo recurso una vez se agota el *Reselection Counter*, sin pasar por el algoritmo de reelección completo. Este parámetro configurable de *Sensing-Based SPS* fue incluido en el estándar con la premisa de que las reelecciones de recursos por parte de cada vehículo son una fuente de ineficiencia, pues el primer paquete enviado tras una reelección no puede ser previsto por los demás vehículos ya que no utiliza unos recursos previamente reservados. Sin embargo, las reelecciones de recursos son necesarias para que la gestión de recursos pueda adaptarse a la posición cambiante de los nodos debido a la alta movilidad. Las reelecciones también evitan que un error en la selección de recursos persista indefinidamente en el tiempo sin subsanarse. El parámetro  $P$ , por tanto, permite controlar la frecuencia de las reelecciones que se producen, de forma que puedan optimizarse sus ventajas y disminuirse sus inconvenientes, por lo que es necesario su estudio. En la Figura 15.a se muestra la PDR para todos valores posibles de  $P$  contemplados en el estándar (de 0 a 0.8), utilizando un modelo de generación de CAMs simplificado (véase apartado 3.4.2) con 190 bytes de tamaño fijo de paquete<sup>5</sup> en escenario de autopista con densidad 120veh/km. En esta figura observamos cómo aumentar  $P$  a valores mayores que 0 ( $P=0$  implica reeleccionar siempre al agotar el *Reselection Counter*) produce una ligera mejora de PDR. Sin embargo, como podemos ver en la Figura 15.b, que muestra que la CDF de PIR, esta mejora se produce a costa de ocasionar un riesgo de colisiones muy persistentes en el tiempo, ya que

<sup>5</sup> Nótese que este modelo de generación de paquetes produce una carga en el canal menor que el modelo 3GPP para LTE-V2X.

pueden llegar a durar varios segundos. Esto es debido a que la escasa frecuencia de reselecciones, con altos valores de  $P$ , provocan que una selección de recursos se mantenga por un tiempo largo. En los casos en los que dos vehículos reseleccionen los mismos recursos para transmitir, existe mayor probabilidad de que la colisión entre sus transmisiones se mantenga por mayor tiempo, hasta que uno de los dos vehículos reseleccione. Las colisiones muy persistentes son un riesgo inasumible en comunicaciones V2X, puesto que los vehículos cuyas transmisiones colisionan durante tanto tiempo seguido no podrán ser detectados en ese tiempo por otros vehículos, con el consecuente riesgo para la seguridad vial.

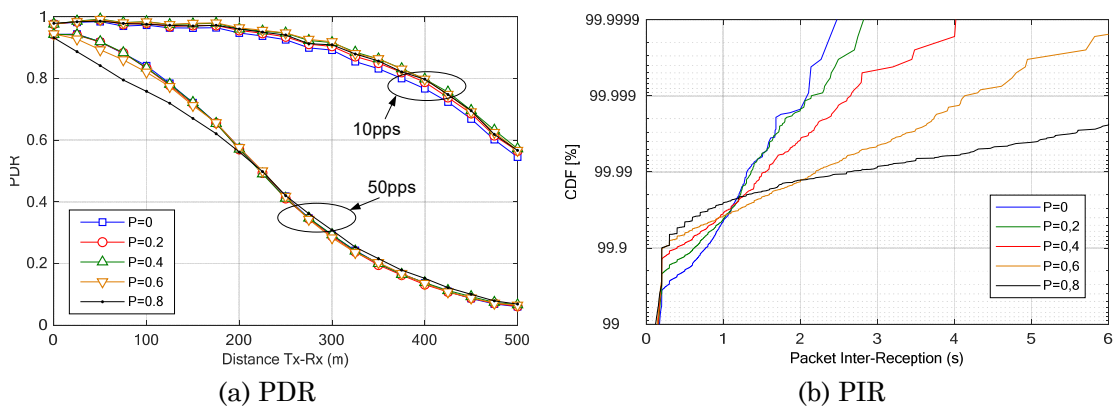


Figura 15. Evaluación del parámetro  $P$  en LTE-V2X

#### 4.3.2. *RSRP threshold*

El estándar define la posibilidad de establecer el umbral mínimo de RSRP del TB (*RSRP threshold*) para excluir sus recursos en el Paso 2 de *Sensing-Based SPS* una vez recibido el SCI. Aumentar este umbral puede conseguir que, en el Paso 2, se prioricen las transmisiones de vehículos más cercanos dejando de excluir los recursos utilizados por vehículos lejanos, cuyas transmisiones llegan con un nivel más bajo de RSRP. Por lo tanto, un aumento del *RSRP threshold*, en resumen, hará que el Paso 2 tenga menos relevancia en el algoritmo limitándose a descartar sólo los recursos utilizados por los vehículos más cercanos, y dejando un mayor margen de decisión al Paso 3. Por lo tanto, el estudio del impacto del *RSRP threshold* es importante porque permite graduar el peso del Paso 2 frente al 3. De cualquier modo, en escenarios con una muy alta carga en el canal, el *RSRP threshold* subirá iterativamente hasta que los CSRs excluidos no superen el 80% de *Selection Window*, con lo que en estos casos el Paso 2 priorizará los vehículos cercanos automáticamente. En la Figura 16 mostramos el efecto en la PDR que produce subir este umbral antes de que el algoritmo en sí lo eleve, utilizando el mismo escenario y modelo de generación que en el apartado 4.3.1. Para 10pps (baja carga) no hay ninguna diferencia. Sin embargo, para 50pps existe un empeoramiento del rendimiento utilizando valores altos de *RSRP threshold*. Observamos en las simulaciones

para 10pps el porcentaje de CSRs excluidos en el Paso 2 en cada reelección. Con el umbral al mínimo valor (-120dBm) se excluyen en promedio el 29% de los recursos de la ventana de selección. Subiendo a -100dBm, este porcentaje se reduce al 17%, y subiendo a valores superiores el porcentaje de excluidos es despreciable. El hecho de que el Paso 2 excluya un menor porcentaje significa que el Paso 3 se encarga de excluir más CSRs, hasta dejar sólo un 20% necesario para la lista final  $L_2$ . El rendimiento no disminuye en 10pps al restringir la intervención del Paso 2, dejando más CSRs para excluir el Paso 3, dado que, como demostramos a continuación, el Paso 3 tiene un funcionamiento similar al Paso 2 en baja carga.

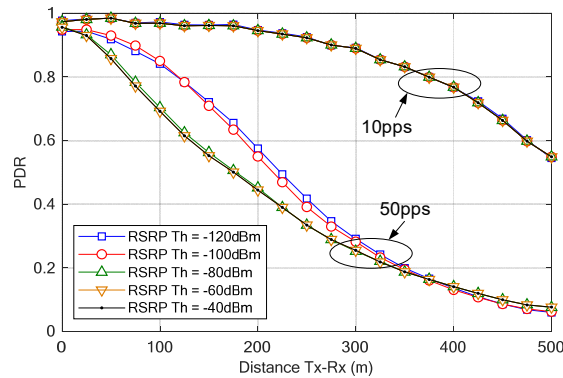


Figura 16. Evaluación de RSRP threshold en LTE-V2X

Para explicar estos resultados es preciso diferenciar el funcionamiento del Paso 2 y Paso 3. En la Figura 17 se muestra la PDR utilizando *Sensing-Based SPS* completo según el estándar, junto con la PDR utilizando únicamente el Paso 2, y únicamente el Paso 3. En el caso de 10pps, la carga es suficientemente baja como para que los subcanales excluidos tanto por el Paso 2 como por el Paso 3 estén limitados sólo por el alcance de sensado a nivel de capa física. En este caso, por tanto, las colisiones que sufre el sistema se deben al problema de terminal oculto. El caso de 50pps es más complejo, puesto que la alta carga hace que se necesite escoger mejor qué recursos excluir. El Paso 2 excluye de manera eficiente los CSRs dando prioridad a las transmisiones más cercanas. El Paso 3, por su parte, fue diseñado como un complemento al Paso 2 para los casos en los que el SCI sufriera colisión. Sin embargo, el rendimiento total utilizando los dos pasos es prácticamente igual a utilizar sólo el Paso 2.

Volviendo al efecto de *RSRP threshold*, con poca carga (10pps en la Figura 16) el Paso 3 funciona tan bien como el Paso 2, por lo que el resultado es el mismo. Sin embargo, para 50pps hay una carga alta en la que el Paso 3 por sí sólo tiene un peor rendimiento que el Paso 2. El Paso 2 en 50pps excluye el máximo de CSRs posible (cerca del 80%) para -120dBm y -100dBm, puesto que el umbral sube automáticamente lo suficiente para dejar el 20% libre. Sin embargo, si *RSRP threshold* es situado inicialmente a -80dBm, el Paso 2 sólo excluye el 20% de los recursos, dejando el 80% restante para la elección del Paso 3. Como podemos ver en Figura 16, el rendimiento disminuye en este caso al dejar que el Paso 3 decida la mayoría de los recursos a excluir, teniendo un peor rendimiento que el Paso 2 en alta carga (Figura 17).

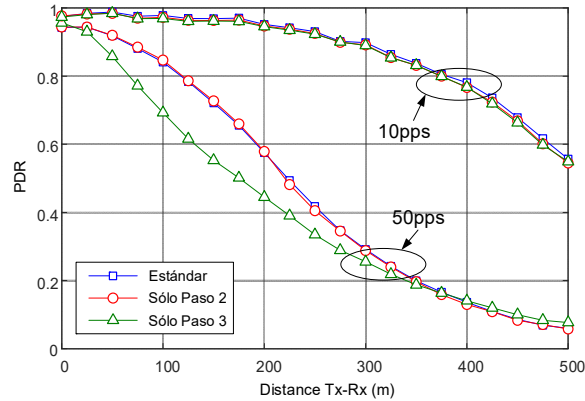


Figura 17. PDR de Sensing-Based SPS separando los pasos 2 y 3

#### 4.3.3. Potencia de transmisión

La potencia de transmisión puede ser considerada como un elemento a variar para evitar interferencias entre vehículos. Puede parecer lógico que, en un escenario cargado, si todos los vehículos reducen su potencia de transmisión se reducirán los errores por colisión a costa de un alcance más corto, priorizando así las transmisiones entre vehículos a menor distancia. Sin embargo, una menor potencia de transmisión también supone que el problema de terminal oculto se produce a una menor distancia, aunque el número de vehículos ocultos disminuya. Además, como se explica en el apartado 2.5, el Paso 2 de *Sensing-Based SPS* aumenta automáticamente el *RSRP threshold* en escenarios cargados para quedarse con el 20% de la lista final  $L_2$ . Aumentar el *RSRP threshold* produce que las transmisiones de vehículos más lejanos dejen de excluirse, algo equivalente a la reducción de la potencia de transmisión de todos los vehículos. Como resultado, reducir la potencia no reduce las colisiones más de lo que el algoritmo *Sensing-Based SPS* las reduce automáticamente. Por tanto, el resultado de reducir la potencia de transmisión por debajo del máximo (23dBm) no consigue una mejora a distancias cortas, y produce un empeoramiento a distancias largas por el menor alcance. En la Figura 18 se muestra este resultado.

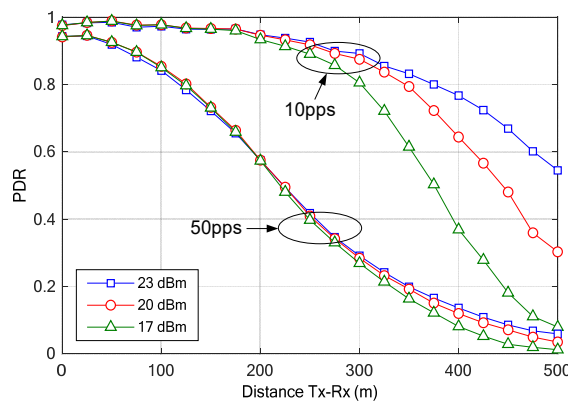


Figura 18. Evaluación de potencia de transmisión en LTE-V2X

#### 4.3.4. Transmisión redundante

Utilizar redundancia puede aportar un aumento de la fiabilidad, pero el aumento de ocupación que supone será contraproducente en escenarios cargados, ya que al transmitir el doble de paquetes en el mismo canal habrá más errores por colisión. En la Figura 19 se representa la PDR para distintas tasas de generación de paquetes en el escenario de autopista con densidad 60veh/km, utilizando el modelo de generación de mensajes propuesto por el 3GPP. Podemos observar cómo para una baja ocupación (10pps) es mejor transmitir dos veces cada paquete en este escenario. Sin embargo, al aumentar la ocupación, transmitir sin redundancia es mejor a partir de una cierta distancia. Esta distancia será más corta cuanto mayor sea la ocupación. En el caso de una ocupación muy alta como en este escenario transmitiendo a 50pps, transmitir sin redundancia logra un mejor rendimiento prácticamente en general.

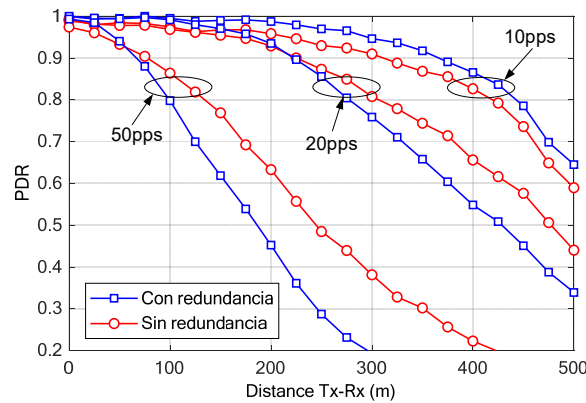


Figura 19. Evaluación de transmisión redundante en LTE-V2X

#### 4.3.5. MCS y subcanalización

En el estándar LTE-V2X, no se especifica un número de subcanales y tamaño de subcanal (en número de RBs) fijo, sino que este tamaño es configurable. Por otro lado, el MCS es un aspecto configurable que debe tenerse en cuenta. Un MCS alto supone que el paquete ocupe menos RBs, y por tanto provoque una menor congestión al sistema, a costa de una menor protección frente a ruido e interferencias. La variación del MCS, por tanto, puede ser optimizada teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes de usar un MCS más alto. La particularidad en LTE-V2X es que existe una dependencia entre el MCS y el tamaño de los subcanales para realizar esta optimización. Como mostramos en la Figura 20, un aumento del MCS sin modificar el tamaño y número de subcanales puede no tener efecto. En el ejemplo de Figura 20, el paquete ocupará menos RBs debido al aumento de MCS, pero seguirá ocupando 2 subcanales porque el aumento no es suficiente para ocupar sólo un subcanal. Por tanto, deberá utilizarse un tamaño de subcanales que se ajuste al número de RBs que ocupa el paquete con el MCS escogido, lo que asocia un número y tamaño de subcanales distinto a cada MCS utilizado para nuestro análisis.

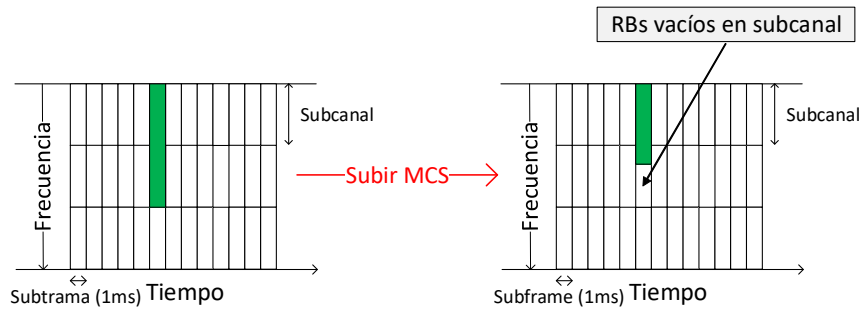


Figura 20. Aumento de MCS que no supone un descenso en la carga si no se ajusta la subcanalización

Para la evaluación de este apartado utilizamos el modelo de tráfico simplificado con tamaño fijo de paquete 190 Bytes, utilizando el mismo MCS en todos los paquetes. Adaptamos el tamaño en número de RBs de los subcanales de forma que todas las transmisiones (SCI más TB) ocuparán siempre un subcanal, con lo que se usará un número de subcanales distinto con cada MCS. Los tres MCS evaluados son los utilizados en las simulaciones a nivel de enlace de [31]. La Tabla 2 especifica la subcanalización utilizada (número de subcanales) para cada MCS evaluado. El número de RBs por subcanal en la Tabla 2 está escogido para ajustarse al número de RBs necesarios para transmitir un paquete de 190 bytes con cada MCS, mientras que el número de subcanales es el máximo de subcanales que, con el tamaño escogido para cada MCS, puede contener el canal de 10MHz (50 RBs).

MCS	Modulación	Coding Rate	Nº de subcanales	RBs por subcanal
MCS 6	QPSK	0.5	3	16
MCS 8	QPSK	0.7	4	12
MCS 11	16-QAM	0.5	6	8

Tabla 2. Configuración de MCS y subcanales utilizada para paquetes de 190 bytes.

En la Figura 21 se representa la PDR en escenarios de autopista con densidades 60veh/km y 120veh/km, utilizando tasas de generación de 20pps y 50pps, e incluyendo retransmisión en este caso<sup>6</sup>. Para el escenario con densidad 120veh/km (velocidad 70km/h) siempre es mejor transmitir con un MCS más alto ya que, aunque la protección frente a interferencias es menor, el número de colisiones baja de manera importante debido a la reducción de la carga que produce aumentar el MCS. En el escenario con densidad 60veh/km (140km/h), el desplazamiento Doppler a altas velocidades produce un suelo de error a nivel de enlace en la recepción de los TB con MCS 11 [31]. Este suelo de error impide que se reciba ningún TB con una fiabilidad superior al 92% (incluyendo la redundancia) independientemente de la SINR con que se reciba. Para 20pps, esto produce que usar MCS 11 suponga un empeoramiento del rendimiento. Al

<sup>6</sup> Mostramos los resultados utilizando retransmisión para aplacar el efecto del suelo de error a nivel de enlace con el MCS más alto, MCS 11. Sin retransmisión, este suelo de error hace inviable utilizar MCS 11 en el escenario de 60veh/km debido a la velocidad de los vehículos (140km/h, véase apartado 3.4.1).



aumentar la carga con 50pps, sin embargo, se observa que este empeoramiento sólo se mantiene a distancias cortas, puesto que más allá sí empieza a ser rentable el suelo de error a nivel de enlace respecto a la reducción de la ocupación que obtiene MCS 11.

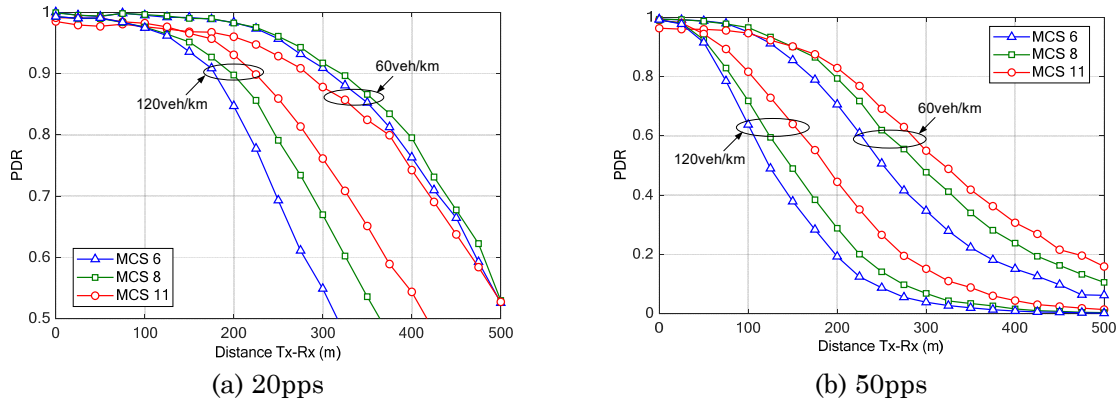


Figura 21. Evaluación de MCS junto a subcanalización en LTE-V2X

#### 4.4. Conclusiones y resultados adicionales

En este capítulo hemos expuesto nuestro trabajo sobre una primera evaluación y dimensionado de LTE-V2X tras su estandarización y la optimización de los aspectos configurables que deja abiertos el estándar. A continuación, desarrollamos las conclusiones obtenidas, y listamos los detalles y resultados secundarios sobre el fondo de este capítulo que pueden encontrarse ampliadas en nuestras publicaciones.

Los resultados del dimensionado de LTE-V2X, expuestos en el apartado 4.2, muestran que el mecanismo de gestión de recursos distribuido y autónomo estandarizado, *Sensing-Based SPS*, es capaz de mejorar significativamente el rendimiento respecto a una selección aleatoria de recursos. Esta mejora ha sido observada tanto en escenarios de autopista con distintas densidades de vehículos como en escenarios urbanos. También se observa una mejora respecto a una selección aleatoria con altas tasas de generación de paquetes para aplicaciones de vehículo autónomo.

Por otro lado, hemos analizado los errores de transmisión que se producen en LTE-V2X. Los errores debidos a la propagación aumentan, como era de esperar, con la distancia entre el emisor y el receptor, puesto que dependen de la capa física, pero estos errores no pueden ser evitados por la gestión de recursos radio. Sin embargo, hemos observado una cantidad significativa de errores por colisión que aumentan con la carga en el canal, e indican que existe margen de mejora en la gestión de recursos radio porque existen vehículos que seleccionan los mismos recursos para transmitir. Los errores por colisiones también están propiciados por el problema de terminal oculto, que afecta a *Sensing-Based SPS* al estar basado en el sensado de las transmisiones de otros vehículos. El funcionamiento del proceso de reservas y reelecciones de *Sensing-Based SPS* también es una fuente de ineficiencias en la gestión, ya que puede haber



situaciones en que varios vehículos seleccionen recursos simultáneamente y no coordinen sus selecciones de manera óptima. También se observan errores por *Half dúplex* en tasas de generación altas para aplicaciones de vehículo autónomo, aunque su importancia es mucho menor que la de los errores por colisión. Estos resultados nos indican que el rendimiento de LTE-V2X depende en gran medida de la gestión de recursos radio, y que la optimización del mecanismo de gestión de recursos estandarizado *Sensing-Based SPS* es importante. Además, se abre la puerta a mejoras y alternativas al mecanismo de gestión de recursos, que exploraremos en el capítulo 7.

La configuración de LTE-V2X analizada en el apartado 4.3, como hemos remarcado en el dimensionado, puede tener gran importancia en el rendimiento. De hecho, para todos los aspectos configurables analizados hemos encontrado que una mala configuración degrada la fiabilidad de las comunicaciones. Las conclusiones obtenidas en el análisis de cada uno de los aspectos configurables analizados son las siguientes.

El parámetro  $P$  de *Sensing-Based SPS* representa la probabilidad de continuar con los mismos recursos tras agotar el *Reselection Counter*.  $P$  puede ser configurado para disminuir el número de reselecciones que se producen, con la intención de que existan menos ocasiones en las que los vehículos no informen al resto de los recursos que van a utilizar, circunstancia que se produce en la primera transmisión tras una reSelección. Sin embargo, esta disminución de reselecciones consigue una mejora menor en el rendimiento, puesto que existen menos situaciones en las que dos vehículos reSeleccionan simultáneamente recursos, pero las colisiones producidas persisten por más tiempo hasta la siguiente reSelección. Además, los errores por colisión que persisten en el tiempo debido a la reducción de las reselecciones con  $P$  son peligrosas para la seguridad vial en aplicaciones de vehículo conectado y autónomo, ya que los vehículos cuyas transmisiones fallan durante un tiempo no son detectados por el resto. Por todo ello, consideramos que la mejor opción es configurar  $P$  para que no se disminuya el tiempo entre reselecciones (valor  $P$  igual a 0).

El parámetro *RSRP threshold*, utilizado en el Paso 2 de *Sensing-Based SPS*, se configura como un umbral de nivel de señal mínimo en una transmisión recibida para excluir los recursos reservados por dicha transmisión. Subir el *RSRP threshold* produce que las transmisiones realizadas por los vehículos más lejanos sean ignoradas por el Paso 2, dejando de excluir los recursos que reservan. Consecuentemente, quedarán más recursos sin excluir en el Paso 3, con lo que el Paso 3 tendrá más relevancia en la elección del recurso final escogido. Según nuestras evaluaciones, la mejor configuración del *RSRP threshold* es el menor valor posible, suficientemente bajo para no dejar de excluir ninguna reserva en el Paso 2. Esto es debido a que, como hemos demostrado, el Paso 2 es más eficiente para la exclusión de recursos candidatos que el Paso 3.

En cuanto a la potencia de transmisión, hemos demostrado que la máxima potencia de transmisión (23dBm) es la óptima. Disminuir la potencia no consigue mejorar la fiabilidad de las transmisiones a distancias cortas pese a la disminución del rango de interferencia, debido a que el rango de sensado

disminuye y, por tanto, no solventa el problema de terminal oculto. El uso de transmisiones redundantes (transmisión duplicada de cada paquete en recursos distintos) puede ser beneficiosa en situaciones de baja carga en el canal, debido a que no se produce una cantidad significativa de colisiones incluso con el doble de carga que supone la redundancia. Sin embargo, en situaciones de mayor carga en el canal, el aumento de colisiones hace que transmitir redundantemente sea contraproducente, empeorando el rendimiento.

Como hemos explicado en el apartado 4.3.5, la configuración del MCS en las transmisiones debe hacerse conjuntamente con la configuración del número y tamaño de los subcanales, de forma que el tamaño de los subcanales se ajuste al número de RBs que ocupan los paquetes transmitidos con el MCS escogido para transmitir. Esto es importante, puesto que la configuración del MCS puede suponer una forma efectiva de adaptar las transmisiones a las condiciones de carga en el canal, pero no servirá si no se utiliza una subcanalización adecuada y adaptada al MCS utilizado. Teniendo esto en cuenta, aumentar el MCS resulta en un mejor rendimiento de LTE-V2X en situaciones de alta carga del canal. Sin embargo, en escenarios de baja carga, y especialmente en escenarios de autopista con los vehículos moviéndose a altas velocidades (alrededor de 140km/h), existe una gran degradación del rendimiento a nivel de capa física con un MCS alto, que hace que sea más efectivo bajar el MCS en estas situaciones.

En este capítulo, por tanto, queda demostrada la importancia de la gestión de recursos en comunicaciones LTE-V2X para obtener el mejor rendimiento posible a nivel de sistema. Si bien el algoritmo de gestión de recursos estandarizado es capaz de conseguir una buena selección de recursos distribuida y autónoma, su rendimiento depende en gran medida de una configuración óptima. Además, existe un margen de mejora para evitar el número significativo de colisiones que se producen, con lo que es conveniente explorar posibles mejoras de la gestión de recursos en el desarrollo de LTE-V2X. Aparte de los resultados y discusión resumidos en este capítulo, listamos a continuación otros detalles y resultados adicionales que pueden ser encontrados en nuestras publicaciones [40], [43]-[45].

- PDR en escenario urbano por separado para condiciones LOS y NLOS (emisor y receptor en la misma calle o en calles perpendiculares) en [43].
- Porcentaje de errores por cada tipo respecto a la distancia entre emisor y receptor en escenario urbano en [43].
- Porcentaje de errores de cada tipo normalizados respecto al total de errores en lugar de al total de transmisiones para escenario urbano, en [43].
- Porcentaje de errores por colisión normalizados respecto al total de transmisiones que no fallan por propagación o *Half dúplex*. En [43] para escenario urbano y [44] para escenario de autopista.
- Tabla con porcentajes de subcanales ocupados, y porcentajes de subcanales con colisión teniendo en cuenta los vehículos en un rango de 1km en el centro de un escenario de autopista, evaluados para densidades de 60veh/km y 120veh/km, y para tasas de generación de

paquetes de 10pps, 20pps y 50pps. Se incluye para configuración con transmisión redundante y sin ella, y para distintas configuraciones de MCS y subcanalización en [45].

- Diferencias de PDR entre el efecto de  $P$  utilizando el modelo simplificado y el modelo 3GPP, incluida una discusión sobre estas diferencias en [40].



## 5. Modelo CAM empírico

### 5.1. Introducción

Por lo general, todos los estudios sobre comunicaciones V2X, tanto referentes a IEEE 802.11p como a LTE-V2X, utilizan un modelo de generación de paquetes que consiste en la transmisión de mensajes CAM con un tamaño fijo (generalmente entre 200 y 400 bytes), y un intervalo entre CAM también fijo (normalmente 100ms), de manera que la generación de paquetes es estrictamente periódica. Este modelo es utilizado, por ejemplo, en los trabajos [34]-[37]. Si bien esta simplificación se ha aceptado como suficiente hasta ahora en la comunidad, en el estándar CAM el modelo de generación de es más complejo (véase apartado 2.3). De hecho, en [17] se remarca que, en un escenario real y utilizando equipos reales para la transmisión de CAM con vehículos, el modelo simplificado utilizado por la mayoría de los estudios es diferente de la generación real de CAM. En concreto, el tráfico de CAM real tiene una notable variación tanto del tamaño de los mensajes como de los intervalos entre ellos, tal y como muestran Figura 22 y Figura 23. Estas variaciones presentes en el tráfico real, y no en el modelo simplificado, serán relevantes en las comparativas entre IEEE 802.11p y LTE-V2X, puesto que pueden afectar de distinta manera a las tecnologías que se comparan, como analizaremos en el capítulo 6.

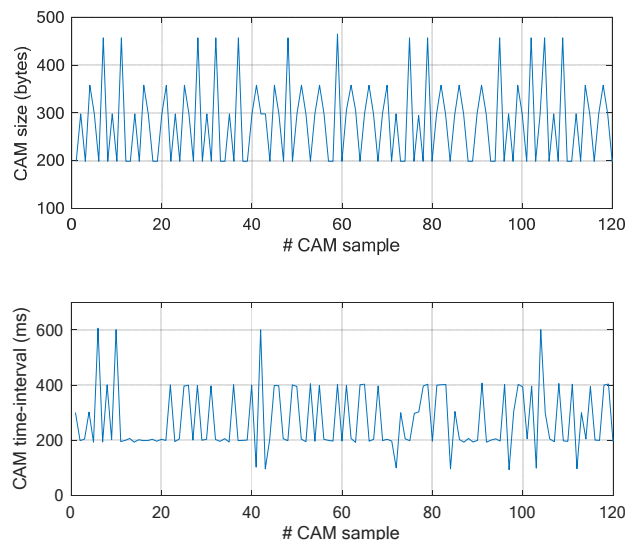


Figura 22. Tamaño e intervalo entre CAMs de 120 muestras consecutivas obtenidas en pruebas de campo por Volkswagen [17]

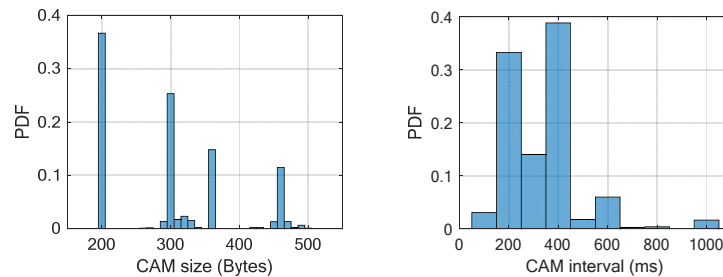


Figura 23. Función de distribución de probabilidad de tamaño e intervalo entre CAMs obtenidas en pruebas de campo por Volkswagen [17]

Por otro lado, en el estándar que define los mensajes CAM la generación depende de la movilidad (velocidad, aceleración y dirección) del vehículo transmisor. Eso hace que, para simular las comunicaciones V2X con una implementación de dicho estándar sea necesario utilizar un escenario de movilidad muy realista y extenso, utilizando un simulador de movilidad vehicular. Este escenario realista debería ser complejo, con los datos de movilidad de una ciudad o autopista real, abarcando una gran superficie y con gran cantidad de vehículos. Esto resulta inviable computacionalmente para evaluaciones a nivel de sistema de comunicaciones V2X. Además, no es eficiente si en dichas evaluaciones no es crítica la correlación de los paquetes transmitidos con la movilidad exacta de los vehículos, como es el caso de la mayoría de estudios sobre el rendimiento de comunicaciones V2X. Respecto al tamaño de los mensajes generados, también dependen de la implementación del estándar, ya que como reseñamos en el apartado 2.3, existen campos opcionales y con tamaño variable, como el *pathHistory*. Es necesario, por tanto, que el modelo utilizado sea basado en implementaciones reales del estándar CAM.

En este capítulo proponemos un modelo<sup>7</sup> de generación de CAM basado en trazas obtenidas en pruebas de campo con equipos montados en vehículos, dentro de carreteras y ciudades reales. La ventaja de este modelo es que podrá ser utilizado en un escenario simple en simulación (por ejemplo, un tramo recto). Esto permitiría reducir la complejidad computacional, y modificar fácilmente parámetros como la densidad de vehículos y la velocidad para estudiar el rendimiento de las comunicaciones V2X, pero manteniendo un modelo de generación de CAM que incluya las variaciones en tamaño e intervalo entre paquetes, de forma similar a un escenario real. Concretamente, el modelo utiliza fuentes de Markov de orden  $m$  para realizar la generación de cada CAM a partir del tamaño variable de los CAM generados anteriormente y el intervalo entre ellos, también variable. El modelo, con sus diferentes variantes extraídas de las distintas trazas disponibles, es de gran interés para las evaluaciones en la comunidad científica, puesto que es el primer modelo creado que permite evaluar las comunicaciones V2X con las variaciones de tamaño e intervalo entre CAMs que produce la generación de CAM estandarizada en pruebas de campo reales. Por ello, ha sido puesto a

<sup>7</sup> Realmente proponemos un conjunto de modelos, basados en el mismo principio, pero con variantes que describimos en los siguientes apartados (por ejemplo, dependiendo del escenario donde han sido obtenidas las trazas).

disposición de la comunidad en un repositorio abierto en [46]. En los siguientes apartados de este capítulo describimos el proceso de creación del modelo (apartado 5.2) y la validación de su funcionamiento (apartado 5.3). Finalmente, el apartado 5.4 presenta las conclusiones sobre el modelo obtenidos y los detalles adicionales que pueden encontrarse en nuestra publicación [47] (incluida en el Anexo A) más allá de lo expuesto en este capítulo.

## 5.2. Generación del modelo

Para la generación del modelo empírico utilizamos trazas de generación de CAM obtenidas por Volkswagen y Renault en pruebas de conducción reales descritas en [17]. Estas trazas han sido compartidas con el laboratorio UWICORE de la Universidad Miguel Hernández para la realización de los estudios expuestos en los capítulos 5 y 6 de esta tesis. Las trazas son obtenidas por cada empresa (Volkswagen y Renault) en tres escenarios distintos: urbano, suburbano y autopista. Obtendremos, por tanto, un modelo para cada empresa (utilizando diferentes *CAM profiles* para la implementación del estándar, como se describe en [17]) y cada escenario distinto. Además, derivaremos un cuarto modelo, de escenario universal, para las trazas de cada empresa, derivado de las trazas en los tres escenarios conjuntamente. Las gráficas que incluiremos en este capítulo para ilustrar el razonamiento expuesto se corresponden con las obtenidas por Volkswagen en un escenario de autopista, aunque las conclusiones obtenidas pueden ser extendidas a todos los demás escenarios.

En las trazas de Volkswagen, podemos observar que hay unos ciertos tamaños de CAM muy utilizados. Concretamente, en la Figura 23 podemos ver que la mayoría de CAM tienen tamaños de aproximadamente {200, 300, 360, 455} bytes. Analizando de forma similar las trazas de Renault observamos que los tamaños más probables son aproximadamente {200, 330, 480, 600, 800} bytes, distintos a los de Volkswagen debido al uso de un *CAM profile* distinto (véase apartado 2.3 para más información de cómo pueden variar los tamaños según el *CAM profile* utilizado). Los tamaños predominantes observados son similares para todos los escenarios en las trazas de un mismo fabricante. Por otro lado, los intervalos entre CAMs están discretizados en múltiplos de 100ms debido a que  $T\_CheckCamGen$ , el periodo de comprobación para decidir si se debe transmitir un CAM, está configurado a 100ms en los equipos. Por tanto, son 10 los posibles valores que puede tomar el intervalo entre CAM (de 100ms a 1s, en intervalos de 100ms). Sin embargo, en las trazas existe un *jitter* en el intervalo entre paquetes, que hace que el intervalo no sea siempre exactamente un múltiplo de 100ms, sino algunos milisegundos más o menos. En la Figura 24 se muestra la distribución de este *jitter* en las trazas del escenario de autopista para Volkswagen. En todos los escenarios se ha encontrado un *jitter* similar, siguiendo aproximadamente una distribución gaussiana.

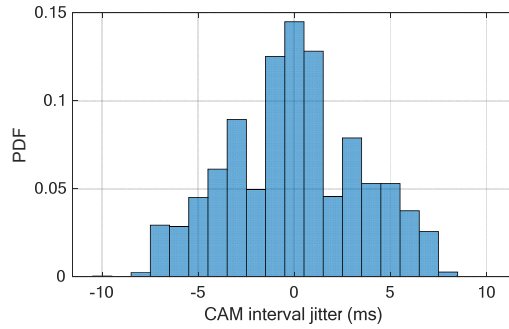


Figura 24. Jitter en traza de autopista obtenida pruebas de campo por Volkswagen [17]

Teniendo en cuenta estas características de las trazas de CAM originales, describimos el proceso de creación de los modelos de generación a continuación. Cada modelo es una fuente de Markov de orden  $m$ , donde cada símbolo está representado por un CAM de un determinado tamaño y el intervalo desde el CAM anterior. La probabilidad de generar un CAM de un determinado tamaño e intervalo depende, por tanto, de los tamaños e intervalos de los  $m$  CAMs anteriores. La fuente de Markov de cada modelo está definida por el alfabeto  $A$ , es decir, el conjunto de posibles símbolos:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_{|A|}\} \quad (2)$$

y un conjunto de probabilidades condicionales:

$$P(a(t) | a(t-1), a(t-2), \dots, a(t-m)) \quad (3)$$

donde  $a(t)$  representa el símbolo que define el siguiente CAM en el instante  $t$ , dependiendo a su vez de los  $m$  símbolos anteriores. Cada probabilidad condicional, por tanto, representa la probabilidad de que el siguiente CAM se genere con un tamaño e intervalo determinados, dados los tamaños e intervalos de los  $m$  CAMs anteriores. El número de símbolos en  $A$  viene dado por el número de posibles tamaños e intervalos. Definimos  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$  como el conjunto de posibles tamaños en cada caso, y  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_{|G|}\}$  como el conjunto de posibles intervalos. El conjunto de símbolos comprende, por tanto, todas las combinaciones de tamaños e intervalos, por lo que  $A = G \times S$ , y el número total de símbolos es  $|A| = |G| \cdot |S|$ . Cada símbolo  $a_n$  dentro de  $A$  está definido por un tamaño  $s_i$  y un tamaño  $g_j$ , donde:

$$n = (j - 1) \cdot |S| + i; \quad 1 \leq i \leq |S| \text{ and } 1 \leq j \leq |G| \quad (4)$$

y de manera inversa:

$$i = ((n - 1) \% |S|) + 1; \quad 1 \leq n \leq |A| \quad (5)$$

$$j = \left\lfloor \frac{n - 1}{|S|} \right\rfloor + 1; \quad 1 \leq n \leq |A| \quad (6)$$

Como hemos aclarado anteriormente en este apartado, todos los modelos generados con las trazas de Volkswagen consideran un conjunto de posibles tamaños  $S = \{200, 300, 360, 455\}$  bytes, mientras que los modelos generados con las trazas de Renault consideran  $S = \{200, 330, 480, 600, 800\}$  bytes. Los posibles intervalos en todas las trazas son  $G = \{100, 200, \dots, 1000\}$  ms. Por lo tanto, las fuentes de Markov derivadas de las trazas de Volkswagen y Renault constarán de 40 y 50 símbolos respectivamente.



Las probabilidades condicionales de la fuente de Markov son listadas dentro de una matriz que definimos como  $M$ . Cada fila de la matriz  $M$  tiene la siguiente estructura:

$$(a(t-m) \quad \dots \quad a(t-2) \quad a(t-1) \quad a(t) \quad P(a(t)|a(t-1), \dots, a(t-m))) \quad (7)$$

donde las primeras  $m$  columnas incluyen los  $m$  símbolos anteriores, correspondientes a los últimos  $m$  CAMs transmitidos, y la columna  $m+1$  representa el símbolo siguiente, correspondiente al posible tamaño e intervalo del siguiente CAM a transmitir. Por último, la última columna incluye la probabilidad condicional de que el siguiente CAM tenga el tamaño e intervalo especificados por el símbolo de la columna  $m+1$ , dados los  $m$  anteriores CAM representados por los símbolos en las  $m$  primeras columnas. En la matriz  $M$  no están incluidas las filas con probabilidad condicional nula.

Para obtener la matriz  $M$  del modelo, contabilizamos en la traza empírica las veces que cada CAM ha sido generado con un tamaño e intervalo concreto dados los  $m$  CAM anteriores. Cada probabilidad condicional se calcula de este modo para  $m = 5$ :

$$P(a_n|a_u, a_v, a_w, a_x, a_y) = c_{n,u,v,w,x,y}/r_{u,v,w,x,y} \quad (8)$$

donde  $a_n$  es el siguiente símbolo y  $a_u, a_v, a_w, a_x, a_y$  los  $m = 5$  símbolos anteriores.  $c_{n,u,v,w,x,y}$  es el número de veces que ocurre la transmisión de un CAM definido por  $a_n$  dados los  $m = 5$  CAMs anteriores definidos por  $a_u, a_v, a_w, a_x, a_y$ . La probabilidad se obtiene normalizando por  $r_{u,v,w,x,y}$ , de forma que todas las probabilidades condicionales de cualquier conjunto de  $m$  símbolos anteriores ( $a_u, a_v, a_w, a_x, a_y$ ) concreto sumen 1:

$$r_{u,v,w,x,y} = \sum_{n=1}^{|A|} c_{n,u,v,w,x,y} \quad (9)$$

Como ejemplo, a continuación mostramos un extracto de la matriz  $M$  creada para el modelo de Volkswagen en escenario de autopista con  $m = 5$ :

$$M = \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 13 & 6 & 7 & 14 & 13 & 8 & 1.000 \\ 13 & 6 & 15 & 6 & 5 & 5 & 0.250 \\ 13 & 6 & 15 & 6 & 5 & 14 & 0.750 \\ 13 & 6 & 15 & 10 & 13 & 6 & 1.000 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 5 & 5 & 0.333 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 5 & 16 & 0.667 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 9 & 16 & 1.000 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 13 & 2 & 0.143 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 13 & 8 & 0.143 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 13 & 12 & 0.143 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 13 & 16 & 0.571 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (10)$$

Las matrices para todas las variantes del modelo están disponibles en [46] para poder ser utilizadas por la comunidad. Además, se incluye un script en MATLAB que ejemplifica la generación de CAM utilizando el modelo. Este procedimiento comienza con la generación de los primeros  $m$  CAMs, siendo esta generación inicial una secuencia de  $m$  símbolos seleccionada aleatoriamente teniendo en cuenta la distribución de probabilidad de cada secuencia de  $m$  CAMs en las trazas originales. Esta distribución de probabilidad también se

incluye en [46]. A partir de esta secuencia inicial, se siguen los dos siguientes pasos para generar cada CAM:

- 1) Obtener el siguiente símbolo  $a_n$  de la fuente de Markov, utilizando para ello la matriz  $M$  y teniendo en cuenta los  $m$  símbolos anteriores.
- 2) Identificar el tamaño  $s_i$  y el intervalo  $g_j$  definidos por el símbolo  $a_n$  como el tamaño e intervalo del CAM generado.

Por último, para que el intervalo entre CAMs sea fiel al observado en las trazas, es necesario añadir el efecto del *jitter* mostrado en la Figura 24. Lo modelamos simplemente añadiendo un valor aleatorio al intervalo con una distribución normal de media cero y desviación estándar medida para cada escenario (Tabla 3).

ESCENARIO	Volkswagen	Renault
Urbano	3.235	2.817
Suburbano	3.814	2.769
Autopista	3.444	2.711
Universal	3.553	2.783

Tabla 3. Desviación estándar del jitter para distintos escenarios

Además de los mencionados distintos escenarios y distintos *CAM profiles* utilizados por Volkswagen y Renault como variantes del modelo, incluimos también como variante del modelo en [46] la opción de dos valores para  $m$  en la fuente de Markov. Por un lado, utilizamos  $m = 1$ , siendo la opción con menor coste computacional, adecuada para estudios donde la correlación entre varios CAM consecutivos no sea crítica. Por otro lado, incluimos el modelo con  $m = 5$ , que consigue una correlación entre CAM consecutivos similar a la de las trazas originales. La Figura 25 muestra esta correlación para la traza de Volkswagen en escenario de autopista, mientras que para las demás trazas se obtienen tendencias similares.

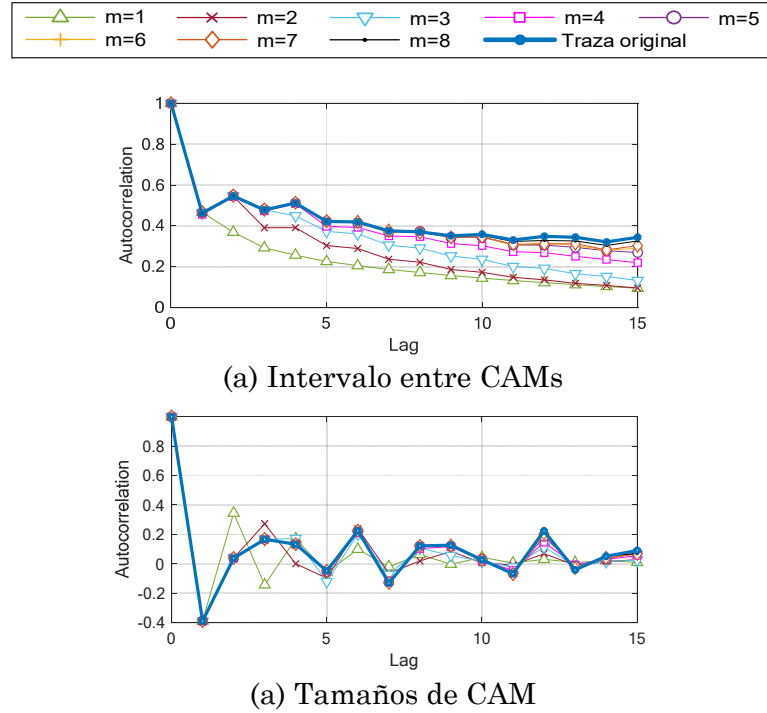


Figura 25. Autocorrelación de la traza original y las trazas generadas con el modelo con varios valores de  $m$  (escenario autopista de Volkswagen)

### 5.3. Validación del modelo

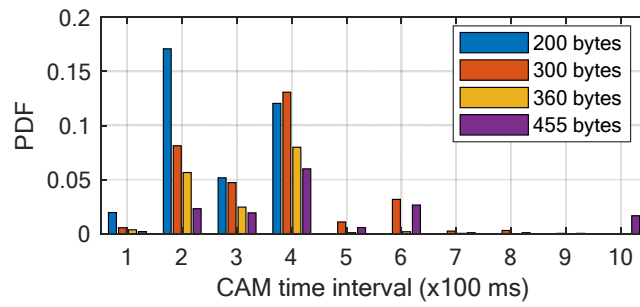
Para validar la generación de CAM con el modelo creado, hemos generado 5 millones de CAMs para cada variante del modelo. Hemos comparado la PDF conjunta de tamaños e intervalos de los CAMs generados con la traza original en cada caso. La Figura 26 muestra la semejanza de los CAMs generados en cuanto a proporción de tamaños e intervalos.

Para cuantificar de forma más precisa esta similitud, utilizamos dos métricas establecidas para comparar PDFs. Por un lado, la divergencia de Kullback-Leibler (también llamada divergencia KL o entropía relativa) mide la cantidad de información perdida cuando una distribución  $Q$  es usada para aproximar otra distribución  $P$ . Se calcula con la siguiente expresión:

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{a \in A} P(a) \cdot \text{Log} \left( \frac{P(a)}{Q(a)} \right) \quad (11)$$

donde  $A$  es el conjunto de posibles parejas tamaño-intervalo de un CAM (igual al alfabeto de la fuente de Markov en el modelo). Por otro lado, la distancia de variación total está definida como la mayor diferencia posible entre las probabilidades que dos PDFs asignan al mismo evento. En la siguiente expresión queda reflejada:

$$\delta(P, Q) = \sup_{a \in A} |P(a) - Q(a)| \quad (12)$$



(a) Traza original

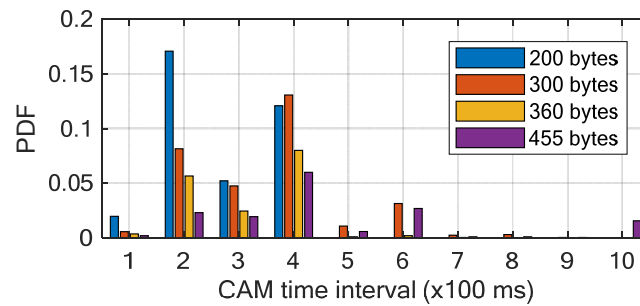
(b) Traza generada con el modelo ( $m = 1$ )

Figura 26. PDF conjunta del intervalo y tamaño de CAM para la traza original y traza generada (escenario autopista de Volkswagen)

En la Tabla 4 mostramos el valor de estas dos métricas para comparar la PDF de las trazas generadas con las trazas originales en todas las variantes del modelo. Los bajos valores obtenidos son coherentes con lo observado en la Figura 26.

Más allá de las similitudes entre PDFs de tamaño e intervalo de CAM, la Figura 25 muestra que el modelo con  $m = 5$  es capaz de modelar la correlación existente entre CAMs consecutivos de las trazas originales. Además de esta correlación, existe una correlación cruzada entre los tamaños e intervalos. Esto es patente, por ejemplo, en la Figura 26, donde podemos observar que el tamaño de CAM predominante no es el mismo para todos los intervalos. Por ejemplo, los intervalos de 100ms y 200ms están predominantemente asociados a tamaños de 200 bytes, mientras que para los intervalos de 400ms y 600ms el tamaño más frecuente es 300 bytes. La Figura 27 muestra la correlación cruzada entre tamaño e intervalo para la traza original y las trazas generadas con  $m = 1$  y  $m = 5$ . Podemos observar que en ambos casos se mantiene la misma correlación cruzada entre tamaños e intervalos para dos CAM consecutivos (*lag* -1 a 1). El modelo con  $m = 5$  es capaz, además, de mantener la correlación para una serie larga de CAMs consecutivos.

$m$	Trazas	Escenario	$D_{KL}(P Q)$	$\delta(P,Q)$
1	Volkswagen	Urbano	$2.558 \times 10^{-5}$	0.0007
		Suburbano	$8.281 \times 10^{-5}$	0.0029
		Autopista	$3.522 \times 10^{-5}$	0.0013
		Universal	$4.621 \times 10^{-5}$	0.0015
	Renault	Urbano	$2.388 \times 10^{-4}$	0.0018
		Suburbano	$3.145 \times 10^{-4}$	0.0014
		Autopista	$2.046 \times 10^{-4}$	0.0018
		Universal	$1.603 \times 10^{-4}$	0.0015
5	Volkswagen	Urbano	$2.606 \times 10^{-5}$	0.0008
		Suburbano	$7.692 \times 10^{-5}$	0.0027
		Autopista	$4.289 \times 10^{-5}$	0.0014
		Universal	$4.548 \times 10^{-5}$	0.0015
	Renault	Urbano	$2.647 \times 10^{-4}$	0.0018
		Suburbano	$3.087 \times 10^{-4}$	0.0013
		Autopista	$1.687 \times 10^{-4}$	0.0017
		Universal	$1.911 \times 10^{-4}$	0.0015

Tabla 4. Divergencia KL y distancia de variación total entre las trazas originales y las generadas con el modelo

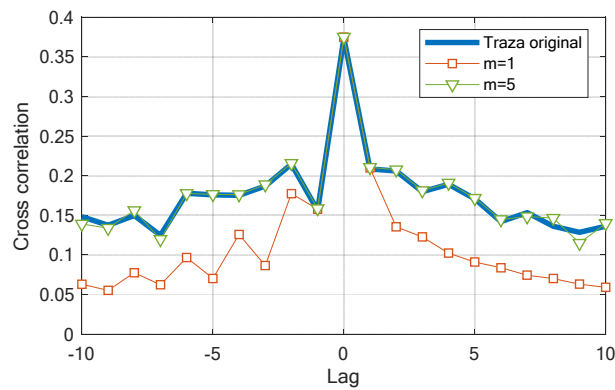


Figura 27. Correlación cruzada entre tamaños e intervalos de CAM (escenario autopista Volkswagen)

## 5.4. Conclusiones y resultados adicionales

En este capítulo hemos presentado un modelo para generar tráfico de mensajes CAM de forma que los tamaños e intervalos entre CAM sigan las variaciones observadas en pruebas de campo realizadas con el estándar de generación de dichos mensajes. El modelo está basado en fuentes de Markov de orden  $m$ , de forma que la generación de un CAM estará determinada por el tamaño e intervalo de los  $m$  CAMs anteriores. El modelo obtenido tiene distintas variantes, dependiendo del escenario en que han sido recolectadas las trazas

originales (urbano, suburbano, autopista y universal), y el *Facilities layer profile utilizado* en cada escenario por la empresa encargada de las pruebas de campo (Volkswagen y Renault). Además, consideramos para cada caso dos posibles valores de  $m$ ,  $m=5$  para evaluaciones que requieran que la correlación entre el tamaño e intervalo de una serie de CAMs consecutivos represente fielmente a la generación estandarizada, y  $m=1$  para evaluaciones que puedan priorizar la sencillez de implementación sobre la correlación entre CAMs consecutivos. La validez del modelo ha sido probada, ya que como hemos demostrado en el apartado 5.3, las trazas CAM creadas utilizando el modelo representan fielmente las características de las trazas originales en cuanto a variación de tamaño e intervalo de CAM.

El modelo podrá ser usado por la comunidad científica para realizar simulaciones a nivel de sistema de comunicaciones V2X con un nivel de detalle superior respecto al uso de los modelos simplificados de tamaño e intervalo fijo utilizados hasta ahora. Las variaciones en tamaño e intervalo realistas integradas en este modelo serán especialmente importantes en los trabajos relativos a comparativas entre tecnologías, puesto que el uso de un modelo simplificado, como el usado hasta ahora en la literatura puede suponer imprecisiones en las conclusiones obtenidas.

En nuestro artículo [47] (incluido en Anexo A) pueden encontrarse, como resultado adicional, variantes del modelo para la generación de intervalos o tamaños de CAM por separado. Esta generación separada puede ser útil para estudios que sólo necesiten una de estas métricas (tamaño o intervalo) y la correlación entre ambas no sea crítica. Entre los detalles de estas variantes están los siguientes:

- Detalles sobre la creación de las variantes del modelo para generación tamaños o intervalos de CAM por separado.
- Validación de las variantes del modelo para generación de tamaños o intervalos por separado.
- Discusión de la precisión de las variantes del modelo para tamaños o intervalos por separado, incluyendo discusión y comparación con el modelo completo de tamaños conjunto con intervalos.

En el repositorio abierto [46] incluimos los siguientes elementos para el uso de la comunidad del modelo creado:

- Matrices  $M$  con las probabilidades condicionales utilizadas para generar el siguiente CAM a partir de los CAM anteriores, para todas las variantes del modelo.
- PDFs de las trazas para todas las variantes del modelo, utilizadas para generar los primeros CAM de la traza.
- Script en MATLAB de ejemplo para generar trazas utilizando las matrices  $M$  y PDFs incluidas. El script es parametrizable para elegir entre todas las variantes del modelo.

## 6. Comparativa entre LTE-V2X e IEEE 802.11p

### 6.1. Introducción

En el capítulo 1 introducíamos cómo actualmente IEEE 802.11p y LTE-V2X son las dos tecnologías candidatas a soportar los requisitos de las comunicaciones V2X. La interoperabilidad entre estas dos tecnologías no es posible, con lo que un vehículo transmitiendo con IEEE 802.11p no es capaz de comunicarse con un vehículo que transmita con LTE-V2X. Esto plantea un problema a los fabricantes de vehículos a la hora de elegir implementar una de las dos tecnologías (o ambas). Sin embargo, el mayor problema está a nivel regulatorio y de asignación de espectro. Dado que las comunicaciones V2X servirán a aplicaciones de seguridad vial, todos los vehículos implicados deben ser capaces de comunicarse entre sí. Además, las bandas de frecuencia disponibles son limitadas. Esto plantea la necesidad de estudiar de forma detallada y comparativa el rendimiento de las dos tecnologías para apoyar las decisiones en cuanto a asignación de espectro y legislación.

Existen algunos estudios comparativos entre ambas tecnologías. Si bien algunos estudios como [48] y [49], realizados por empresas, incluyen discusiones sobre la madurez, comercialización, y perspectivas de evolución de ambas tecnologías, en este capítulo nos centraremos exclusivamente en el rendimiento a nivel tecnológico. [7] realiza una completa comparativa a nivel de enlace entre IEEE 802.11p y LTE-V2X. El resultado es que LTE-V2X tiene una mejora significativa a nivel de enlace respecto a IEEE 802.11p, lo cual permite un mayor alcance en la transmisión en ausencia de interferencia. Sin embargo, los análisis a nivel de enlace no tienen en cuenta la eficiencia en la gestión de recursos radio en un sistema con varios vehículos transmitiendo simultáneamente. Las posibles interferencias entre vehículos pueden causar errores por colisión independientemente del rendimiento a nivel de enlace. De hecho, los mecanismos de asignación de recursos distribuidos y autónomos, tanto de IEEE 802.11p (CSMA/CA) como de LTE-V2X (*Sensing-Based SPS*), son imperfectos, provocando errores por colisión cuando hay niveles de carga en el canal significativos. Por lo tanto, una comparativa más completa será la realizada a nivel de sistema.

En este capítulo presentamos un análisis comparativo en profundidad entre IEEE 802.11p y LTE-V2X. Desde el punto de vista de la gestión de recursos radio. En esta comparativa a nivel de sistema entre IEEE 802.11p y LTE-V2X es necesario utilizar un modelo de generación de paquetes realista. Como exponemos en el capítulo 5, el tráfico de comunicaciones en el estándar CAM

no es estrictamente periódico y con un tamaño de paquete fijo. Sin embargo, las evaluaciones a nivel de sistema de IEEE 802.11p y LTE-V2X que existen en la literatura actualmente (por ejemplo [34]-[37]) utilizan un modelo de generación simplificado periódico y con tamaño de paquete fijo. Nuestro análisis comparativo incluirá evaluaciones con el modelo simplificado utilizado en la comunidad, pero incidirá en las consecuencias que tiene la utilización de un modelo aperiódico y con tamaño variable, como el descrito en el capítulo 5. Concretamente, este modelo afectará de forma distinta a la de gestión de recursos y la capa MAC de IEEE 802.11p y LTE-V2X. Una parte importante del estudio mostrado en este capítulo es, por tanto, la caracterización de cómo afectan las variaciones en el periodo y tamaño de los paquetes generados a IEEE 802.11p y LTE-V2X, donde observaremos que IEEE 802.11p es capaz de absorber estas variaciones de forma más eficiente que LTE-V2X, debido a su funcionamiento más flexible a nivel MAC. En nuestro artículo [39], incluido en Anexo A, se detallan todos los aspectos resumidos en este capítulo, y se incluyen resultados adicionales que reseñaremos en el apartado 6.5 junto a las conclusiones obtenidas.

## 6.2. Parámetros de evaluación

A pesar de que en el apartado 3.4.3 describimos los parámetros utilizados para las evaluaciones realizadas en el marco de esta tesis, en este capítulo se utilizan algunos parámetros de forma diferente al resto para realizar un estudio comparativo en condiciones justas entre las dos tecnologías. En este apartado repasamos brevemente las configuraciones más importantes a tener en cuenta para los resultados de este capítulo.

El modelo de generación de paquetes utilizado es el modelo CAM empírico descrito en el capítulo 5, utilizando la variante de Volkswagen en escenario de autopista y  $m = 5$ . Sin embargo, también utilizaremos, para comparar, el modelo simplificado con tamaño de paquete fijo de 200 bytes e intervalo entre paquetes fijo de 200ms (5pps).

Respecto a la transmisión, en ambas tecnologías utilizaremos la misma potencia de transmisión, 23dBm. También utilizaremos el mismo MCS (modulación QPSK con *coding rate* 0.5, equivalente a MCS 6 en LTE-V2X). En el caso de LTE-V2X utilizamos 5 subcanales de 10RBs cada uno, con lo que los paquetes ocuparán el número de subcanales especificado en la Tabla 5 dependiendo de su tamaño. Por otro lado, en este capítulo utilizaremos niveles de sensibilidad de equipos reales en lugar de los mínimos definidos en los estándares. Estos niveles de sensibilidad son -92dBm para IEEE 802.11p [42] y -103.5dBm para LTE-V2X [41].



Tamaño de paquete (bytes)	Número de subcanales
200	2
300	3
360	3
455	4

Tabla 5. Número de subcanales de 10RBs para cada tamaño de paquete en LTE-V2X

Respecto a aspectos configurables de IEEE 802.11p, es remarcable que utilizaremos siempre *Capture Effect* para IEEE 802.11p, dado que su implementación está extendida en equipos reales [23]. Por parte de LTE-V2X, la configuración del RRI (intervalo de reserva de recursos, véase último párrafo del apartado 2.5) es importante en nuestra evaluación. Mientras que para el modelo de generación de paquetes simplificado la elección de RRI es trivial (igual al intervalo fijo entre paquetes), las variaciones de intervalo en el modelo empírico introducen la dificultad de seleccionar el RRI de modo que se obtenga el mejor rendimiento. Dado que no existen en la literatura estudios sobre la selección de RRI en LTE-V2X para una generación de paquetes no estrictamente periódica, incluiremos este estudio dentro del análisis incluido en este capítulo. Para ello, consideraremos tres estrategias de selección de RRI cuando utilicemos el modelo de generación empírico:

- Estrategia 1. Selección de RRI siempre a 100ms, por ser el mínimo intervalo de generación.
- Estrategia 2. Selección de RRI siempre a 200ms, debido a que 200ms y 400ms (que es múltiplo) son los intervalos que más ocurren en las trazas empíricas, suponiendo el 72.16% de los intervalos.
- Estrategia 3. Selección de RRI igual al intervalo anterior a la reelección de recursos, debido a que hay un 50.4% de probabilidad de que un intervalo se repita en las trazas CAM generadas con el modelo CAM empírico.

### 6.3. Ineficiencias de LTE-V2X

En las evaluaciones realizadas en este estudio hemos comprobado que la ineficiencia encontrada en la gestión de recursos radio de IEEE 802.11p viene dada por el problema de terminal oculto, inherente a CSMA/CA para todos los sistemas basados en IEEE 802.11. Este problema se acentúa con la densidad de nodos (vehículos) y la carga en el canal, pero es independiente de la variabilidad del tamaño de los paquetes transmitidos y del intervalo entre ellos. El funcionamiento simple de la capa MAC de IEEE 802.11p hace que sea muy flexible, por lo que IEEE 802.11p no tiene ineficiencias añadidas debido al tráfico aperiódico y de tamaño variable. En LTE-V2X también se producen errores debido al problema de terminal oculto, ya que su gestión de recursos está basada en el sensado de paquetes de otros vehículos. Sin embargo, el mecanismo de gestión de recursos *Sensing-Based SPS* de LTE-V2X utiliza

reservas de recursos radio para los siguientes paquetes a transmitir. Estas reservas tienen un tamaño y un intervalo de reserva (RRI) determinados, por lo que las variaciones de tamaño e intervalo producidas en el modelo de generación CAM empírico tendrán un efecto perjudicial adicional en la gestión de recursos de LTE-V2X. En este apartado identificamos las ineficiencias específicas de LTE-V2X debidas al algoritmo *Sensing-Based SPS*, y definimos una serie de métricas creadas para analizar su prevalencia en nuestro estudio. Todas estas métricas serán independientes de la densidad de vehículos, puesto que son relativas a la generación de CAM en cada vehículo.

### 6.3.1. Reselecciones adicionales

Las reselecciones en LTE-V2X son una fuente de posibles colisiones, debido a que los demás vehículos no tienen manera de saber en qué recursos se va a transmitir el primer mensaje tras una reselección. Las reselecciones por agotamiento del *Reselection Counter* se producen siempre, independiente del modelo de tráfico, y suponen una fuente de ineficiencia que aumenta con la densidad de vehículos en el escenario. Como se puede apreciar en la Figura 28, dos vehículos  $V_1$  y  $V_2$  que reseleccionan en instantes cercanos solapan sus *Selection Windows*. Esto hace que exista probabilidad de que seleccionen los mismos recursos y todas sus siguientes transmisiones colisionen hasta que uno de los dos vehículos vuelva a reseleccionar. Sin embargo, una mayor densidad de vehículos provoca que existan más reselecciones simultáneas en el escenario (como en la Figura 28 al añadir  $V_3$ ), con lo que la ineficiencia producida por las reselecciones se acentuará al existir más solapamientos entre las *Selection Windows* de varios vehículos.

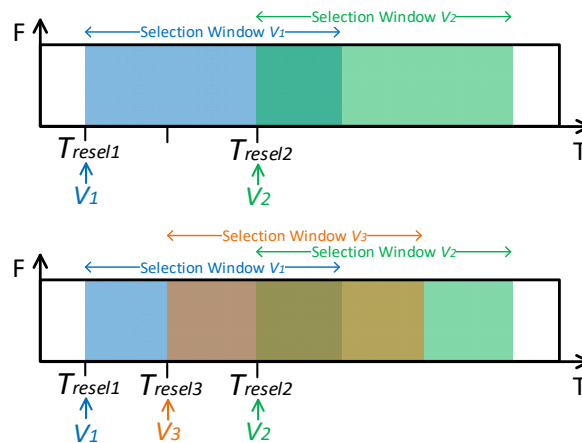


Figura 28. Aumento del riesgo de colisión debido al incremento de reselecciones. Más reselecciones suponen mayor solapamiento entre *Selection Windows*.

Por otra parte, las variaciones de tamaño e intervalo entre paquetes producen reselecciones adicionales que provocan un empeoramiento del rendimiento. El hecho de que haya reselecciones adicionales provoca que haya más vehículos reseleccionando continuamente, con lo que aumenta la probabilidad de que se solapen las ventanas de selección de varios vehículos produciendo un mayor riesgo de colisiones. Además, las reselecciones adicionales por variación de

tamaño y límite de latencia producen otro efecto perjudicial que no se produce en las reselectiones por agotamiento del *Reselection Counter*. En el SCI de cada transmisión se indica el RRI, que es tomado por los demás vehículos como un indicador de la reserva para la siguiente transmisión. En la transmisión del paquete inmediatamente anterior al agotamiento del *Reselection Counter*, el vehículo transmisor  $V_g$  pone a 0 el campo RRI del SCI para indicar que esa reserva ya no se va a seguir utilizando. Sin embargo, en el caso de reselectiones adicionales por latencia o tamaño,  $V_g$  ha indicado a los demás vehículos en su transmisión anterior a la reselección adicional que la reserva sigue activa, porque en el momento de transmitirla  $V_g$  no sabía que iba a tener que reselectionar, ya que aún no se había generado el paquete cuyo tamaño o latencia obliga a  $V_g$  a producir una reselección adicional. Esto provoca que los demás vehículos excluyan unos recursos donde finalmente no se va a transmitir nada, lo cual es perjudicial para una correcta gestión de recursos al reducir el número de recursos utilizables y aumentar pues la probabilidad de colisión. Las reselectiones adicionales por variaciones de tamaño (Figura 29) se dan cuando una selección ha sido realizada para un mensaje pequeño, y después se genera un mensaje de mayor tamaño que ocupa más subcanales de los que tiene la reserva. Las reselectiones adicionales por límite de latencia se pueden producir si se realiza una reserva con un RRI mayor que el intervalo mínimo entre mensajes (RRI=200ms en el ejemplo de Figura 30). Las reselectiones por latencia dependen, por tanto, de la estrategia de selección de RRI. Se produce la reselección por latencia sólo si se genera un mensaje con un intervalo menor que el RRI, de forma que el límite de latencia del mensaje generado sea anterior a la reserva para transmitir.

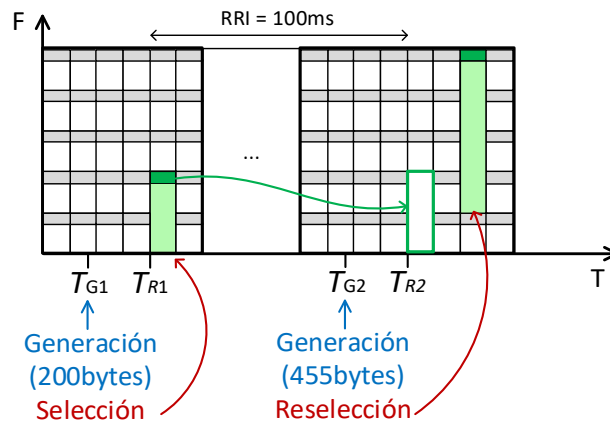


Figura 29. Reselección extra por tamaño.

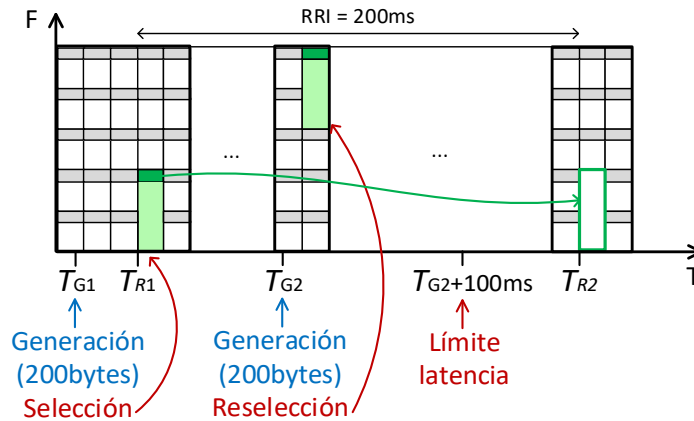


Figura 30. Reelección extra por latencia.

Obtendremos las siguientes estadísticas relativas a las reelecciones para evaluar su impacto en la eficiencia de la gestión de recursos:

- *Ratio de reelecciones por tamaño.* Ratio de paquetes generados que han producido una reelección por tamaño.
- *Ratio de reelecciones por latencia.* Ratio de paquetes generados que han producido una reelección por latencia.
- *Ratio de reelecciones por contador.* Ratio de paquetes generados para los cuales se ha producido una reelección por agotamiento del *Reselection Counter*.
- *Ratio de reelecciones total.* Ratio de paquetes generados para los cuales se ha producido una reelección por cualquier motivo. No equivale a la suma de los tres ratios anteriores, puesto que existe la posibilidad de que para un paquete se produzca reelección por dos o los tres motivos a la vez. En este caso, la reelección cuenta sólo como una en el ratio de reelecciones total.

### 6.3.2. Subcanales no utilizados por variación de tamaño

Si no se produce una reelección y se utilizan los recursos reservados, es posible que la reserva realizada por el vehículo  $V_g$  sea de mayor tamaño del que necesita el mensaje generado. En este caso, los demás vehículos excluyen también los subcanales que quedan vacíos, siendo una fuente de ineficiencia para la gestión de recursos. La Figura 31 muestra un ejemplo de esta ineficiencia. Para cuantificar dicha ineficiencia definimos la siguiente métrica:

- *Ratio promedio de subcanales no utilizados debido a variación de tamaño.* Ratio promedio de subcanales no utilizados en una reserva utilizada para transmitir. Como ejemplo, en la Figura 31, la primera transmisión deja vacío un ratio 0 de subcanales reservados (0 de 4), mientras que la segunda transmisión deja vacíos un ratio 0.5 de los subcanales reservados (2 de 4).

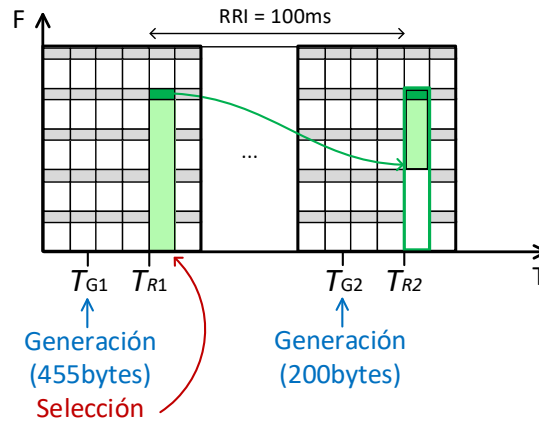


Figura 31. Subcanales no utilizados por variación de tamaño.

### 6.3.3. Reservas de subcanales no utilizadas

Siempre que no se produzca una reelección, es posible que la reserva realizada por un vehículo  $V_r$  no sea utilizada porque el siguiente mensaje se genere después de esta, debido a que el intervalo ha sido más largo que el RRI. En la Figura 32.a se representa esta situación. En este caso, el slot reservado por la transmisión anterior queda vacío.  $V_r$  utilizará el siguiente slot de su reserva. Sin embargo, la reserva de este segundo slot no ha sido anunciada, puesto que no se ha transmitido ningún SCI en el slot anterior que lo haga. La transmisión no anunciada puede provocar una colisión con otros vehículos que se encuentren reeleccionando. Sin embargo, la posibilidad de que otros vehículos no la excluyan en su reelección depende del momento en que generen el mensaje para el cual deben lanzar la reelección. Por un lado, si un vehículo  $V_g$  lanza una reelección antes del slot vacío (Figura 32.b), excluirá el slot vacío porque piensan que va a ser utilizado por  $V_r$ . Sin embargo, si  $V_g$  utiliza el mismo RRI que  $V_r$ , excluirá también el siguiente slot usado por  $V_r$  ya que seleccionará otros recursos distintos para su primera transmisión, con lo que no se producirá colisión en ningún caso. Por otro lado, si la reelección de  $V_g$  es lanzada después del slot vacío (Figura 32.c),  $V_g$  considerará que esos recursos ya están libres al no haber recibido un SCI con la reserva para el siguiente slot, con lo que existirán posibilidades de no excluir los recursos utilizados por  $V_r$  y colisionar. Para esta ineficiencia definimos la siguiente métrica:

- *Ratio de reservas no utilizadas.* Ratio de reservas no utilizadas para transmitir respecto al total de reservas realizadas, excluyendo aquellas que queden sin utilizar debido a una reelección adicional por tamaño o latencia.

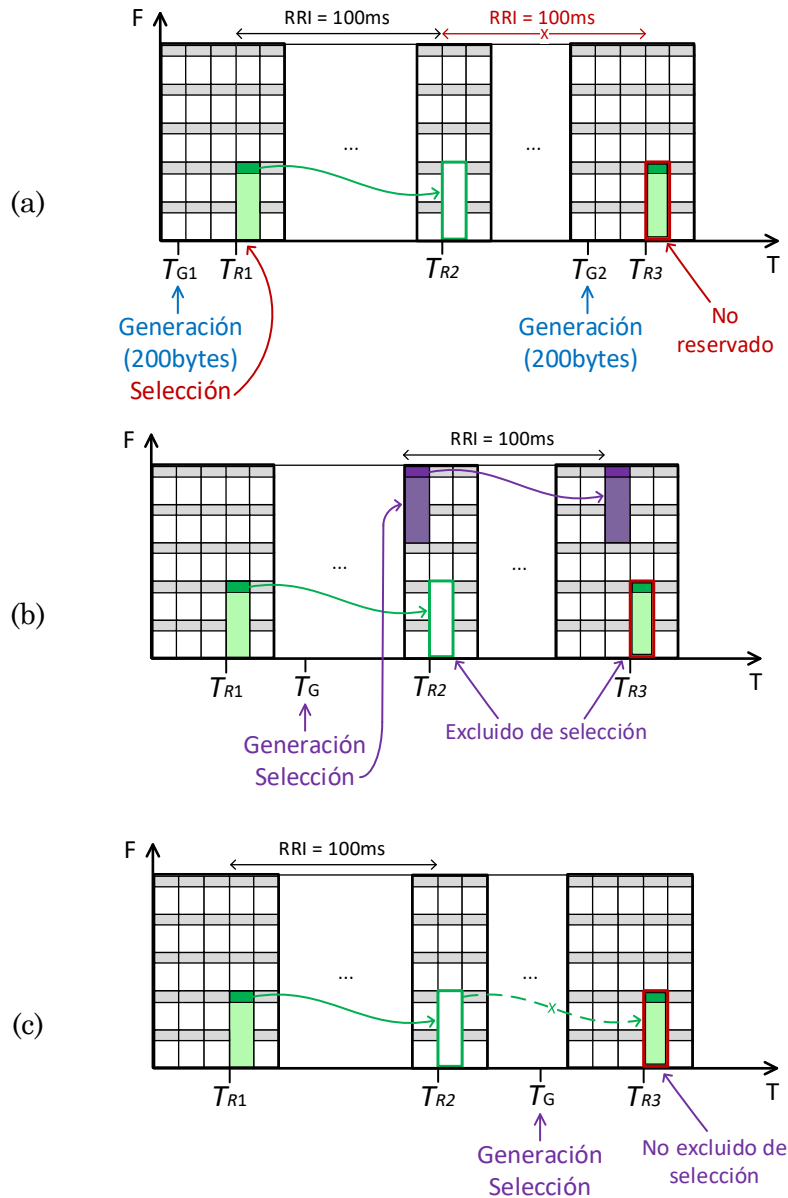


Figura 32. Reservas de subcanales no utilizadas.

## 6.4. Comparativa a nivel de sistema

En este apartado presentamos los resultados más importantes del análisis comparativo entre IEEE 802.11p y LTE-V2X. Comparamos la PDR obtenida con IEEE 802.11p con la obtenida con LTE-V2X, incluyendo las tres estrategias de selección de RRI mencionadas en 6.2. En la Figura 33 está representada esta comparativa para los 4 escenarios de autopista con distinta densidad de vehículos, utilizando el modelo empírico de generación de CAMs. En la Figura 34 se representa la PDR en los mismos escenarios, pero esta vez utilizando el modelo simplificado con intervalo entre CAM de 200ms (5pps). No utilizamos

100ms de intervalo entre CAM porque la CBR sería mucho más alta en el mismo escenario utilizando el modelo simplificado que el modelo empírico. De esta forma las CBR son más cercanas, aunque siguen sin ser iguales (ver Tabla 6).

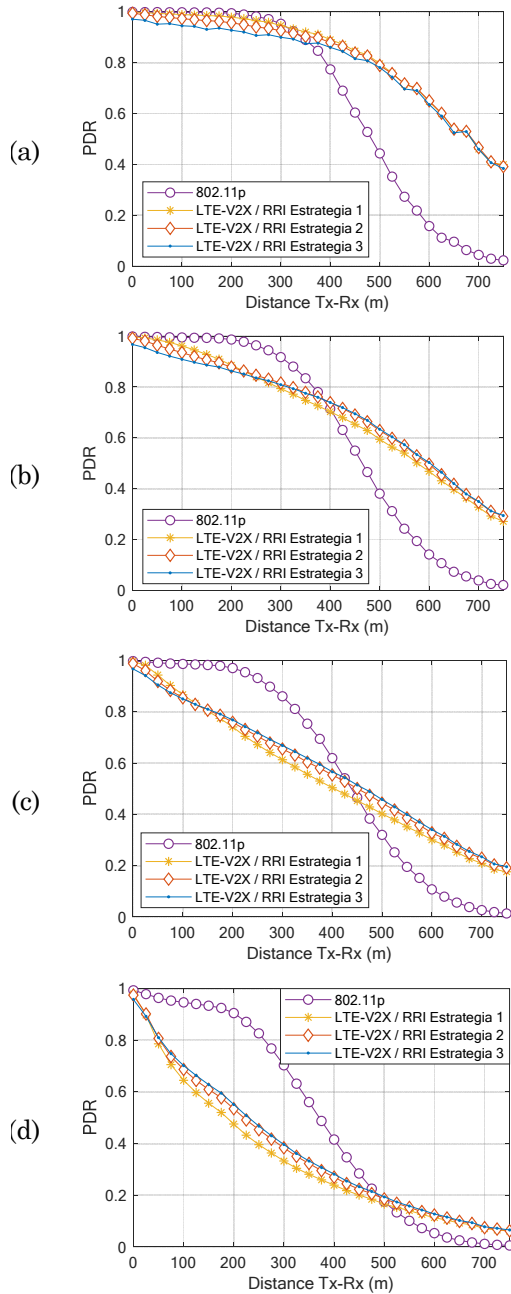


Figura 33. PDR usando el modelo CAM empírico. (a) 60veh/km, (b) 120veh/km, (c) 200veh/km, (d) 400veh/km.

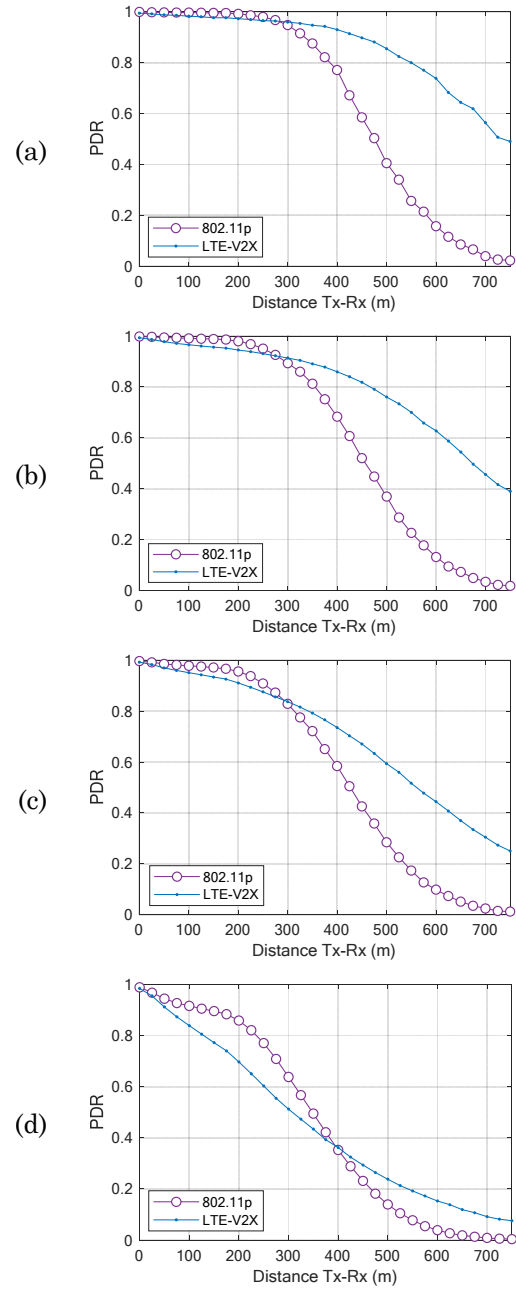


Figura 34. PDR usando el modelo simplificado con 200ms entre CAMs. (a) 60veh/km, (b) 120veh/km, (c) 200veh/km, (d) 400veh/km.

Modelo CAM	Escenario (veh/km)	IEEE 802.11p	LTE-V2X
Empírico	60	0.101	0.095
	120	0.206	0.186
	200	0.334	0.289
	400	0.61	0.485
Simplificado	60	0.12	0.119
	120	0.233	0.237
	200	0.376	0.386
	400	0.654	0.638

Tabla 6. CBR en IEEE 802.11p y LTE-V2X utilizando los dos modelos de generación

En baja densidad, la tendencia es la misma para el modelo empírico (Figura 33.a) y el modelo simplificado (Figura 34.a). La carga del canal es baja, con lo que es más importante el rendimiento a nivel de capa física, y por ello LTE-V2X alcanza mejores niveles de PDR a distancias medias y largas. A distancias cortas, IEEE 802.11p funciona ligeramente mejor debido a la mejora que ofrece el *Capture Effect*. En estas distancias cortas, LTE-V2X sufre de colisiones debido a los vehículos que coinciden al reseleccionar aproximadamente al mismo tiempo y solapan sus *Selection Windows*. Estas reselecciones son especialmente perjudiciales a distancias cortas, ya que dos vehículos cercanos reciben las mismas transmisiones, y por tanto es más probable que excluyan los mismos recursos al reseleccionar.

Con el aumento de la densidad, vemos que tanto IEEE 802.11p como LTE-V2X empeoran su rendimiento. En el caso de IEEE 802.11p, este empeoramiento se debe sólo al aumento de CBR que provoca más colisiones por el problema de terminal oculto. De hecho, los errores por colisión en IEEE 802.11p tienen una relación directa con la CBR (ver Tabla 6), independientemente del modelo de generación de CAM. Por el contrario, en LTE-V2X no sólo afecta el problema de terminal oculto debido al sensado con rango limitado. También influyen las ineficiencias debidas a las reselecciones en todos los modelos de generación de CAM, lo que hace que el aumento de colisiones sea mayor que el de IEEE 802.11p al aumentar la carga en el canal. Además, en el modelo empírico también influyen las ineficiencias debido a las variaciones de tamaño e intervalo de CAM. Esto hace que la bajada de rendimiento de LTE-V2X respecto a IEEE 802.11p sea mayor para el modelo empírico (Figura 33) que para el modelo simplificado (Figura 34). En la Figura 35 queda demostrado que el peor rendimiento de LTE-V2X en alta carga del canal es debido al aumento de errores por colisión respecto a IEEE 802.11p, ya que los errores por propagación son mayores en IEEE 802.11p debido a su peor rendimiento a nivel de capa física. Hemos obviado los errores por *half dúplex* y No SCI en la Figura 35 por ser despreciables en todos los casos. En cuanto a los niveles de CBR en la Tabla 6 debemos hacer algunas puntualizaciones. La CBR de IEEE 802.11p y LTE-V2X no es directamente comparable debido a la distinta forma de medirla (véase Figura 11 en apartado 3.5) y al distinto nivel de sensibilidad. Sin embargo, es destacable que un aumento de las colisiones hace que la CBR disminuya debido a que dos paquetes que colisionan ocupan los mismos



recursos radio, siendo en total la mitad del canal que deberían ocupar en caso de no haber colisión. Esto es lo que produce que LTE-V2X tenga una menor CBR que IEEE 802.11p en escenarios altamente cargados, especialmente utilizando el modelo empírico que produce más colisiones en LTE-V2X.

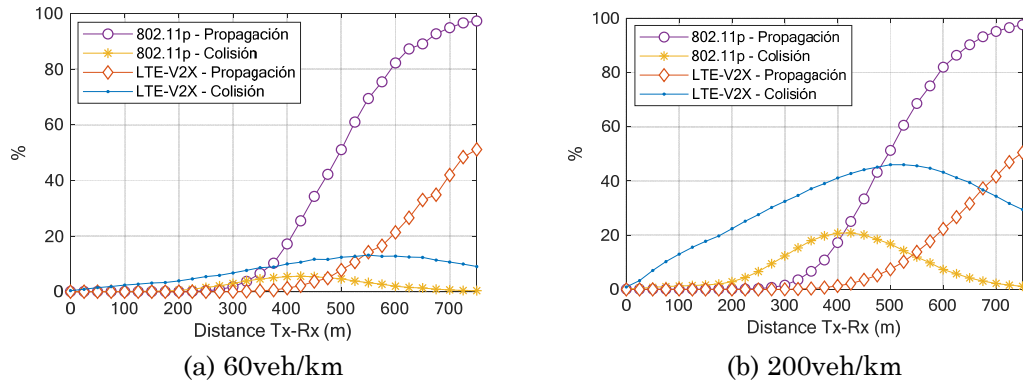


Figura 35. Errores por propagación y colisión en IEEE 802.11p y LTE-V2X usando el modelo empírico

Para explicar en detalle la pérdida de rendimiento en LTE-V2X debido a las ineficiencias identificadas en 6.3 y las diferencias en función de la estrategia de selección de RRI, obtenemos las métricas definidas en 6.3 para evaluar estas ineficiencias. En la Tabla 7 se muestran los ratios de reselecciones para el modelo empírico<sup>8</sup>. En el caso de que no hubiera reselecciones extra, el ratio de reselecciones total sería de 0.1, siendo todas las reselecciones debidas al agotamiento del *Reselection Counter* que se produciría de media para 1 de cada 10 paquetes (entre 5 y 15 con distribución uniforme). Sin embargo, para el modelo empírico, ninguna de las estrategias de selección de RRI es capaz de evitar reselecciones extra, con lo que el ratio de reselecciones total es siempre mayor que 0.1. Por tanto, hay menos ocasiones en que se llega a agotar el *Reselection Counter*. Por el contrario, se reselecciona antes por otro motivo, lo que ocasiona que el ratio de reselección por contador sea menor que 0.1. Respecto al ratio de reselección por latencia, es distinto según la estrategia de selección de RRI. Para la estrategia 1 (RRI=100ms), prácticamente no hay reselecciones por latencia, debido a que 100ms es el intervalo mínimo entre CAM. Sólo se aprecia un desdeñable 0.1% que es debido al *jitter*. La estrategia 2 (RRI=200ms) sí tiene un número significativo de reselecciones por latencia (16.9% de los paquetes generados). La estrategia 3 produce aún más reselecciones puesto que el RRI seleccionado puede ser aún mayor de 200ms. Las tres estrategias producen reselecciones extra por tamaño debido al tamaño variable de los CAM. Sin embargo, las reselecciones por límite de latencia (en estrategias 2 y 3) hacen que aumenten las reselecciones por tamaño. Esto es debido a que, cuando se produce una reselección por límite de latencia, hay probabilidades de que el CAM generado sea pequeño, con lo que se realizará una reserva ajustada a su tamaño que tendrá que ser desechada en cuanto se

<sup>8</sup> El modelo simplificado no tiene reselecciones extra, subcanales no utilizados debido a variación de tamaño, o reservas no utilizadas. Esto es debido a la ausencia de variaciones en el intervalo y tamaño de CAMs. La ineficiencia existente es, por tanto, el ratio de reselecciones por contador que es igual a 0.1.

genere un CAM más grande. Por el contrario, si no hay reselecciones por límite de latencia (estrategia 1), en el momento en que se genere una reserva para un CAM del tamaño más grande (455 bytes), esta se mantendrá hasta que se agote el contador, con lo que no habrá ningún otro factor que pueda provocar otra reselección por variación de tamaño.

Estrategia selección RRI	Ratio reselección latencia	Ratio reselección tamaño	Ratio reselección contador	Ratio reselección total
1	0.001	0.076	0.081	0.155
2	0.169	0.134	0.047	0.313
3	0.234	0.169	0.03	0.387

Tabla 7. Ratios de reselecciones en LTE-V2X con modelo empírico

Por otra parte, en la Tabla 8 se muestra el valor del ratio promedio de subcanales no utilizados debido a variación de tamaño y el ratio de reservas no utilizadas (véase definición de estas métricas en 6.3). Si analizamos el ratio promedio de subcanales no utilizados debido a variación de tamaño, vemos que esta métrica está inversamente relacionada con el número de reselecciones. Un mayor número de reselecciones evita que se mantenga una reserva (del tamaño del paquete más grande) hasta el agotamiento del *Reselection Counter*. Esto es justo lo que pasa utilizando RRI=100ms, que evita reselecciones por límite de latencia. Por el contrario, las estrategias 2 y 3 que utilizan RRI más largos, tienen más reselecciones que hacen que el tamaño de las reservas utilizadas sea más ajustado al tamaño del CAM transmitido. Los subcanales no utilizados por variación de tamaño provocan en el algoritmo de reselección la exclusión de recursos que realmente no se van a utilizar. Esto es más importante cuando la carga del canal aumenta, pero no es tan crítico cuando hay poca carga ya que quedan suficientes recursos libres. Es, por tanto, una de las razones por las que la estrategia 1 funciona mejor que las estrategias 2 y 3 en cargas bajas, pero peor al aumentar la carga (véase Figura 33).

Estrategia selección RRI	Ratio promedio subcanales no utilizados / variación de tamaño	Ratio de reservas no utilizadas
1	0.225	0.815
2	0.18	0.367
3	0.143	0.118

Tabla 8. Subcanales y reservas no utilizadas en LTE-V2X con modelo empírico

En cuanto al ratio de reservas no utilizadas, vemos en la Tabla 8 que es mayor cuando el RRI seleccionado es de menor duración. Debido a esta ineficiencia, utilizar la estrategia 1 produce más transmisiones no anunciadas, y por tanto mayor posibilidad de que otro vehículo reserve esos recursos y se produzcan colisiones. Sin embargo, la estrategia 1 produce muchas menos reselecciones, lo que consigue que haya menos vehículos reseleccionando continuamente. Como resultado, la probabilidad de que algún vehículo colisione se compensa. Esta es la razón de que la PDR esté bastante igualada para las distintas estrategias, pese a la gran diferencia que hay en el valor de ratio de reservas

no utilizadas. Por último, es destacable que tanto las reservas vacías como las transmisiones no anunciadas que producen esta ineficiencia son más perjudiciales conforme aumenta la carga en el canal, debido a que aumentan las probabilidades de colisión. Este efecto también es responsable de que la estrategia 1 funcione algo mejor a densidades bajas y peor a densidades altas.

En resumen, los cambios en la selección de RRI no producen grandes diferencias en el rendimiento, debido a que la reducción de unas ineficiencias produce el aumento de otras, tal como puede observarse en la Figura 36 que ilustra parte de los resultados mostrados numéricamente en las tablas anteriores.

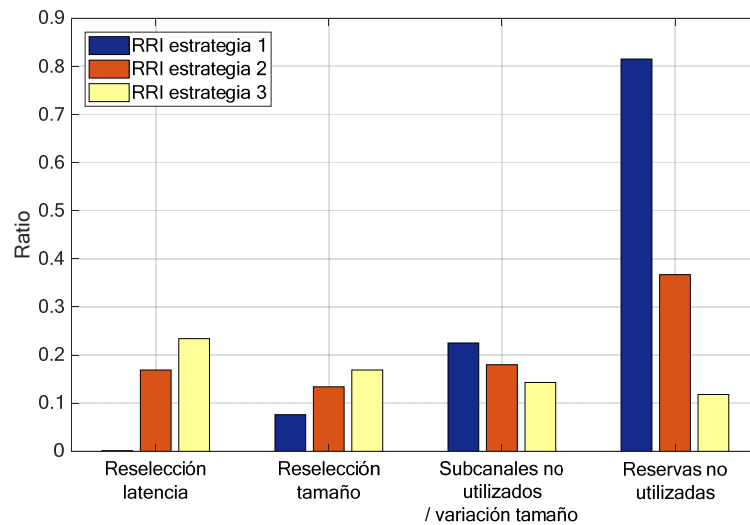


Figura 36. Medidas de ineficiencias en LTE-V2X para cada estrategia de selección de RRI

Como añadido a los resultados obtenidos, hemos realizado una evaluación de IEEE 802.11p en el caso hipotético de que tuviera el mismo rendimiento a nivel de capa física de LTE-V2X, de forma que la gestión de recursos en capa MAC sea la que determine la diferencia entre las dos tecnologías. Esto incluye igualar la sensibilidad y las curvas BLER-SINR a las de LTE-V2X, pero no el ruido térmico, ya que IEEE 802.11p utiliza todo el ancho del canal mientras que LTE-V2X sólo utiliza algunos subcanales en frecuencia, dependiendo del tamaño del CAM. El resultado, en la Figura 37, es que IEEE 802.11p mejora su rendimiento con esta nueva capa física en todas las distancias. Es destacable que, gracias al *Capture Effect*, IEEE 802.11p es capaz de mantener o mejorar el rendimiento a distancias cortas a pesar de aumentar el rango de recepción. Este resultado indica que IEEE 802.11p tiene un notable potencial de mejora en el caso de que su capa física sea evolucionada en tecnologías que la sucedan, aunque LTE-V2X seguiría teniendo algo de ventaja a nivel de capa física por la división en frecuencia.

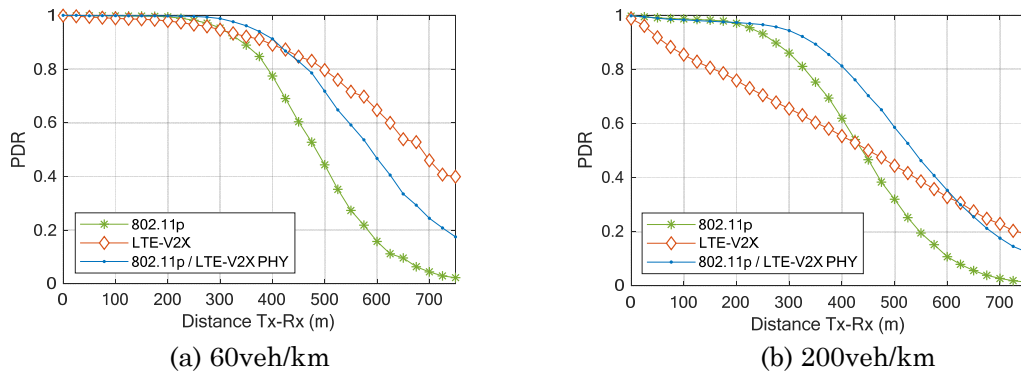


Figura 37. Evaluación de IEEE 802.11p igualando su capa física a la de LTE-V2X

## 6.5. Conclusiones y resultados adicionales

En este capítulo exponemos un análisis comparativo en profundidad entre las dos tecnologías candidatas a soportar comunicaciones V2X, IEEE 802.11p y LTE-V2X. Para llevar a cabo este análisis hemos realizado evaluaciones a nivel de sistema de las dos tecnologías en distintas densidades de tráfico, y también con distintos modelos de generación de paquetes y con diferentes configuraciones que nos han permitido observar el comportamiento de los mecanismos de gestión de recursos de ambas tecnologías en profundidad.

El rendimiento observado para LTE-V2X con poca carga en el canal es superior al de IEEE 802.11p, debido al mejor funcionamiento a nivel de capa física que le permite alcanzar mayores rangos de transmisión. No obstante, los resultados muestran que la capa MAC de LTE-V2X es menos eficiente que la de IEEE 802.11p para gestionar correctamente los recursos radio y evitar colisiones entre las transmisiones de varios vehículos. Esto hace que, con el incremento de la carga en el canal, LTE-V2X empeore su rendimiento respecto a IEEE 802.11p. Tanto el mecanismo CSMA/CA utilizado en IEEE 802.11p como el mecanismo *Sensing-Based SPS* utilizado en LTE-V2X sufren el problema de terminal oculto, al utilizar las transmisiones recibidas como información para seleccionar los recursos radio donde transmitir. Sin embargo, *Sensing-Based SPS* tiene algunas ineficiencias adicionales derivadas del mecanismo de reservas semipersistentes. Este estudio es el primero en determinar y cuantificar estas ineficiencias, que pueden clasificarse en dos grupos. El primer grupo son las reselecciones de recursos, que suponen una fuente de colisiones, al provocar que varios vehículos reseleccionando simultáneamente puedan escoger los mismos recursos donde transmitir. Las reselecciones aumentan con la densidad de vehículos, pero también con las variaciones de tamaño e intervalo entre los paquetes generados. El segundo grupo de ineficiencias es la infrautilización de las reservas debida a la variación de tamaño e intervalo en la generación de paquetes, que provoca que queden recursos en el canal sin utilizar.

También hemos encontrado diferencias entre las dos tecnologías respecto a la adaptación al modelo de generación de paquetes utilizado. Para IEEE 802.11p,

la variabilidad en intervalo y tamaño de los paquetes no afecta a la gestión de recursos debido a la flexibilidad de su capa MAC. Sin embargo, algunas de las ineficiencias de LTE-V2X identificadas aparecen con las variaciones de tamaño e intervalo entre paquetes, con lo que el decaimiento del rendimiento de LTE-V2X respecto a IEEE 802.11p al aumentar la carga en el canal es más patente para el modelo CAM empírico utilizado que para el modelo simplificado de tamaño e intervalo entre paquetes fijo. Además, hemos comprobado que los cambios en la configuración en LTE-V2X (como la modificación del RRI) no son capaces de evitar el impacto de las variaciones en tamaño e intervalo de paquete, puesto que cada cambio de configuración que mitiga un tipo de ineficiencias agrava inevitablemente el efecto de otras.

Finalmente, hemos comprobado el rendimiento de IEEE 802.11p igualando el rendimiento de su capa física al de LTE-V2X, encontrando que obtendría una mejora relevante, especialmente a distancias largas. Sin embargo, en situaciones con baja carga del canal, LTE-V2X sigue funcionando mejor a largas distancias que IEEE 802.11p incluso igualando el rendimiento de su capa física, debido a que LTE-V2X no utiliza el total del canal para transmitir, con lo que el ruido térmico le afecta menos. Esta evaluación es interesante dado que algunos estudios como [50] explican que la capa física de IEEE 802.11p podría ser mejorada, e incluso alcanzar el rendimiento de la capa física de LTE-V2X.

En nuestro artículo [39] (incluido en Anexo A) extendemos los resultados y discusiones de este capítulo. Entre los resultados adicionales incluidos están:

- Comparativa utilizando modelos de generación mixtos entre el modelo CAM empírico y el modelo simplificado. Estos modelos están basados en el modelo CAM empírico, pero manteniendo fijo el intervalo o el tamaño de CAM. El objetivo de estas evaluaciones es concretar la ineficiencia que producen la variabilidad de intervalo entre paquetes y la variabilidad de tamaño de paquete por separado. Concluimos que tanto el tamaño variable como el intervalo variable por separado producen un perjuicio al rendimiento de LTE-V2X, aunque el efecto del intervalo variable es algo más perjudicial.
- Evaluación de LTE-V2X con  $P=0.8$  para el modelo CAM empírico, obteniéndose las mismas conclusiones mostradas en el apartado 4.3.1 para el modelo simplificado, es decir, un aumento de  $P$  produce una mejora muy pequeña del rendimiento, pero produce algunas colisiones entre dos vehículos que se mantienen en el tiempo y son peligrosas en aplicaciones de vehículo conectado.
- Evaluación de LTE-V2X con transmisión redundante para el modelo CAM empírico. Concluimos que, debido a las ineficiencias que introduce la variabilidad en tamaño e intervalo del modelo CAM empírico, la transmisión redundante no es eficiente incluso para una carga del canal baja.
- Evaluación de LTE-V2X con el modelo 3GPP (dos tamaños de paquete e intervalo fijo), obteniéndose una tendencia intermedia a las observadas con los modelos simplificado y modelo CAM empírico.

- Evaluación de LTE-V2X con el modelo CAM empírico, pero eliminando el *jitter* añadido al intervalo entre CAMs. Concluimos que el efecto del *jitter* es despreciable para el rendimiento de LTE-V2X.

# 7. Propuestas para la mejora de la gestión de recursos radio en LTE-V2X

## 7.1. Introducción

En los capítulos 4 y 6 hemos analizado el funcionamiento del mecanismo de gestión de recursos radio de LTE-V2X, *Sensing-Based SPS*, descrito en el apartado 2.5. Los resultados mostrados nos han permitido conocer a fondo el funcionamiento de *Sensing-Based SPS*, llegando a la conclusión de que existe margen de mejora para evitar algunos errores de transmisión debidos a interferencias por colisiones entre las transmisiones de los vehículos. En concreto, hemos observado que el problema de terminal oculto, las reselecciones y la fiabilidad en la estimación de los recursos utilizados por los demás vehículos son fuentes de errores en la selección de recursos que hacen que *Sensing-Based SPS* no consiga un rendimiento óptimo.

Para mejorar el rendimiento del mecanismo de gestión de recursos de LTE-V2X existen diferentes opciones, dependiendo del nivel de alineamiento con el estándar de la mejora propuesta. Por un lado, la optimización de la configuración de LTE-V2X permitiría mejorar el rendimiento manteniendo la compatibilidad total con el estándar, y es pues el primer paso que exploramos en el apartado 4.3. Sin embargo, hemos demostrado en los capítulos 4 y 6 que sólo con la modificación de los distintos aspectos configurables que deja abiertos el estándar no se solucionan totalmente las ineficiencias de *Sensing-Based SPS*. Por ello, en este capítulo estudiamos modificaciones al mecanismo de gestión de recursos estandarizado en LTE-V2X. En concreto, estudiamos dos enfoques diferentes. El primero consiste en realizar modificaciones al algoritmo *Sensing-Based SPS*, pero manteniendo la mayor parte de su funcionamiento. En este caso, las propuestas están bastante alineadas con el estándar y buscan mitigar sus ineficiencias, aunque en cierta medida el margen de mejora que da limitado por las características de LTE-V2X ya analizadas. La segunda opción es el diseño de un mecanismo de gestión de recursos alternativo a *Sensing-Based SPS*, que intente solucionar las ineficiencias encontradas. Este mecanismo de gestión alternativo deberá, sin embargo, tener en cuenta la estructura de división en tiempo y frecuencia de LTE-V2X, así como su capa física, de forma que se garantice la viabilidad de su implementación.

Siguiendo estas premisas, en este capítulo presentamos varias propuestas evaluadas como parte del trabajo de esta tesis. En el apartado 7.2 presentamos



dos modificaciones distintas al algoritmo *Sensing-Based SPS*, acotadas por la premisa de mantener la mayor parte de su funcionamiento. La primera de ellas evalúa la modificación de la *Sensing Window*, el periodo de tiempo previo a una reelección en el cual se efectúan medidas de señal en el canal para posteriormente ser utilizadas en el algoritmo de reelección. Esta propuesta, expuesta en el apartado 7.2.1, está desarrollada dentro de nuestra publicación de conferencia [40]. La segunda propuesta de modificación a *Sensing-Based SPS* se basa en la utilización de distintas reservas para distintos tamaños de paquete generados por la capa de aplicación. Explicamos esta propuesta en el apartado 7.2.2, mientras que en nuestro artículo [45] (incluido en Anexo A) se expone de forma más detallada. En el apartado 7.3 resumimos y discutimos una propuesta de gestión de recursos alternativa para LTE-V2X publicada en [51] (incluida en Anexo A), que trata de aprovechar la información recibida por cada vehículo (posición, velocidad, etc.) de los demás vehículos en la vía para realizar una gestión de recursos que evite las ineficiencias encontradas para *Sensing-Based SPS*. Finalmente, en el apartado 7.4 expondremos la propuesta de una posible colaboración entre IEEE 802.11p y LTE-V2X en un hipotético escenario futuro de coexistencia de ambas tecnologías en todos los vehículos. Evaluaremos un mecanismo de gestión de recursos alternativo para LTE-V2X en entornos urbanos apoyado por la información recibida mediante la interfaz IEEE 802.11p. Esta propuesta está detallada en nuestra publicación de conferencia [52]. En el apartado 7.5 concluiremos este capítulo con las conclusiones obtenidas, además de un listado de los detalles y resultados adicionales que pueden ser encontrados en nuestras publicaciones, incluidas en Anexo A.

## 7.2. Modificaciones al algoritmo estandarizado

En este apartado evaluamos modificaciones al algoritmo *Sensing-Based SPS* que podrían suponer una mejora de rendimiento para LTE-V2X. Sin embargo, estas modificaciones son limitadas con el propósito de seguir una alineación fuerte con el estándar. Sin embargo, esto producirá que las mejoras de rendimiento producidas por estas modificaciones estén limitadas por las propias ineficiencias inherentes al funcionamiento de *Sensing-Based SPS*. Como hemos introducido en el apartado 7.1, evaluamos dos propuestas siguiendo esta pauta en los siguientes subapartados 7.2.1 y 7.2.2.

### 7.2.1. *Sensing Window* modificada

El estándar establece que se deben tener en cuenta los valores de RSSI medidos durante 1 segundo antes de la selección de recursos, periodo llamado *Sensing Window*. El Paso 3 de *Sensing-Based SPS* funciona en base a estas medidas. El Paso 3 de *Sensing-Based SPS* ordena los CSR según la media de RSSI medida a lo largo de *Sensing Window*. Sin embargo, dado que en 1 segundo muchos de los vehículos reeleccionan recursos, el Paso 3 puede considerar un alto RSSI medio para recursos que ya se han dejado libres, y considerar un bajo



RSSI medio para recursos que ya están ocupados, pero han estado vacíos durante la mayor parte de *Sensing Window*. La razón por la que el estándar establece a 1 segundo la ventana en lugar de medir el RSSI reciente es debido a que se soportan intervalos entre paquetes de hasta 1 segundo (1pps).

Si bien la duración de *Sensing Window* no es parametrizable según el estándar, hemos considerado la posibilidad de que acortarla produzca alguna mejora. Por ello, hemos analizado la reducción de *Sensing Window* a 0.5 y 0.1 segundos. Además, evaluamos una ponderación exponencial de RSSI en el Paso 3 de forma que tengan más peso las medidas de RSSI más recientes, siempre dejando el Paso 2 como el especificado en el estándar. Para este estudio utilizamos, como en 4.2.1, el modelo de generación simplificado y el escenario de autopista con 120veh/km. Los resultados para 10pps no varían en ningún caso debido a la baja carga en el canal. Para el caso de 50pps, representado en la Figura 38, sólo se obtienen mejoras a distancias cortas poco relevantes.

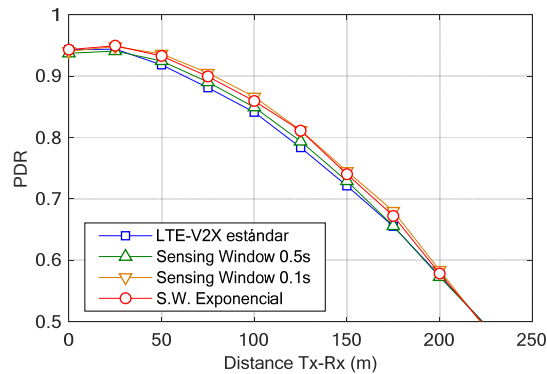


Figura 38. PDR de LTE-V2X con variaciones en *Sensing Window* (50pps, 120veh/km)

Para explicar que no haya diferencias demasiado significativas, nos referimos a la evaluación del Paso 2 y Paso 3 de *Sensing-Based SPS* por separado, realizada en el apartado 4.3.2. En ella concluíamos que el Paso 3 realmente tiene una relevancia limitada, por lo que las variaciones de *Sensing Window* evaluadas en este apartado no son muy efectivas.

### 7.2.2. Reserva distinta para distintos tamaños de paquete

En un modelo de generación de CAM con distintos tamaños de paquete, como el utilizado por el 3GPP descrito en el apartado 3.4.2, el algoritmo *Sensing-Based SPS* no puede adaptar el tamaño de la reserva a cada paquete generado. Si consideramos una división del canal en 4 subcanales con 12RBs cada uno, uno de cada 5 paquetes (300 bytes) ocupará dos subcanales, y los otros 4 (190 bytes) ocuparán un subcanal. Las reservas realizadas para paquetes de 190 bytes no se mantendrán hasta que el *Reselection Counter* llegue a cero, sino que se forzará una reelección extra por tamaño al llegar el paquete de 300 bytes. La nueva reserva de dos subcanales, a medida del paquete de 300 bytes, se mantendrá incluso para los paquetes de 190 bytes siguientes, cuya transmisión

sólo ocupa un subcanal. Esto hará que los demás vehículos excluyan un subcanal que realmente no está siendo utilizado para transmitir. Como posible solución para la generación con varios tamaños de paquete, proponemos no realizar reservas para los paquetes de mayor tamaño. De esa manera, en el caso del modelo 3GPP, para los paquetes de 190 bytes que son la mayoría, se realizan reservas mediante el algoritmo *Sensing-Based SPS* de un solo subcanal. Esto evita reservar subcanales no utilizados para transmitir estos paquetes más pequeños. En el caso de los paquetes de 300 bytes, utilizamos una transmisión llamada *one-shot*, que consiste en seleccionar para este paquete nuevos subcanales para transmitir mediante el algoritmo *Sensing-Based SPS*. Estos subcanales son exclusivamente utilizados para transmitir el paquete de 300 bytes y no se realiza una reserva en el SCI para los siguientes paquetes. Como resultado, las selecciones para paquetes de 300 bytes sí tendrán en cuenta las reservas realizadas para los paquetes de 190 bytes. El inconveniente es que los paquetes de 300 bytes podrán producir colisiones, ya que otros vehículos no pueden evitarlos mediante sensado al no transmitir en recursos reservados de antemano. Sin embargo, los paquetes de 300 bytes son menos frecuentes, con lo que el perjuicio de transmitirlos sin reserva puede ser asumible. La Figura 39 muestra la PDR en un escenario de autopista con 120veh/km para varias tasas de generación de paquetes con el modelo 3GPP. Comparamos el rendimiento del algoritmo *Sensing-Based SPS* tal cual esta estandarizado con la modificación propuesta de no utilizar reservas para los paquetes de 300 Bytes. Se observa una mejora del rendimiento con nuestra propuesta a distancias medias en casos de alta ocupación del canal. El resultado muestra que hay una potencial mejora al no utilizar reservas para los paquetes más grandes en modelos de generación de paquetes de distintos tamaños.

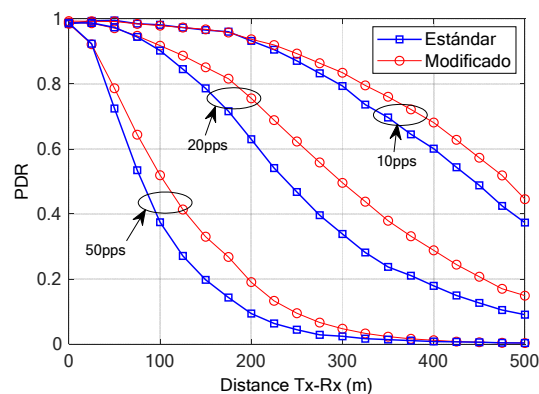


Figura 39. PDR con *Sensing-Based SPS* modificado para no realizar reservas en los paquetes más grandes. (transmisión redundante, 120veh/km)

### 7.3. Algoritmo de selección de recursos basado en geolocalización

Las modificaciones analizadas en el apartado 7.2 buscan mejorar el rendimiento del algoritmo de gestión de recursos en LTE-V2X, *Sensing-Based*

*SPS*. Otros autores han propuesto algunas modificaciones a *Sensing-Based SPS*, pero siempre manteniendo la mayor parte de su funcionalidad. Por ejemplo, [53] propone que los vehículos deben ejecutar el algoritmo de reelección antes de agotar el *Reselection Counter* para informar a otros vehículos. [54] propone que cada vehículo debe incluir en el SCI el valor de su *Reselection Counter* para que los demás vehículos tengan en cuenta cuántas transmisiones quedan antes de liberar los recursos reservados. [55] evalúa la posibilidad de descartar algunos paquetes en escenarios con alta carga. En el capítulo 4 también proponemos un estudio de los parámetros de *Sensing-Based SPS* para optimizar sus valores, no especificados por el 3GPP. En cualquiera de los casos descritos, las mejoras son limitadas debido a las ineficiencias inherentes al algoritmo *Sensing-Based SPS*. Dentro de estas ineficiencias están el problema de terminal oculto (debido al sensado con rango limitado) y las desventajas que producen las reservas y reelecciones, que han sido analizadas en el capítulo 6.

Este apartado propone un algoritmo de selección de recursos radio alternativo al algoritmo *Sensing-Based SPS* definido en LTE-V2X dadas las carencias y limitaciones demostradas en anteriores capítulos. La propuesta se basa en explotar información de contexto, y en concreto de geolocalización. De hecho, los paquetes transmitidos en comunicaciones V2X (como CAM) incluyen datos como posición y velocidad de los vehículos, que podría ser explotada para la asignación de recursos. La propuesta que resumimos en este apartado, contrariamente a los anteriores planteamientos publicados, presenta un mecanismo de gestión de recursos distribuido (sin apoyo de la red celular) para LTE-V2X totalmente distinto de *Sensing-Based SPS*. La intención de este nuevo mecanismo es evitar el problema de terminal oculto y reelecciones de *Sensing-Based SPS*. Nuestra técnica se basa en el aprovechamiento de la información de contexto (posición y velocidad) recibidos del resto de vehículos para realizar la selección de recursos. En concreto, la técnica que denominaremos *Geo-Based Scheduling*, busca formar un orden en cola de los vehículos, de forma que los vehículos sigan ese mismo orden a la hora de seleccionar el recurso donde transmitir.

### 7.3.1. Descripción del algoritmo *Geo-Based Scheduling*

El objetivo de *Geo-Based Scheduling* es reducir las colisiones entre transmisiones coordinando la selección de subcanales entre vehículos, incluso entre vehículos que no pueden detectarse entre ellos. Para lograrlo, los vehículos utilizan la información de posición y velocidad incluida en los CAM intercambiados para formar una cola virtual. El orden de los vehículos en la cola virtual es utilizado para seleccionar recursos radio de forma determinista. Este ‘mapeo’ determinista de posición en cola a subcanales escogidos está diseñado para maximizar la distancia a la que se encuentran dos vehículos que utilizan los mismos recursos.

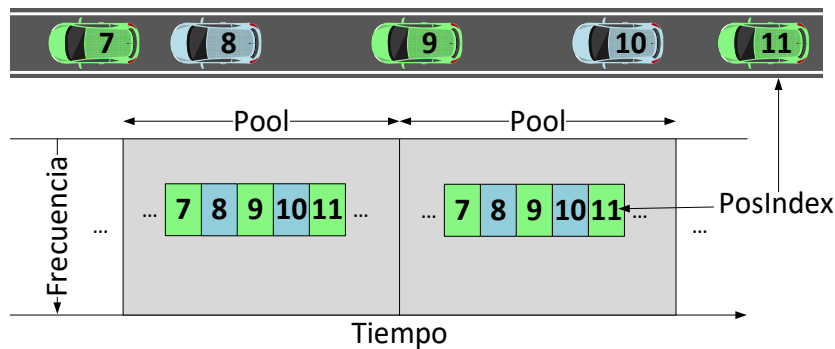


Figura 40. Principio básico de Geo-Based Scheduling

El mecanismo propuesto organiza los recursos en *Pools* que son comunes para todos los vehículos. Definimos un *Pool* como el conjunto de subcanales incluidos en todas las subtramas de un periodo dado (ver Figura 40). La duración de este periodo es igual al intervalo entre paquetes (CAMs) generados en capas superiores. Todos los vehículos tienen sincronizado el final de cada *Pool* (e inicio del siguiente) utilizando el *Direct Frame Number* (DFN) definido en el estándar LTE [27], que permite sincronizar periodos sin apoyo de la red celular. Sin embargo, esto no implica que la generación de CAMs deba estar sincronizada entre vehículos. *Geo-Based Scheduling* se ejecuta de forma completamente distribuida en todos los vehículos independientemente. A continuación, resumimos los pasos seguidos en *Geo-Based Scheduling* al final de cada *Pool* para seleccionar recursos (Figura 41)<sup>9</sup>.

- 1) Todos los vehículos, en el instante final de un *Pool*, estiman la posición de los vehículos a su alrededor. Para ello, los vehículos utilizan los campos de posición geográfica, velocidad y *TimeStamp* de los CAMs transmitidos por los vehículos cercanos.
- 2) Cada vehículo construye una cola virtual con el orden de sus vehículos cercanos basándose en su posición estimada. La posición de cada vehículo es representada por un número entero que llamaremos *PosIndex* (ver Figura 40). Este número puede tomar valores entre 0 y  $N-1$ , siendo  $N$  el número de subcanales dentro de cada *Pool*. Los vehículos adjuntan su propio *PosIndex* a sus CAM transmitidos<sup>10</sup>.
- 3) Para calcular su *PosIndex*, cada vehículo tiene en cuenta el orden de los vehículos en la cola virtual y su *PosIndex* asociado. Este cálculo es la parte más crítica del algoritmo, y tiene en cuenta posibles errores de estimación de orden y *PosIndex* en otros vehículos, convergiendo siempre a una cola ordenada de manera rápida. Además, es resistente a cambios de posición frecuentes en la cola debido a la alta movilidad de los vehículos en un entorno de autopista. Describiendo este cálculo de modo simplificado, el vehículo debe tener en cuenta los *PosIndex* de los

<sup>9</sup> El lector puede encontrar los detalles concretos de implementación del algoritmo en nuestro artículo [51] incluido en Anexo A. Dicho artículo describe de forma y detallada el funcionamiento de cada uno de estos pasos.

<sup>10</sup> En nuestras evaluaciones es tenido en cuenta el aumento de un máximo de 12 bits que supone adjuntar el *PosIndex* en los paquetes transmitidos.

vehículos que lo preceden en la cola y seleccionar el *PosIndex* que mejor corresponda con la mayoría de estos vehículos.

- 4) Los vehículos seleccionan los recursos para transmitir dentro del siguiente *Pool* en base a su *PosIndex* calculado. Esta selección tiene en cuenta los posibles errores por colisión y *half duplex* que se pueden producir, de forma que los vehículos que produzcan estos errores estén lo más alejados posible.

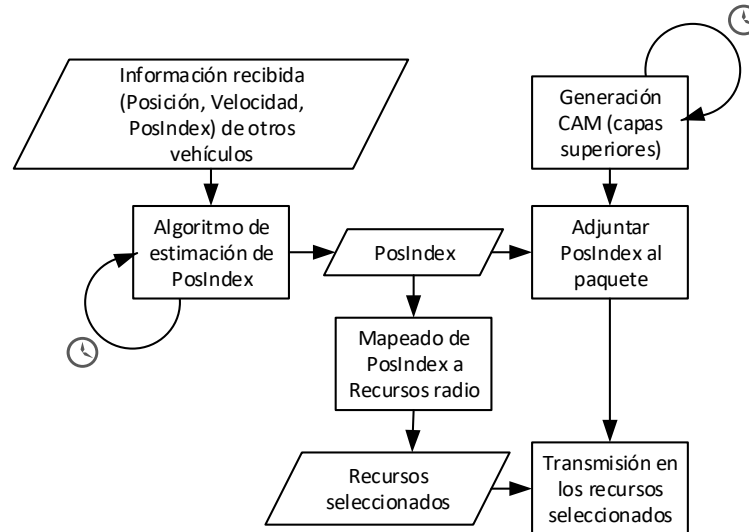


Figura 41. Funcionamiento del mecanismo de gestión de recursos Geo-Based Scheduling

Una vez descrito el funcionamiento principal, debemos hacer algunas puntualizaciones. Por un lado, la selección de recursos no es totalmente determinista, sino que se añade un pequeño grado de aleatorización determinando, en lugar de unos recursos concretos asignados a cada *PosIndex*, un conjunto limitado dentro del cual se escoge aleatoriamente. La razón es que, a pesar de que el algoritmo de cálculo de *PosIndex* está diseñado para ser robusto, siempre pueden existir situaciones en las que se produzcan errores en la ordenación. Un error puntual no es problemático puesto que el algoritmo es capaz de subsanarlo rápidamente, pero en algunas improbables situaciones es posible que se produzca un error que no se subsane automáticamente y persista en el tiempo. Por ejemplo, en una situación en la que un convoy de vehículos alcanza a otro que en principio estaban muy alejados para escucharse como en la Figura 42.a, pero casualmente el último vehículo del convoy alcanzado tiene el mismo *PosIndex* que el primero del convoy perseguidor. En este caso, estos dos vehículos no se escucharán entre ellos y por tanto no se detectarán, con lo que el error persistirá provocando una situación peligrosa. Es más, tras un tiempo sin detectarse mutuamente, el siguiente vehículo no podrá detectarlos y escogerá también el mismo *PosIndex*, como en la Figura 42.b. Eventualmente, todos los vehículos acabarán escogiendo el mismo *PosIndex*, lo que conllevará un colapso de las comunicaciones como en la Figura 42.c. Es por ello que es necesario flexibilizar la técnica mediante la aleatorización propuesta aunque a priori pueda parecer que se pierda algo de eficiencia.

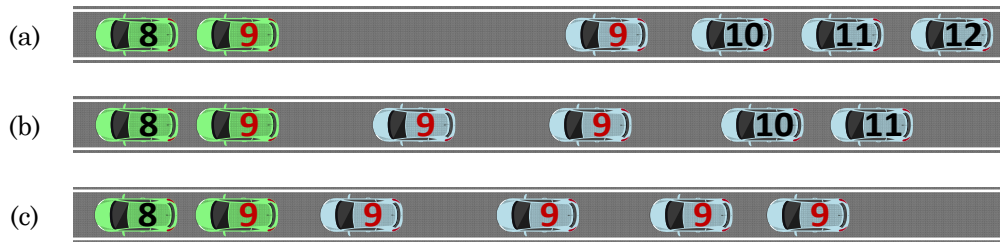


Figura 42. Ejemplo de colapso del mecanismo de gestión sin transmisiones aleatorizadas.

Por otro lado, aunque por simplicidad hemos considerado carreteras con un solo carril y sentido en la descripción de *Geo-Based Scheduling*, es posible utilizar el algoritmo para dos sentidos y varios carriles, simplemente tomando como criterio para la ordenación la posición a lo largo de la carretera, independientemente del sentido o carril. Retomando la definición del valor de *PosIndex*, este sigue un orden ascendente en el mismo sentido del kilometraje de la autopista. Si el *PosIndex* de un vehículo es  $X$ , el *PosIndex* del vehículo inmediatamente posterior, siguiendo el sentido de las marcas de kilómetros (independientemente del sentido de ambos vehículos), deberá ser  $X+1$ . En la Figura 43 se muestra un ejemplo del valor de *PosIndex* a lo largo de una carretera con dos sentidos. Dada la gran adaptabilidad a cambios conseguida con el algoritmo de estimación, la técnica es capaz de sobreponerse sin apenas errores a la gran cantidad de cambios de posición por vehículos en sentidos contrarios.



Figura 43. Asignación de *PosIndex* para cola virtual en dos sentidos

### 7.3.2. Modelo analítico de *Geo-Based Scheduling*

Como parte del desarrollo de *Geo-Based Scheduling*, hemos creado un modelo analítico que calcula el rendimiento de LTE-V2X utilizando este mecanismo de gestión de recursos. El funcionamiento del modelo se basa en el cálculo de probabilidades para cada tipo de error posible en la transmisión de mensajes, en función de la distancia entre el vehículo emisor y el receptor. La probabilidad de error por propagación es calculada utilizando las fórmulas de *pathloss* y *shadowing*, junto con las curvas BLER-SINR que modelan el funcionamiento de la capa física de LTE-V2X en nuestro simulador (véase apartado 3.3). La probabilidad de error por *Half Dúplex* está calculada analizando la probabilidad de que un vehículo receptor, situado a una distancia dada, transmita en la misma subtrama que el emisor. Por lo tanto, dependerá de las subtramas asignadas al *PosIndex* del emisor y del receptor, lo cual a su vez depende de la cantidad de vehículos entre ellos que está determinada por la densidad de vehículos dada la distancia entre emisor y receptor. La probabilidad de error por colisión se calcula teniendo en cuenta la posibilidad e intensidad de la interferencia a una transmisión que pueden producir todos



los vehículos del escenario. Cada interferencia (proveniente de cada vehículo del escenario) está modelada por la probabilidad de que la interferencia utilice los mismos subcanales que la transmisión, y por la intensidad de la interferencia dada la distancia entre el vehículo interferente y el receptor.

El modelo desarrollado para *Geo-Based Scheduling* analítico valida el funcionamiento de este mecanismo de gestión de recursos. Como puede observarse en la Figura 44, la obtenida en nuestras simulaciones concuerda con la calculada mediante el modelo analítico. Esto supone que el funcionamiento de *Geo-Based Scheduling* se ajusta al esperado. De hecho, el modelado analítico de *Geo-Based Scheduling* ha sido fundamental para el desarrollo del mecanismo de mapeo de un *PosIndex* dado a los recursos radio donde transmitir en el *Pool*, ya que provee de una comprensión en profundidad de cómo minimizar los errores por *Half dúplex* y colisión.

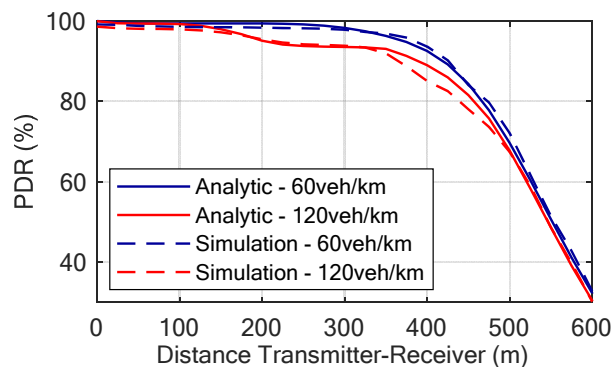


Figura 44. PDR de LTE-V2X utilizando *Geo-Based Scheduling* según el modelo analítico y las simulaciones realizadas (vehículos transmitiendo a 10pps)

### 7.3.3. Evaluación

Evaluamos el mecanismo de gestión de recursos propuesto en un escenario de autopista con dos sentidos como el descrito en el apartado 3.4.1 y utilizando el modelo de generación de paquetes del 3GPP. Debido al movimiento de los vehículos, pueden existir algunos errores en el orden de la cola. Como medida del número de errores de ordenación, establecemos el porcentaje de veces a lo largo de la simulación y entre todos los vehículos que cada vehículo considera su *PosIndex* como el inmediatamente siguiente (uno más) al vehículo que le precede en la cola. Los resultados muestran que un 99.4% y 99.2% de las de las estimaciones de *PosIndex* son correctas para 60veh/km y 120veh/km respectivamente, lo que muestra que la ordenación está muy cerca de ser óptima. Esta baja cantidad de errores de ordenación se produce a pesar de la cantidad de cambios de posición que se producen en el escenario debido al movimiento de los vehículos en ambos sentidos. Figura 45 muestra el porcentaje de vehículos en el escenario que han cambiado de posición en la duración de cada *Pool*, conjuntamente con el porcentaje de errores de selección de *PosIndex*. Se muestran estos porcentajes para cada *Pool* en una duración de 10 segundos de evaluación. Como se puede apreciar, el porcentaje de errores es

mucho menor que el de cambios, de lo que se deduce que el algoritmo es capaz de soportar una gran movilidad satisfactoriamente.

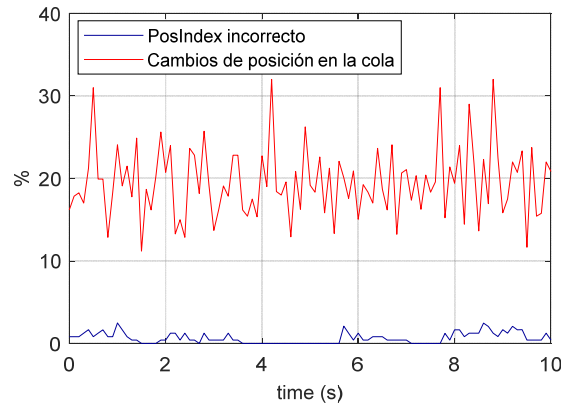


Figura 45. Porcentaje de vehículos que intercambian su posición en la cola virtual en cada Pool, junto a porcentaje de errores de estimación de PosIndex. Escenario 120veh/km y

En la Figura 46 comparamos la PDR de *Geo-Based Scheduling* con la del algoritmo estandarizado *Sensing-Based SPS*, con una tasa de generación de paquetes de 10pps. Podemos observar que nuestra técnica aumenta significativamente el rendimiento respecto a *Sensing-Based SPS*, y que esta diferencia se acentúa al aumentar la densidad de vehículos. De hecho, este aumento de densidad produce una bajada de PDR más acusada en *Sensing-Based SPS* puesto que nuestra técnica es más robusta frente a un aumento de la carga en el canal. Esto es debido a una mejor organización de los recursos radio. En la Figura 47 mostramos los errores por colisión utilizando ambos algoritmos. Se muestran junto a los errores por propagación, iguales para ambos algoritmos ya que nuestra propuesta no modifica la capa física. Observamos que los errores por colisión son significativamente menores para *Geo-Based Scheduling* que para el algoritmo estandarizado.

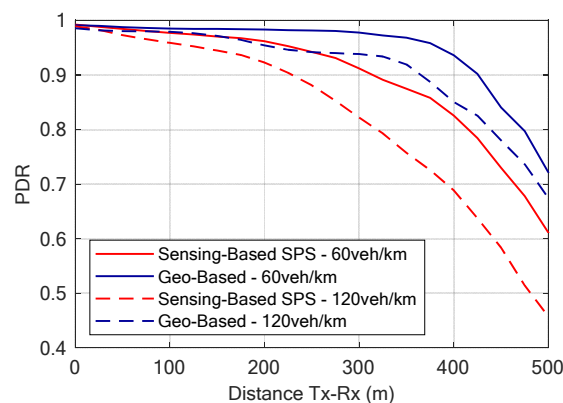


Figura 46. PDR utilizado el algoritmo propuesto (*Geo-Based*) y el algoritmo estandarizado (*Sensing-Based SPS*). Tasa de generación 10pps.



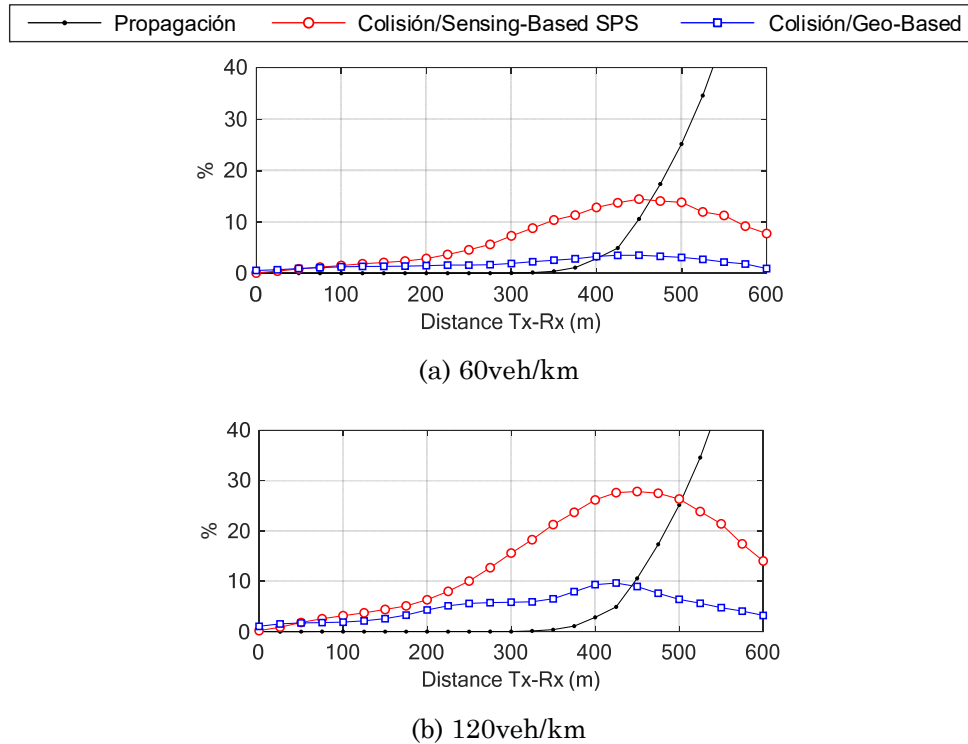


Figura 47. Errores por colisión y propagación

Si bien los errores por colisión no se eliminan completamente, es destacable que ningún mecanismo de gestión de recursos puede garantizar la ausencia total de errores por colisión a cualquier distancia con una alta carga, puesto que el número de subcanales es limitado. Sin embargo, nuestra propuesta ha sido diseñada para que estos errores se produzcan a la mayor distancia posible entre transmisor y receptor. Es posible observar mejor esto en la Figura 48, donde comparamos la PDR de ambos algoritmos para una tasa de generación de paquetes de 50pps, que produce una alta congestión en el canal. Esta alta tasa de generación de paquetes es propia de aplicaciones de vehículo autónomo. La Figura 48 muestra cómo el algoritmo propuesto es capaz de soportar mejor la congestión, aumentando la distancia a la cual se observa una degradación en la PDR<sup>11</sup>. Esta conclusión es reforzada por los datos que incluimos en la Tabla 9, donde mostramos la máxima distancia a la cual se supera un valor de PDR de 0.9. Este valor de PDR es comúnmente utilizado como el umbral a partir del cual las comunicaciones V2X son fiables [4][38].

<sup>11</sup> La abrupta bajada de PDR que se observa alrededor de una distancia de 325 entre emisor y receptor en la Figura 48 es debida a los fallos por *Half dúplex*, debido a que esa es la máxima distancia a la que se encuentran los vehículos que deben seleccionar una misma subtrama debido a la densidad de vehículos de ese escenario.

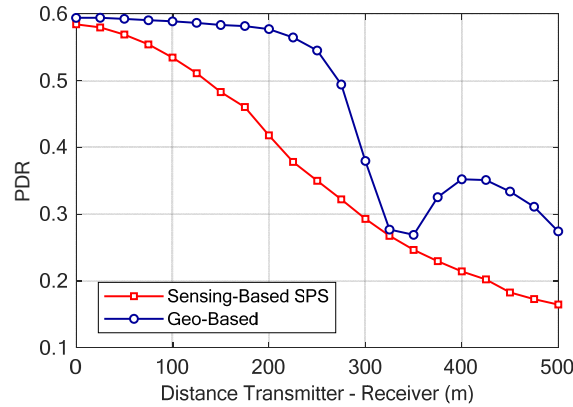


Figura 48. PDR utilizado el algoritmo propuesto (Geo-Based) y el algoritmo estandarizado (Sensing-Based SPS) para aplicaciones de vehículo autónomo. Escenario 60veh/km y

Densidad (veh/km)	Tasa generación (pps)	Sensing-Based SPS (m)	Geo-Based (m)	Mejora (%)
60	10	316	426	34.8
	20	245	407	66.1
	50	80	244	205
120	10	229	365	59.4
	20	117	283	141.9
	50	31	107	245.2

Tabla 9. Distancia a la cual se garantiza una PDR de 0.9

## 7.4. Coexistencia entre LTE-V2X y IEEE 802.11p

### 7.4.1. Posibilidad de colaboración entre tecnologías

En la actualidad, como introducimos en el apartado, existe un debate en la industria y en las instituciones públicas sobre la tecnología de comunicaciones V2X que debería dar soporte a las aplicaciones de vehículo conectado y autónomo. Mientras que en el capítulo 6 realizamos una comparativa de las dos tecnologías candidatas, IEEE 802.11p y LTE-V2X, existe también la posibilidad de que ambas tecnologías coexistan en un futuro, de forma que los mensajes utilizados por las aplicaciones de vehículo conectado y autónomo sean transmitidas por ambas en todos los vehículos. Esta posibilidad viene dada por un principio de neutralidad tecnológica que se contempla en las instituciones legislativas, que intenta no favorecer o perjudicar ninguna de las tecnologías candidatas. Mientras que una posibilidad es la elección de la mejor tecnología, si esta elección no resulta clara a las instituciones públicas, estas podrían decantarse por una división del espectro disponible para comunicaciones V2X entre las dos tecnologías. Dado que ambas tecnologías no son interoperables entre sí (una interfaz IEEE 802.11p no puede recibir transmisiones de una LTE-V2X y viceversa), todos los vehículos deberían poder intercomunicarse entre sí, con lo que todos deberían estar obligados a incorporar una interfaz IEEE 802.11p y otra LTE-V2X para transmitir. Si bien esta solución no es la

más eficiente desde el punto de vista de asignación de espectro<sup>12</sup>, la redundancia podría conllevar un aumento en la fiabilidad de las comunicaciones V2X en comparación con el empleo de una tecnología en un único canal, lo cual es deseable por su importancia en el futuro de la seguridad vial y la conducción autónoma.

Más allá de este posible escenario futuro, nuestra propuesta es que, de considerarse que la redundancia en las comunicaciones V2X sea deseable y factible en términos de asignación de espectro, lo más eficiente será utilizar tecnologías diferentes pero complementarias en lugar utilizar dos (o más) interfaces de la misma tecnología. Nos basamos en el hecho de que, cuanto mayor correlación tenga la transmisión de dos transmisiones redundantes del mismo paquete, menor será la ganancia que produzca dicha redundancia. Si ambas transmisiones están muy correladas (por ejemplo, al ser transmitidas mediante interfaces radio iguales), las posibilidades de que fallen a la vez son mayores. Por el contrario, es esperable obtener mayores ganancias con la redundancia en el caso de que las dos transmisiones tengan una baja correlación entre ellas, de forma que sea más improbable que se produzca un error en ambas a la vez.

Las tecnologías candidatas IEEE 802.11p y LTE-V2X son diferentes a nivel de capa física, lo cual ya supone un cierto nivel de diversidad para la transmisión redundante que confirma el interés en la opción de transmitir utilizando ambas interfaces a la vez. Sin embargo, aunque sus capas MAC no son iguales, ambas basan su selección de recursos radio en el sensado de las transmisiones provenientes de otros vehículos. Esto supone un cierto grado de correlación, que limita la ganancia en fiabilidad por la transmisión redundante debido a que ambas tecnologías están afectadas por el problema de terminal oculto. Por otro lado, puede ser interesante que exista una cooperación entre ambas tecnologías para aumentar la diversidad en la gestión de recursos, de forma que las transmisiones de ambas interfaces sean complementarias. Utilizando estas premisas, hemos desarrollado un mecanismo colaborativo para mejorar la fiabilidad, centrándonos en las condiciones más difíciles, y que por ende son aquellas que más requieren de un aumento de fiabilidad: condiciones NLOS (no visión directa) en entornos urbanos. Esta técnica considera la transmisión redundante por dos interfaces, una IEEE 802.11p especializada en las transmisiones a corta distancia, y otra LTE-V2X que se apoya en la información de contexto recibida de otros vehículos cercanos mediante la interfaz IEEE 802.11p para seguir un algoritmo de asignación de recursos que permita mejorar el rango de las transmisiones NLOS. Las transmisiones NLOS en un escenario urbano son importantes, dado que los vehículos aproximándose a una misma intersección por calles distintas en un mismo instante se acabarán encontrando. Las intersecciones son una situación de riesgo y maniobras complejas para conducción autónoma, y las comunicaciones V2X tienen la capacidad de anticipar la presencia de vehículos en otras calles antes de llegar

---

<sup>12</sup> Tampoco es eficiente desde el punto de vista económico al tener que incorporar dos interfaces cada vehículo en lugar de una, pero se asume que el valor de esta redundancia será despreciable comparado al valor de un vehículo.

a una intersección, al contrario que las cámaras y sensores de proximidad como lidar.

### 7.4.2. Gestión de recursos para LTE-V2X asistida por IEEE 802.11p

Nuestra propuesta divide los recursos radio de LTE-V2X en *Pools*. Definimos un *Pool* como todos los recursos del canal en un periodo dado, de la misma manera que en el algoritmo de gestión de recursos *Geo-Based Scheduling* descrito en el apartado 7.3. Recordemos que la duración de este periodo es igual al intervalo entre paquetes (CAMs) generados en capas superiores y los vehículos tienen sincronizado el final e inicio de los *Pools*. A partir de ahí, cada *Pool* se divide en tantos *Subpools* como calles entrantes a una intersección (4 calles en el ejemplo de Figura 49.a). Cada uno de estos *Subpool* está reservado para los vehículos que circulan en dirección a la intersección desde cada una de las calles entrantes (Figura 49.b). Con esto logramos que los vehículos que se aproximan a una intersección desde distintas calles, y por tanto en condiciones NLOS, nunca transmitan en la misma subtrama. Esto impide la posibilidad de colisiones debido a terminal oculto entre ellos, y errores por *Half dúplex* entre vehículos.

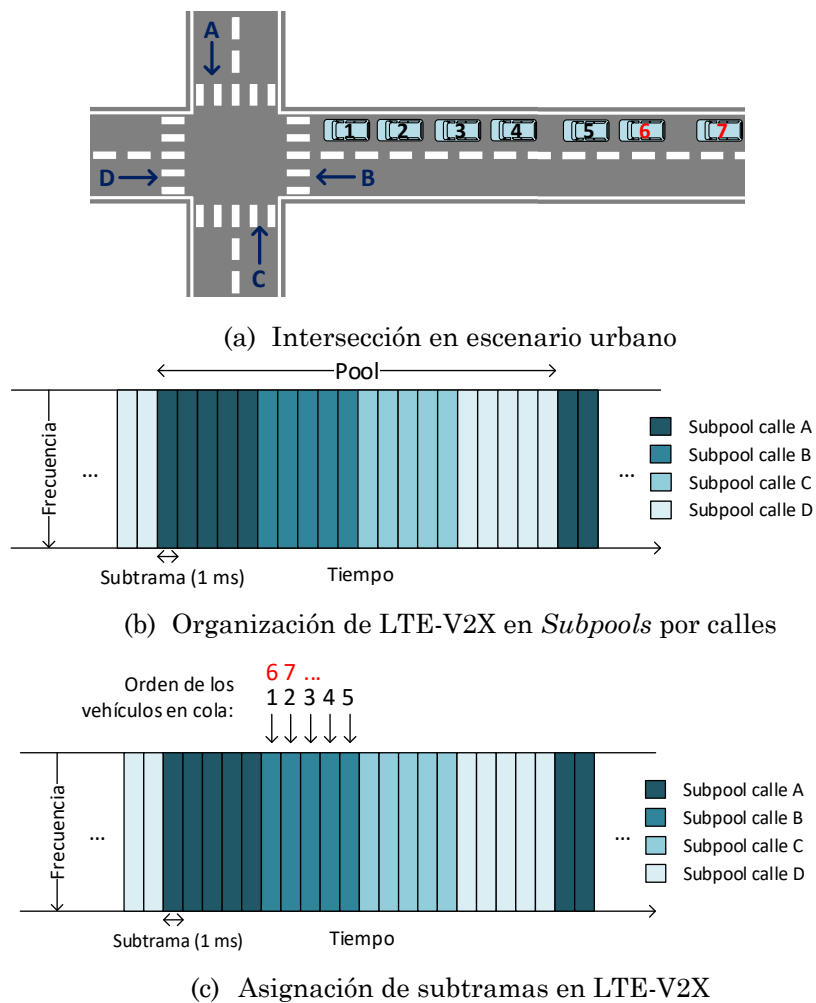


Figura 49. Mecanismo de gestión de recursos propuesto para LTE-V2X asistido por IEEE 802.11p

Entre los vehículos de una misma calle entrante, se selecciona de forma determinista una subtrama dentro del *Subpool* asignado. Para ello, se considera una cola virtual desde la intersección, de manera que las subtramas son asignadas secuencialmente por orden de cola como muestra Figura 49.c. Para estimar su posición en la cola virtual, los vehículos utilizan la información de contexto incluida en los CAMs transmitidos por los vehículos de su misma calle. Estos CAMs serán correctamente transmitidos mediante la interfaz IEEE 802.11p. En el caso de que el número de vehículos en la cola virtual de una calle supere el número de subtramas en el *Subpool* asignado, los vehículos deben compartir subtramas siguiendo el orden de la cola. Por ejemplo, en la Figura 49.c los vehículos con posición 6 y 7 en la cola deben compartir subtrama con los vehículos con posición 1 y 2 respectivamente. Con este método se maximiza la distancia entre vehículos que utilizan la misma subtrama. Los subcanales dentro de la subtrama son escogidos de manera aleatoria. Esta aleatorización es necesaria para añadir cierta flexibilidad al algoritmo, de forma que se eviten errores por colisión persistentes en el tiempo. Cuando un vehículo sobrepasa una intersección y entra en un nuevo segmento, selecciona la nueva subtrama donde transmitir de acuerdo a su situación respecto a la nueva intersección a la que se dirige.

El mecanismo de gestión de recursos propuesto trata de minimizar los errores de LTE-V2X en transmisiones de vehículos que se aproximan a una intersección en condiciones NLOS. Esta mejora de transmisiones NLOS se realiza a costa de asumir más errores de las transmisiones de vehículos en la misma calle con LTE-V2X. Sin embargo, es necesario destacar que IEEE 802.11p no sufre ninguna modificación, y las transmisiones mediante la interfaz IEEE 802.11p en condiciones LOS alcanzan un rango satisfactorio. El mecanismo propuesto prioriza las transmisiones NLOS mediante la interfaz LTE-V2X, que tiene un mayor alcance en condiciones NLOS debido al mejor funcionamiento a nivel de capa física.

Evaluamos el mecanismo propuesto en un escenario urbano (descrito en el apartado 3.4.1), con el modelo de generación de paquetes propuesto por el 3GPP. Utilizamos transmisión redundante mediante dos interfaces, una IEEE 802.11p y otra LTE-V2X, cada una utilizando un canal distinto. En la Figura 50 observamos que el rendimiento de la transmisión redundante mejora significativamente en condiciones NLOS utilizando el mecanismo propuesto para LTE-V2X (IEEE 802.11p + IEEE 802.11p-assisted LTE-V2X) respecto a la utilización del estándar en ambas tecnologías (IEEE 802.11p + LTE-V2X). Como esperábamos, esto se produce a costa de un empeoramiento en condiciones LOS debido al peor rendimiento de LTE-V2X en estas condiciones. Sin embargo, el empeoramiento en condiciones LOS es asumible en comparación con la mejora producida en NLOS. El aumento del rango de transmisión conseguido en NLOS es muy importante debido a la importancia de las comunicaciones V2X en estas condiciones para el tráfico, y las dificultades para alcanzar una fiabilidad alta a mayores distancias debido a la obstaculización de edificios. Además, en condiciones de alta carga (50pps), la mejora porcentual en NLOS es superior al empeoramiento en LOS. Podemos observarlo con mayor detalle en la Tabla 10, donde incluimos el rango hasta el cual se consigue una PDR de 0.9 en los escenarios evaluados.

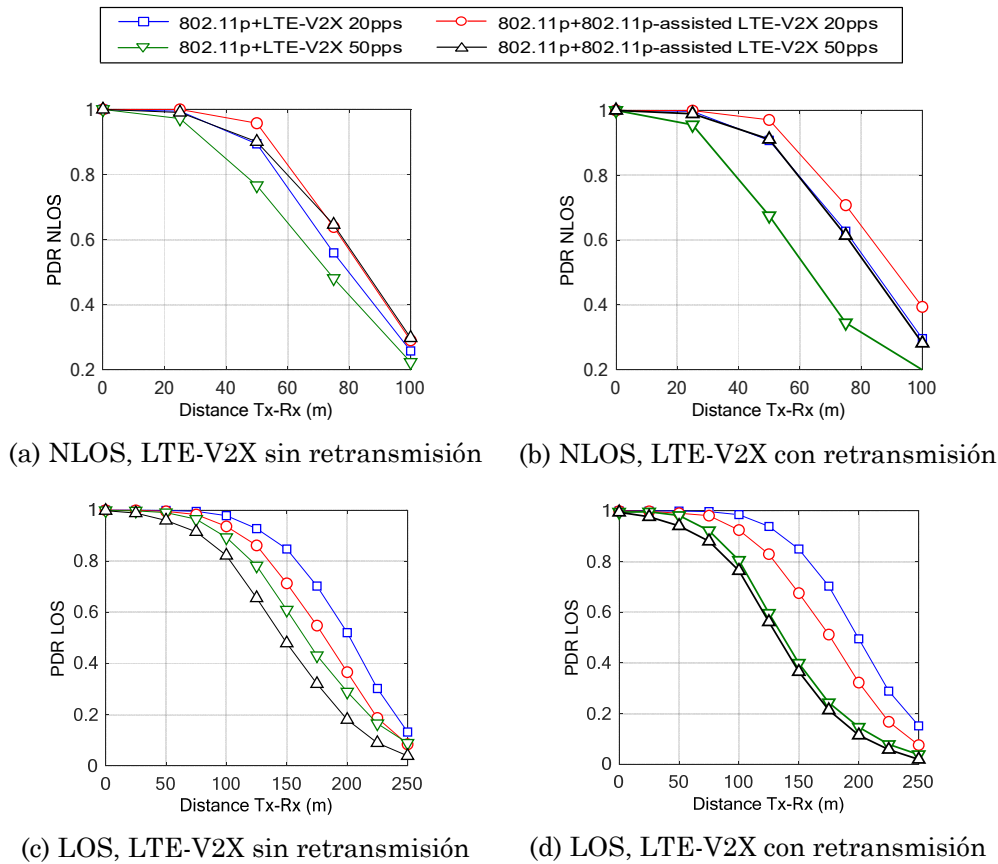


Figura 50. PDR con transmisiones redundantes de IEEE 802.11p y LTE-V2X en escenario urbano

Tasa de generación (pps)	Retransmisión en LTE-V2X	LOS/NLOS	Estándar (m)	Propuesta (m)	Variación relativa (%)
20	No	LOS	133.7	112.2	-16.1%
		NLOS	48.5	54.5	12.4%
	Sí	LOS	138.9	106.5	-23.3%
		NLOS	50.7	56.7	11.8%
50	No	LOS	97.5	79.0	-19.0%
		NLOS	33.7	50.1	48.7%
	Sí	LOS	79.7	66.9	-16.1%
		NLOS	29.9	50.9	70.2%

Tabla 10. Distancia a la que se consigue una PDR de 0.9 con transmisión redundante IEEE 802.11p + LTE-V2X

La mejora en NLOS, como pretendíamos, se produce por un descenso de los errores por colisión y *Half dúplex* de las transmisiones LTE-V2X entre los vehículos de distintas calles. En la Figura 51 podemos observar cómo los errores por *Half dúplex* son eliminados completamente gracias a la división en *Subpools* asignados a cada calle por separado, mientras que las colisiones decrecen gracias a la asignación ordenada de vehículos en cada *Subpool*.

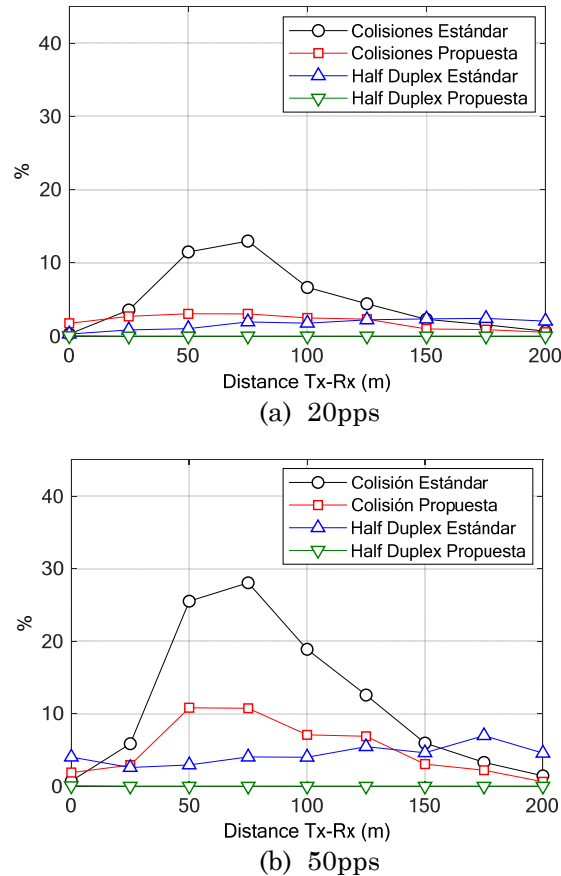


Figura 51. Errores por colisión y Half dúplex de la interfaz LTE-V2X en condiciones NLOS. Sin retransmisión.

## 7.5. Conclusiones y resultados adicionales

En este capítulo hemos propuesto y analizado posibles mejoras para el mecanismo de gestión de recursos distribuido y autónomo de LTE-V2X. Como vimos en capítulos anteriores, es posible mejorar el rendimiento obtenido con el mecanismo de gestión de recursos estandarizado, *Sensing-Based SPS*, debido a algunas ineficiencias en su funcionamiento que provocan errores por colisión entre las transmisiones de los distintos vehículos de un escenario.

Hemos evaluado dos modificaciones a *Sensing-Based SPS*, en ambos casos manteniendo la mayor parte de su funcionamiento. En primer lugar, hemos propuesto la variación del Paso 3 de *Sensing-Based SPS*, modificando la *Sensing Window*, es decir, el periodo de tiempo anterior al momento de la reelección de recursos durante el cual las medidas de RSSI en todos los subcanales son tenidas en cuenta para descartar los recursos candidatos en el Paso 3. Hemos concluido que dar prioridad a las medidas de RSSI más recientes en la *Sensing Window* podría ser beneficioso en escenarios de muy alta carga en el canal, pero la mejora es muy limitada debido a la poca influencia del Paso 3 en el rendimiento de *Sensing-Based SPS*. La segunda modificación propuesta para *Sensing-Based SPS* consiste en no realizar reservas de recursos para los



mensajes de mayor tamaño. Las reservas, por tanto, se realizarán para los mensajes más pequeños, evitando las reselecciones por tamaño que se producen al generarse un mensaje más grande y los subcanales que se reservan sin ser finalmente utilizados debido a que la reserva se realiza a medida de los mensajes más grandes. Esta modificación en las reservas consigue una mejora significativa del rendimiento en escenarios cargados. Las dos modificaciones a *Sensing-Based SPS* propuestas están muy alineadas con el estándar, de forma que no suponen una actualización profunda del mismo. Sin embargo, las mejoras obtenidas están limitadas por las ineficiencias inherentes al funcionamiento de *Sensing-Based SPS*.

Para obtener mejoras más relevantes en la gestión de recursos, hemos propuesto la creación de mecanismos de gestión de recursos alternativos para LTE-V2X, con un funcionamiento totalmente distinto de *Sensing-Based SPS*. En concreto, hemos propuesto el mecanismo de gestión de recursos *Geo-Based Scheduling*, que utiliza la información de contexto intercambiada entre los vehículos para realizar una asignación de recursos radio siguiendo el orden de los vehículos en una carretera. Este mecanismo ha sido diseñado detalladamente para tener un funcionamiento robusto y estable, de forma que hemos demostrado que los cambios de posición a alta velocidad de los vehículos no provoquen la aparición de errores en la asignación de recursos. El mecanismo *Geo-Based Scheduling* es capaz de aumentar el rendimiento de LTE-V2X muy significativamente, gracias a que está diseñado para maximizar la distancia entre los vehículos que utilizan los mismos recursos. La ordenación de vehículos consigue que exista una cooperación en la gestión de recursos incluso entre vehículos que no son capaces de detectarse mutuamente, ya que el orden es seguido mediante los vehículos que se encuentran entre ellos.

La segunda propuesta presentada en este capítulo surge de un posible escenario de coexistencia entre IEEE 802.11p y LTE-V2X, donde los vehículos implementen las dos interfaces radio. En este contexto, hemos propuesto que todos los vehículos transmitan sus mensajes por dos interfaces (una de cada tecnología), hemos propuesto la colaboración de ambas tecnologías para intentar aprovechar las fortalezas de cada una de forma que la fiabilidad total sea óptima. En concreto, hemos definido y desarrollado un mecanismo de gestión de recursos para LTE-V2X asistido por la información recibida por la interfaz IEEE 802.11p. Esta propuesta ha sido enfocada en esta tesis a mejorar la fiabilidad en entornos urbanos y en concreto a mejorar las comunicaciones V2X en intersecciones. Esta elección se fundamenta en la relevancia de las intersecciones para la seguridad y en el reto para las comunicaciones que suponen las intersecciones dada las condiciones de comunicación NLOS existentes entre vehículos que se aproximan a una intersección. Obtenemos una mejora significativa en condiciones NLOS en todos los escenarios, a costa de un ligero empeoramiento en condiciones LOS. El empeoramiento en condiciones LOS es asumible en un escenario urbano, de modo que se priorizan las transmisiones NLOS, muy importantes en las situaciones de riesgo que suponen las intersecciones en escenarios urbanos.



A continuación, listamos los detalles y resultados adicionales relativos a este capítulo que pueden encontrarse en nuestra publicación en conferencia<sup>13</sup> [52], y en nuestros artículos en revista [45] y [51], incluidos en Anexo A.

- Porcentajes de utilización de subcanales respecto al total de subcanales disponibles en el canal, y porcentaje de utilización de subcanales reservados en LTE-V2X utilizando *Sensing-Based SPS* y la modificación de no utilizar reservas para los paquetes de mayor tamaño presentada en 7.2.2. Se puede encontrar en [45].
- Detalle del modelo analítico del funcionamiento del mecanismo de gestión de recursos propuesto *Geo-Based Scheduling*, incluyendo fórmulas de estimación de errores por propagación, colisión y *Half dúplex*. Incluido en [51].
- Descripción en detalle del algoritmo de estimación de *PosIndex* y el mapeado de *PosIndex* a los subcanales utilizados en *Geo-Based Scheduling*. Se incluye formulación matemática de estos aspectos y explicación detallada con una discusión de los fundamentos utilizados para su desarrollo. Incluido en [51].
- Discusión detallada de las posibilidades de la coexistencia y cooperación de LTE-V2X e IEEE 802.11p, en [52].
- Descripción detallada del funcionamiento y condiciones de evaluación del mecanismo de gestión de recursos para LTE-V2X asistido por IEEE 802.11p en entornos urbanos, en [52].

---

<sup>13</sup> Además, en otra de nuestras publicaciones en conferencia, [40], puede encontrarse la evaluación presentada en 7.2.1 para la modificación de *Sensing Window*, pero no hay detalles adicionales para este apartado más allá de la configuración de las simulaciones realizadas.



## 8. Conclusiones y líneas de investigación futuras

Las comunicaciones V2X serán en un futuro próximo un componente fundamental para la seguridad vial y la conducción autónoma. La capacidad de los vehículos para intercambiar información entre ellos, con los peatones y con la infraestructura vial es clave para llevar el mundo de la automoción y la movilidad al siguiente nivel de seguridad y comodidad para sus usuarios. Por ello, esta nueva tecnología se encuentra en la actualidad en un momento de gran repercusión, y su desarrollo está obteniendo una gran atención por parte de la industria automovilística y de telecomunicaciones, además de organizaciones e instituciones públicas. Los esfuerzos en regulación y estandarización de las comunicaciones V2X están siendo muy significativos para que su despliegue sea lo más rápido, fiable y eficiente posible.

Actualmente existen dos tecnologías estandarizadas para soportar los requisitos de las comunicaciones V2X, IEEE 802.11p y LTE-V2X. Mientras que IEEE 802.11p fue estandarizada hace más de una década, LTE-V2X ha sido estandarizada por el 3GPP recientemente. Esto hace que LTE-V2X sea a día de hoy una tecnología menos madura a nivel de desarrollo que IEEE 802.11p, puesto que el funcionamiento de IEEE 802.11p ha sido estudiado en detalle tanto por la comunidad académica como por la industria para su comercialización y despliegue. El trabajo realizado en el marco de esta tesis es pionero en el estudio y desarrollo del funcionamiento de LTE-V2X. El análisis realizado sobre el mecanismo de gestión de recursos radio estandarizado para LTE-V2X ha sido significativamente relevante para dimensionar el rendimiento a nivel de sistema del estándar. La optimización de la configuración de LTE-V2X tras su estandarización ha sido también un punto clave en el desarrollo de esta tecnología, así como las propuestas de mejoras realizadas. Todos estos resultados y análisis obtenidos han contribuido de manera notable al desarrollo de LTE-V2X. Además, la comparativa realizada a nivel de sistema de LTE-V2X con IEEE 802.11p ha provisto a la comunidad académica e industrial de un análisis exhaustivo de ambas tecnologías y sus diferencias con un punto de vista neutral y en condiciones de operación realistas. Esto resulta esencial en el momento actual para las entidades reguladoras y empresas ante la necesidad de elegir o apoyar el despliegue de una tecnología u otra. A continuación, exponemos las conclusiones obtenidas a partir de esta tesis.

La plataforma de simulación implementada, utilizada para realizar los análisis necesarios en esta tesis, ha supuesto el primer hito conseguido. El detalle en la implementación y la versatilidad para evaluar todos los aspectos necesarios en

nuestros análisis han supuesto una parte considerable e imprescindible del trabajo realizado. Además, el hecho de haberla implementado en etapas muy tempranas del desarrollo de LTE-V2X (justo después de su estandarización) ha hecho posible que nuestras publicaciones sean pioneras en el estudio y desarrollo de LTE-V2X, de forma que han sido una referencia en la comunidad académica y también en el ámbito empresarial.

Por otro lado, la creación e implementación de un modelo de generación de mensajes CAM realista supone una aportación destacada a la comunidad para realizar evaluaciones realistas. Hasta ahora, todos los estudios que evaluaban el rendimiento de las comunicaciones V2X (independientemente de la tecnología V2X evaluada) utilizaban un modelo simplificado de la generación de mensajes, que consta de un tamaño de mensaje y un intervalo entre mensajes fijos. Sin embargo, las variaciones en tamaño e intervalo de mensaje que se producen utilizando el estándar CAM tienen un impacto determinante en algunos análisis. El modelo de generación de CAM empírico desarrollado, a partir de trazas obtenidas en pruebas de campo reales, es capaz de capturar estas variaciones en tamaño e intervalo manteniendo la eficiencia computacional necesaria para llevar a cabo simulaciones a nivel de sistema de las comunicaciones V2X.

En nuestra primera evaluación de LTE-V2X hemos dimensionado el rendimiento de su mecanismo de gestión de recursos radio, *Sensing-Based SPS*. Hemos concluido que el mecanismo de reservas semipersistentes de *Sensing-Based SPS* obtiene una mejora en la gestión distribuida y autónoma por parte de los vehículos de los recursos radio, respecto a una selección aleatoria de recursos. Sin embargo, el funcionamiento no es óptimo, y tiene algunas ineficiencias. El problema de terminal oculto afecta a la selección óptima de recursos, puesto que *Sensing-Based SPS* no puede tener en cuenta las transmisiones de los vehículos más allá de su rango de sensado. Además, las reselecciones de recursos radio son otra fuente de errores en la gestión de recursos, puesto que tras una reselección no se ha informado en ningún caso a los demás vehículos de los recursos que van a estar ocupados. Debido a estas ineficiencias, hemos comprobado que existe un significativo número de errores de transmisión debido a colisiones (interferencias) entre las transmisiones de varios vehículos que seleccionan indebidamente los mismos recursos radio.

En base a nuestro estudio sobre el funcionamiento de las diversas configuraciones de LTE-V2X, hemos concluido que una adecuada configuración es fundamental para optimizar su rendimiento. Existen varios aspectos configurables importantes que afectan al funcionamiento de la gestión de recursos radio. En esta tesis hemos estudiado el comportamiento de LTE-V2X con la modificación de dichos aspectos, optimizando su configuración con un análisis en profundidad y razonado de las conclusiones obtenidas. En todos los aspectos configurables hemos observado que una mala configuración conlleva un aumento de las colisiones, con el consecuente perjuicio en el rendimiento de las comunicaciones, con lo que destacamos la importancia de una correcta configuración de los aspectos que el estándar de LTE-V2X deja a libre implementación.

La comparativa realizada entre LTE-V2X e IEEE 802.11p es la primera comparativa a nivel de sistema realista y neutral entre las dos tecnologías estandarizadas para comunicaciones V2X. En ella hemos observado que el rendimiento de LTE-V2X es superior al de IEEE 802.11p cuando existe poca carga en el canal, debido a su mejor funcionamiento a nivel de capa física, que le permite alcanzar mayores rangos de transmisión. Con el aumento de la carga en el canal ambas tecnologías experimentan un aumento de los errores de transmisión por colisión debido a las ineficiencias de sus mecanismos de gestión de recursos. Sin embargo, este aumento de colisiones es más pronunciado en LTE-V2X debido a las ineficiencias adicionales de Sensing-Based SPS debidas al uso de reservas semipersistentes y reselecciones de recursos, haciendo que IEEE 802.11p tenga mejor rendimiento en escenarios con media y alta carga. Estas ineficiencias de LTE-V2X se acentúan aún más en el caso del uso de una generación de mensajes con variación de tamaño de mensajes e intervalo entre ellos, como la que se experimenta en la transmisión de mensajes CAM. Sin embargo, la flexibilidad de la capa MAC de IEEE 802.11p hace que las variaciones de tamaño e intervalo entre mensajes no afecten a su rendimiento. Como resultado, cuando los mensajes varían su tamaño e intervalo, la mejora en rendimiento de IEEE 802.11p sobre LTE-V2X aumenta aún más en escenarios de carga moderada y alta.

Puesto que LTE-V2X tiene margen de mejora en la gestión de recursos debido a las ineficiencias estudiadas, se han propuesto en esta tesis mejoras para el mecanismo de gestión de recursos de LTE-V2X. Se ha demostrado que algunos cambios en el mecanismo *Sensing-Based SPS*, como evitar realizar reservas de recursos para los mensajes de mayor tamaño, pueden conseguir una mejora en el rendimiento. Sin embargo, estas mejoras están limitadas por las ineficiencias propias de *Sensing-Based SPS*. Para conseguir mejoras más significativas, hemos propuesto algoritmos de gestión de recursos para LTE-V2X totalmente distintos a *Sensing-Based SPS*. Hemos diseñado el algoritmo *Geo-Based Scheduling*, que aprovecha la información de contexto (posición y velocidad) intercambiada entre los vehículos para realizar una asignación de recursos ordenada de forma distribuida y autónoma. Nuestro diseño e implementación de *Geo-Based Scheduling* es robusto frente a la alta movilidad de los vehículos, y consigue una mejora muy significativa respecto a *Sensing-Based SPS* gracias a su capacidad para evitar el problema de terminal oculto y a su ordenación optimizada de las transmisiones de todos los vehículos, independientemente de la densidad de vehículos y la carga en el canal.

También hemos considerado un escenario de coexistencia entre IEEE 802.11p y LTE-V2X. En el caso hipotético de que ambas tecnologías sean consideradas para la transmisión de mensajes en comunicaciones vehiculares, estudiamos los beneficios de una posible colaboración entre ambas tecnologías para que sus transmisiones sean complementarias, de modo que el rendimiento total se optimice. Es el caso del algoritmo de gestión de recursos para LTE-V2X asistido por IEEE 802.11p que hemos diseñado para mejorar las transmisiones en condiciones sin línea de visión directa en entornos urbanos. Este algoritmo prioriza las transmisiones NLOS por la interfaz LTE-V2X, dado que estas transmisiones tienen menor alcance debido a los obstáculos (edificios) entre el vehículo transmisor y el receptor, y son cruciales para evitar situaciones de

peligro en intersecciones. El algoritmo de selección de recursos en LTE-V2X utiliza la información de posición adquirida por la interfaz IEEE 802.11p en condiciones LOS para establecer una ordenación de recursos que evite errores por colisión en las transmisiones entre vehículos en condiciones NLOS.

Para investigaciones futuras será necesario seguir estudiando y mejorando la gestión de recursos de LTE-V2X para adecuarla a la aparición y coexistencia de diferentes tipos de mensajes. Si bien las primeras aplicaciones de vehículo conectado utilizarán los modelos de mensajes descritos en esta tesis (como los mensajes CAM), que constan de la transmisión continuada en modo broadcast de mensajes de pequeño tamaño conteniendo información de contexto, para futuras aplicaciones como percepción colectiva o conducción cooperativa se establecerán nuevos mensajes [56] que tendrán nuevas características y deberán coexistir. El funcionamiento de LTE-V2X deberá ser estudiado con las características de los mensajes específicos para las nuevas aplicaciones y ser desarrollado para ser lo más eficiente posible en su transmisión.

En esta tesis se ha presentado el problema de optimización conjunto del MCS y subcanalización utilizado en LTE-V2X, si bien es necesario un estudio pormenorizado. Hemos observado que un aumento del MCS en condiciones de alta carga en el canal mejoraba el rendimiento al reducir la carga, y por tanto las colisiones. Pero este aumento en el MCS debía estar acompañado de una adaptación del tamaño de los subcanales al tamaño de los paquetes con dicho MCS. Este estudio deberá ser extendido para abarcar totalmente la complejidad de este problema cuando existen varios tamaños de paquete distintos. Por un lado, debe investigarse cuál debe ser el número y tamaño fijo óptimo de los subcanales utilizados. El MCS puede ser adaptado por cada vehículo para aliviar la congestión, pero el número de subcanales no puede modificarse de forma dinámica y debe ser el mismo para todos los vehículos, por lo que debe encontrarse la subcanalización más adecuada para todos los distintos niveles de congestión. Por otro lado, debe investigarse si utilizar un MCS más alto para transmitir los paquetes de mayor tamaño es beneficioso para el funcionamiento de LTE-V2X. Esta utilización permite uniformizar el tamaño de los paquetes en número de subcanales utilizados, ya que los paquetes más grandes utilizarán el mismo número de subcanales que los pequeños al usar un MCS más alto. Sin embargo, el uso de MCS más altos reduce el rendimiento radio al reducirse la protección contra errores. Además, limitaría los MCSs utilizables por los paquetes de mayor tamaño si el objetivo fuera que todos los paquetes (independiente de su tamaño) utilizaran el mismo número de subcanales con el fin de evitar reselecciones. Esta discusión evidencia que la optimización de los MCSs y la subcanalización en LTE-V2X no es trivial y es necesario un estudio pormenorizado.

Otro aspecto a estudiar en LTE-V2X es el control de congestión. El estándar establece la capacidad de imponer un máximo de subcanales utilizados a los vehículos dependiendo de la carga en el canal (CBR) que observen, de forma que en situaciones de alta carga disminuya el máximo de subcanales que pueden ser utilizados por cada vehículo. Sin embargo, en la actualidad no ha sido estudiado en profundidad el número de subcanales máximo que deberían utilizar los vehículos dependiendo de cada nivel de CBR para un

funcionamiento óptimo. Además, tampoco ha sido estudiado en detalle cuál es la mejor opción para no sobrepasar el límite de uso de subcanales requerido, existiendo la posibilidad de descartar paquetes (lo cual produce ineficiencias en LTE-V2X como se indica en [57]) o aumentar el MCS, para lo cual no existe un estudio en profundidad como hemos destacado en el párrafo anterior.

Recientemente, se está estudiando la posibilidad de coexistencia entre LTE-V2X e IEEE 802.11p [58], con lo que este parece un escenario probable en el futuro. Si se confirma, nuestra propuesta de que ambas tecnologías colaboren debería ser desarrollada para alcanzar el máximo potencial utilizando una transmisión redundante por ambas. Esto incluye buscar variaciones en el funcionamiento de sus respectivas capas MAC para que la fiabilidad aumente mediante la complementariedad de las transmisiones. Esto se conseguirá tratando de disminuir la correlación entre las transmisiones en ambas interfaces, de forma que las ineficiencias que afecten a una no afecten a la otra y viceversa. El estudio de nuevos mecanismos de gestión de recursos teniendo en cuenta esta realidad de coexistencia es potencialmente una mejora sustancial en el rendimiento de las comunicaciones V2X para aplicaciones de seguridad vial y conducción autónoma.

En esta tesis hemos evaluado el llamado modo 4 o modo distribuido de LTE-V2X, que se ha considerado en la comunidad como el modo principal debido a que no depende de la infraestructura celular para funcionar, puesto que la selección de recursos radio donde transmitir es realizada por cada nodo de forma autónoma. En el estándar también se incluye un modo centralizado llamado modo 3. En LTE-V2X modo 3 las transmisiones se realizan también directamente entre vehículos sin pasar por la red celular, pero la gestión de recursos está llevada a cabo por la estación base. Si bien todavía no está claro el despliegue a gran escala de modo 3, la utilización de la gestión de recursos centralizada en entornos sobrecargados (como entornos urbanos con mucho tráfico) puede suponer una mejora necesaria en el rendimiento de LTE-V2X. El estándar define una arquitectura multi-operador para soportar las comunicaciones LTE-V2X modo 3 [59], pero la gestión de recursos centralizada se deja a implementación de la estación base [26][27]. El estudio de mecanismos de gestión de recursos centralizados adaptados a las necesidades de latencia y fiabilidad de las comunicaciones V2X será importante para que las comunicaciones LTE-V2X modo 3 supongan una mejora viable y eficiente, en ciertos escenarios, respecto a las comunicaciones LTE-V2X modo 4. Además, deberán ser estudiados los detalles de la coexistencia entre modo 3 y modo 4, y las transiciones entre las áreas en las que opere un modo u otro.

En la actualidad, el 3GPP se encuentra finalizando el proceso de estandarización de la evolución de LTE-V2X, necesaria para soportar los requisitos de las futuras aplicaciones de conducción autónoma avanzadas [38]. Esta evolución estará basada en la evolución ya estandarizada de LTE hacia la tecnología de acceso radio del estándar 5G [60], (llamada comúnmente en el 3GPP 'New Radio', o NR). La adaptación de NR a las necesidades de las comunicaciones V2X está siendo estudiada actualmente [61], e incluye una modificación de los mecanismos de gestión de recursos radio. Sería, pues, necesario un estudio pormenorizado de su funcionamiento y rendimiento tras



su estandarización final, tal y como en esta tesis hemos realizado con LTE-V2X. Por otro lado, también se está desarrollando en la actualidad la evolución de IEEE 802.11p, llamada IEEE 802.11bd [62]. Por lo tanto, NR-V2X e IEEE 802.11bd serán las nuevas generaciones de las tecnologías LTE-V2X e IEEE 802.11p, cuyo funcionamiento ha sido comparado en esta tesis. El trabajo de diseño de NR-V2X e IEEE 802.11bd deberá ser desarrollado y, al tratarse de tecnologías que evolucionan de sus generaciones predecesoras, los desarrollos de LTE-V2X e IEEE 802.11p serán la base de los primeros análisis. También deberá estudiarse la coexistencia entre NR-V2X e IEEE 802.11bd, así como la coexistencia con las tecnologías predecesoras que serán desplegadas con anterioridad para dar soporte a las primeras aplicaciones de redes vehiculares. Esta coexistencia añade nuevas incógnitas importantes para el futuro de las comunicaciones V2X ya que NR-V2X y LTE-V2X son incompatibles a nivel de comunicaciones mientras que IEEE 802.11bd ha sido diseñada para garantizar la compatibilidad con IEEE 802.11p.

Tanto las propuestas realizadas en el marco de esta tesis doctoral, como las descritas como trabajo futuro, podrían implementarse y validarse experimentalmente para demostrar su funcionamiento y viabilidad técnica mediante pruebas de campo. Dada la limitada existencia de chipsets LTE-V2X y la imposibilidad de modificar los existentes para seguir los diseños propuestos, este tipo de implementaciones requeriría de soluciones de código abierto. Una posibilidad sería el empleo de dispositivos SDR completamente reprogramables junto a la plataforma software de código abierto OpenAirInterface (OAI) que integra la pila de protocolos del 3GPP, y permite emular el funcionamiento en tiempo real de dispositivos móviles, estación base y nodos de la red troncal.



# Bibliografía

- [1] ETSI TC ITS, "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Use case definitions," TR 102 638, V1.1.5, Jan. 2016.
- [2] IEEE Standards Association, "IEEE Standard for Information technology; Local and metropolitan area networks; Specific requirements; Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments," IEEE 802.11p-2010, Jun. 2010.
- [3] S. Abuelsamid, "Volkswagen Adds 'Vehicle-To-Everything' Communications to Revamped Golf with NXP Chips," *Forbes*, Oct. 2019.
- [4] 3GPP, "Study on LTE-based V2X services," TR 36.885, Rel-14 V14.0.0, Jul. 2016.
- [5] 3GPP, "Study on LTE Device to Device Proximity Services; Radio Aspects," TR 36.843, Rel-12 V12.1.0, Mar. 2013.
- [6] 5G Automotive Association, "An assessment of LTE-V2X (PC5) and IEEE 802.11p direct communications technologies for improved road safety in the EU," 5GAA white paper, Dec. 2017.
- [7] J. Hu et al., "Link level performance comparison between LTE V2X and DSRC," *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 2 (2), pp. 101-112, Jun. 2017.
- [8] European Commission, "Supplementing Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the deployment and operational use of cooperative intelligent transport systems," Commission Delegated Regulation (EU), Mar. 2019.
- [9] ETSI TC ITS, "Intelligent Transport Systems (ITS); Pre-standardization study on ITS architecture; Part 2: Interoperability among heterogeneous ITS systems and backward compatibility," TR 103 576-2 V1.1.1, Feb. 2020.
- [10] ETSI TC ITS, "Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems using LTE Vehicle to everything communication in the 5.9 GHz frequency band," TS 103 613, V1.1.1, Nov. 2018.
- [11] 3GPP TS 36.300, "E-UTRA and E-UTRAN; Overall description; Stage 2," Rel-14 V14.11.0, Sep. 2019.
- [12] Repositorio abierto del 3GPP. Disponible online en: <https://portal.3gpp.org/>
- [13] ETSI TC ITS, "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service," EN 302 637-2 V1.4.1, Jan. 2019.
- [14] Christoph Sommer, Reinhard German and Falko Dressler, "Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis," *IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC)*, vol. 10 (1), pp. 3-15, Jan. 2011.
- [15] Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, and Laura Bieker, "Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility," *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5 (3&4):128-138, Dec. 2012.

- [16] A. Varga and R. Hornig, "An overview of the OMNET++ simulation environment," in *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems*, Article No.: 60, pp. 1–10, Mar. 2008.
- [17] CAR 2 CAR Communication Consortium, "Survey on ITS-G5 CAM statistics," TR2052, V1.0.1, Dec. 2018.
- [18] ETSI TC ITS, "Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture", ETSI EN 302 665, V1.1.1, Sep. 2010.
- [19] CAR 2 CAR Communication Consortium, "Basic System Profile," Version 1.3, Aug. 2018.
- [20] SCOOP Project, "SCOOP Technical Specifications," Release 1.2, delivery 2.4.1., May. 2016.
- [21] 3GPP TR 22.885, "Study on LTE support for Vehicle to Everything (V2X) services," Rel-14 V14.0.0, Dec. 2015.
- [22] A. Festag, "Cooperative intelligent transport systems standards in europe," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 12, pp. 166-172, Dec. 2014.
- [23] Q. Chen et al., "Overhaul of IEEE 802.11 Modeling and Simulation in NS-2," *Proc. ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems (MSWIM '07)*, Chania (Greece), 22-26 Oct. 2007.
- [24] 3GPP TS 36.213, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures," Rel-14 V14.12.0, Sep. 2019.
- [25] 3GPP TS 36.101, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception," Rel-14 V14.13.0, Oct. 2019.
- [26] 3GPP TS 36.321, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol Specification," Rel-14 V14.12.0, Jan. 2020.
- [27] 3GPP TS 36.331, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC) Protocol Specification," Rel-14 V14.13.0, Sep. 2019.
- [28] M. Gonzalez-Martín, M. Sepulcre, R. Molina-Masegosa and J. Gozalvez, "Analytical Models of the Performance of C-V2X Mode 4 Vehicular Communications," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1155-1166, Feb. 2019.
- [29] J. Meinilä *et al.* "WINNER+ Final Channel Models," Wireless World Initiative New Radio, Delivery 5.3, Version 1.0, Jun. 2010.
- [30] ITU-R M, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced", IMT.EVAL, Document 5/69-E, Oct. 2008.
- [31] Huawei, HiSilicon, "DMRS enhancement of V2V," R1-160284, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #84, St Julian's, Malta, Feb. 2016.
- [32] O. Goubet, G. Baudic, F. Gabry and T. J. Oechtering, "Low-Complexity Scalable Iterative Algorithms for IEEE 802.11p Receivers," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 9, pp. 3944-3956, Sept. 2015.
- [33] HCM 2010: Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, USA, 2010.
- [34] M. Sepulcre, J. Gozalvez, B. Coll-Perales "Why 6Mbps is not (always) the Optimum Data Rate for Beaconing in Vehicular Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16 (12), pp. 3568-3579, Dec. 2017.
- [35] M. Noor-A-Rahim et al., "Performance Analysis of IEEE 802.11p Safety Message Broadcast With and Without Relaying at Road Intersection", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23786-23799, Apr. 2018.

- [36] A. Bazzi et al., "Study of the Impact of PHY and MAC Parameters in 3GPP C-V2V Mode 4," *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Taipei (Taiwan), 5-7 Dec. 2018.
- [37] Y. Jeon et al., "Reducing Message Collisions in Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling (SPS) by Using Reselection Lookaheads in Cellular V2X," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4388, Dec. 2018.
- [38] 3GPP, "Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services," TR 36.886, Rel-15 V15.1.0, Mar. 2017.
- [39] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, M. Sepulcre, "Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation with Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size," enviado a *IEEE Access*.
- [40] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez and M. Sepulcre, "Configuration of the C-V2X Mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communication," *2018 14th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN)*, Shenyang, China, 2018, pp. 43-48.
- [41] 5GAA, "V2X Functional and Performance Test Report; Test Procedures and Results," 5GAA Report, Apr. 2019.
- [42] Cohda Wireless, "Cohda Mobility MK5 Module Datasheet," V1.2.0, May. 2015.
- [43] R. Molina-Masegosa and J. Gozalvez, "System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and Its Distributed Scheduling," *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Sydney, NSW, 2017, pp. 1-5.
- [44] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, "Rendimiento de LTE-V Modo 4 para vehículo conectado y autónomo", *Libro de actas del XXXII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, 6-8 September 2017, Cartagena.
- [45] R. Molina-Masegosa and J. Gozalvez, "LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 30-39, Dec. 2017.
- [46] Repositorio abierto con los modelos CAM empíricos propuestos. <https://github.com/msepulcre/CAM-model>
- [47] R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre, J. Gozalvez, F. Berens and V. Martinez, "Empirical Models for the Realistic Generation of Cooperative Awareness Messages in Vehicular Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 5, pp. 5713-5717, May 2020.
- [48] A. Filippi, K. Moerman, V. Martinez, A. Turley, "IEEE 802.11p ahead of LTE-V2V for safety applications," NXP and Autotalks whitepaper, Sep. 2017.
- [49] 5G Automotive Association, "An assessment of LTE-V2X (PC5) and IEEE 802.11p direct communications technologies for improved road safety in the EU," 5GAA white paper, Dec. 2017.
- [50] A. Turley, K. Moerman, A. Filippi, V. Martinez, "C-ITS: Three observations on LTE-V2X and ETSI ITS-G5. A comparison." NXP Whitepaper, 2018.
- [51] R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre and J. Gozalvez, "Geo-Based Scheduling for C-V2X Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 9, pp. 8397-8407, Sept. 2019.
- [52] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez and M. Sepulcre, "An IEEE 802.11p-Assisted LTE-V Scheduling for Reliable Multi-Link V2X Communications," *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Chicago, IL, USA, 2018, pp. 1-5.

- [53] Y. Jeon et al., "Reducing Message Collisions in Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling (SPS) by Using Reselection Lookaheads in Cellular V2X," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4388, Dec. 2018.
- [54] N. Bonjorn et al., "Cooperative Resource Allocation and Scheduling for 5G eV2X Services," *IEEE Access*, Jan. 2019.
- [55] L. Abanto-Leon et al., "Enhanced C-V2X Mode-4 Subchannel Selection," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Chicago (USA), 27-30 Aug. 2018.
- [56] ETSI TC ITS, "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS)," TR 103 562 V2.1.1, Dec. 2019.
- [57] A. Mansouri, V. Martinez and J. Härri, "A First Investigation of Congestion Control for LTE-V2X Mode 4," *2019 15th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Wengen, Switzerland, 2019, pp. 56-63.
- [58] A. Bazzi, A. Zanella, I. Sarris and V. Martinez, "Co-channel Coexistence: Let ITS-G5 and Sidelink C-V2X Make Peace," arXiv:2003.09510 [cs.NI], Mar. 2020.
- [59] 3GPP TS 23.285, "Architecture enhancements for V2X services," Rel-14 V14.9.0, Dec. 2019.
- [60] 3GPP TS 38.300, "NR; Overall description; Stage 2," Rel-14 V16.1.0, Apr. 2020.
- [61] 3GPP TS 38.885, "Study on NR Vehicle-to-Everything (V2X)," Rel-14 V16.0.0, Mar. 2019.
- [62] G. Naik, B. Choudhury and J. Park, "IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70169-70184, 2019.

# Anexo A. Publicaciones

Esta tesis doctoral está sustentada por un compendio de trabajos previamente publicados o aceptados para publicación. En este anexo incluimos una copia de las publicaciones especificadas a continuación. El orden en el que están incluidos es el mismo en el que se listan a continuación.

Artículos en revistas de impacto, indexadas según JCR Science Edition:

- *LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications.* [45]  
R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez  
**IEEE Vehicular Technology Magazine**  
Vol 12, pp. 30-39 (Diciembre 2017).  
ISSN: 1556-6072. Editorial: IEEE  
**Factor de impacto JCR-SCI: 6.038, Cuartil Q1**  
DOI: 10.1109/MVT.2017.2752798
- *Geo-Based Scheduling for C-V2X Networks.* [51]  
R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre, J. Gozalvez  
**IEEE Transactions on Vehicular Technology**  
Vol 68, Issue 9, pp. 8397-8407 (Junio 2019).  
ISSN: 0018-9545. Editorial: IEEE  
**Factor de impacto JCR-SCI: 5.339, Cuartil Q1**  
DOI: 10.1109/TVT.2019.2924698
- *Empirical Models for the Realistic Generation of Cooperative Awareness Messages in Vehicular Networks.* [47]  
R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre, J. Gozalvez, F. Berens, V. Martinez  
**IEEE Transactions on Vehicular Technology**  
Vol 69, Issue 5, pp. 5713-5717 (Marzo 2020).  
ISSN: 0018-9545. Editorial: IEEE  
**Factor de impacto JCR-SCI: 5.339, Cuartil Q1**  
DOI: 10.1109/TVT.2020.2979232
- *Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation with Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size.* [39]  
R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre, J. Gozalvez  
**IEEE Access (En revisión)**  
ISSN: 2169-3536. Editorial: IEEE  
**Factor de impacto JCR-SCI: 4.098, Cuartil Q1**

Artículos derivados de comunicaciones en congresos internacionales con revisión por pares y comité científico de prestigio, publicados en editoriales de prestigio internacionales:

- *System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and its Distributed Scheduling* [43]  
R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez  
**2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**  
4-7 Junio 2017 (Sydney, NSW, Australia).  
ISBN: 978-1-5090-5932-4. Editorial: IEEE  
DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108463
- *An IEEE 802.11p-Assisted LTE-V Scheduling for Reliable Multi-Link V2X Communications* [52]  
R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, M. Sepulcre  
**2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)**  
27-30 Agosto 2018 (Chicago, IL, USA).  
ISBN: 978-1-5386-6358-5. Editorial: IEEE  
DOI: 10.1109/VTCFall.2018.8690760
- *Configuration of the C-V2X Mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communication* [40]  
R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, M. Sepulcre  
**2018 14th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN)**  
6-8 Diciembre 2018 (Shenyang, China).  
ISBN: 978-1-7281-0548-2. Editorial: IEEE  
DOI: 10.1109/MSN.2018.00014

# LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications

Rafael Molina-Masegosa and Javier Gozalvez. Universidad Miguel Hernandez de Elche (UMH)

*This paper provides an overview of the LTE-V standard supporting sidelink or V2V communications using the PC5 interface in LTE. The paper reviews the physical layer changes introduced under Release 14 for LTE-V, its communication modes 3 and 4, and the LTE-V evolutions under discussion in Release 15 to support 5G V2X communications and autonomous vehicles' applications. Modes 3 and 4 support direct V2V communications, but differ on how they allocate the radio resources. Resources are allocated by the cellular network under Mode 3. Mode 4 does not require cellular coverage, and vehicles autonomously select their radio resources using a distributed scheduling scheme supported by congestion control mechanisms. Mode 4 is considered the baseline mode, and represents an alternative to 802.11p or DSRC. In this context, the paper also presents a detailed analysis of the performance of LTE-V sidelink Mode 4, and proposes a modification to its distributed scheduling.*

## Introduction

V2X (Vehicle-to-Everything) communications will enable the exchange of information between vehicles (Vehicle to Vehicle, V2V), and between vehicles and other nodes (infrastructure and pedestrians). This exchange will provide vehicles with a more accurate knowledge of their surrounding environment that can improve the traffic safety [1]. Important efforts have been devoted over the last years to develop V2X communications using IEEE 802.11p. However, 802.11p uses a CSMA/CA medium access scheme, and can face some challenges to guarantee strict reliability levels and ensure the network's scalability as the load increases [2]. As an alternative, the Third Generation Partnership Project (3GPP) published in September 2016 the first version of Release 14 that includes support for V2X communications [3]. The standard is commonly referred to as LTE-V, LTE-V2X or Cellular V2X. The LTE-V physical layer improves the link budget with regards to 802.11p. In addition, LTE-V can increase the reliability, under certain conditions, by adding a redundant transmission per packet. The LTE-V standard includes two radio interfaces. The Uu interface supports Vehicle to Infrastructure (V2I) communications, while the PC5 interface supports V2V communications based on direct LTE sidelink. LTE sidelink or D2D (Device to Device) was introduced for the first time under Release 12 for public safety, and includes two modes of operation: Mode 1 and Mode 2. Both modes were designed with the objective to prolong the battery lifetime of mobile devices at the cost of increasing the latency. Connected vehicles require highly reliable and low latency V2X

communications, and therefore Mode 1 and 2 are not suitable for vehicular applications. Release 14 introduces two new communication modes (Mode 3 and Mode 4) specifically designed for V2V communications. In Mode 3, the cellular network selects and manages the radio resources used by vehicles for their direct V2V communications. In Mode 4, vehicles autonomously select the radio resources for their direct V2V communications. Mode 4 can hence operate without cellular coverage, and is therefore considered the baseline V2V mode since safety applications cannot depend on the availability of cellular coverage. Mode 4 includes a distributed scheduling scheme for vehicles to select their radio resources, and the support for distributed congestion control.

This paper presents an overview of LTE-V sidelink V2V communications based on the PC5 interface in Release 14 (referred to as LTE-V in the rest of the paper). The tutorial includes a review of the LTE-V physical layer, and presents in detail Mode 3 and Mode 4 for V2V communications. In addition, the paper reviews the support for congestion control in LTE-V, and the enhancements that are currently under discussion in Release 15. Mode 4 is the baseline mode for V2V communications using LTE-V. As a result, the paper includes a comprehensive simulation evaluation of the performance of LTE-V Mode 4. Based on the results of this analysis, the authors propose a modification to its distributed scheduling.

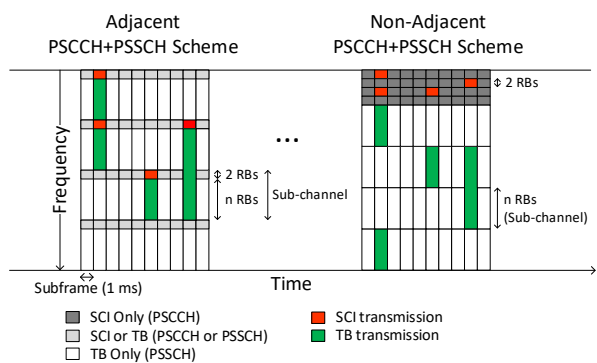
## Physical Layer

LTE-V utilizes SC-FDMA, and supports 10 and 20MHz channels. Each channel is divided into sub-frames, Resource Blocks (RBs), and sub-channels. Sub-frames are 1ms long (like the Transmission Time Interval). A RB is the smallest unit of frequency resources that can be allocated to a user. It is 180kHz wide in frequency (12 sub-carriers of 15kHz). LTE-V defines sub-channels as a group of RBs in the same sub-frame. The number of RBs per sub-channel can vary. Sub-channels are used to transmit data and control information. The data is transmitted in Transport Blocks (TBs) over Physical Sidelink Shared Channels (PSSCH), and the control information in Sidelink Control Information (SCI) messages over Physical Sidelink Control Channels (PSCCH) [4]. A TB contains a full packet to be transmitted, e.g. a beacon or Cooperative Awareness Message (CAM). A node that wants to transmit a TB must also transmit its associated SCI (also referred to as SA Scheduling Assignment). The SCI includes information such as the modulation and coding scheme used to transmit the TB, the RBs it uses, and the resource reservation interval for semi-persistent scheduling. This information is critical for other nodes to



be able to receive and decode the transmitted TB, so the SCI must be correctly received. A TB and its associated SCI must always be transmitted in the same sub-frame. We refer to the transmission of an SCI and its associated TB in the same sub-frame as SCI+TB (or HARQ transmission in 3GPP). LTE-V defines 2 sub-channelization schemes (Figure 1):

- **Adjacent PSCCH+PSSCH.** The SCI and TB are transmitted in adjacent RBs. For each SCI+TB transmission, the SCI occupies the first two RBs of the first sub-channel utilized for the transmission. The TB is transmitted in the RBs following the SCI, and can occupy several sub-channels (depending on its size). If it does so, it will also occupy the first two RBs of the following sub-channels.
- **Non-Adjacent PSCCH+PSSCH.** The RBs are divided into pools. One pool is dedicated to transmit only SCIs, and the SCIs occupy 2 RBs. The second pool is reserved to transmit only TBs and is divided into sub-channels.



**Figure 1** LTE-V sub-channelization

TBs can be transmitted using QPSK or 16-QAM, whereas the SCIs are always transmitted using QPSK. LTE-V uses turbo coding and normal cyclic prefix. LTE-V sub-carriers have a total of 14 symbols per sub-frame. Four of these symbols are dedicated to the transmission of Demodulation Reference Signals (DMRS) in order to combat the Doppler effect at high speeds. DMRSs are transmitted in the 3<sup>rd</sup>, 6<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> symbol of each sub-carrier per sub-frame [5]. The maximum transmit power is 23dBm, and the standards specify a sensitivity power level requirement at the receiver of -90.4dBm and a maximum input level of -22dBm [6].

## Mode 4

Vehicles communicate using sidelink or V2V communications under Mode 4, and autonomously select their radio resources independently of whether they are under cellular coverage or not. When the vehicles are under cellular coverage, the network decides how to configure the V2X channel and informs the vehicles through the Sidelink V2X Configurable Parameters [3]. The message includes, among others: the carrier frequency of the V2X channel, the V2X resource pool, synchronization references, the sub-channelization scheme, the number of sub-channels per sub-frame, and the number of RBs per sub-channel. When the vehicles are not under cellular coverage, they utilize a pre-configured set of parameters in replacement of the Sidelink V2X Configurable Parameters. However, the standard does not specify a concrete value for each parameter. The V2X resource pool indicates which sub-frames of a channel are utilized for V2X. The rest of sub-frames can be utilized by other services (including cellular communications). The standard includes the option to divide the

V2X resource pool based on geographical areas (referred to as Zoning [3]). In this case, vehicles in an area can only utilize the pool of resources that have been assigned to such area. We will assume in this paper that a channel is completely dedicated to V2X and that Zoning is not applied.

## Sensing-based Semi-Persistent Scheduling

Vehicles select their sub-channels in Mode 4 using the sensing-based Semi-Persistent Scheduling (SPS) scheme specified in Release 14 [4][7]. A vehicle reserves the selected sub-channel(s) for a number of consecutive *Reselection Counter* packet transmissions. This counter is randomly set between 5 and 15, and the vehicle includes its value in the SCI. After each transmission, the *Reselection Counter* is decremented by one. When it is equal to zero, new resources must be selected and reserved with probability  $(1-P)$ . Each vehicle can set up  $P$  between 0 and 0.8. New resources need to be reserved also if the packet to be transmitted does not fit in the sub-channel(s) previously reserved. The *Reselection Counter* is randomly chosen every time new resources must be reserved. Packets can be transmitted every 100 sub-frames (i.e. 10 packets per second or 10pps) or in multiples of 100 sub-frames (up to a minimum of 1pps). Each vehicle includes its packet transmission interval in the resource reservation field of its SCI. Thanks to the semi-persistent reservation of resources, and the inclusion of the *Reselection Counter* and packet transmission interval in the SCI, other vehicles can estimate which sub-channels are free when making their own reservation, which reduces packet collisions. The process to reserve sub-channels is organized in the following three steps.

*Step 1.* Let's suppose that a vehicle  $V$  needs to reserve new sub-channels at time  $T$ . It can reserve sub-channels between  $T$  and the established maximum latency (equal or lower than 100ms [4]). This time period is referred to as selection window. Within the selection window, the vehicle identifies as Candidate Single-Subframe Resources (CSRs)<sup>1</sup> to be reserved, all groups of adjacent sub-channels within the same sub-frame where the SCI+TB to be transmitted fits.

*Step 2.* Vehicle  $V$  analyzes all the information it has received in the 1000 sub-frames before  $T$ , and creates a list  $L_j$  of CSRs it could reserve. This list includes all the CSRs in the selection window except those that meet the following two conditions:

- 1)  $V$  has correctly received in the last 1000 subframes an SCI from another vehicle indicating that it will utilize this CSR at the same time as  $V$  will need it to transmit any of its next *Reselection Counter* packets;
- 2)  $V$  measures an average Reference Signal Received Power (RSRP) over the RBs utilized to transmit the TB associated to the SCI higher than a given threshold<sup>2</sup>.

The two conditions must be simultaneously met in order for  $V$  to exclude a CSR. Vehicle  $V$  also excludes all CSRs of sub-frame  $F$  in the selection window, if  $V$  was transmitting during any previous sub-frame  $F-100*j$  ( $j \in \mathbb{N}$ ,  $1 \leq j \leq 10$ )<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Also referred to as Candidate Resources.

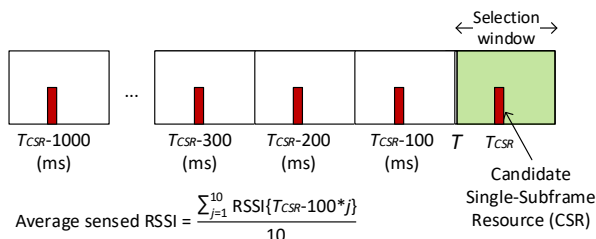
<sup>2</sup> The threshold depends on the priority of the packet. This priority is established by higher layers based on the relevance and urgency of the application. If  $V$  receives several SCIs from the same interfering vehicle reserving a given CSR, it will utilize the most recent one to estimate the average RSRP.

<sup>3</sup>  $V$  is not able to receive the transmissions of other vehicles in the sub-frame it is transmitting (half-duplex transmissions).



After Step 2 is executed,  $L_1$  must include at least 20% of all CSRs in the selection window. If not, Step 2 is iteratively executed until the 20% target is met. The RSRP threshold is increased by 3dB in each iteration.

*Step 3.* Vehicle  $V$  creates a second list  $L_2$  of CSRs. The total number of CSRs in  $L_2$  must be equal to 20% of all CSRs in the selection window.  $L_2$  includes the CSRs from  $L_1$  (after Step 2) that experienced the lowest average RSSI (Received Signal Strength Indicator) over all its RBs. This RSSI value is averaged over all the previous  $T_{CSR-100*j}$  sub-frames ( $j \in \mathbb{N}$ ,  $1 \leq j \leq 10$ ), see Figure 2. Vehicle  $V$  randomly chooses one of the CSRs in  $L_2$ , and reserves it for the next *Reselection Counter* packet transmissions.



**Figure 2** Step 3: average RSSI of a candidate resource

### Extensions to sensing-based SPS

LTE-V Mode 4 provides the option for each packet to be transmitted twice to increase the reliability. In this case, the sensing-based SPS scheme creates a third list  $L_3$  of CSRs. Let's suppose that the original SCI+TB transmission took place in a CSR in sub-frame  $SF$ .  $L_3$  is made of all CSRs included in  $L_2$  (produced in Step 3) that are located in the time interval  $[SF-15ms; SF+15ms]$ , with the exception of all the CSRs in  $SF$ . The sensing-based SPS scheme randomly selects a CSR from  $L_3$  for the redundant transmission of the SCI+TB. The selection for redundant transmissions is maintained semi-persistently for the following *Reselection Counter* packets.

The sensing-based SPS scheme can support higher packet transmission frequencies than 10pps, in particular 20pps and 50pps. In this case, the following changes to the sensing-based SPS scheme are applied:

- The maximum tolerable latency is 50ms and 20ms respectively, which reduces the selection window.
- The *Reselection Counter* can take any value between 10 and 30 for 20pps, and between 25 and 75 for 50pps.
- The variable  $j$  in Step 3 takes values between 1 and 20 for 20pps, and between 1 and 50 for 50pps.

Release 14 includes a variant of the sensing-based SPS scheme for Pedestrian to Vehicle communications, where pedestrians broadcast their presence using mobile devices. The sensing process seriously compromises the battery of these devices, so the standard gives them the option to only sense a percentage of the 1000 sub-frames previous to  $T$  in Step 2. The mobile devices can only select (using the sensing-based SPS scheme) CSRs in the sensed sub-frames.

### Mode 3

Vehicles also communicate using sidelink or V2V communications under Mode 3. However, the selection of sub-channels is managed by the base station or eNB, and not by each vehicle as it is the case in Mode 4. Mode 3 is hence only available when vehicles are under cellular coverage. 3GPP has defined the

necessary cellular architecture enhancements to support V2X. One of these enhancements is the V2X Control Function that is used by the network in Mode 3 to manage radio resources and to provide vehicles (or in general UEs) with the Sidelink V2X Configurable Parameters. Mode 3 utilizes the same sub-channel arrangements as defined for Mode 4. Vehicles using Mode 3 must also transmit an associated SCI per TB, and the transmission of the SCI and TB must take place in the same sub-frame. Differently from Mode 4, the standards do not specify a resource management algorithm for Mode 3. Each operator can implement its own algorithm that should fall under one of these two categories [8]:

- **Dynamic Scheduling.** Vehicles request sub-channels to the eNB for each packet transmission. This increases the cellular signaling overhead, and delays the packet transmission until vehicles are notified of their assigned sub-channels.
- **Semi-persistent Scheduling (SPS).** The eNB reserves sub-channels for the periodic transmissions of a vehicle like in Mode 4. However, differently from Mode 4, it is up to the eNB to decide for how long should the reservation be maintained (i.e. Mode 3 does not define a *Reselection Counter*). Only the eNB can activate, de-activate or modify a reservation of sub-channels for a vehicle. The vehicle must inform the eNB of the size, priority and transmission frequency of its packets so that the eNB can semi-persistently reserve the appropriate sub-channels. This information (referred to as UE Assistance Information [4]) must be provided to the eNB at the start of a transmission, or when any of the traffic characteristics (size, priority and frequency) change.

Vehicles operating under Mode 3 can be supported by different cellular operators or PLMNs (Public Land Mobile Networks). To enable their direct communications, 3GPP has defined an inter-PLMN architecture [9] that can support the following scenarios:

- Vehicles supported by different PLMNs transmit in different carriers. In this case, vehicles must be able to simultaneously receive in multiple carriers to receive the transmissions of vehicles supported by other PLMNs. To this aim, each PLMN broadcasts in the Sidelink V2X Configurable Parameters the necessary information so that the vehicles it supports can receive the packets transmitted by vehicles supported by other PLMNs.
- Vehicles supported by different PLMNs share the same carrier, but each PLMN is assigned part of the RBs of the carrier. The standard does not specify how the resources should be split among the PLMNs, but introduces a coordination mechanism (through the V2X Control Function) between PLMNs to avoid packet collisions.

### Congestion Control

Release 14 supports congestion control in Mode 4 [3]. The standard does not specify a particular congestion control algorithm, but defines the related metrics and possible mechanisms to reduce the channel congestion. Each time a vehicle has to transmit or retransmit a packet, it estimates the Channel Busy Ratio (CBR) and Channel occupancy Ratio (CR). If the packet is going to be transmitted at sub-frame  $n$ , the measurements are done at sub-frame  $n-4$  [4]. The CBR provides an indication of the level of channel congestion, and is defined as the amount of sub-channels in the previous 100 sub-frames that experience an average RSSI

higher than a pre-configured threshold<sup>4</sup>. The CR quantifies the channel occupancy generated by the transmitting vehicle. It is defined as the amount of sub-channels that the transmitting vehicle utilizes during a period of 1000 sub-frames. This period can include past and future<sup>5</sup> sub-frames, and it is up to each vehicle to decide how many past and future sub-frames it takes into account when computing the CR with certain restrictions. In particular, the CR must be estimated taking into account at least the previous 500 sub-frames, and only the future sub-frames that are already reserved by the transmitting vehicle can be considered to compute the CR.

The standard indicates that up to sixteen CBR intervals can be defined, and for each one, a transmitting vehicle cannot overpass a maximum  $CR_{Limit}$  that augments as the CBR decreases. The value of  $CR_{Limit}$  for each CBR interval varies with the priority of the packet. The standard does not specify the range of each CBR interval and the values of  $CR_{Limit}$ . However, Table 1 shows an example from 3GPP working documents [10] for 10pps<sup>6</sup>.

CBR measured	$CR_{Limit}$
$CBR \leq 0.65$	no limit
$0.65 < CBR \leq 0.675$	1.6e-3
$0.675 < CBR \leq 0.7$	1.5e-3
$0.7 < CBR \leq 0.725$	1.4e-3
$0.725 < CBR \leq 0.75$	1.3e-3
$0.75 < CBR \leq 0.775$	1.2e-3
$0.8 < CBR \leq 0.825$	1.1e-3
$0.825 < CBR \leq 0.85$	1.1e-3
$0.85 < CBR \leq 0.875$	1.0e-3
$0.875 < CBR$	0.8e-3

**Table 1** Example of CBR intervals and  $CR_{Limit}$  for congestion control under LTE-V mode 4 [10].

When a vehicle has to transmit a packet (or its redundant version), it measures the CBR and quantifies its CR. If its CR is higher than the value of  $CR_{Limit}$  specified for the CBR interval that includes the measured CBR, the vehicle must reduce its CR below  $CR_{Limit}$ . To do so, the standard defines several possible mechanisms [7][8], and it is up to each vehicle to decide which one to utilize:

- Packet dropping. The vehicle reduces its CR by not transmitting certain packets generated by the application (but maintains the reserved sub-channels).
- Number of transmissions per packet. The vehicle can reduce its CR by transmitting each packet only once (i.e. avoiding redundant transmissions).
- Modulation and coding scheme (MCS). The vehicle can reduce the CR by augmenting the MCS. This is possible if the pre-configured sub-channelization and the initial MCS results in that the transmission of a packet requires the use of various sub-channels. In this case, a packet can be transmitted using a lower number of sub-channels by increasing the MCS, which will in turn reduce the CR.
- Sub-channels reserved. A vehicle can reduce its CR by reducing the number of sub-channels it reserves per transmission. This can be achieved, for example, by

augmenting the MCS that reduces the number of RBs necessary to transmit a packet.

- Transmission power. Decreasing the transmission power reduces the CBR. If the resulting CBR level falls under a lower CBR interval,  $CR_{Limit}$  increases. In this case, a vehicle might be able to satisfy the condition that the CR is below the  $CR_{Limit}$  without directly decreasing its CR.

A vehicle can only modify the number of transmissions per packet or the number of reserved sub-channels when it has to execute the sensing-based SPS scheme to reserve new sub-channels. The other mechanisms can be applied at any point in time, and on a per packet basis if needed. It is though important to emphasize that none of the congestion control mechanisms should force a new reservation of sub-channels. Forcing a new reservation before the *Reselection Counter* is equal to zero can negatively impact other vehicles that reserved their sub-channels considering that surrounding vehicles would maintain their reservations. This negative impact is actually also present when implementing packet dropping. However, [11] showed that packet dropping improves the PDR (Packet Delivery Ratio) under congested channels.

Mode 3 does not implement a distributed congestion control process as defined in Mode 4. In Mode 3, the eNB manages the sub-channels, and decides how to reduce the channel occupancy. Such decisions can take into account the CBR levels locally measured by vehicles. To this aim, the eNB can request each vehicle to periodically (the eNB determines the period), or on-demand, report its measured CBR [8].

## Progress of Standardization Activities on 5G V2X

3GPP has started the work on new 5G V2X enhancements under Release 15, and has completed the analysis of new use cases and requirements that will be supported by Release 15 [12]. Release 14 supports connected vehicle use cases such as forward collision warning. Release 15 new use cases are more focused on autonomous driving, and include: platooning, sensor and map sharing, information sharing for partial/conditional and high/full automated driving, and remote driving, among others. These applications can require the transmission of up to 50pps, a maximum latency between 3 and 10ms, and up to a 99.99% reliability level (defined in terms of PDR). To support these requirements, some of the LTE-V enhancements (referred to as V2X Phase 2 or eV2X) under discussion in Release 15 include [13]:

- Carrier Aggregation. LTE supports Carrier Aggregation up to 32 carriers. 3GPP is considering the aggregation of up to 8 carriers for LTE-V sidelink.
- 64-QAM modulation. Release 14 supports QPSK and 16-QAM. 64-QAM increases the data rate and can reduce the channel occupancy. 3GPP is currently analyzing the need for a new DMRS scheme when introducing 64-QAM.
- Reduction of the maximum time between the packet arrives at layer 1 and the start of the selected sub-channel for transmission. Release 15 seeks to reduce this maximum time from 20ms (Release 14) to less than 10ms.
- Shared resources between Modes 3 and 4. Both modes could independently operate using a different pool of RBs. However, Release 15 is analyzing the possibility for both modes to coexist in order to optimize the usage of resources. Such coexistence might require changes for both modes. To date, only minor changes have been discussed, e.g. giving higher

<sup>4</sup> The standard does not specify this threshold, but 3GPP working documents usually compute this threshold by adding -107dBm per RB in the sub-channel.

<sup>5</sup> Future sub-frames can be taken into account as each vehicle reserves a number of sub-channels using the sensing-based SPS scheme.

<sup>6</sup> Higher transmission frequencies augment the CR within a period of 1000 sub-frames. In this case, the values of  $CR_{Limit}$  for each CBR interval should be re-visited.

priority to Mode 3 reservations (indicated through the SCI), or including the resource reservation field in the SCI of Mode 3 transmissions so that Mode 4 can take them into account [14].

- **Transmit Diversity.** Release 15 is looking into the feasibility and gains that can be achieved in LTE-V using Transmit Diversity schemes (e.g. space time and frequency block coding, and small delay cyclic delay diversity).
- **Transmission Time Interval (TTI).** Release 15 is analyzing the possibility to reduce the TTI for LTE-V from 1ms to 0.5ms or 2 symbols. The analysis must take into account that vehicles with different TTI values (Release 14 and Release 15) will need to coexist in the same pool of RBs. Release 14 vehicles will not be able to overhear Release 15 vehicles using lower TTIs. However, their transmissions should not interfere with those from Release 14.

### Performance of LTE-V Mode 4

This section presents a comprehensive analysis of the performance of LTE-V Mode 4 under the Highway Fast (60 vehicles per km at 140km/h) and Highway Slow (120 vehicles per km at 70km/h) scenarios defined in [15]. Vehicles transmit packets of 190bytes, except one of every five packets that has a size of 300bytes [15]. Packets are periodically transmitted every 100, 50 or 20ms (10, 20 or 50pps respectively). We assume that a 10MHz channel at 5.9GHz is completely dedicated to Mode 4 using Adjacent PSCCH+PSSCH sub-channelization. Four sub-channels (of 12RBs each) are defined per sub-frame. The 300 bytes packets occupy two sub-channels, and the 190 bytes packets one<sup>7</sup>.  $P$  is set equal to 0. The propagation is modeled using the WINNER+ B1 pathloss model and a log-normal shadowing with spatial correlation. Radio transmission errors are modeled using Look-Up Tables (LUT) from [16] that map the SINR (Signal to Interference Noise Ratio) to the BLER (Block Error Rate). We assume perfect synchronization, and all vehicles transmit at 23dBm. The noise figure is set to 9dB and the RSRP threshold for the sensing-based SPS scheme is initially set to -110dBm.

Figure 3 compares the PDR of 802.11p and LTE-V as a function of the distance between transmitter and receiver. LTE-V is configured without redundant transmissions, and vehicles transmit 10pps or 50pps. The figure shows that LTE-V outperforms 802.11p when 802.11p is configured with the default 6Mbps data rate. However, 802.11p can improve its performance when configured with a 18Mbps data rate [17], and even outperform LTE-V. We will later show that LTE-V can also increase its performance under highly loaded scenarios by augmenting the MCS. Figure 3 shows that when vehicles transmit 10pps, 802.11p can achieve a performance close to LTE-V up to a distance of 160m if the 802.11p data rate is increased to 18Mbps. From this distance, 802.11p achieves a smaller PDR than LTE-V due to the PHY layer performance and the dominant effect of propagation. When the channel load increases (vehicles transmit 50pps), packet collisions become the dominant source of errors. In this case, 802.11p can outperform LTE-V (with its configuration under analysis) if the 802.11p data rate is increased to 18Mbps. As demonstrated in [17], augmenting the data rate reduces the channel load and packet collisions. The reduction of packet collisions under

highly loaded scenarios (like when vehicles transmit 50pps) compensates the negative physical layer effects of increasing the data rate and using a less robust modulation and coding rate.

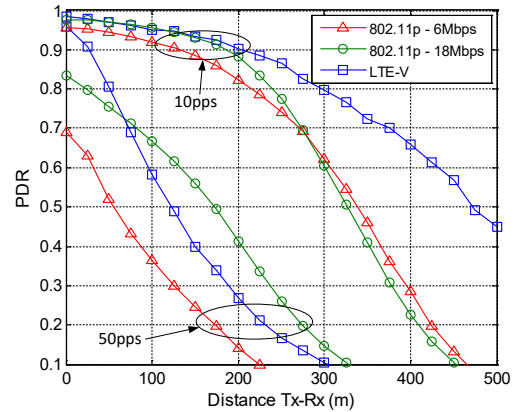


Figure 3 Comparison of LTE-V and 802.11p in Highway Slow.

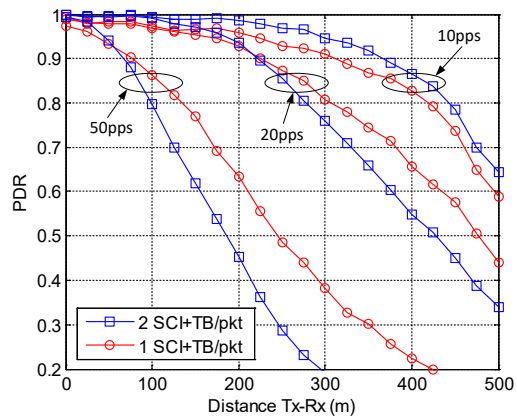


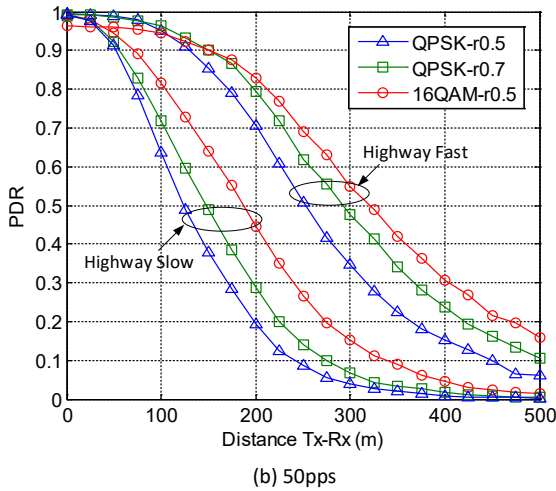
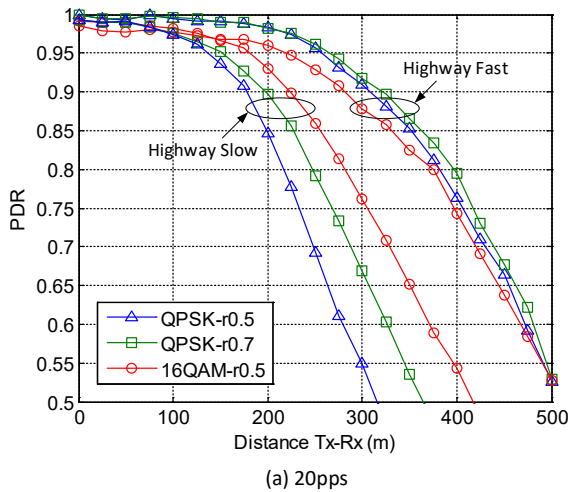
Figure 4 Effect of the number of transmissions per packet under the Highway Fast scenario.

Figure 3 shows that, just like 802.11p, the performance of LTE-V is significantly degraded when vehicles transmit more packets per second and the load increases. Many autonomous driving applications require vehicles to transmit a high number of packets per second. In this case, it is of interest to analyze the effectiveness of some of the congestion control mechanisms. Figure 4 shows the effect of transmitting each SCI+TB packet once (no redundancy) or twice. Figure 4 shows that redundant transmissions improve the PDR under low loads (10pps). However, redundant transmissions increase the load, and therefore the packet collisions as illustrated in Table 2. This results in that redundant transmissions decrease the PDR from a certain distance when the load augments (Figure 4). However, redundant transmissions always improve the PDR at short distances between the transmitter and receiver due to the impact of Half-Duplex (HD) errors. These errors occur when a vehicle is transmitting in a sub-frame, and cannot receive the packets of other vehicles transmitting in the same sub-frame.

<sup>7</sup> QPSK and a code rate of 0.5 is used for the TBs corresponding to the 300bytes packets (TBs occupy 20 RBs), whereas the 190bytes are transmitted with QPSK and a code rate of 0.7 (TBs occupy 10 RBs).

Scenario	Packets per second	Redundant transmission	% of occupied sub-channels	% of sub-channels with packet collisions
Highway Fast	10	No	17.08 %	0.78 %
		Yes	31.72 %	3.21 %
	20	No	32.22 %	2.76 %
		Yes	55.03 %	14.37 %
	50	No	62.08 %	23.33 %
		Yes	80.39 %	56.83 %
Highway Slow	10	No	32.46 %	3.38 %
		Yes	55.23 %	14.13 %
	20	No	55.05 %	14.53 %
		Yes	76.09 %	44.47 %
	50	No	80.91 %	56.64 %
		Yes	91.35 %	79.05 %

**Table 2** Impact of redundant transmissions and number of packets transmitted per second on packet collisions.



**Figure 5** Effect of the MCS.

The probability of HD errors is independent of the distance and non-negligible when each SCI+TB packet is transmitted only once and vehicles transmit a high number of packets per second (e.g. it is equal to 2.5% for 50pps). Redundant transmissions eliminate HD errors since the probability that two vehicles transmit their two SCI+TB packets in the same sub-frame is negligible.

[17] showed that increasing the data rate can improve the performance of 802.11p, especially when channels are congested. Figure 5 analyzes the effect of the data rate on the LTE-V

performance considering that all packets have a size of 190 bytes, and that each packet is transmitted twice. The figure depicts the PDR for QPSK and a code rate of 0.5 (QPSK-r0.5), QPSK and a code rate of 0.7 (QPSK-r0.7), and 16QAM and a code rate of 0.5 (16QAM-r0.5). Each packet occupies 16, 12 and 8 RBs with QPSK-r0.5, QPSK-r0.7 and 16QAM-r0.5, and each sub-frame includes 3, 4 and 6 sub-channels respectively. Increasing the data rate decreases the error protection, but also the number of packet collisions (Table 3). The lower number of collisions explains why increasing the data rate always improves the PDR under the Highway Slow scenario (Figure 5). This effect is not always observed in Highway Fast where vehicles move at faster speeds (140km/h). In this case, the Doppler effect has a significant impact on the link level performance of 16QAM-r0.5 that exhibits an error floor [16] (cannot reduce the BLER below 8% even for high SINRs). The lower packet collisions obtained with 16QAM-r0.5 does not compensate this error floor when vehicles transmit 20pps (Figure 5.a). However, when the load increases (50pps), 16QAM-r0.5 significantly reduces the packet collisions (Table 3), and achieves the best PDR despite its error floor (Figure 5.b).

Scenario	Packets per second	MCS	% of occupied sub-channels	% of sub-channels with packet collisions
Highway Fast	20	QPSK-r0.5	66.43 %	12.53 %
		QPSK-r0.7	51.93 %	7.12 %
		16QAM-r0.5	36.88 %	2.54 %
	50	QPSK-r0.5	97.19 %	71.85 %
		QPSK-r0.7	90.41 %	49.23 %
		16QAM-r0.5	78.57 %	20.56 %
Highway Slow	20	QPSK-r0.5	91.82 %	51.82 %
		QPSK-r0.7	82.28 %	29.82 %
		16QAM-r0.5	64.49 %	12.59 %
	50	QPSK-r0.5	99.82 %	97.05 %
		QPSK-r0.7	99.13 %	90.22 %
		16QAM-r0.5	95.49 %	67.26 %

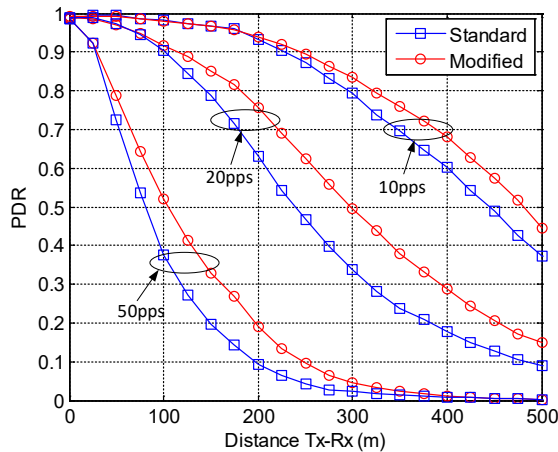
**Table 3.** Impact of the MCS on channel occupancy and packet collisions.

### Modified sensing-based SPS

The sensing-based SPS scheme can present certain inefficiencies when packets have different sizes and need a different number of sub-channels. This is the case with the traffic model in [15]. The baseline configuration utilized in the previous section results in that 300bytes packets require two sub-channels, and 190bytes packets only one. A reservation done for a 190bytes packet will not be maintained for the following *Reselection Counter* transmissions since a 300bytes packet will be generated before the counter is equal to 0. A new reservation will then be required for the 300bytes packet, and the two reserved sub-channels will be maintained for *Reselection Counter* transmissions. This is highly inefficient since the following four transmissions correspond to 190bytes packets, and they only need one sub-channel. This results in that the sensing-based SPS scheme excludes more resources in *Step 2* that are really being utilized, and more vehicles will compete for the non-excluded resources. To overcome this inefficiency, this paper proposes a modification to the sensing-based SPS scheme when the packets to be transmitted have different sizes, and the larger packets are less frequent than the smaller ones (likely scenario in vehicular communications). In particular, we propose that no sub-channels are reserved when



transmitting the larger packets (300bytes in this study). The sensing-based SPS scheme is used to select the sub-channels necessary to transmit this packet. However, the selected sub-channels will not be reserved for the following *Reselection Counter* transmissions. Instead, the sensing-based SPS scheme will be again applied to select the sub-channel used to transmit the next 190bytes packet. This sub-channel will be the one reserved for the following *Reselection Counter* transmissions.



**Figure 6** Comparison of the standard and modified sensing-based SPS (Highway Slow and redundant transmissions).

Figure 6 shows that the modified scheme improves the PDR compared to when applying the standard one defined in Release 14. The gains achieved are particularly relevant for medium to large distances and when vehicles transmit more packets per second. The gains achieved result from a more efficient utilization of sub-channels. Table 4 shows that vehicles utilize all the sub-channels they reserve with the modified scheme. On the other hand, the standard scheme results in that a large percentage of reserved sub-channels are not really utilized by the vehicles that reserved them. These unused sub-channels cannot be occupied by other vehicles, and the standard scheme occupies a lower percentage of sub-channels than our proposal. This has a negative effect on the PDR of the standard scheme since vehicles compete for a smaller number of sub-channels, and therefore experience more packet collisions.

Scheme	Packets per second	% of occupied sub-channels	% of reserved sub-channels that are utilized
Standard	10	55.97 %	68.12 %
	20	77.07 %	64.79 %
	50	92.04 %	62.32 %
Modified	10	56.79 %	100 %
	20	85.01 %	100 %
	50	99.03 %	100 %

**Table 4** Utilization of sub-channels by the standard and modified sensing-based SPS schemes (Highway Slow scenario and redundant transmissions).

## Conclusions

This paper has presented a comprehensive overview of the LTE-V standard for sidelink or V2V communications based on the PC5 interface. The paper also includes a detailed analysis of LTE-V Mode 4. This mode is considered the baseline scheme as it does

not require any cellular infrastructure support. The conducted study has shown that LTE-V can represent an alternative to 802.11p or DSRC due to its improved link budget, the support for redundant transmissions per packet, different sub-channelization schemes, and the infrastructure assistance under Mode 3. However, the distributed scheduling designed for LTE-V Mode 4 is not collision free, and requires a careful configuration of the transmission parameters, in particular for autonomous applications that require vehicles to transmit more packets per second. In this case, congestion control mechanisms and more efficient distributed scheduling schemes are necessary.

## References

- [1] M. Eiza, T. Owens, Q. Ni and Q. Shi, "Situation-Aware QoS Routing Algorithm for Vehicular Ad hoc Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 64, Issue 12, pp. 5520 – 5535, Dec 2015.
- [2] G. Araniti, C. Campolo, M. Condoluci, A. Iera and A. Molinaro, "LTE for Vehicular Networking: A Survey," *IEEE Communications Magazine*, Volume: 51, Issue: 5, May, 2013.
- [3] 3GPP, "TS 36.300 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (v14.3.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jun. 2017.
- [4] 3GPP, "TS 36.213 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (v14.3.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jun. 2017.
- [5] 3GPP, "TS 36.211 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (v14.3.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jun. 2017.
- [6] 3GPP, "TS 36.101 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (v14.4.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jul. 2017.
- [7] 3GPP, "TS 36.321 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (v14.3.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jun. 2017.
- [8] 3GPP, "TS 36.331 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (v14.3.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jul. 2017.
- [9] 3GPP, "TS 23.285 Architecture enhancements for V2X services (v14.3.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jun. 2017.
- [10] Qualcomm Incorporated, "R1-1611594. Congestion control for V2V," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #87, Reno, U.S.A., Nov. 2016.
- [11] Intel Corporation, "R1-1702143. Evaluation of congestion control schemes for V2V communication," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #88, Athens, Greece, Feb. 2017.
- [12] 3GPP, "TR 22.886 Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services (v15.0.0, Release 15)," 3GPP, Tech. Rep., Mar. 2017.
- [13] 3GPP MCC Support, "Draft Report of 3GPP TSG RAN WG1 #89 v0.2.0," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #89, Hangzhou, China, May. 2017.
- [14] Ericsson, "R1-1708942. Radio resource pool sharing between mode 3 and mode 4 UEs," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #89, Hangzhou, China, May. 2017.
- [15] 3GPP, "TR 36.885 Study on LTE-based V2X services (v14.0.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jul. 2016.
- [16] Huawei, HiSilicon, "R1-160284. DMRS enhancement of V2V," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #84, St. Julian's, Malta, Feb. 2016.
- [17] M. Sepulcre, J. Gozalvez, B. Coll-Perales "Why 6Mbps is not (always) the Optimum Data Rate for Beaconing in Vehicular Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Early Access, 2017.

## Acknowledgements

This work is supported in part by the Spanish Ministerio de Economía y Competitividad and FEDER funds under the project TEC2014-5716-R and research grant PEJ-2014-A-33622.

*Rafael Molina-Masegosa (rafael.molinam@umh.es)* received a Telecommunications Engineering Degree from the University of

*Granada (UGR), Spain. During his final degree project, he worked on brain image processing, directed by researchers from Signal Processing and Biomedical Applications (SiPBA) group from the UGR. In December 2015, he joined the UWICORE research laboratory from the Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Spain, where he is currently conducting his PhD working on 5G wireless vehicular networks.*

**Javier Gozalvez (j.gozalvez@umh.es)** received an electronics engineering degree from the Engineering School ENSEIRB (Bordeaux, France), and a PhD in mobile communications from the University of Strathclyde, Glasgow, U.K. Since October 2002, he is with the Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Spain, where he is currently an Associate Professor and Director of the UWICORE laboratory. At UWICORE, he leads research activities in the areas of vehicular networks, 5G device-centric

*networks, and wireless industrial networks. He has published over 135 papers in international conferences and journals, and has been Principal Investigator for 30 research projects and contracts. He has received several awards at international and national conferences, the best research paper award from the Journal of Network and Computer Applications (Elsevier) in 2014, and the Runner-up prize for the "Juan López de Peñalver" award of the Royal Academy of Engineering in Spain that recognizes the most notable Spanish engineers aged below 40. He is an expert evaluator for the European Commission and research agencies across Europe.*

# Geo-Based Scheduling for C-V2X Networks

Rafael Molina-Masegosa, Miguel Sepulcre and Javier Gozalvez

**Abstract**—Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) networks can operate without cellular infrastructure support. Vehicles can autonomously select their radio resources using the sensing-based Semi-Persistent Scheduling (SPS) algorithm specified by the Third Generation Partnership Project (3GPP). The sensing nature of the SPS scheme makes C-V2X communications prone to the well-known hidden-terminal problem. To address this problem, this paper proposes a novel geo-based scheduling scheme that allows vehicles to autonomously select their radio resources based on the location and ordering of neighboring vehicles on the road. The proposed scheme results in an implicit resource selection coordination between vehicles (even with those outside the sensing range) that reduces packet collisions. This paper evaluates analytically and through simulations the proposed scheduling scheme. The obtained results demonstrate that it reduces packet collisions and significantly increases the C-V2X performance compared to when using the sensing-based SPS scheme.

**Index Terms**—C-V2X, V2X, 5G V2X, LTE-V, scheduling, PC5, sidelink, V2V, hidden-terminal, radio resource management.

## I. INTRODUCTION

The 3GPP published in Release 14 a new standard to support V2X communications [1]. This standard is known as C-V2X (or Cellular-V2X, Long Term Evolution V2X, LTE-V2X, LTE-V), and supports direct V2V (Vehicle-to-Vehicle) communications with the PC5 interface (also referred to as sidelink). 3GPP Release 15 evolves C-V2X, and defines enhanced use cases [2]. 3GPP has currently an open study item under Release 16 to define the evolution of C-V2X [3].

C-V2X is the first cellular standard that allows direct V2V communications. C-V2X communications are managed by the cellular infrastructure when operating under mode 3, and several algorithms have been proposed in the literature for radio resource allocation (e.g. [4] and [5]). C-V2X mode 3 can benefit from the centralized control of the radio resource allocation, but it is only valid under cellular coverage. On the other hand, C-

V2X mode 4 can operate with and without cellular coverage. C-V2X mode 4 allows vehicles to autonomously select their radio resources. C-V2X mode 4 is highly relevant since V2V safety applications cannot depend on the availability of cellular coverage. C-V2X mode 4 defines a sensing-based Semi-Persistent Scheduling (SPS) algorithm that all vehicles implement to select their radio resources. The SPS scheme is sensing-based, so vehicles use the algorithm to estimate which resources are available. The sensing nature of the SPS algorithm results in that C-V2X mode 4 can be challenged by the hidden terminal problem: if two vehicles cannot sense each other, they can select and simultaneously transmit using the same radio resource which results in packet collisions [6]. Additional C-V2X mode 4 challenges include half-duplex operation and scalability. Standardized C-V2X equipment can only operate under Half Duplex mode [7], so vehicles cannot transmit and receive at the same time. Consequently, vehicles cannot overhear all other vehicles transmitting at the same time even if they transmit using different sub-channels. The negative effects resulting from hidden terminal and half-duplex operation, together with the bandwidth limitations (particularly relevant when considering bandwidth-demanding automated applications), influence the capacity of C-V2X networks to effectively support large number of vehicles. Mechanisms are hence necessary to control the load and ensure the scalability of the C-V2X network while maintaining high reliability levels.

Different studies have proposed options to improve the performance of C-V2X mode 4 and its SPS scheme. For example, [8]-[11] analyze and optimize the parameters of the SPS algorithm that are not fixed by the 3GPP standard. [12]-[15] propose modifications or extensions to the SPS algorithm but maintain most of its functionality. For example, [12] proposes that vehicles execute earlier the radio resource reselection process so that they can inform other vehicles in advance of the resources they will utilize for their following transmissions. A related objective is sought in [13] where authors propose that vehicles should inform other vehicles about the number of packets that are going to be transmitted using the same radio resources. [14] proposes that vehicles only reserve resources for the more frequent (and smaller) packets. Less frequent (and larger) packets should be transmitted without reserving resources (one shot transmissions). [15] modifies SPS so that higher weight is given to the most recent signal level measurements when selecting new resources. [16] proposes a power control algorithm to reduce interference when the channel load is high. A different alternative to control the channel load is packet dropping, which is evaluated in [17]. All these proposals improve the performance of SPS and C-V2X

Copyright (c) 2019 IEEE. Personal use of this material is permitted. However, permission to use this material for any other purposes must be obtained from the IEEE by sending a request to [pubs-permissions@ieee.org](mailto:pubs-permissions@ieee.org). This work was supported in part by the *Conselleria de Educaci3n, Investigaci3n, Cultura y Deporte de Generalitat Valenciana* through the project AICO/2018/A/095, the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and FEDER funds under the project TEC2017-88612-R, and grant PEJ-2014-A33622. Rafael Molina-Masegosa, Miguel Sepulcre, and Javier Gozalvez are with the UWICORE Laboratory, Universidad Miguel Hernandez de Elche (UMH), Spain. E-mail: [rafael.molinam@umh.es](mailto:rafael.molinam@umh.es), [msepulcre@umh.es](mailto:msepulcre@umh.es), [j.gozalvez@umh.es](mailto:j.gozalvez@umh.es).

mode 4. However, they are still affected by the challenges previously discussed, and in particular by the hidden-terminal problem that limits their gains. Combatting the hidden terminal problem requires vehicles to be aware of which radio resources are used by vehicles beyond their sensing range. This is the objective of this study that proposes a novel geo-based scheduling scheme for C-V2X Mode 4 that combats the hidden terminal challenge.

The proposed geo-based scheduling scheme selects radio resources based on the location of vehicles and their ordering on the road. The ordering is estimated using the location and speed information received in the vehicles' beacons. Beacons are referred to as CAMs (Cooperative Awareness Messages) in European Telecommunications Standards Institute (ETSI) standards and BSMs (Basic Safety Messages) in Society of Automotive Engineers (SAE) standards. All vehicles autonomously select their radio resources following the geographical ordering of the vehicles on the road. This coordinated process reduces packet collisions even with vehicles beyond the sensing range. The performance of the proposed scheme is analyzed analytically and through network simulations in highway scenarios. The results demonstrate that the geo-based scheduling scheme reduces packet collisions and significantly increases the C-V2X Mode 4 performance compared to when using the sensing-based SPS scheme.

## II. C-V2X COMMUNICATIONS

C-V2X mode 4 vehicles autonomously select their radio resources or sub-channels to transmit their data and control information [18]. A sub-channel is defined in C-V2X as a group of Resource Blocks (RBs) in the same 1ms sub-frame (Fig. 1). C-V2X divides its 10MHz (or 20MHz) channels into 1ms sub-frames and RBs of 180 kHz each. The data is transmitted over Transport Blocks (TBs), and the control information is transmitted in Sidelink Control Information (SCI) messages. Each TB contains a full packet (e.g. a beacon), and has an associated SCI that must be transmitted in the same sub-frame and occupies 2 RBs. The SCI includes important information that must be correctly received to decode the associated TB, and that includes among others: The Modulation and Coding Scheme (MCS) used to transmit the TB, the sub-channels occupied by the TB, and the resource reservation interval. This interval indicates how often the vehicle intends to use the selected sub-channels. It is equal to 100ms if vehicles transmit 10 beacons or packets per second (i.e. 10pps); 50ms for 20pps, and 20ms for 50pps. Vehicles reserve the selected sub-channels for *Reselection Counter* consecutive transmissions so that other vehicles can accurately estimate which sub-channels are occupied. *Reselection Counter* is a random number selected between: 5 and 15 for 10pps; 10 and 30 for 20pps; and 25 and 75 for 50pps. It is decremented by one after each packet transmission, and the vehicle must select with probability  $(1-P)$  new sub-channels when *Reselection Counter* is equal to zero. Following [8],  $P$  is configured in this study equal to 0.

Vehicles select their sub-channels using the sensing-based SPS scheme defined in 3GPP Release 14 [18]. Vehicles are required to continuously sense the transmissions in all sub-

channels to avoid selecting sub-channels that are used by other vehicles. To select its sub-channels, a vehicle must first identify the Selection Window (SW) where it can search for the candidate sub-channels. The SW is illustrated in Figure 1, and is defined as the time period between the time  $T$  at which the vehicle wants to reserve a sub-channel and  $T$  plus the maximum transmission latency. This latency is defined in the 3GPP standard [18] and is equal to 100ms, 50ms and 20ms when vehicles transmit 10pps, 20pps and 50pps, respectively. Within SW, the vehicle identifies all the Candidate Single-Subframe Resources (CSRs). A CSR is a group of adjacent sub-channels within the same sub-frame where the SCI+TB to be transmitted fits. The vehicle then creates a list  $L_1$  with all the CSRs in SW except those for which the vehicle: (1) has received in the previous 1000 sub-frames an SCI from another vehicle indicating that it will utilize this CSR at the same time that the vehicle will need it to transmit any of its next packets; and (2) has measured an average Reference Signal Received Power (RSRP) in the associated TB higher than a pre-defined threshold (equal to -120dBm in this study). If  $L_1$  does not include at least 20% of all CSRs in SW, the vehicle increases the RSRP threshold by 3dB and generates a new list  $L_1$ . This process is repeated until  $L_1$  includes at least 20% of all CSRs in SW. The vehicle then creates a second list  $L_2$  that includes the CSRs from  $L_1$  with the lowest average RSSI (Received Signal Strength Indicator). The average RSSI is computed over all its RBs and over the previous  $T_{CSR-j} \cdot T_{PI}$  sub-frames ( $j \in \mathbb{N}$ ), where  $T_{PI}$  is equal to 100, 50 and 20 when vehicles transmit 10pps, 20pps and 50pps respectively (Fig. 1).  $j$  is defined as  $1 \leq j \leq 10$  for 10pps,  $1 \leq j \leq 20$  for 20pps, and  $1 \leq j \leq 50$  for 50pps. The total number of CSRs in  $L_2$  must be equal to 20% of all CSRs in SW. Finally, the vehicle randomly chooses one of the CSRs in  $L_2$ , and utilizes it for the next *Reselection Counter* packet transmissions. New resources must be selected if a packet to be transmitted does not fit in the CSR previously reserved. It should be noted that current 3GPP standards only consider half duplex operation for C-V2X radios, i.e. a vehicle cannot transmit and receive at the same time [7].

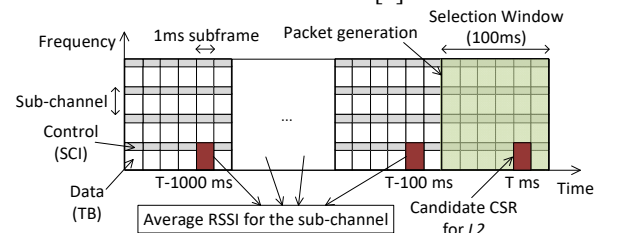


Fig. 1. C-V2X mode 4 channelization and scheduling for 10 pps [19].

## III. GEO-BASED SCHEDULING

The objective of the geo-based scheduling is to reduce packet collisions by coordinating the selection of sub-channels between vehicles, even between vehicles that cannot sense each other. To this aim, vehicles exploit the geographical location exchanged through beacons to form a virtual queue. The order of the vehicles in the virtual queue is used by the proposed geo-based scheduling to deterministically select the sub-channels that will be used by each vehicle to transmit. This deterministic selection has been designed to maximize the distance between two vehicles using the same sub-channel, and therefore



minimize packet collisions.

To achieve its objectives, the proposed scheme organizes the use of sub-channels into *Pools* that are common to all vehicles. A *Pool* is defined as the set of sub-channels included in all the sub-frames within a given time period. This time period is here set up equal to the packet transmission interval of beacons. A *Pool* has a total of  $N$  sub-channels:

$$N = SF \cdot SC = \frac{1000}{\lambda} \cdot SC \quad (1)$$

where  $SF$  is the number of 1ms sub-frames in the *Pool* and  $SC$  is the number of sub-channels per sub-frame.  $SF$  is set equal to  $1000/\lambda$ , where  $\lambda$  is the packet transmission frequency in pps (i.e. the inverse of the packet transmission interval). Fig. 2 illustrates the organization of a *Pool*. All vehicles are time-synchronized at the *Pool* level since they are synchronized at the sub-frame level (following 3GPP specifications [20]) and sub-frames are numbered using the Direct Frame Number (DFN) [21]; the DFN can be derived even if there is no cellular coverage. This does not imply that vehicles generate their beacons at the same time. The proposed scheduling scheme is completely distributed and is executed by all vehicles at the end of the time period that defines a *Pool*. It operates as follows:

1. All vehicles estimate at the end of a *Pool* the location of their neighboring vehicles. To this aim, vehicles use the location, speed and *TimeStamp* data transmitted by neighboring vehicles in their last beacons.
2. Each vehicle builds a virtual queue and orders all its neighboring vehicles in the queue based on their geographical location. The position of a vehicle in the queue is represented by an integer number referred to as *PosIndex*. *PosIndex* can take values between 0 and  $N-1$  where  $N$  is equal to the number of sub-channels in a *Pool*. Vehicles attach their *PosIndex* to their beacons<sup>1</sup>.
3. To compute their *PosIndex*, vehicles take into account the ordering of vehicles in the queue and the *PosIndex* information transmitted by neighboring vehicles. If a vehicle overhears that its preceding vehicle has a *PosIndex* equal to  $X$ , it chooses a *PosIndex* equal to  $X+1$ . If a vehicle does not detect any neighboring vehicle, it maintains its last *PosIndex* value.
4. Vehicles select their sub-channel(s) for transmission based on their *PosIndex*. Packet collisions can then be avoided if all vehicles correctly estimate their *PosIndex*. Such collisions are unavoidable if there are more vehicles than sub-channels in a *Pool*. However, if this is the case, the geo-based scheduling scheme maximizes the distance between vehicles that share the same sub-channels.

<sup>1</sup> This requires an overhead of 8 to 12 bits per beacon depending on the number of sub-channels per sub-frame. This overhead has been taken into account in our evaluation.

<sup>2</sup> For robustness, we only consider vehicles from which at least one of their last ten beacons has been received.

TABLE I. VARIABLES

Variable	Definition
$\beta$	Traffic density (vehicles per meter)
$\delta_{HD}, \delta_{SEN}, \delta_{PRO}, \delta_{COL}$	Probability of not correctly receiving a packet due to HD, SEN, PRO and COL errors, respectively
$\Delta PI_{i,r}$	Difference between PosIndex of vehicles $v_i$ and $v_r$
$d_{i,u}$	Distance between $v_i$ and its preceding vehicle $u$
$\lambda$	Packet transmission frequency (pps)
$2M$	Length of the Random Transmission Window
$N$	Number of sub-channels in a Pool
$N_P$	Number of sub-channels occupied by the transmitted packet
$PI_u$	PosIndex of vehicle $u$
$PR$	Center of the Random Transmission Window
$P_{SEN}$	Sensing power threshold
$SC$	Number of sub-channels in a sub-frame
$sc(PI)$	First sub-frame in the sub-frame $sf(PI)$
$SF$	Number of 1ms sub-frames in a Pool
$sf(PI)$	Sub-frame in the Pool corresponding to PosIndex $PI$
$U$	Number of detected preceding vehicles
$\mu, \eta$	Weighting parameters for PosIndex estimation
$w$	Number of transmissions in normal mode between two consecutive transmissions in random mode
$w_{min}, w_{max}$	Minimum and maximum value of $w$

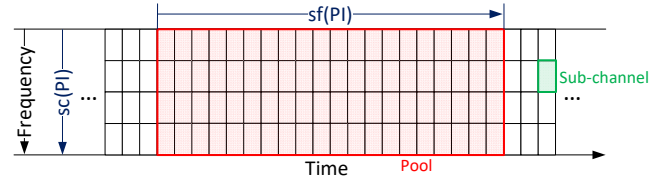


Fig. 2. *Pool* organization for  $\lambda=50$ pps ( $SF=20$ ),  $SC=4$  and  $N=80$ .

#### A. Location estimation and virtual queues

All vehicles estimate the location of their neighboring vehicles at the end of each *Pool* and using the information included in their last beacon. The location of a neighboring vehicle is estimated as the sum of the location included in its last beacon<sup>2</sup> plus the distance traveled since such last beacon was generated<sup>3</sup>. Similarly, each vehicle estimates its own location at the end of a *Pool* considering the location it included in its last beacon and the distance travelled since the last beacon was generated. Vehicles then order their neighboring vehicles in a virtual queue based on their estimated geographical location. The process followed to estimate the location of vehicles is robust against low GNSS location accuracies, and guarantees that all vehicles estimate the same location for a given neighboring vehicle. Consequently, all vehicles equally order their neighboring vehicles in their virtual queues, and will not select the same *PosIndex*. In addition, the scheduling scheme is robust against errors in the ordering of vehicles in the queue since all vehicles identify the same order.

#### B. PosIndex estimation

Vehicles use the virtual queue to estimate their *PosIndex* considering only their preceding vehicles. If a vehicle does not detect any preceding vehicle, it maintains its last *PosIndex* value. We denote as  $U$  the number of detected preceding vehicles. Vehicles are numbered from 1 to  $U$  with vehicle  $v_i$

<sup>3</sup> This distance is equal to the multiplication of the time elapsed since the last beacon was generated and the vehicles' speed (included in the beacons). The beacons also include the parameter *TimeStamp* that indicates the time at which the last beacon was generated.

being the closest preceding vehicle to the vehicle  $v_i$  that is computing its *PosIndex*, and vehicle  $v_U$  the farthest. If the *PosIndex* of vehicle  $u$  is  $PI_u$  then vehicle  $u-1$  should have a *PosIndex* equal to  $PI_u+1$ . The maximum value for the *PosIndex* is  $N-1$ , so the vehicle that follows the vehicle with *PosIndex* equal to  $N-1$  selects a *PosIndex* equal to 0. If all vehicles were perfectly ordered, vehicle  $v_i$  should just check the *PosIndex* of preceding vehicle  $v_1$  and select its *PosIndex* equal to  $PI_1+1$ . However, there can be errors in the estimation of the *PosIndex*, and hence  $v_i$  has to check the *PosIndex* of all its preceding vehicles.  $v_i$  computes then its *PosIndex* as:

$$PI_i = \arg \max_{PI} \sum_{u=1}^U \Phi(PI, PI_u + u) \quad (2)$$

where

$$\Phi(X, Y) = \begin{cases} 1 & \text{if } X = Y \\ 0 & \text{if } X \neq Y \end{cases} \quad (3)$$

Equation (2) weights equally the *PosIndex* of all the preceding vehicles for robustness. However, it is not optimal to rapidly update the *PosIndex* values when there is a change in the ordering of vehicles in the queue. This is illustrated in Fig. 3 where  $v_i$  needs to compute its *PosIndex*. Let's suppose that the vehicle has detected three preceding vehicles in its sensing range, and their *PosIndex* are equal to 9, 15 and 16, respectively. The vehicle computing the *PosIndex* should select a *PosIndex* equal to 12 since the correct ordering of the preceding vehicles should be 9, 10 and 11 (vehicle 9 has a preceding vehicle with *PosIndex* equal to 8). However, vehicles with *PosIndex* equal to 15 and 16 have not yet modified their *PosIndex*, and (2) results in that  $v_i$  selects a *PosIndex* equal to 17. This vehicle will only select the correct *PosIndex* (i.e. 12) when vehicle 15 updates its *PosIndex*. The *PosIndex* could be updated faster if it was chosen only as a function of the *PosIndex* of the farthest vehicle. However, this will make the scheme very unreliable if a single vehicle incorrectly estimates its *PosIndex*. There is then a trade-off between robustness and speed to update the *PosIndex* values, and we propose to address it by replacing (2) with (4):

$$PI_i = \arg \max_{PI} \sum_{u=1}^U \Phi(PI, PI_u + u) \cdot (\mu + \eta \cdot d_{i,u}) \quad (4)$$

where  $d_{i,u}$  is the distance between  $v_i$  and each of its preceding vehicles.  $\mu$  and  $\eta$  are weighting parameters. A high  $\mu/\eta$  increases the robustness of the *PosIndex* estimation, while a low  $\mu/\eta$  increases the speed to update the *PosIndex* when there are changes in the ordering.  $\mu$  and  $\eta$  are set equal to 10 and 0.1 to achieve a compromise between robustness and speed.

### C. Sub-channel selection

Vehicles select their sub-channel(s) from the *Pool* based on their *PosIndex*. The organization of a *Pool* is illustrated in Fig. 2. We number the sub-frames in a *Pool* from 0 to  $SF-1$  and the sub-channels in a frame from 0 to  $SC-1$ . A vehicle with *PosIndex* equal to  $PI$  selects a sub-channel in the sub-frame:

$$sf(PI) = PI \bmod SF \quad (5)$$

where  $X \bmod Y$  is the modulo operation. Let's suppose that the vehicle has to transmit a packet that occupies  $N_p$  sub-channels

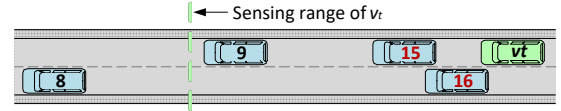


Fig. 3. Illustration of trade-offs in the *PosIndex* estimation.

(with  $N_p \geq 1$ ). The first sub-channel that the vehicle with *PosIndex*  $PI$  selects in sub-frame  $sf(PI)$  is the sub-channel numbered  $sc(PI)$  with:

$$sc(PI) = 2 \cdot R(PI) \cdot N_p \bmod SC + \left\lfloor \frac{2 \cdot R(PI) \cdot N_p}{SC} \right\rfloor \cdot N_p \quad (6)$$

and

$$R(PI) = \left\lfloor \frac{PI}{SF} \right\rfloor \cdot \bmod \left\lfloor \frac{SC}{N_p} \right\rfloor \quad (7)$$

If  $N_p > 1$ , the vehicle selects the sub-channels numbered  $sc(PI)$  to  $sc(PI) + N_p - 1$  in sub-frame  $sf(PI)$ . If there are more vehicles in the scenario than available sub-channels, vehicles with the same *PosIndex* will share the same sub-channel(s). However, the scheme maximizes the distance between vehicles that share the same sub-channel(s). This minimizes the interference and reduces the risk of packet collisions. It should be noted that the proposed sub-channel selection process is valid for different packet sizes. The modulation and coding scheme (MCS) can be adapted to fit a packet into  $N_p$  sub-channels with  $N_p$  between 1 and  $SC$ .

### D. Randomization

The proposed scheme avoids packet collisions between vehicles (even with vehicles outside the sensing range) if the *PosIndex* values are correctly estimated. Most errors in the *PosIndex* estimation are rapidly detected and fixed by the proposed scheme. However, some errors could persist over time and degrade the performance as illustrated in Fig. 4. Let's suppose that vehicles in the left group of Fig. 4.a cannot sense the vehicles on the right group. In this case, vehicles compute their *PosIndex* independently of the *PosIndex* values of the vehicles in the other group. It could then happen that the last vehicle of the left group has the same *PosIndex* as the first vehicle of the right group. When the two groups get closer and vehicles start sensing each other (Fig. 4.b), the transmissions from the two vehicles with the same *PosIndex* will collide. These vehicles will not be able to detect the packet collision that will persist over time. In addition, nearby vehicles will not receive the packets from the two vehicles that collide, so the following vehicle (2<sup>nd</sup> vehicle in the right group) will select their *PosIndex* (Fig. 4.b). This error will propagate (Fig. 4.c) and the transmissions from all vehicles will collide since they all end up selecting the same *PosIndex* value.

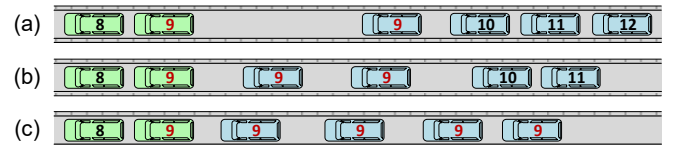


Fig. 4. *PosIndex* error propagation.

To avoid these errors, we introduce some randomization in

the proposed scheduling scheme. In particular, each vehicle is requested to transmit one out of  $w$  packets in a sub-channel(s) selected randomly. These packets still include the *PosIndex* estimated following the process previously explained.  $w$  is randomly chosen between  $w_{min}=5$  and  $w_{max}=15$  for  $\lambda=10$ pps, between  $w_{min}=10$  and  $w_{max}=30$  for  $\lambda=20$ pps, and between  $w_{min}=25$  and  $w_{max}=75$  for  $\lambda=50$ pps. These values have been chosen considering that 3GPP specifications allow C-V2X mode 4 vehicles to use the same sub-channels between 0.5s (equal to  $w_{min}/\lambda$ ) and 1.5s (equal to  $w_{max}/\lambda$ ). We also consider these time limits for our scheme. The probability that a vehicle has to transmit using a randomly selected sub-channel is then:

$$p^{ran} = \left( \frac{w_{min} + w_{max}}{2} \right)^{-1} \quad (8)$$

The random sub-channel(s) is selected from a set of sub-channels that excludes the sub-channel(s) corresponding to the *PosIndex* of the vehicle. This set is chosen to maximize the distance with potentially colliding vehicles, and is referred to as Random Transmission Window. This distance can be maximized if a vehicle with *PosIndex*  $PI$  selects the Random Transmission Window around the sub-channel corresponding to the *PosIndex*  $PR$ :

$$PR = \begin{cases} PI + \lceil N/2 \rceil - SF/2 & \text{if } SC \bmod 2 = 0 \\ PI + \lceil N/2 \rceil & \text{if } SC \bmod 2 = 1 \end{cases} \quad (9)$$

Following this equation, the vehicle randomly selects a sub-channel within the set of sub-channels identified by the *PosIndex* values included in the interval  $[(PR-M) \bmod N, (PR+M) \bmod N]$ . In this study,  $M$  has been set equal to 5, 2 and 1 for vehicles transmitting 10pps, 20pps and 50pps, respectively. These values have been chosen to guarantee with 99% probability that two vehicles with the same *PosIndex* can detect each other during their random transmissions. This will allow them to detect that they share the same *PosIndex* and that they have to correct them. For example, two vehicles do their random transmission in the same *Pool* with probability  $p^{ran}=0.1$  when  $\lambda=10$ pps. The probability that both vehicles randomly select the same sub-channel is  $1/(2M+1)=0.09$  ( $M=5$  for  $\lambda=10$ pps). Vehicles can then detect each other during their random transmissions with 99.1% probability.

The distance between potentially colliding vehicles is maximized if  $PR=PI+N/2$ . However, this value can generate half-duplex errors with nearby vehicles (e.g. those with *PosIndex* equal to  $PI+1$  or  $PI-1$ ) when  $SC$  is even. To avoid this, we subtract  $SF/2$  in (9) when  $SC$  is even. Fig. 5 illustrates an example for a vehicle with *PosIndex* equal to 3, a pool with  $N=80$  sub-channels ( $SF=20$  and  $SC=4$ ) and  $M$  equal to 1 (i.e. 50pps). The sub-channel corresponding to  $PI=3$  is shaded in the figure. The sub-channels included in the Random Transmission Window are stripped in Fig. 5, and correspond to *PosIndex* values within the interval  $[52,54]$ . The random transmission within this interval can collide with the transmissions from vehicles with *PosIndex* 52 to 54. However, the impact of such collisions is mitigated by the distance between the colliding vehicles. Without the term  $SF/2$  in (9), the Random Transmission Window would correspond to *PosIndex* values

from 42 to 44 (sub-frames from 2 to 4), which could cause a half-duplex error between the vehicle with  $PI=3$  (when it operates in random mode) and its adjacent vehicles with  $PI=2$  and  $PI=4$  (when they operate in normal mode).

The proposed scheduling scheme has been presented in all Section III considering scenarios with a single lane and driving direction. However, it is perfectly valid for scenarios with multiple lanes and driving directions since the order in the virtual queue is established based on the vehicles' location. Different driving directions increase the rate at which the *PosIndex* values change. However, Section VI demonstrates that the proposed scheduling scheme can cope with these changes, and significantly outperform sensing-based SPS.

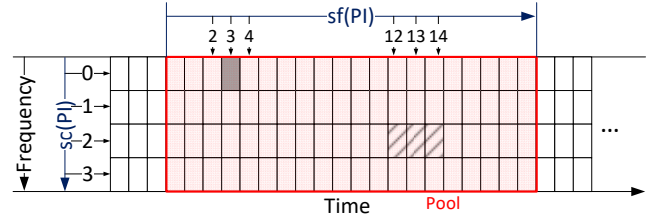


Fig. 5. Random Transmission Window.

#### IV. ANALYTICAL PERFORMANCE MODELS

The performance of the proposed scheduling scheme is compared against that achieved with sensing-based SPS. To this aim, this study evaluates analytically and through simulations their PDR (Packet Delivery Ratio) performance as a function of the distance between transmitter and receiver. The PDR is modelled following the approach presented in [19] to evaluate the performance of C-V2X mode 4 using sensing-based SPS. These models are here extended to analytically quantify the C-V2X performance when using the proposed geo-based scheduling scheme. To derive the PDR, we quantify the following four mutually exclusive types of transmission errors present in C-V2X:

- 1) Errors due to half-duplex transmissions (*HD*). A half-duplex error happens when a receiving vehicle is transmitting a packet in the same sub-frame. The packet is then lost since the receiving vehicle cannot transmit and receive in the same sub-frame. The scheduling scheme has hence an impact on HD errors that depend on the probability that two vehicles select the same sub-frame to transmit their packets.
- 2) Errors due to a received signal power below the sensing power threshold (*SEN*). A packet cannot be decoded if it is received with a signal power below the sensing power threshold  $P_{SEN}$ . The probability of suffering an *SEN* error depends on the distance between transmitter and receiver, the sensing power threshold, the transmission power and the propagation, but not on the scheduling scheme.
- 3) Errors due to propagation effects (*PRO*). *PRO* errors are produced when the received signal power of a packet is higher than  $P_{SEN}$ , but the experienced SNR (Signal to Noise Ratio) is not sufficient to correctly decode the packet. The SNR is computed considering only propagation effects and not interference and packet collisions. *PRO* errors depend on the same factors as *SEN* errors plus on the MCS used to

transmit a packet. In this study, PRO errors exclude HD and SEN errors.

- 4) Error due to packet collisions (COL). This error is produced when a vehicle transmits on the same sub-channel and sub-frame than another vehicle, and the resulting SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) is not sufficient to correctly decode the packet. COL errors depend on the scheduling scheme, the traffic density, the transmission parameters, the distance between transmitter and receiver, and the propagation. In this study, COL errors exclude those quantified in 1), 2) and 3).

We can then assume that a packet is correctly received if none of the four possible errors occur. The PDR is then:

$$PDR(d_{i,r}) = (1 - \delta_{SEN}(d_{i,r})) \cdot (1 - \delta_{PRO}(d_{i,r})) \cdot (1 - \delta_{HD}(d_{i,r})) \cdot (1 - \delta_{COL}(d_{i,r})) \quad (10)$$

where  $\delta_{HD}$ ,  $\delta_{SEN}$ ,  $\delta_{PRO}$  and  $\delta_{COL}$  represent, respectively, the probability of not correctly receiving a packet due to HD, SEN, PRO and COL errors.  $d_{i,r}$  represents the distance between the transmitting ( $v_i$ ) and receiving vehicles ( $v_r$ ).

The PDR is here analytically derived for a multi-lane highway scenario with a traffic density of  $\beta$  vehicles per meter (i.e. average distance between vehicles of  $1/\beta$  meters). We define  $\Delta PI_{i,r}$  as the difference between the *PosIndex* of vehicles  $v_i$  and  $v_r$ . This difference is related to the distance between the two vehicles, the traffic density and the number of sub-channels in the *Pool*:

$$\Delta PI_{i,r} = \|\beta \cdot d_{i,r}\| \bmod N \quad (11)$$

where the operation  $\|x\|$  represents the nearest integer of  $x$ .

All vehicles transmit  $\lambda$  packets per second with power  $P_t$  in a 10MHz channel at 5.9GHz. Following the 3GPP traffic model [20], each vehicle periodically generates beacons or packets. One out of five packets contains 300 bytes of data (referred to as LF or Low Frequency), while the other four contain 190 bytes (HF or High Frequency).

#### A. HD errors

To compute  $\delta_{HD}$ , we need to differentiate when the vehicle is transmitting in the sub-channel corresponding to its *PosIndex* (normal mode) and when it is using the random sub-channel (random mode). The probability that vehicle  $v_r$  cannot receive a packet due to the HD effect can be approximated as:

$$\delta_{HD}(d_{i,r}) = p^{ran} \cdot \delta_{HD}^{ran}(d_{i,r}) + p^{nor} \cdot \delta_{HD}^{nor}(d_{i,r}) \quad (12)$$

where  $\delta_{HD}^{ran}(d_{i,r})$  and  $\delta_{HD}^{nor}(d_{i,r})$  represent the probability that  $v_r$  cannot receive a packet due to the half-duplex effect when  $v_i$  operates in random and normal mode, respectively.  $p^{nor}$  is the probability that  $v_i$  operates in normal mode. Let's consider the example in Fig. 5 where  $v_i$  has a *PosIndex* equal to 3 and selects the sub-channel in grey when operating under normal mode. In this case, vehicles operating under normal mode and transmitting in the same sub-frame as  $v_i$  will not receive the packet from  $v_i$ . Their probability of HD error is then equal to the probability that they are in normal mode, i.e.  $p^{nor} = 1 - p^{ran}$ .

An HD error can also occur when  $v_i$  is operating under

normal mode (*PosIndex* of 3 and the grey sub-channel in Fig. 5) and the receiving vehicles that normally operate under sub-frames 12, 13 and 14 (Fig. 5) operate under random mode. Following (9), these vehicles can select a sub-channel in the same sub-frame as the grey sub-channel when they operate in random mode. In this case, the probability of HD error is equal to the probability that the receiving vehicle is in random mode multiplied by the probability that it selects the same sub-frame as  $v_i$  when  $v_i$  operates under normal mode (i.e. sub-frame 3 in Fig. 5). In this case, the probability of HD error is equal to  $p^{ran}/(2M+1)$ . The probability of HD error when  $v_i$  operates under normal mode can then be expressed as:

$$\delta_{HD}^{nor}(d_{i,r}) = \begin{cases} p^{nor} & \text{if } \Delta PI_{i,r} \in \{0, K/2, K, 3K/2\} \\ p^{ran}/(2M+1) & \text{if } \Delta PI_{i,r} \in R_{K/4} \cup R_{3K/4} \cup R_{5K/4} \cup R_{7K/4} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

Where  $K = N / \lfloor SC / 2 \rfloor$  and  $R_X$  is the set of  $2M+1$  *PosIndex* values centered at  $X$ :

$$R_X = \{X - M, \dots, X + M\} \quad (14)$$

Under random mode,  $v_i$  selects a sub-channel and sub-frame following (5), (6) and (9). In Fig. 5, the set of candidate sub-channels include sub-channel 2 in sub-frames 12, 13 and 14. The probability that vehicles in these sub-frames experience an HD error is equal to the probability that they operate in normal mode multiplied by the probability that  $v_i$  selects their sub-frame for its random transmission. This probability of HD error is equal to  $p^{nor}/(2M+1)$ . Similarly, an HD error can occur if vehicles with a normal transmission in sub-frames 2, 3 and 4 operate under random mode, and select the same sub-frame as  $v_i$  when  $v_i$  is operating under random mode. This probability of HD error is equal to  $p^{ran}/(2M+1)$ . The probability of HD error when  $v_i$  operates under random mode is then:

$$\delta_{HD}^{ran}(d_{i,r}) = \begin{cases} p^{nor} / (2M+1) & \text{if } \Delta PI_{i,r} \in R_{K/4} \cup R_{3K/4} \cup R_{5K/4} \cup R_{7K/4} \\ p^{ran} / (2M+1) & \text{if } \Delta PI_{i,r} \in R_0 \cup R_{K/2} \cup R_K \cup R_{3K/2} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

#### B. SEN errors

SEN errors are not influenced by the scheduling scheme. The probability of error because a packet is received with a signal power below the sensing power threshold  $P_{SEN}$  is then the same whether using the sensing-based SPS scheme or our proposal. This probability was derived in [19] and is equal to:

$$\delta_{SEN}(d_{i,r}) = \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{P_t - PL(d_{i,r}) - P_{SEN}}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right) \quad (16)$$

where  $\operatorname{erf}$  is the well-known error function,  $d_{i,r}$  is the distance between transmitter and receiver,  $P_t$  is the transmission power,  $PL(d_{i,r})$  is the pathloss at  $d_{i,r}$ , and  $\sigma$  is the variance of the shadowing (SH) that is modeled as a log-normal random distribution with zero mean. Readers are referred to [19] for details on how this probability was computed.

#### C. PRO errors

The probability that a packet is lost due to propagation effects does not depend on the scheduling scheme. It depends on the SNR of the received packet and the PHY layer performance of the receiver. The PHY layer performance depends on the size

of the packet and the MCS used to transmit it. [19] presented an analytical model for  $\delta_{PRO}$  considering all packets of equal size and using the same MCS. This paper extends this model to consider LF and HF packets encoded with different MCS. In this case, the probability that a packet is lost due to propagation effects can be expressed as:

$$\delta_{PRO}(d_{i,r}) = p^{HF} \cdot \delta_{PRO}^{HF}(d_{i,r}) + p^{LF} \cdot \delta_{PRO}^{LF}(d_{i,r}) \quad (17)$$

where  $p^{LF}(=1/5)$  and  $p^{HF}(=4/5)$  are the probability to transmit an LF or HF packet.  $\delta_{PRO}^{HF}(d_{i,r})$  and  $\delta_{PRO}^{LF}(d_{i,r})$  represent the probabilities that an HF or LF packet is lost due to propagation effects, respectively. The SNR at a receiver can be expressed (in dB) as a random variable:

$$SNR(d_{i,r}) = P_r(d_{i,r}) - N_0 = P_t - PL(d_{i,r}) - SH - N_0 \quad (18)$$

where  $N_0$  is the noise power. The pathloss is constant at a fixed distance  $d_{i,r}$ , so the SNR follows the same distribution as the shadowing  $SH$  but with a mean value equal to  $P_t - PL - N_0$ .

We use the link level Look-Up Tables (LUTs) presented in [22] to model the C-V2X PHY layer performance. These LUTs relate the Block Error Rate (BLER) to the SNR for a packet size, MCS, scenario (highway or urban), and relative speed between transmitter and receiver. The probability that an HF packet is lost due to propagation effects is:

$$\delta_{PRO}^{HF}(d_{i,r}) = \sum_{s=-\infty}^{+\infty} BLER^{HF}(s) \cdot f_{SNR|P_r > P_{SEN}, d_{i,r}}(s) \quad (19)$$

where

$$f_{SNR|P_r > P_{SEN}, d_{i,r}}(s) = \begin{cases} \frac{f_{SNR, d_{i,r}}(s)}{1 - \delta_{SEN}} & \text{if } P_r > P_{SEN} \\ 0 & \text{if } P_r \leq P_{SEN} \end{cases} \quad (20)$$

$BLER^{HF}(s)$  represents the BLER for an SNR equal to  $s$  and the MCS utilized to transmit the HF packets.  $f_{SNR, d_{i,r}}(s)$  represents the PDF of the SNR.  $f_{SNR|P_r > P_{SEN}, d_{i,r}}(s)$  is the PDF of the SNR at  $d_{i,r}$  for SNR values with  $P_r > P_{SEN}$ . The objective of this term is to omit packets with a received signal power lower than  $P_{SEN}$  since they have already been taken into account in (16). The PDF of the SNR needs to be normalized by  $1 - \delta_{SEN}$  in (20) so that the integral of this equation between  $-\infty$  and  $+\infty$  is 1, and the probability  $\delta_{PRO}^{HF}$  is between 0 and 1.

$\delta_{PRO}^{LF}$  is derived similarly, and can be expressed as:

$$\delta_{PRO}^{LF}(d_{i,r}) = \sum_{s=-\infty}^{+\infty} BLER^{LF}(s) \cdot f_{SNR|P_r > P_{SEN}, d_{i,r}}(s) \quad (21)$$

#### D. COL errors

Errors due to packet collisions are produced when an interfering vehicle  $v_i$  transmits on the same sub-frame and sub-channel than the transmitting vehicle  $v_t$ , and the interference generated results in an SINR that is not sufficient for the receiving vehicle  $v_r$  to correctly decode the packet. This error depends on the scheduling scheme, and hence it is necessary to derive the analytical expression for our proposal. The probability of error due to collisions also depends on the packet size, and can hence be expressed as:

$$\delta_{COL}(d_{i,r}) = p^{HF} \cdot \delta_{COL}^{HF}(d_{i,r}) + p^{LF} \cdot \delta_{COL}^{LF}(d_{i,r}) \quad (22)$$

where  $\delta_{COL}^{HF}(d_{i,r})$  and  $\delta_{COL}^{LF}(d_{i,r})$  represent the probability of packet loss due to collisions when the transmitting vehicle transmits a HF or a LF packet, respectively. These probabilities can be expressed as a function of the probability that the transmitting vehicle is in normal or random mode, and the probabilities that packet collisions occur when operating under each mode and when transmitting HF or LF packets:

$$\delta_{COL}^{HF}(d_{i,r}) = p^{nor} \cdot \delta_{COL}^{nor, HF}(d_{i,r}) + p^{ran} \cdot \delta_{COL}^{ran, HF}(d_{i,r}) \quad (23)$$

$$\delta_{COL}^{LF}(d_{i,r}) = p^{nor} \cdot \delta_{COL}^{nor, LF}(d_{i,r}) + p^{ran} \cdot \delta_{COL}^{ran, LF}(d_{i,r}) \quad (24)$$

where:

$$\delta_{COL}^{nor, HF}(d_{i,r}) = 1 - \prod_i (1 - \delta_{COL}^{nor, HF, i}(d_{i,r}, d_{t,i}, d_{i,r})) \quad (25)$$

$$\delta_{COL}^{nor, LF}(d_{i,r}) = 1 - \prod_i (1 - \delta_{COL}^{nor, LF, i}(d_{i,r}, d_{t,i}, d_{i,r})) \quad (26)$$

$$\delta_{COL}^{ran, HF}(d_{i,r}) = 1 - \prod_i (1 - \delta_{COL}^{ran, HF, i}(d_{i,r}, d_{t,i}, d_{i,r})) \quad (27)$$

$$\delta_{COL}^{ran, LF}(d_{i,r}) = 1 - \prod_i (1 - \delta_{COL}^{ran, LF, i}(d_{i,r}, d_{t,i}, d_{i,r})) \quad (28)$$

Eq. (25) to (28) are expressed as a function of the interfering vehicle  $v_i$  and its distance to the transmitting and receiving vehicles.  $v_i$  can provoke a COL error if  $v_t$  and  $v_i$  simultaneously transmit using the same sub-channel, and the interference generated by  $v_i$  is such that the packet is lost due to the SINR. The previous equations can be expressed as:

$$\delta_{COL}^{nor, HF, i}(d_{i,r}, d_{t,i}, d_{i,r}) = p_{SIM}^{nor, HF}(d_{t,i}) \cdot p_{INT}^{HF}(d_{i,r}, d_{i,r}) \quad (29)$$

$$\delta_{COL}^{nor, LF, i}(d_{i,r}, d_{t,i}, d_{i,r}) = p_{SIM}^{nor, LF}(d_{t,i}) \cdot p_{INT}^{LF}(d_{i,r}, d_{i,r}) \quad (30)$$

$$\delta_{COL}^{ran, HF, i}(d_{i,r}, d_{t,i}, d_{i,r}) = p_{SIM}^{ran, HF}(d_{t,i}) \cdot p_{INT}^{HF}(d_{i,r}, d_{i,r}) \quad (31)$$

$$\delta_{COL}^{ran, LF, i}(d_{i,r}, d_{t,i}, d_{i,r}) = p_{SIM}^{ran, LF}(d_{t,i}) \cdot p_{INT}^{LF}(d_{i,r}, d_{i,r}) \quad (32)$$

$p_{SIM}^{nor, HF}(d_{t,i})$  in eq. (29) represents the probability that  $v_t$  and  $v_i$  simultaneously transmit using the same sub-channel when  $v_t$  is transmitting an HF packet under normal mode.  $p_{INT}^{HF}(d_{i,r}, d_{i,r})$  is the probability that the interference generated by  $v_i$  on  $v_r$  is higher than a threshold that would provoke that if  $v_t$  and  $v_i$  simultaneously transmit on the same sub-channel,  $v_r$  cannot correctly decode the packet. Terms in eq. (30), (31) and (32) are analogous but for LF packets and/or transmissions in random mode. These probabilities are next computed.

#### D1. Probability that interference is higher than threshold

We assume that the effect of the interference from  $v_i$  to  $v_r$  is equivalent to additional noise. The SINR at  $v_r$  can then be expressed in dB as:

$$SINR(d_{i,r}, d_{i,r}) = P_r(d_{i,r}) - P_i(d_{i,r}) - N_0 \quad (33)$$



where  $P_i$  is the signal power received by  $v_r$  from  $v_i$ .  $SINR$  is hence a random variable resulting from the sum of two random variables ( $P_r$  and  $P_i$ ). The PDF of the  $SINR$  can hence be obtained from the cross correlation of the PDF of  $P_r$  and  $P_i$ . The probability that  $v_r$  incorrectly receives a HF packet due to low  $SINR$  (i.e. low  $P_r$  and/or high  $P_i$ ) is then:

$$p_{SINR}^{HF}(d_{t,r}, d_{i,r}) = \sum_{s=-\infty}^{+\infty} BLER^{HF}(s) \cdot f_{SINR|P_r > P_{SEN}, d_{t,r}, d_{i,r}}(s) \quad (34)$$

Equation (34) includes the HF packets incorrectly received due to propagation effects. These packets were already considered in  $\delta_{PRO}^{HF}(d_{t,r})$ . To only consider those HF packets lost due to collisions, we perform the following normalization:

$$p_{INT}^{HF}(d_{t,r}, d_{i,r}) = \frac{p_{SINR}^{HF}(d_{t,r}, d_{i,r}) - \delta_{PRO}^{HF}(d_{t,r})}{1 - \delta_{PRO}^{HF}(d_{t,r})} \quad (35)$$

where  $\delta_{PRO}^{HF}(d_{t,r})$  is obtained from (19). The same LUTs used in (19) are used in (34) to estimate the BLER in  $BLER^{HF}(s)$ .

The equations for LF packets are analogous to those of HF packets, and are obtained replacing the HF-dependent variables in (34) and (35) by the LF ones:

$$p_{SINR}^{LF}(d_{t,r}, d_{i,r}) = \sum_{s=-\infty}^{+\infty} BL^{LF}(s) \cdot f_{SINR|P_r > P_{SEN}, d_{t,r}, d_{i,r}}(s) \quad (36)$$

$$p_{INT}^{LF}(d_{t,r}, d_{i,r}) = \frac{p_{SINR}^{LF}(d_{t,r}, d_{i,r}) - \delta_{PRO}^{LF}(d_{t,r})}{1 - \delta_{PRO}^{LF}(d_{t,r})} \quad (37)$$

## D2. Probability that $v_t$ and $v_i$ simultaneously transmit on the same sub-channel

The probability  $p_{SIM}$  that  $v_t$  and  $v_i$  transmit simultaneously in the same sub-frame and sub-channel depends on whether they operate in normal or random mode, and on whether they transmit a HF or LF packet. When  $v_t$  is in normal mode and transmits a HF packet, it can receive interference from vehicles  $v_i$  operating in normal mode and using the same  $PosIndex$  (i.e.  $\Delta PI_{t,i}=0$ ). This situation can occur with probability  $p^{nor}$ .  $v_t$  can also receive interference from a vehicle  $v_i$  that transmits an LF packet in normal mode with  $\Delta PI_{t,i}=K$ . This is case since we consider that LF packets occupy twice the number of sub-channels of HF packets. The probability that this situation occurs is equal to the probability that  $v_i$  is in normal mode and transmits an LF packet ( $p^{nor} \cdot p^{LF}$ ).  $v_t$  can also receive interference from vehicles  $v_i$  operating under random mode. More specifically, when  $v_t$  transmits an HF packet under normal mode, it can be interfered with probability  $p^{ran}/(2M+1)$  by vehicles  $v_i$  operating under random mode and with  $\Delta PI_{t,i} \in R_{5K/4}$ . In this case,  $p^{ran}/(2M+1)$  represents the probability that  $v_i$  is in random mode and selects the same sub-frame and sub-channel than  $v_t$  (i.e.  $1/(2M+1)$ ). Similarly,  $v_t$  can also receive interference from vehicles  $v_i$  that transmit an LF packet in random mode with  $\Delta PI_{t,i} \in R_{K/4}$ . This situation occurs with probability  $p^{ran} \cdot p^{LF}/(2M+1)$  since interfering vehicles  $v_i$  have to be in random mode and transmit an LF packet. The probability that  $v_t$  is interfered when transmitting an HF packet in normal mode can then be expressed as:

$$p_{SIM}^{nor, HF}(d_{t,i}) = \begin{cases} p^{nor} & \text{if } \Delta PI_{t,i} = 0 \\ p^{nor} \cdot p^{LF} & \text{if } \Delta PI_{t,i} = K \\ p^{ran} / (2M + 1) & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in R_{5K/4} \\ p^{ran} \cdot p^{LF} / (2M + 1) & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in R_{K/4} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (38)$$

The process to compute the probability that  $v_t$  is interfered when transmitting an LF packet in normal mode is analogous to that of HF packets. The main differences are that:

- $v_i$  operating in normal mode and with  $\Delta PI_{t,i}=K$  can interfere  $v_t$  when it transmits an HF packet. The probability that this happens is  $p^{nor}$  rather than  $p^{nor} \cdot p^{LF}$ .
- $v_i$  operating in random mode and with  $\Delta PI_{t,i} \in R_{K/4}$  can interfere  $v_t$  with probability  $p^{ran} / (2M+1)$  since it can interfere whether transmitting an HF or LF packet.

The probability that  $v_t$  is interfered when transmitting an LF packet in normal mode can then be expressed as:

$$p_{SIM}^{nor, LF}(d_{t,i}) = \begin{cases} p^{nor} & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in \{0, K\} \\ p^{ran} / (2M + 1) & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in R_{K/4} \cup R_{5K/4} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (39)$$

The potentially interfering vehicles are different when  $v_t$  is in random mode. Under this mode, the vehicles  $v_i$  that can interfere  $v_t$  when  $v_t$  transmits an HF packet are:

- Vehicles  $v_i$  with a  $PosIndex$  such that  $\Delta PI_{t,i} \in R_{7K/4}$ . This interference can occur with probability  $p^{nor}/(2M+1)$ . This is the case because  $v_i$  has to operate under normal mode and it does not depend on the type of packet it transmits (both LF and HF interfere in this case). Additionally,  $v_t$  has to randomly select the same sub-channel as  $v_i$  (there are  $2M+1$  possible sub-channels).
- Vehicles  $v_i$  with a  $PosIndex$  such that  $\Delta PI_{t,i} \in R_{3K/4}$ . The interference can occur if vehicles  $v_i$  transmit a LF packet in normal mode, which happens with probability  $p^{nor} \cdot p^{LF}/(2M+1)$ .
- Vehicles  $v_i$  operating in random mode and with a  $PosIndex$  such that  $\Delta PI_{t,i} \in R_0$ . In this case, the probability of interference is  $p^{ran}/(2M+1)$ .
- Vehicles  $v_i$  transmitting an LF packet in random mode and with a  $PosIndex$  such that  $\Delta PI_{t,i} \in R_K$ . This situation can occur with probability  $p^{ran} \cdot p^{LF}/(2M+1)$ .

The probability that an interfering vehicle  $v_i$  simultaneously transmits in the same sub-channel than  $v_t$  when  $v_t$  is in random mode and transmits a HF packet can then be expressed as:

$$p_{SIM}^{ran, HF}(d_{t,i}) = \begin{cases} p^{nor} / (2M + 1) & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in R_{7K/4} \\ p^{nor} \cdot p^{LF} / (2M + 1) & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in R_{3K/4} \\ p^{ran} / (2M + 1) & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in R_0 \\ p^{ran} \cdot p^{LF} / (2M + 1) & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in R_K \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (40)$$

The potentially interfering vehicles  $v_i$  are the same when  $v_t$  transmits a LF packet under random mode than when it transmits a HF packet. Equation (40) can then be adapted to compute the probability that  $v_t$  and  $v_i$  simultaneously transmit on the same sub-channel when  $v_t$  is in random mode and transmits an LF packet. In this case, vehicles  $v_i$  could interfere

$v_i$  irrespective of whether they transmit a LF or a HF packet. As a result, (40) needs to be modified by removing  $p^{LF}$  in order to compute the probability that  $v_i$  interferes  $v_j$  when  $v_i$  is in random mode and transmits a LF packet:

$$P_{SIM}^{ran,LF}(d_{t,i}) = \begin{cases} p^{nor} / (2M + 1) & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in R_{3K/4} \cup R_{7K/4} \\ p^{ran} / (2M + 1) & \text{if } \Delta PI_{t,i} \in R_0 \cup R_K \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (41)$$

The probability of packet loss due to collisions ( $\delta_{COL}$ ) is then computed with (22) and (23)-(41). Finally, the PDR is computed using (10) where  $\delta_{HD}$ ,  $\delta_{SEN}$ ,  $\delta_{PRO}$  and  $\delta_{COL}$  are obtained from (12), (16), (17) and (22), respectively.

## V. EVALUATION SCENARIO

The scheduling schemes have been evaluated under a Highway scenario following 3GPP recommendations in [20]. The scenario implements a 5km highway segment with 6 lanes (3 lanes in each direction). The maximum speed is 140km/h for a traffic density of 60veh/km and 70km/h for 120veh/km. The mobility is modeled with the traffic simulator SUMO.

The scheduling schemes are evaluated considering C-V2X mode 4 communications. Such communications are simulated in VEINS using a C-V2X interface implemented by the authors following the 3GPP specifications in [20]. The C-V2X mode 4 interface (using sensing-based SPS) was validated against an analytical model in [19]. The proposed scheduling scheme has been implemented on the same simulator. The simulator models propagation using the WINNER+ B1 model recommended by 3GPP in [20]. The model implements a log-distance pathloss model, and models the shadowing using a log-normal random distribution with a standard deviation of 3dB. It also implements the shadowing correlation as specified in [20]. The simulator models the C-V2X PHY layer performance using the BLER-SNR curves from [22] that include the fast fading effect. Following the 3GPP guidelines [20], we assume perfect time and frequency synchronization at sub-frame and sub-carrier levels and a noise figure of 9dB. The simulator implements the In-Band Emission model defined by the 3GPP in [20]. All vehicles transmit beacons at 23dBm in a dedicated 10MHz channel at 5.9GHz. The channel is divided into 4 sub-channels of 12 RBs each. Beacons are periodically generated following the traffic model specified by the 3GPP in [20]. The model specifies that one out of five beacons contains 300 bytes of data (LF beacon), while the remaining four contain 190 bytes (HF beacons). LFs are transmitted using MCS 7, and require 2 sub-channels. HFs are transmitted using MCS 9, and require 1 sub-channel.

## VI. RESULTS

### A. Validation

Fig. 6 compares the PDR obtained with the proposed scheduling scheme analytically (using the model in Section III) and through simulations. The simulation platform implements the complete geo-based scheduling scheme as described in Section V. This implementation provides an accurate estimate of the network performance that can be obtained with the proposed scheme under realistic mobility conditions. On the

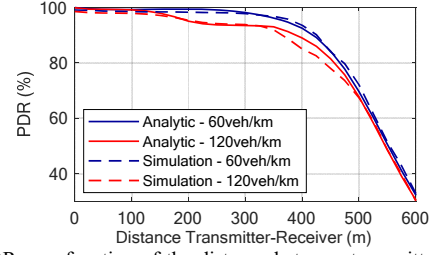


Fig. 6. PDR as a function of the distance between transmitter and receiver. Vehicles transmit 10pps.

other hand, the analytical model provides an estimate of the performance that can be achieved when vehicles are perfectly ordered. Fig. 6 shows that both PDR curves are very similar which validates the analytical model and the implementation at the simulation platform. The small differences observed in Fig. 6 are mainly due to In-Band Emissions and to a small percentage of ordering errors in the simulations. The simulation platform models In-Band Emissions, and such emissions suppose some extra collision errors due to the near-far effect. The high mobility of vehicles during the simulations also generates a small percentage of ordering errors that contribute to the small differences between the analytical and simulation PDRs in Fig. 6. A correct operation of the proposed scheduling scheme requires that the *PosIndex* of a vehicle is equal to the *PosIndex*+1 of the preceding vehicle in the scenario. 99.4% and 99.2% of the vehicles in the simulations guaranteed this condition for traffic densities of 60 and 120 vehicles per km, respectively. The remaining vehicles select an incorrect *PosIndex* value. However, a packet collision between two vehicles only occurs if two vehicles select the same *PosIndex*. In the simulated scenarios, only 0.46% and 0.61% of the vehicles selected at a given moment the same *PosIndex* value as their preceding vehicle for traffic densities of 60 and 120 vehicles per km respectively. Their transmissions then collide, and these collisions contribute to the small differences observed in Fig. 6 between the analytical and simulated PDRs. This type of errors can occur when two nearby vehicles detect for a short period of time different virtual queues until they both detect the same vehicles.

Fig. 7 represents an example of the percentage of vehicles that change their position in the queue within a *Pool*, and the percentage of vehicles that incorrectly select their *PosIndex*. The figure clearly shows that only a very small percentage of vehicles incorrectly select their *PosIndex* despite the highly dynamic scenario (on average, around 20% of the vehicles in

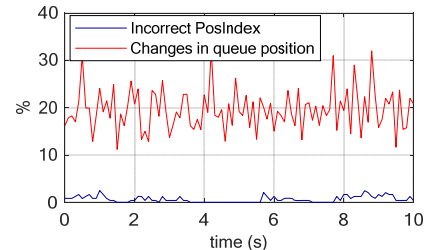


Fig. 7. Percentage of vehicles that change their position in the queue within a *Pool*, and percentage of vehicles that incorrectly select their *PosIndex*. Scenario with 120veh/km and 10pps. Similar trends observed for 60veh/km.



the scenario change their position in the queue within 100ms). This demonstrates that the geo-based scheduling scheme is robust, and can correctly handle continuous changes of the vehicles' position within the queue.

### B. Comparative analysis

Fig. 8 compares the PDR obtained with the proposed geo-based scheduling scheme to that obtained with the sensing-based SPS scheme defined in 3GPP. The comparison is done for simulations with a traffic density of 60 and 120 vehicles/km. Fig. 8 demonstrates that the geo-based scheduling scheme significantly outperforms the sensing-based scheduling algorithm. The figure also shows that our scheduling proposal better copes with an increase in the channel load, and its gains over the sensing-based SPS scheme augment with the traffic density. This is the case because our proposal better organizes the use of sub-channels and hence reduces the risk of packet collisions. This risk increases with the density for the sensing-based SPS scheme as illustrated in Fig. 9. This figure represents the percentage of packets incorrectly received per type of transmission error in C-V2X as a function of the distance between transmitter and receiver. The figure clearly shows that our proposed scheduling scheme significantly reduces the percentage of packets lost due to packet collisions compared to the standard sensing-based SPS scheme. Packet collisions are the dominant factor for packet losses up to a distance of 450m. This distance is where the hidden-terminal effect is stronger for the sensing-based SPS scheme. At this distance, our proposed geo-based scheduling scheme reduces packet collisions by 67.6% and 75.7% for 60 and 120 vehicles/km, respectively. These gains are due to a better and more efficient assignment of sub-channels. Propagation (SEN+PRO errors in Fig. 9) becomes the dominant factor for packet losses for distances higher than 450m. Both scheduling schemes experience the same percentage of packets lost due to propagation since our proposal does not modify the physical layer of C-V2X mode 4. Fig. 9 does not represent the percentage of packets lost due to HD errors since they are negligible for these scenarios. HD errors become more relevant when vehicles transmit more packets per second. Release 14 introduces support for C-V2X communications at 20pps and 50pps. These rates are expected to sustain some of the enhanced V2X use cases that have been specified under 3GPP Release 15 for connected and automated driving. High packet generation rates can challenge the operation of the sensing-based SPS scheme given the large percentage of packets lost due to packet collisions. This is actually observed when comparing the PDR obtained with the sensing-based SPS scheme in Fig. 8 and Fig. 10. Fig. 10 represents the PDR obtained with the two scheduling schemes under evaluation when considering a packet generation rate of 50pps and a traffic density of 60 vehicles/km. The comparison of Fig. 8 and Fig. 10 clearly shows the strong PDR degradation experienced with the standardized sensing-based SPS scheme when the channel load increases as a result of higher packet generation rates. Fig. 10 clearly shows that the proposed

<sup>4</sup> No scheduling scheme can guarantee a high PDR for all distances when the channel load increases since the number of sub-channels is limited. Our

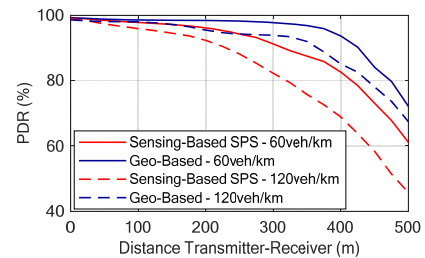


Fig. 8. PDR as a function of the distance between transmitter and receiver for 60 and 120 vehicles/km. Vehicles transmit 10pps.

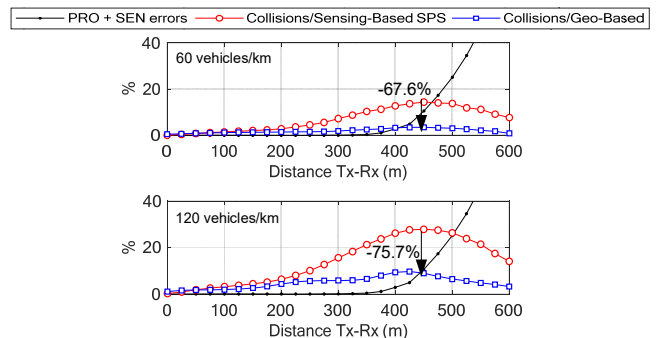


Fig. 9. Percentage of packets lost due to packet collisions and propagation. Vehicles transmit 10pps.

scheduling scheme better copes with the increase in the channel load, and improves the PDR compared with the standardized sensing-based SPS scheme. In particular, the proposed scheduling scheme improves the PDR at short distances, and considerably augments the distance at which a PDR of 0.9 can be guaranteed. This PDR threshold is usually considered by the 3GPP to analyze the performance of V2X communications [2][20]. The proposed scheme significantly improves the PDR at short distances at the expense<sup>4</sup> of a lower PDR between 300 and 400m (although still higher than that achieved with sensing-based SPS). This is due to the Half-Duplex effect explained in Section IV.

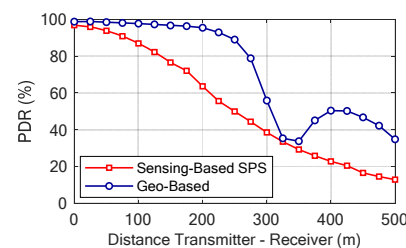


Fig. 10. PDR as a function of the distance between transmitter and receiver for 60 vehicles/km and 50pps.

Finally, Table II represents the distance at which a PDR equal to 0.9 is guaranteed following the evaluation criteria usually employed in 3GPP. The table depicts the performance obtained with the sensing-based SPS scheme and our geo-based proposal for all the scenarios analyzed in this study. The table also shows the improvement obtained with our proposal compared to the sensing-based SPS scheme. Table II clearly shows that our

proposal has been designed so that the negative effects of such increase are observed for larger rather shorter distances between transmitter and receiver.

proposal outperforms the sensing-based SPS scheme in all scenarios. Higher gains are achieved when the channel load increases and the sensing-based SPS scheme suffers from significant packet collisions.

TABLE II. DISTANCE AT WHICH A PDR EQUAL TO 0.9 IS GUARANTEED

Density (veh/km)	Packet rate (pps)	Sensing-based SPS(m)	Geo-based (m)	Improvement (%)
60	10	316	426	34.8
	20	245	407	66.1
	50	80	244	205
120	10	229	365	59.4
	20	117	283	141.9
	50	31	107	245.2

## VII. CONCLUSIONS

This paper proposes a novel geo-based scheduling scheme for C-V2X communications where vehicles autonomously select their sub-channels. The proposed scheme exploits context information exchanged between vehicles to select the sub-channels. In particular, the scheme takes into account the location of nearby vehicles and their ordering on the road to select the sub-channels. All vehicles follow the same process, and hence implicitly coordinate their sub-channel selection which significantly reduces the number of packet collisions. Analytical models have been presented to quantify the PDR of the proposed scheme, and the probability of packet loss due to the four types of possible transmission errors in C-V2X. Extensive network simulations have also been conducted, and the obtained results demonstrate that the proposed geo-based scheduling scheme reduces packet collisions and significantly increases the C-V2X performance compared to when using the standardized sensing-based SPS scheme. The geo-based scheduling scheme has been evaluated considering C-V2X mode 4. However, it could be applied to C-V2X evolutions where vehicles autonomously select their sub-channels.

## REFERENCES

- [1] 3GPP TS 36.300, "E-UTRA and E-UTRAN; Overall description; Stage2," Rel-14 V14.8.0, Oct. 2018.
- [2] 3GPP TR 22.886, "Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services," Rel-15 V15.1.0, Mar. 2017.
- [3] 3GPP TR 38.885, "NR, Study on Vehicle-to-Everything," Rel-16 V1.0.0, Nov. 2018.
- [4] C. Guo *et al.*, "Resource allocation for V2X Communications: A Large Deviation Theory Perspective," *IEEE Wireless Communications Letters*, Mar. 2019.
- [5] A. Bazzi *et al.*, "Optimizing the Resource Allocation of Periodic Messages With Different Sizes in LTE-V2V," *IEEE Access*, Mar. 2019.
- [6] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, "System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and its Distributed Scheduling," *Proc. IEEE VTC-Spring*, Sydney (Australia), 4-7 June 2017.
- [7] 3GPP TS 36.101, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment radio transmission and reception," Rel-14 V14.10.0, Jan. 2019.
- [8] A. Bazzi *et al.*, "Study of the Impact of PHY and MAC Parameters in 3GPP C-V2V Mode 4," *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Taipei (Taiwan), 5-7 Dec. 2018.
- [9] A. Nabil *et al.*, "Performance Analysis of Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling in C-V2X Networks," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Chicago (USA), 27-30 Aug. 2018.
- [10] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, M. Sepulcre, "Configuration of the C-V2X Mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communications," *Proc. Mobile Ad-hoc and Sensor Networks Conference (MSN)*, Shenyang (China), 6-8 Dec. 2018.
- [11] B. Toghi *et al.*, "Multiple Access in Cellular V2X: Performance Analysis in Highly Congested Vehicular Networks," *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Taipei (Taiwan), 5-7 Dec. 2018.
- [12] Y. Jeon *et al.*, "Reducing Message Collisions in Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling (SPS) by Using Reselection Lookaheads in Cellular V2X," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4388, Dec. 2018.
- [13] N. Bonjorn *et al.*, "Cooperative Resource Allocation and Scheduling for 5G eV2X Services," *IEEE Access*, Jan. 2019.
- [14] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, "LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 30-39, Dec. 2017.
- [15] L. Abanto-Leon *et al.*, "Enhanced C-V2X Mode-4 Subchannel Selection," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Chicago (USA), 27-30 Aug. 2018.
- [16] B. Kang *et al.*, "Sensing-Based Power Adaptation for Cellular V2X Mode 4," *Proc. IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Seoul (South Korea), 22-25 Oct. 2019.
- [17] A. Mansouri *et al.*, "A First Investigation of Congestion Control for LTE-V2X Mode 4," *Proc. IEEE Wireless On-demand Network systems and Services Conference (WONS)*, Wengen (Switzerland), Jan. 2019.
- [18] 3GPP TS 36.213, "E-UTRA; Physical layer procedures," Rel-14 V14.9.0, Jan. 2019.
- [19] M. Gonzalez-Martin *et al.*, "Analytical Models of the Performance of C-V2X Mode 4 Vehicular Communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.: 68 (2), Feb. 2019.
- [20] 3GPP TR 36.885, "Study on LTE-Based V2X services," Rel-14 V14.0.0, Jul. 2016.
- [21] 3GPP TS 36.331, "E-UTRA; Radio Resource Control (RRC)," Rel-14 V14.9.0, Jan. 2019.
- [22] R1-160284, "DMRS enhancement of V2V," Huawei, HiSilicon, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #84, St Julian's, Malta, Feb. 2016.



# Empirical Models for the Realistic Generation of Cooperative Awareness Messages in Vehicular Networks

Rafael Molina-Masegosa, Miguel Sepulcre, Javier Gozalvez, Friedbert Berens, Vincent Martinez

**Abstract**—Most V2X (Vehicle-to-Everything) applications rely on broadcasting awareness messages known as CAM (Cooperative Awareness Messages) in ETSI or BSM (Basic Safety Message) in SAE standards. A large number of studies have been devoted to guarantee their reliable transmission. However, to date, the studies are generally based on simplified data traffic models that generate awareness messages at periodic intervals or with a constant message size. These models do not accurately represent the real generation of CAM messages that follow specific mobility-based rules. Using simplified and unrealistic traffic models can significantly impact the results and validity of the studies, and hence accurate models for the generation of awareness messages are necessary. This paper proposes the first set of models that can realistically generate CAM messages. The models have been created from real traces collected by two car manufacturers in urban, sub-urban and highway test drives. The models are based on  $m$ th order Markov sources, and model the size of CAMs and the time interval between CAMs. The models are openly provided to the community and can be easily integrated into any simulator.

**Index Terms**—V2X, vehicular networks, CAM, BSM, awareness, model, traffic, IEEE 802.11p, ITS-G5, C-V2X, LTE-V2X, 5G V2X.

## I. INTRODUCTION

V2X networks will support connected and automated driving thanks to the wireless exchange of information. Most V2X-enabled applications rely on frequently broadcasting awareness messages known as CAM (Cooperative Awareness Messages) or BSM (Basic Safety Message) in ETSI and SAE standards, respectively. These messages include the position, speed and basic status information of the transmitting node. These messages are independent of the underlying wireless technologies (e.g., ITS-G5, DSRC, LTE-V2X or 5G V2X). Their importance has triggered a large number of studies aimed at guaranteeing their reliable transmission. Most of these studies utilize simplified traffic models for the generation of the awareness messages. These models typically generate awareness messages at periodic time intervals (100ms to 1s) or with a constant message size (200-400 bytes). These simplified models are used e.g. in [1][2] with IEEE 802.11p, [3][4] with LTE-V2X, and [5] for comparing the performance of LTE-V2X and DSRC. 3GPP recommended during the LTE-V2X standardization process a traffic model with two message sizes and a fixed time interval between CAMs [6]. An aperiodic traffic model was later introduced in [7], but the model is not compliant with ETSI rules [8] for the generation of CAM messages. These rules

Submitted in July 2019. This work was supported in part by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and FEDER funds under project TEC2017-88612-R, and by the TransAID project under the Horizon2020 Framework Programme, Grant Agreement no. 723390.

Rafael Molina-Masegosa, Miguel Sepulcre and Javier Gozalvez are with the Universidad Miguel Hernandez de Elche (UMH), Spain. E-mail: [rafael.molinam@umh.es](mailto:rafael.molinam@umh.es), [msepulcre@umh.es](mailto:msepulcre@umh.es), and [j.gozalvez@umh.es](mailto:j.gozalvez@umh.es).

Friedbert Berens is with FBCConsulting Sarl in Wasserbillig, Luxembourg, e-mail: [friedbert.berens@me.com](mailto:friedbert.berens@me.com). Vincent Martinez is with NXP semiconductors France. Email: [Vincent.martinez@nxp.com](mailto:Vincent.martinez@nxp.com).

specify when vehicles should generate CAMs, and what should be their content. [9] experimentally demonstrated that current standards create CAMs with different time intervals and variable size. This was observed under urban, sub-urban and highway scenarios using commercial and standard-compliant V2X devices. These devices implemented different Facilities layer profiles and were embedded on vehicles of two OEMs. The statistics reported in [9] show significant differences between the collected traces and the CAM messages generated with the simplified traffic models ([6], [7]). These differences can significantly impact the conclusions reached in studies based on the transmission and reception of awareness messages.

In this context, this paper presents the first set of empirical models to realistically generate Cooperative Awareness Messages (CAMs) in vehicular networks. The models are created using the real traces presented in [9]. These traces were collected by Volkswagen and Renault in real urban, suburban and highway scenarios. The derived models are based on  $m$ th order Markov sources. They model the time interval between CAMs (referred to as CAM time interval or CAM generation interval) and the size of CAMs. We present two sets of models. The first one jointly models the size of CAMs and the time interval between CAMs, and is capable to accurately reflect the existing correlation between these two variables. The second set separately models the two variables. These simpler (and less accurate) models have been produced for simulation purposes. The models are validated against the empirical traces reported in [9]. The models can be easily integrated into any network simulator, and are openly provided to the community in [10].

## II. COOPERATIVE AWARENESS MESSAGES

CAM messages are generated at the Facilities layer of the ETSI ITS Communications Architecture. ETSI defines in [8] the format of CAMs and the CAM generation rules. The format and generation rules are applicable regardless of the technology used for the access layer (e.g. IEEE802.11p or LTE-V2X). ETSI rules specify that CAMs should be generated every 100ms to 1s. A vehicle should generate a new CAM if any of the following triggering conditions is satisfied:

- The distance between the current position of the vehicle and the position included in its previous CAM exceeds 4 m.
- The absolute difference between the current speed of the vehicle and the speed included in its previous CAM exceeds 0.5 m/s.
- The absolute difference between the current heading of the vehicle and the heading included in its previous CAM exceeds 4°.
- The time elapsed since the last CAM was generated is equal to or higher than 1 s.

A vehicle checks these conditions every  $T\_CheckCamGen \leq 100ms$ , i.e. at least 10 times per second. The time interval between CAMs is then variable and a multiple of  $T\_CheckCamGen$ . The measurements reported in [9] show that it is unlikely that the time between consecutive CAMs is constant for more than 3 CAMs (except when the vehicle is stopped).

A CAM message includes one ITS PDU header and multiple mandatory or optional containers [8]. The header includes data elements (DE) such as the protocol version, the message type and the ID of the vehicle or RSU (Road Side Unit) that transmits the CAM. Each container includes a series of optional and mandatory DEs:

- The basic container is mandatory and includes information of the transmitting vehicle (e.g. the type of vehicle or its position).
- The high frequency container is mandatory and contains highly dynamic information of the transmitting vehicle (e.g. its acceleration, heading or speed).
- The low frequency container is optional and contains static and dynamic information of the transmitting vehicle (e.g. the status of the exterior lights and the vehicle's path history).
- The special vehicle container is optional and is transmitted by specific vehicles such as public transport, emergency vehicles or vehicles transporting dangerous goods.

The size of CAMs depends on the optional containers and the DEs included. The ITS PDU header and the basic container are mandatory and have a fixed size. The high frequency container is mandatory. However, 7 of its 16 DEs are optional. The size of this container is hence variable, and can depend on the manufacturer and the context conditions of the vehicle [9]. The low frequency container is optional and is normally transmitted less frequently than the high frequency container. It has three mandatory DEs including the *PathHistory*. This DE describes the path that a vehicle has followed. The description can use between 0 and 40 path entries, so the size of *PathHistory* is not fixed. The number of path entries depends on the driving conditions and the implementation [9]. For example, the Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC) profile 1.3 [9] establishes that *PathHistory* should cover 200-500 meters of history of a vehicle. However, other implementations like SCOOP release 1.2 [9] propose up to 40 points. Security also has an impact on the amount of data that is finally transmitted. Security certificates might be attached to a CAM before transmission. The certificate is attached whenever a new neighboring vehicle is detected or once per second. The certificate can also be sent on-demand, for example, whenever requested by a RSU. The size of security certificates usually varies between 100 and 150 bytes [9]. Considering the security certificates and the optional containers and DEs, the size of CAMs can vary between 200 and 800 bytes. These variations are significant and should be taken into account to accurately estimate the V2X performance.

### III. EMPIRICAL CAM TRACES

The models presented in this study have been derived using CAM traces obtained by Volkswagen and Renault in test drives described in [9]. The traces have been collected in urban, suburban and highway scenarios under normal road traffic conditions. All traces were generated by On Board Units (OBU) embedded in vehicles, so we do not consider CAM messages generated by RSUs. Each OEM conducted test drives on different locations and using commercial ITS-G5 equipment from different vendors [9]. The traces include (among other) the time at which each CAM is generated and their size. This section uses the Volkswagen traces to discuss the major trends observed. Similar trends have been observed with the Renault traces. Differences between both OEMs are highlighted when appropriate. Fig. 1 depicts the PDF (Probability Density Function) of the size of the CAMs generated by Volkswagen in highway scenarios. The figure shows that the size of CAMs is not constant, and that certain values are more probable. In particular, most CAMs have a size of approximately {200, 300, 360, 455} bytes. We conducted a similar analysis with the Renault traces, and found that the most probable CAM sizes for Renault are approximately {200, 330, 480, 600, 800} bytes. The

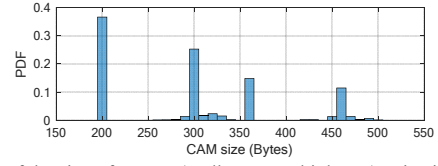


Fig. 1. PDF of the size of CAMs (Volkswagen, highway). Bin size of 10B.

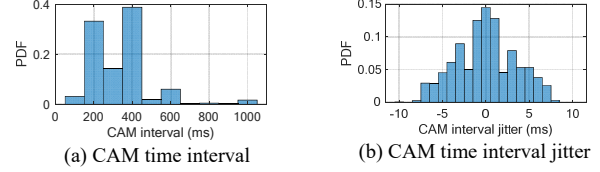


Fig. 2. PDFs of the time interval between CAMs and its jitter (Volkswagen, Highway).

differences observed between both OEMs are due to the different profiles used at the Facilities layer [9]. Similar trends and CAM sizes are observed under urban and sub-urban scenarios for both OEMs.

Fig. 2a plots the PDF of the time interval between CAMs for the highway traces collected by Volkswagen. The results are shown with a time resolution of 100ms since the parameter  $T\_CheckCamGen$  was configured equal to 100ms during the test drives. The CAM time interval is then always a multiple of 100ms. Fig. 2a clearly shows that CAM messages are not generated periodically. The same trend has been observed for the Renault traces and the other scenarios. Fig. 2b shows that there is certain jitter (approximately between -10ms and 10ms). This results in that the CAM time interval is not exactly a multiple of 100ms. Fig. 2b depicts the PDF of the jitter observed in the Volkswagen highway traces. A similar jitter has been observed in all the traces reported in [9]. The jitter can be due to several factors including the time needed to process and encode the CAMs, and the time spent in executing other tasks on the hardware.

An analysis of the traces collected by Volkswagen and Renault showed that the generation of consecutive CAMs is correlated. This correlation is visible in Fig. 3 that plots the autocorrelation of the CAMs' size and time interval collected in the original traces. This correlation results from the time correlation of the vehicular context

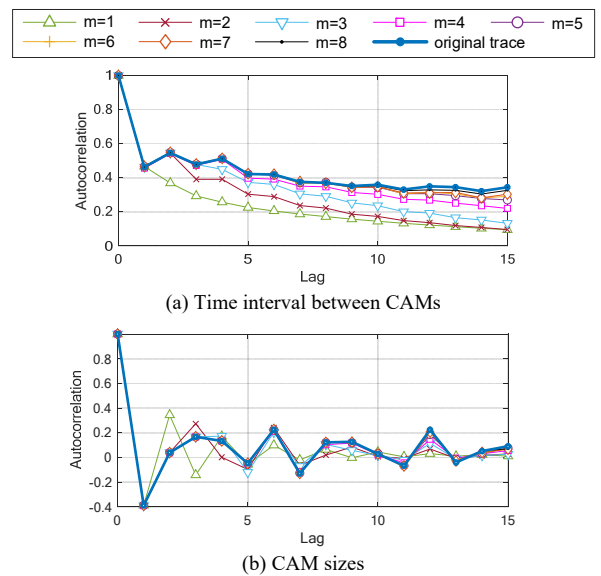


Fig. 3. Autocorrelation in the original traces and in traces generated with the proposed models (Volkswagen highway scenario).



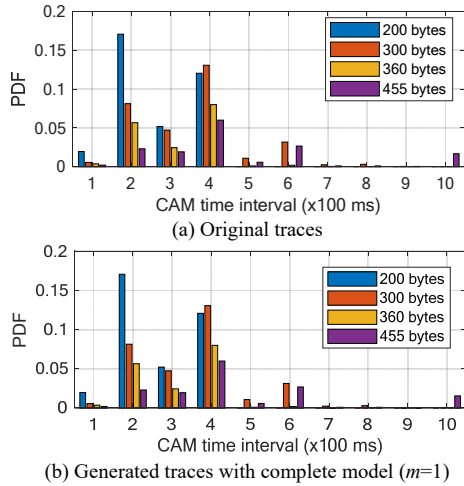


Fig. 4. Joint PDF of the time interval between CAMs and their size (Volkswagen, Highway).

and mobility conditions that affect the CAM triggering conditions and the content of the CAM containers. We have also observed in the traces that there is a certain correlation between the size of CAMs and the time interval between CAMs. In particular, we have observed that the probability of generating a CAM with a given size depends on the current time interval. This is observed in Fig. 4a. that plots the joint PDF of the time interval between CAMs and their size for the Volkswagen highway traces. Fig. 4 only considers the four most probable CAM sizes following Fig. 1. Fig. 4a shows, for example, that there is a high probability of generating a CAM of around 200 bytes when the time interval between CAMs is 200ms. However, the probability of generating such CAM decreases with the time interval.

#### IV. MODELS

This section presents the models derived from the CAM traces reported in [9] and analyzed in the previous section. They model the size of CAMs and the time interval between CAMs. We present two different sets of models. The first one (*complete models*) jointly models the size of CAMs and the time interval to the next CAM. This approach produces the most accurate models since they account for the correlation between the two variables (Fig. 4a). We have produced a second set of models (*separate models*) where the time interval between CAMs and their size are modelled separately. These models do not capture the correlation between the two variables but have been produced for simulation purposes as an option with lower computational cost for studies where the correlation is not relevant. All models presented in this section are openly available in [10] where we also provide Matlab scripts to explain and facilitate their use.

##### A. Complete models

We have produced different models for each OEM since they produce CAMs of different size (Fig. 1). We have created a model for each scenario (urban, suburban and highway) and OEM. We have also produced a *universal* model for each OEM merging the traces from all the scenarios. Each model is a  $m$ th order Markov source where each symbol in the source alphabet is represented by a CAM with a given size and time interval to the previous CAM. The probability of generating a CAM with a certain size and time interval depends on the  $m$  preceding CAMs following Fig. 3. The models are then able to capture the correlation between the size and time intervals of  $m$  consecutive CAMs. Each Markov source is specified by the source alphabet  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_{|A|}\}$  and a set of conditional probabilities:

$$P(a(t) | a(t-1), a(t-2), \dots, a(t-m)) \quad (1)$$

where  $a(t)$  represents the next symbol (at time instant  $t$ ) that depends on the previous  $m$  symbols.

The number of symbols in the source alphabet is a function of the number of possible CAM sizes and values of the time interval between CAMs. We define  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$  as the set of possible CAM sizes.  $|S|$  is the cardinality of  $S$ . We define  $G=\{g_1, g_2, \dots, g_{|G|}\}$  as the set of possible time intervals between CAMs.  $|G|$  is the cardinality of  $G$ . The set of symbols in the source alphabet is the cartesian product of  $S$  and  $G$ , i.e.  $A = S \times G$ . The number of symbols is equal to  $|A| = |S| \cdot |G|$ . A source symbol  $a_n \in A$  is associated to  $s_i$  and  $g_j$  where:

$$i = ((n-1) \% |S|) + 1; \quad 1 \leq n \leq |A| \quad (2)$$

$$j = \left\lfloor \frac{n-1}{|S|} \right\rfloor + 1; \quad 1 \leq n \leq |A| \quad (3)$$

and inversely:

$$n = (j-1) \cdot |S| + i; \quad 1 \leq i \leq |S| \text{ and } 1 \leq j \leq |G| \quad (4)$$

The number of conditional probabilities needed to define the proposed  $m$ th Markov source is  $|A|^m$ .  $|A|^m$  can be very large even for small values of  $m$ . We define a transition matrix  $M$  in order to efficiently store and use the conditional probabilities. Each row in the matrix is defined as follows:

$$(a(t-m) \dots a(t-2) \ a(t-1) \ a(t) \ P(a(t)|a(t-1), \dots, a(t-m))) \quad (5)$$

The first  $m$  columns represent the previous  $m$  symbols (i.e. previous  $m$  CAMs). The column  $m+1$  represents the next symbol (i.e. the next CAM), and the last column represents the conditional probability that a certain CAM (with a given size and time interval to the previous CAM) is transmitted considering the  $m$  previous CAMs. We limit the size of the matrix by removing the rows with a null conditional probability. This reduces the number of rows by several orders of magnitude and significantly improves the tractability of the models.

To compute the conditional probabilities, we parsed the CAM traces and counted the number of times that a certain CAM was generated (with a given size and time interval to the previous CAM) for each set of possible  $m$  previous CAMs. For example, the probability that the source generates a symbol  $a_n$  for  $m=5$  considering that the previous symbols were  $a_u, a_v, a_w, a_x$  and  $a_y$  is computed as:

$$P(a_n | a_u, a_v, a_w, a_x, a_y) = c_{n,u,v,w,x,y} / r_{u,v,w,x,y} \quad (6)$$

where

$$r_{u,v,w,x,y} = \sum_{n=1}^{|A|} c_{n,u,v,w,x,y} \quad (7)$$

and  $c_{n,u,v,w,x,y}$  is the number of times  $a_n$  was generated after  $a_u, a_v, a_w, a_x$  and  $a_y$ . The normalization in (6) results in that the sum of the conditional probabilities associated to a symbol  $a_n$  for any set of  $m$  previous symbols is equal to one.

The jitter observed in Fig. 2b is not directly included in the  $m$ th order Markov source. Instead, it is computed and added every time a new CAM is generated. The jitter is modelled using a Gaussian distribution with zero mean and standard deviation following Table I.

Following Section III and Fig. 1, all models generated with the traces collected by Volkswagen consider  $S=\{200, 300, 360, 455\}$  bytes. Similarly, the models created from the traces collected by

TABLE I. JITTER STANDARD DEVIATION (MS)

Scenario	Volkswagen	Renault
Urban	3.235	2.817
Suburban	3.814	2.769
Highway	3.444	2.711
Universal	3.553	2.783

Renault use  $S=\{200, 330, 480, 600, 800\}$  bytes. We have limited  $S$  to these values since other CAM sizes were unlikely. Their inclusion would unnecessarily increase the complexity of the models. We consider for all models that  $G=\{100, 200, \dots, 1000\}$  ms. The Markov sources derived using the Volkswagen and Renault traces are then characterized by 40 and 50 symbols, respectively. The complete transition matrices are not shown in this paper for readability reasons given their size. Instead, all matrices are openly provided in [10]. As an example, (8) shows some rows of  $M$  ( $M$  has in total 1853 rows) for the Volkswagen highway model with  $m=5$ .

$$M = \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 13 & 6 & 7 & 14 & 13 & 8 & 1.000 \\ 13 & 6 & 15 & 6 & 5 & 5 & 0.250 \\ 13 & 6 & 15 & 6 & 5 & 14 & 0.750 \\ 13 & 6 & 15 & 10 & 13 & 6 & 1.000 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 5 & 5 & 0.333 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 5 & 16 & 0.667 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 9 & 16 & 1.000 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 13 & 2 & 0.143 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 13 & 8 & 0.143 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 13 & 12 & 0.143 \\ 13 & 6 & 15 & 14 & 13 & 16 & 0.571 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (8)$$

The matrices are provided in [10] in plain text so that they can be easily processed and used. We also provide a Matlab script that describes how CAM messages can be produced using the derived models. The generation of each symbol (or CAM) depends on the previous  $m$  symbols. To generate the first symbol, the script randomly selects a preliminary sequence of  $m$  symbols from the trace taking into account the probability of each available sequence. To compute these probabilities (also provided in [10]), we parsed the trace and counted the number of occurrences of each sequence. The following steps are then executed to generate a CAM:

1. Select the next symbol of the Markov source  $a_n$  considering the previous  $m$  symbols and the transition matrix  $M$ .
2. Identify the size  $s_i$  of the next CAM associated to symbol  $a_n$  using (2).
3. Identify the time interval  $g_i$  at which the next CAM associated to symbol  $a_n$  is generated using (3). Generate the jitter and add it to this time interval to compute the exact time at which the next CAM is generated.

The models can be generated for any value of  $m$ . In [10], we provide models for  $m=1$  and  $m=5$ . The model with  $m=1$  reduces the computational cost and can be adequate when the time correlation between symbols is not relevant or has a low impact. Such correlation can be relevant in certain studies, and hence we provide also the model with  $m=5$  (i.e. the size and time interval of a CAM depends on the previous 5 CAMs). This model accurately captures the autocorrelation present in the empirical traces (see Section V) and offers a trade-off between complexity and accuracy.

### B. Separate models

The complete models generate CAM messages and determine their size and time interval between them. However, users might only be interested to utilize the models to decide the size of CAMs or the time intervals between CAMs. For example, users might utilize traffic mobility simulators (e.g. SUMO) to simulate complex traffic scenarios and compute the exact moment at which CAM messages should be generated following the CAM triggering conditions described in Section II. In this case, users might only be interested in models that determine the size of CAMs. The complete models can be used to determine only the size of CAMs or their time intervals. To do so, the models should be used as explained in section IV.A but discarding step 2 or 3. If step 2 is discarded, the model will only determine the time interval to the next CAM. If step 3 is discarded, it will determine the size of CAMs.

The complete models have a source alphabet  $A = S \times G$ . The resulting transition matrices  $M$  are larger than necessary (and hence impact the computational cost) if the complete models are used to only determine the size of CAMs or the time interval to the next CAM. The separate models represent an alternative to reduce the size of  $M$  and reduce the computational time. These models independently generate the size of CAM messages or the time intervals between CAMs. They are also modeled using  $m$ th order Markov sources with  $A=S$  and  $A=G$ , respectively. Each symbol in the source alphabets corresponds to either a possible CAM size or a time interval. The transition matrices are generated following the process described for the complete models. In the case of the complete models, the conditional probability is equal to the probability that a certain CAM with a given size and time interval is transmitted considering the  $m$  previous CAMs. In the case of the separate models, it is equal to the probability that a certain CAM with a given size or time interval is transmitted considering the  $m$  previous CAMs. The jitter model (including the standard deviations in Table I) is still valid for the separate model that generates the time interval between CAMs. The separate models have smaller alphabets and transition matrices  $M$  than the complete models and hence represent a lower computational cost alternative. We also provide in [10] separate models for  $m=1$  and  $m=5$ .

## V. VALIDATION

This section validates the proposed models. Both complete and separate models have been validated, but we mainly focus in this section on the complete models since they more accurately represent the generation of CAMs in realistic scenarios. For the validation, we generate 5 million CAMs per scenario and OEM using our models. We first then compute and compare the joint PDF of the time intervals between CAMs and CAM sizes obtained with our models and with the real traces. Fig. 4 shows such comparison considering the Volkswagen highway traces. The figure shows the high similarity between the joint PDFs obtained with our model (Fig. 4.b) and with the real traces (Fig. 4.a). The comparison in Fig. 4 is done with  $m=1$ . A similar joint PDF is obtained with the complete model with  $m=5$ . A more accurate comparison is done using the KL divergence (or relative entropy) and the total variation distance (or statistical distance) metrics [11]. Both metrics are used to compare PDFs. We denote as  $P$  and  $Q$  the joint PDFs in Fig. 4 computed with the real traces and the proposed models respectively. The KL divergence measures the amount of information lost when  $Q$  is used to approximate  $P$ . It is computed as:

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{a \in A} P(a) \cdot \text{Log} \left( \frac{P(a)}{Q(a)} \right) \quad (9)$$

where  $A$  is the set of possible pairs of CAM sizes and intervals between CAMs (i.e. the source alphabet in our model). The total variation distance between  $P$  and  $Q$  is the largest possible difference between the probabilities that the two PDFs assign to the same event. It can be expressed as:

$$\delta(P, Q) = \sup_{a \in A} |P(a) - Q(a)| \quad (10)$$

Table II reports the two metrics computed for different scenarios. The results clearly demonstrate the high similarity between the joint PDFs obtained with the real traces and with our complete models.

The separate models do not generate CAM messages with the same accuracy as the complete ones since they do not account for the correlation between the CAM sizes and the time intervals. They can still be relevant for simulation purposes and it is interesting to analyze their accuracy. We first compute the KL divergence and total variation distance metrics when generating the joint PDF of the CAM time intervals and sizes with the separate models (i.e. without the correlation



TABLE II. STATISTICAL COMPARISON

$m$	Traces	Scenario	$D_{KL}(P  Q)$	$\delta(P,Q)$
1	Volkswagen	Urban	$2.558 \times 10^{-5}$	0.0007
		Suburban	$8.281 \times 10^{-5}$	0.0029
		Highway	$3.522 \times 10^{-5}$	0.0013
		Universal	$4.621 \times 10^{-5}$	0.0015
	Renault	Urban	$2.388 \times 10^{-4}$	0.0018
		Suburban	$3.145 \times 10^{-4}$	0.0014
		Highway	$2.046 \times 10^{-4}$	0.0018
		Universal	$1.603 \times 10^{-4}$	0.0015
5	Volkswagen	Urban	$2.606 \times 10^{-5}$	0.0008
		Suburban	$7.692 \times 10^{-5}$	0.0027
		Highway	$4.289 \times 10^{-5}$	0.0014
		Universal	$4.548 \times 10^{-5}$	0.0015
	Renault	Urban	$2.647 \times 10^{-4}$	0.0018
		Suburban	$3.087 \times 10^{-4}$	0.0013
		Highway	$1.687 \times 10^{-4}$	0.0017
		Universal	$1.911 \times 10^{-4}$	0.0015

between both variables). In this case,  $D_{KL}$  and  $\delta$  are equal to 0.1093 and 0.0485 respectively when considering the Volkswagen highway traces and the traces generated with the separate model with  $m=1$  model (similar values are obtained with  $m=5$ ). The metrics improve if we compare the PDFs of the CAM sizes (or the PDFs of the CAM time intervals) obtained with our separate models with that obtained with the real traces. In this case,  $D_{KL}$  and  $\delta$  are equal to  $5.3192 \times 10^{-6}$  and 0.001 respectively when considering the PDFs of the CAM sizes and the Volkswagen highway scenario.  $D_{KL}$  and  $\delta$  are equal to  $1.5549 \times 10^{-5}$  and 0.0021 respectively when considering the PDFs of the CAM time intervals. Similar trends have been observed for all the scenarios and OEMs.

Fig. 3 compares the autocorrelation of the CAMs' size and time interval observed in the original traces and in traces generated with the complete and separate models. The performance obtained with the complete model is shown in Fig. 3 with different values of  $m$ . The figure shows that the complete model with  $m=1$  does not capture accurately the time correlation present in the original traces. This correlation is though accurately modelled when  $m=5$ . In this case, the absolute difference of the autocorrelation observed in the generated and original traces is less than 0.1 for sequences of up to 15 consecutive symbols. The accuracy gained with higher values of  $m$  is not significant and does not justify the higher computational cost resulting from larger transition matrices  $M$  when  $m$  increases. The proposed model with  $m=5$  offers then an adequate trade-off between computational cost and accuracy, and this is why we published in [10] models with  $m=1$  and  $m=5$ . The performance obtained with the separate models is then shown in Fig. 3 for only  $m=1$  and  $m=5$ . The separate models match also the autocorrelation observed in the original traces, but with less accuracy than the complete models. However, the separate models cannot model the correlation between the size of CAMs and the time interval between CAMs observed in Fig. 3. This is visible in Fig. 5 that plots the cross-correlation between the CAMs' size and time intervals for the original traces and the traces generated with the complete and separate models. Fig. 5 shows that only the complete model with  $m=5$  can accurately capture the cross-correlation present in the original traces. The separate models should then be utilized in studies where the correlation between the size and time interval of CAMs is not critical. It should be noted that although this correlation exists, it is not too high ( $<0.4$ , Fig. 5).

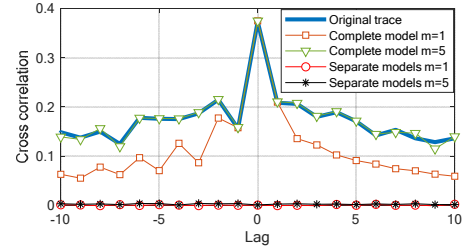


Fig. 5. Cross-correlation in the original traces and in traces generated with the proposed models (Volkswagen highway scenario).

## VI. CONCLUSIONS

This paper proposes a set of models to realistically generate Cooperative Awareness Messages (CAMs) in vehicular networks. To the authors' knowledge, these models are the first publicly available that have been created from real CAM traces collected in test drives using commercial standard-compliant V2X equipment. The models have been derived using traces collected by Volkswagen and Renault in urban, suburban and highway test drives under normal road traffic conditions. The proposed models are based on  $m$ th order Markov sources. They model the size of CAMs and the time interval between CAMs. This study presents two sets of models. The first one jointly models the size of CAMs and the time intervals, and is hence capable to account for the correlation between these two variables. A simpler set of models is also presented for simulation purposes. These models separately (and independently) model the size of CAMs and the time intervals. All models can be easily integrated into any network simulator and are openly provided to the community in [10]. The availability of realistic traffic models is necessary for an accurate evaluation of vehicular networks.

## REFERENCES

- [1] M. Sepulcre, et al, "Why 6Mbps is not (always) the Optimum Data Rate for Beaconing in Vehicular Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16 (12), pp. 3568-3579, Dec. 2017.
- [2] X. Ge, "Ultra-Reliable Low-Latency Communications in Autonomous Vehicular Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 5, pp. 5005-5016.
- [3] A. Mansouri *et al.*, "A First Investigation of Congestion Control for LTE-V2X Mode 4," *Proc. IEEE WONS*, 22-24 Jan. 2019.
- [4] A. Bazzi, A. Zanella, B. Masini, "Optimizing the Resource Allocation of Periodic Messages With Different Sizes in LTE-V2V," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43820-43830, Mar. 2019.
- [5] T.V. Nguyen *et al.*, "A comparison of Cellular Vehicle-to-Everything and Dedicated Short Range Communication," *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Torino (Italy), 27-29 Nov. 2017.
- [6] 3GPP RAN, "Study on LTE-Based V2X services," TR 36.885, Rel-14 V14.0.0, Jul. 2016.
- [7] 3GPP RAN, "Study on evaluation methodology of new Vehicle-to-Everything (V2X) use cases for LTE and NR," TR 37.885, Rel-15 V15.2.0, Dec. 2018.
- [8] ETSI, "Intelligent Transport Systems; Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service," EN 302 637-2 V1.4.1, Jan. 2019.
- [9] CAR 2 CAR Communication Consortium, "Survey on ITS-G5 CAM statistics," TR2052, V1.0.1, Dec. 2018.
- [10] Open Source repository with the CAM models proposed: <https://github.com/msepulcre/CAM-model>
- [11] A. Basu, H. Shioya, C. Park, "Statistical Inference - The Minimum Distance Approach", CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.



# Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation with Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size

Rafael Molina-Masegosa<sup>1</sup>, Javier Gozalvez<sup>1</sup>, Miguel Sepulcre<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Universidad Miguel Hernandez de Elche (UMH), Spain.

Corresponding author: Rafael Molina-Masegosa (e-mail: rafael.molinam@umh.es).

This work was supported in part by the Spanish Ministry of Science and Innovation (MCI), the State Research Agency (AEI) and the European Regional Development Fund (FEDER) under project TEC2017-88612-R.

**ABSTRACT** V2X (Vehicle to everything) communications can be currently supported by standards based on IEEE 802.11p (e.g. DSRC or ITS-G5) or LTE-V2X (also known as Cellular V2X or C-V2X) technologies. There has been an intense debate in the community on which technology achieves best performance. However, existing studies do not fully take into account the potential variability present in the generation and size of V2X messages. This variability can significantly impact the operation and performance of the Medium Access Control (MAC). This study progresses the state of the art by conducting an in-depth evaluation of both technologies under different message traffic patterns. In particular, we consider aperiodic and periodic messages of constant or variable size based on the standardized ETSI Cooperative Awareness Messages (CAMs). The study considers different scenarios and possible configurations of IEEE 802.11p and LTE-V2X. The study demonstrates that IEEE 802.11p can better cope with variations in the size and time interval between messages. The gains achieved by IEEE 802.11p over LTE-V2X augment with the channel load due to the inefficiencies of the LTE-V2X sensing-based semi-persistent scheduling when transmitting aperiodic messages and messages of variable size.

**INDEX TERMS** LTE-V2X, C-V2X, Cellular V2X, IEEE 802.11p, ITS-G5, DSRC, comparison, aperiodic, variable size, CAM.

## I. INTRODUCTION

V2X (Vehicle to Everything) communications are fundamental for next generation active traffic safety and dynamic traffic management applications. V2X communications will extend the awareness range of connected and automated vehicles with information coming from neighboring vehicles, the infrastructure or vulnerable road users. V2X applications mainly rely on broadcasting basic awareness messages (sometimes referred to as beacons). These messages include CAMs (Cooperative Awareness Messages) specified by ETSI or BSMs (Basic Safety Messages) specified by SAE. These messages include basic information such as the position, speed or direction of the transmitting vehicle.

There are currently two main technologies to support first generation V2X communications. IEEE 802.11p was the first V2X technology specified and is the basis of the DSRC (Dedicated Short Range Communications) and ITS-G5

(specified in Europe by ETSI) standards. There has been extensive testing and trialing worldwide of IEEE 802.11p-based V2X communications and applications. The Third Generation Partnership Project (3GPP) standardized a competing standard under Release 14 and Release 15 based on an adaptation of LTE (Long Term Evolution) for vehicular scenarios. The technology is known as LTE-V2X or Cellular V2X (C-V2X) and is based on the PC5 or sidelink LTE radio interface. This interface allows direct V2V (Vehicle to Vehicle) or V2I (Vehicle to Infrastructure) communications without necessarily transferring the data over the cellular network. IEEE 802.11p and LTE-V2X are not interoperable so vehicles will not be able to communicate with each other if they implement different technologies. This has raised an intense debate on the technology that should be deployed. The debate is not exclusively based on technical aspects but also on regulatory and business ones [1][2]. This includes for example the allocation of the

spectrum (mainly on the ITS 5.9GHz band) and the capacity to evolve and maintain backwards compatibility with deployed first generation V2X equipment. The social and economic relevance of V2X and the challenges faced if deploying non-interoperable V2X technologies requires a careful evaluation of both technologies under realistic conditions. These evaluations are necessary to support regulatory and business decisions for the best public interest. Several studies have compared IEEE 802.11p and LTE-V2X. For example, the study reported in [3] presents a complete comparison at the link level. The study shows that LTE-V2X can improve the link budget over IEEE 802.11p by around 7dB and increase the communication range and reliability at the link level. A complete comparison of both technologies requires though an evaluation at the system level. This is particularly relevant in the case of direct V2X communications if vehicles autonomously select their radio resources. In this case, the design of the MAC (Medium Access Control) can significantly impact the final performance, especially as the V2X network scales. It has already been proven that the MAC of both IEEE 802.11p [4] and LTE-V2X [5] are prone to packet collisions when the channel load increases. Several studies ([2], [6]-[10]) have compared the performance and configuration of IEEE 802.11p and LTE-V2X at the system level. However, existing studies generally consider a simplified traffic model for generation of messages. This model was proposed in 3GPP for the evaluation of LTE-V2X [11] but does not follow any of the vehicular standards that define how messages should be generated. The model generates messages periodically, and messages have one or two possible sizes. ETSI and SAE specify in [12] and [13] respectively, when awareness messages (CAMs and BSMS) should be generated and what should be their size. Several OEMs demonstrated experimentally in [14] that CAMs are not generated periodically and their size constantly varies. The time interval between messages and their size can significantly influence the operation and performance of the MAC in distributed environments where vehicles autonomously select their radio resources. In this context, this study advances the state of the art with an in-depth comparison at the system level of IEEE 802.11p and LTE-V2X mode 4 when considering messages (generated following the ETSI CAM standard) that are characterized by variable sizes and time interval between messages. The study focuses on LTE-V2X mode 4 since it does not require cellular infrastructure support and is hence the baseline mode for ubiquitous active traffic safety. The study also analyses how different message patterns (i.e. periodic or aperiodic and of constant or variable size) can affect IEEE 802.11p and LTE-V2X. This includes the analysis of different possible configurations of IEEE 802.11p and LTE-V2X under various traffic densities. The study demonstrates that the sensing-based semi-persistent scheduling scheme defined in LTE-V2X faces significant challenges when handling aperiodic messages and messages of variable size. This study

demonstrates that these challenges cannot be resolved with different configurations of LTE-V2X, and IEEE 802.11p outperforms LTE-V2X as the network scales. In particular, IEEE 802.11p achieves better performance under medium and high traffic densities, i.e. when the MAC has a higher impact on the final performance than the physical layer. The study demonstrates that IEEE 802.11p can better cope with variations in the size and time interval between messages, whereas these variations negatively impact LTE-V2X.

## II. V2X COMMUNICATION TECHNOLOGIES

### A. IEEE 802.11p

IEEE 802.11p is an evolution of IEEE 802.11a for vehicular communications. IEEE 802.11p uses an OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)-based physical (PHY) layer with a channel bandwidth of 10 MHz. A 10 MHz bandwidth can better combat the multipath delay spread and Doppler effects caused by the vehicular mobility compared to a 20 MHz bandwidth. Reducing the bandwidth to 10 MHz requires doubling all OFDM timing parameters used in 20 MHz channels (e.g. the duration of the preamble, OFDM symbols or training sequences). IEEE 802.11p uses the same modulation and coding schemes than IEEE 802.11a. It supports data rates ranging from 3 to 27 Mbps using coding rates of 1/2, 2/3 or 3/4 (convolutional coding) and BPSK (binary phase shift keying), QPSK (quadrature phase shift keying), 16-QAM (16-quadrature amplitude modulation) or 64-QAM modulations.

IEEE 802.11p offers the possibility to communicate outside a basic service set (BSS) and eliminates at the MAC the authentication/association procedures and the need to scan available frequency channels. The IEEE 802.11p basic access method is the Distributed Coordination Function (DCF) of IEEE 802.11 that is known as Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA). In CSMA/CA, a node has to sense the radio channel before transmitting a packet so that the transmission does not start if another node is using the channel. If the channel is sensed as idle, the node can start its transmission. If the channel is sensed as busy, the node defers its transmission until the end of the current transmission. The radio channel is sensed as busy when the vehicle detects a signal with a received power strength higher than the Clear Channel Assessment (CCA) threshold. The CCA threshold must be higher than the receiver's sensitivity level (or sensing power threshold). At the end of the channel busy period, the node waits for a backoff time to minimize collisions during contention between multiple nodes that also deferred their transmission since they also detected the channel as busy. This time is calculated for each packet by multiplying the parameter  $aSlotTime$  and an integer number that is randomly selected in the interval  $[0, CW]$ ;  $CW$  is referred to as the *Contention Window*. For the transmission of broadcast packets in 10 MHz channels,  $CW = aCW_{min} = 15$  and  $aSlotTime = 13\mu s$ . The node decreases the backoff time when it senses the channel as idle

for more than a DIFS (Distributed InterFrame Space) period when the last frame detected was received correctly, or for more than a EIFS (Extended InterFrame Space) period when the last frame detected was not received correctly. The node can start its transmission when its backoff time reaches zero. Several studies have shown that the capture effect can improve the performance of IEEE 802.11 technologies [15]. This feature is implemented in many chips. It allows a node in reception mode to abandon the current packet reception process to start receiving a new packet with significantly higher signal strength. To this aim, the node continuously monitors the received signal strength while in receiving mode. If there is suddenly a sharp increase (e.g. by 10 dB), the receiver stops decoding the packet it was receiving and starts decoding the new packet received with higher signal strength. If the capture effect is not implemented, the node will not be able to receive and decode the new incoming packet with higher signal strength, and this incoming packet would represent interference. It is highly probable that the node will not be able to correctly decode the packet it was originally trying to decode since the incoming packet generates a high interference. The capture effect can have a strong impact on vehicular networks due to the hidden terminal problem. It is also particularly useful to improve the packet reception probability at short distances. To explain why, let's consider a scenario with three vehicles (A, B and C). Vehicles A and B are close to each other and their distance to C is large. We assume that vehicle A implements the capture effect and starts receiving a packet with low signal strength from vehicle C. We consider that vehicle B cannot detect the transmission of C and starts a new transmission. In this case, vehicle A abandons the reception of the packet from C and starts receiving the packet from B that is received with higher signal strength. Vehicle A can correctly decode the packet from B. If vehicle A did not implement the capture effect, it would not be able to receive the packet from B and C since the transmission from C would be highly interfered by vehicle B.

### B. LTE-V2X

LTE-V2X can operate with 10 MHz or 20 MHz channels. LTE-V2X utilizes a time-frequency resource structure (Fig. 1) similar to that of LTE. The time is structured into 1ms sub-frames that contain 14 OFDM symbols. The channel bandwidth is divided in Resource Blocks (RBs) of 180 kHz each. Each RB is made of 12 OFDM sub-carriers separated by 15 kHz each. RBs within the same sub-frame are organized into sub-channels. LTE-V2X defines different Modulation and Coding Scheme (MCS) using turbo coding and QPSK or 16-QAM. In LTE-V2X, the data and control information are encapsulated in Transport Blocks (TBs) and Sidelink Control Information (SCI), respectively. TBs are transmitted over Physical Sidelink Shared Channels (PSSCH) and SCIs over Physical Sidelink Control Channels (PSCCH) [16]. A TB contains a full packet and can occupy one or more sub-channels depending on the MCS and the

number of RBs per sub-channel. Each SCI is associated to a TB and occupies 2 RBs. An SCI contains important information to decode a TB such as the utilized MCS, the RBs used to transmit the TB, or information related to the reservation of sub-channels for the following transmission. The SCI must be correctly received to be able to decode its associated TB. A TB and its associated SCI must be transmitted in the same sub-frame as illustrated in Fig. 1.

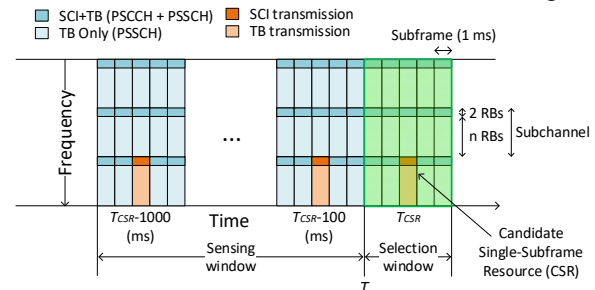


FIGURE 1. LTE-V2X channelization.

LTE-V2X can operate under Mode 3 or mode 4. In Mode 3, the cellular base station (or eNB) selects and manages the sub-channels for the direct communication between vehicles. In mode 4, vehicles do not require the support from cellular base stations and autonomously select their sub-channels. Vehicles operating under mode 4 need to utilize a common set of parameters so that they can communicate with each other. These parameters include, for example, the number of sub-channels per sub-frame and the number of RBs per sub-channel [17]. These parameters are not fixed by the standard. They can be pre-configured, e.g. using the default values defined by ETSI [18]. Alternatively, they can be configured by the cellular network when vehicles are under cellular coverage.

In LTE-V2X mode 4, vehicles utilize the sensing-based Semi-Persistent Scheduling (SPS) scheme [16][19] defined in Release 14 to autonomously select their sub-channels. This scheduling scheme is sensing-based and is used by vehicles to identify and select sub-channels that are not occupied by other vehicles. To this aim, the scheduling scheme includes a semi-persistent reservation process that vehicles utilize to notify neighboring vehicles of the selected and reserved sub-channels. In particular, vehicles use the Resource Reservation Interval (RRI) included in the SCI to inform neighboring vehicles when they will utilize the reserved sub-channel(s) for their next transmission. If a vehicle is using a sub-channel to transmit its current TB (and its associated SCI) at time  $t$ , the RRI notifies nearby vehicles that the vehicle will also use the same sub-channel for its next transmission at  $t+RRI$ . The RRI is then used to avoid other vehicles from utilizing the same sub-channel(s). The RRI can be configured equal to 20ms, 50ms, 100ms or any multiple of 100ms. The 3GPP standard does not fix a value of the RRI and its configuration is up to UE (User Equipment) implementation [19]. The configuration of the RRI has an important impact on the operation of the sensing-



based SPS scheme. Its value should be adapted as much as possible to the characteristics of the messages that vehicles must transmit.

Vehicles use the selected sub-channel(s) for a number of consecutive *Reselection Counter* transmissions. *Reselection Counter* is randomly selected between 5 and 15 for RRI=100ms (or any multiple of 100ms), between 10 and 30 for RRI=50ms and between 25 and 75 for RRI=20ms. *Reselection Counter* is decremented by one after each transmission, and a new value must be selected every time a vehicle must reserve new sub-channel(s). New sub-channel(s) must be reserved if at least one of the following conditions is satisfied:

- New sub-channel(s) must be reserved with probability  $(1-P)$  if the *Reselection Counter* reaches 0.  $P$  can be configured between 0 and 0.8. Increasing  $P$  augments the probability to maintain a selected sub-channel(s) for longer periods of time and provides a more stable sensing environment. However, increasing  $P$  also augments the probability for persistent packet collisions between two vehicles that select the same sub-channel(s) [20]. It should be noted that if a vehicle does not maintain the current reservation when *Reselection Counter* reaches 0, it notifies other nodes by setting the RRI in the SCI equal to 0.
- New sub-channel(s) must be reserved if the new packet or TB does not fit in the reserved sub-channel(s).
- New sub-channel(s) must be reserved if the current reservation cannot satisfy the latency deadline of the new packet. This happens if the time until the next reserved sub-channel(s) is higher than the latency deadline of the new packet.

The process to select and reserve new sub-channel(s) is referred to as reselections. To select new sub-channel(s) at time  $T$ , the ego vehicle executes the following three steps of the sensing-based SPS scheme:

- Step 1. The ego vehicle identifies first the Candidate Single-Subframe Resources (CSRs) within the Selection Window. The Selection Window (Fig. 1) is the time period between  $T$  and the latency deadline defined for the incoming packet (equal or lower than 100ms [16]). A CSR is a group of adjacent sub-channels within the same sub-frame where the new SCI+TB to be transmitted fits.
- Step 2. The ego vehicle excludes the identified CSRs that are expected to be used by other vehicles. To this aim, the ego vehicle senses the transmissions from other vehicles during the so-called Sensing Window. The Sensing Window is the time period that includes the last 1000 sub-frames before  $T$  (Fig. 1). A CSR is excluded if the two following conditions are met: 1) the ego vehicle has received an SCI from another vehicle indicating that it will utilize this CSR in the current Selection Window or at the same time as the ego vehicle will need it to transmit any of its following *Reselection Counter* transmissions;

2) the ego vehicle excludes a CSR if its average Reference Signal Received Power (RSRP) measured over the TB associated to the corresponding SCI is higher than a given threshold. The RSRP threshold is a configurable parameter. The ego vehicle builds a list  $L_1$  with all the CSRs that have not been excluded.  $L_1$  must include at least 20% of all CSRs in the Selection Window. Otherwise, Step 2 is iteratively executed increasing the RSRP threshold by 3dB at each iteration until the 20% target is met.

- Step 3. The ego vehicle builds a list  $L_2$  with the CSRs included in  $L_1$  that have the lowest average RSSI (Received Signal Strength Indicator) over all its RBs. This RSSI value is averaged over all the previous  $T_{CSR-T_{IPF}j}$  sub-frames where  $T_{IPF}=100ms$  and  $1 \leq j \leq 10$  for RRI $\geq$ 100ms,  $T_{IPF}=50ms$  and  $1 \leq j \leq 20$  for RRI=50ms, and  $T_{IPF}=20ms$  and  $1 \leq j \leq 50$  for RRI=20ms. The total number of CSRs in  $L_2$  must be equal to 20% of all CSRs in the Selection Window. The ego vehicle randomly selects a CSR from  $L_2$  to transmit its new packet and maintains the selection for its next *Reselection Counter* transmissions. We refer to the selected CSR as selected sub-channel(s) in the rest of the paper.

### III. IMPACT OF MESSAGE PATTERNS ON THE OPERATION OF THE LTE-V2X MODE 4 MAC

This study investigates the impact of different message traffic patterns on the operation and performance of IEEE 802.11p and LTE-V2X mode 4. In particular, the study analyses the impact of different time intervals between messages and variable message sizes. Section IV presents the message generation models that are utilized for the numerical evaluation of this impact. On the other hand, this section discusses qualitatively the impact that messages of variable size and time intervals can have on the LTE-V2X mode 4 MAC. The section focuses the discussion on LTE-V2X mode 4 because IEEE 802.11p has a simpler but more flexible MAC. IEEE 802.11p does not have a time-frequency structure to organize the channel access as it is the case of LTE-V2X. In addition, there is no semi-persistent reservation of resources in IEEE 802.11p. In IEEE 802.11p, nodes can access the channel at any time if they sense that the channel is free. The MAC process to sense and access the channel must be conducted for every packet (i.e. there is no reservation) and it is independent of the size of the packet to be transmitted. As a result, the IEEE 802.11p MAC is not really affected by the size of the messages and whether messages are periodic or aperiodic. This is not the case of LTE-V2X since it uses a pre-defined time-frequency structure that conditions the access to the channel as well as the size of packets that can fit in a configured sub-channel. In addition, LTE-V2X semi-persistently reserves the selected sub-channels and this reservation might not be utilized if messages are generated aperiodically. All these aspects are discussed in detail in the following sub-sections

and are numerically quantified in Section VI.

### A. RESELECTIONS IN LTE-V2X SENSING-BASED SPS SCHEME

In LTE-V2X mode 4, a vehicle might reselect its sub-channel(s) when *Reselection Counter* is equal to 0; the potential reselection is conditioned by  $P$  as previously explained. Reselections can generate packet collisions since neighboring vehicles will not be aware of the new selected sub-channel(s) until the next TB is transmitted. The number of reselections increases with the traffic density, and the probability of packet collisions increases with the number of reselections. This is illustrated in Fig. 2 that represents the time-frequency structure in LTE-V2X. Fig. 2.a depicts a scenario where two vehicles reselect sub-channels at two different time instants  $T_{resel1}$  and  $T_{resel2}$ . Their transmissions can collide if their selection windows overlap and they select the same sub-channel(s) in the time window where the two selection windows overlap. If this happens, the collisions will persist until at least one of the two vehicles reselects new sub-channels. The probability for packet collisions increases when the number of vehicles reselecting sub-channels increases since there is a higher probability that selection windows overlap. This is visible in Fig. 2.b where a third vehicle ( $V_3$ ) reselects its sub-channels at  $T_{resel3}$  and its selection window overlaps with that of  $V_1$  and  $V_2$ . This can generate additional packet collisions between  $V_3$  and  $V_1$  and between  $V_3$  and  $V_2$ .

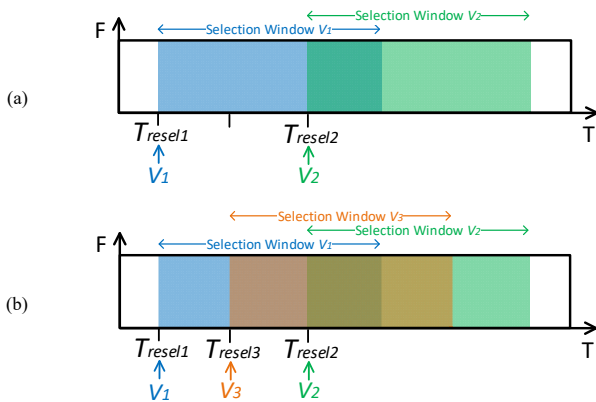


FIGURE 2. Reselections in LTE-V2X and probability of packet collisions.

### B. ADDITIONAL RESELECTIONS

Reselections originated by the depletion of *Reselection Counter* are part of the sensing-based SPS scheme and are hence independent of the message traffic patterns. However, variations in the size of messages (and the corresponding TBs) or the time between messages can generate additional reselections before *Reselection Counter* is depleted. If the size of messages varies, a reselection will occur when a new message does not fit in the previously reserved sub-

channel(s)<sup>1</sup>. We will refer to this as a size reselection. Size reselections are illustrated in Fig. 3 that represents a scenario where a vehicle generates a first message (or TB) at  $T_{G1}$  and reserves two sub-channels for its transmission at  $T_{R1}$ . The next message generated at  $T_{G2}$  is bigger and does not fit in the two reserved sub-channels at  $T_{R2}$ . The vehicle must then reselect new sub-channels to transmit the new message.

Variations in the time between messages can also force additional reselections that are referred to as latency reselections. This depends on the strategy to select the RRI and on the time interval between messages. In particular, additional reselections can occur when sub-channel(s) are reserved with an RRI larger than the minimum time interval between messages or TBs. This scenario is illustrated in Fig. 4 where a vehicle generates a first TB at  $T_{G1}$  and reserves two sub-channels for its transmission at  $T_{R1}$ . The selected sub-channels are reserved at  $T_{R2} = T_{R1} + \text{RRI}$  (RRI=200ms in Fig. 4) for transmitting the next TB. Let's suppose that the next TB is generated at  $T_{G2}$  and has a latency deadline of 100 ms. The vehicle must then transmit the TB before  $T_{G2} + 100$  ms. If  $(T_{G2} + 100 \text{ ms}) < T_{R2}$ , the vehicle is forced to reselect new sub-channels to transmit the TB before the latency deadline even if *Reselection Counter* is not depleted.

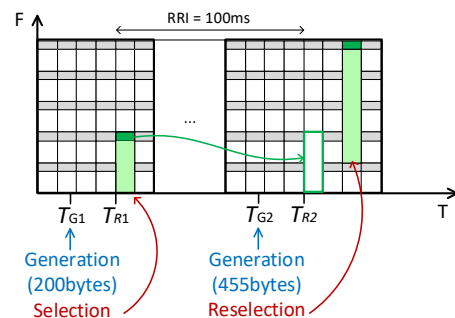


FIGURE 3. Reselection of sub-channel(s) due to variations in the size of messages.

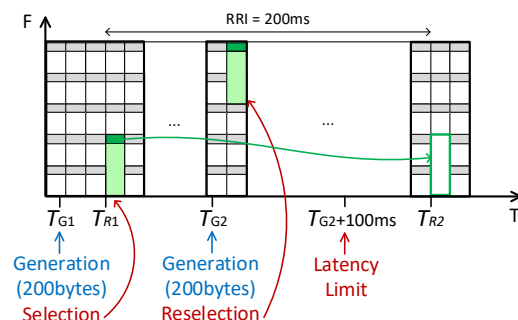


FIGURE 4. Reselection of sub-channel(s) due to variations in the time-interval between messages.

<sup>1</sup> A reselection does not occur if the new message is smaller than the previous message for which the current sub-channel(s) was reserved. In this

case, some RBs of the selected and reserved sub-channel(s) will be left unused when transmitting the smaller message.



### C. UNUTILIZED RESERVATIONS

Reselections due to variations in the size of messages and the time interval between messages can leave previously reserved sub-channel(s) unutilized. However, other vehicles will believe that these previously reserved sub-channel(s) are still reserved and will not consider them as candidate sub-channels. This is visible in Fig. 3 and Fig. 4. In these figures, the reservation of sub-channels at  $T_{R2}$  is unutilized because other vehicles believe these sub-channels are still reserved by the transmitting vehicle even though this vehicle had to select new sub-channel(s) at  $T_{G2}$ . We will refer to this problem as unutilized reservations. Unutilized reservations negatively impact the performance since they effectively reduce the capacity as the number of available sub-channels for other vehicles to select is reduced. This increases the risk of packet collisions when the network load augments.

It should be noted that reselections resulting from depleting the *Reselection Counter* do not generate unutilized reservations. Vehicles transmit their RRI in the SCI associated to a TB. The vehicles that receive the SCI know which sub-channels the transmitting vehicle will utilize to transmit its next TB thanks to the RRI. Before transmitting the last TB that depletes the *Reselection Counter*, the transmitting vehicle evaluates  $1-P$  to decide if it maintains the current reservation or selects new sub-channels. If new sub-channels must be reserved, the RRI is set equal to zero to announce neighboring vehicles that the transmitting vehicle will select new sub-channel(s) for transmitting the following TB. This frees the sub-channel(s) currently utilized by the transmitting vehicle, and these sub-channels can be used by other vehicles thereafter. A vehicle that must reselect its sub-channel(s) before *Reselection Counter* is depleted due to variations in size or time interval of TBs does not set RRI to zero in its last transmission since it could not anticipate that it would have to reselect new sub-channel(s) for its next TB. As a result, it cannot inform neighboring vehicles that it will not utilize the previously reserved sub-channels.

Reservations can also be left unutilized even if there are no additional reselections. This can occur if the time between messages or TBs is larger than the RRI. This scenario is illustrated in Fig. 5.a where a vehicle  $V_a$  generates a first TB at  $T_{G1}$  and reserves two sub-channels for its transmission at  $T_{R1}$ . The vehicle reserves the same sub-channels at  $T_{R2}=T_{R1}+RRI$ . However, the next TB is generated at  $T_{G2}$  and  $T_{G2} > T_{R2}$ . The complete reservation announced for  $T_{R2}$  (using the SCI in the first TB) is then left unutilized and all other vehicles cannot use these sub-channels since they are reserved (even if unutilized) by the transmitting vehicle. The vehicle  $V_a$  transmits the TB generated at  $T_{G2}$  using the same sub-channels at  $T_{R3}$  (assuming  $T_{G2} + \text{latency\_deadline} > T_{R3}$ ). However, the vehicle has not announced the reservation of the sub-channels at  $T_{R3}$  since it did not transmit a SCI (with the corresponding RRI) at  $T_{R2}$ . Other vehicles therefore believe that the sub-channels at  $T_{R3}$  are free. Transmitting the

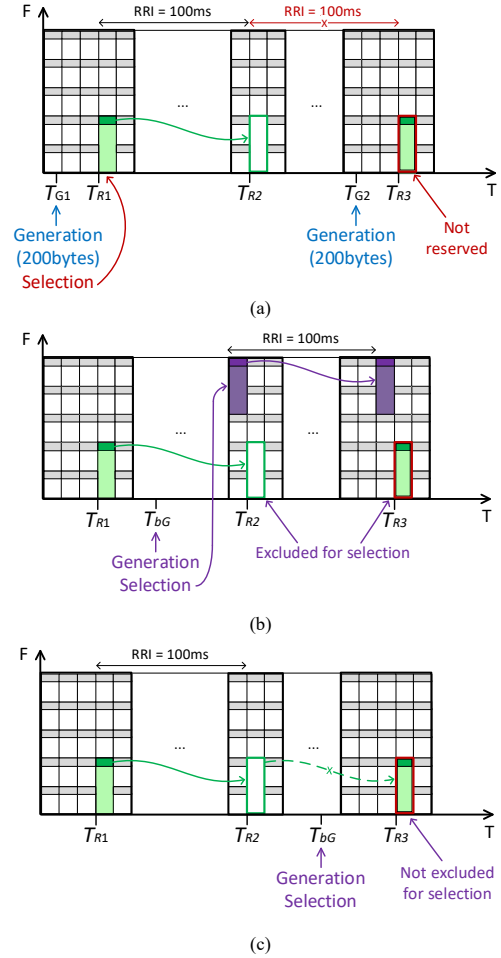


FIGURE 5. Unutilized reservations.

second TB at  $T_{R3}$  can hence generate packet collisions with other vehicles that are reselecting sub-channels and may select the sub-channels used by  $V_a$  at  $T_{R3}$ . This depends on when these other vehicles generate their TB and select new sub-channels. If they do so before  $T_{R2}$  (Fig. 5.b), they will exclude as candidate sub-channels the empty reservation from  $V_a$  at  $T_{R2}$  since they believe that these sub-channels are going to be used by  $V_a$ . This is illustrated in Fig. 5.b where a second vehicle  $V_b$  generates a first TB at  $T_{bG}$ . The vehicle launches then the process to select sub-channels before  $T_{R2}$  and excludes the sub-channels reserved by  $V_a$  at  $T_{R2}$  from its list of candidate sub-channels.  $V_b$  will then select different sub-channels than  $V_a$  for its first TB and will reserve them for the next TB. There is then no risk of collision between  $V_a$  and  $V_b$ . The risk of collision exists if  $V_b$  generates its TB at  $T_{bG} > T_{R2}$  (Fig. 5.c). In this case,  $V_b$  believes that  $V_a$  will not use the sub-channels at  $T_{R3}$  since  $V_a$  did not transmit an SCI (and TB) at  $T_{R2}$  indicating the reservation using the RRI. Consequently,  $V_b$  considers that the sub-channels used by  $V_a$  at  $T_{R3}$  are available, and a collision would exist if after applying the sensing-SPS scheme  $V_b$  selects for its transmissions any of the sub-channels used by  $V_a$  at  $T_{R3}$ .

#### D. UNUSED SUB-CHANNEL(S)

Variations in the size of TBs can also result in unused sub-channels even if this variation does not generate an additional reselection. This can occur if the new TB is smaller than the reserved sub-channels. In this case, there will be no additional reselection but some of the reserved sub-channels will be left unused and other vehicles cannot utilize them since they are reserved. This reduces again the number of available sub-channels and increases the risk of packet collisions with the network load. This scenario is illustrated in Fig. 6 where a vehicle generates a first TB at  $T_{G1}$  and reserves four sub-channels for its transmission at  $T_{R1}$ . The next TB is generated at  $T_{G2}$  and only needs two of the four sub-channels. The other two sub-channels are still reserved but left unused by the transmitting vehicle. Other vehicles cannot utilize them since they are reserved by the transmitting vehicle.

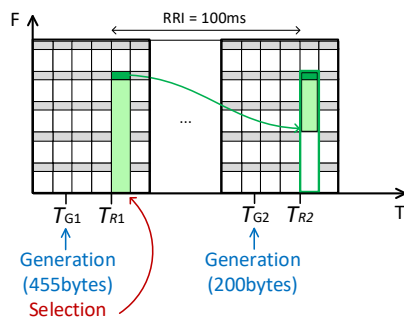


FIGURE 6. Unused sub-channels due to variations in the size of TBs.

#### IV. MESSAGE GENERATION MODELS

The previous section has shown that the LTE-V2X mode 4 MAC can experience certain challenges when handling aperiodic messages and messages of variable size. It is then important to analyze how different message traffic patterns affect the operation and performance of LTE-V2X and IEEE 802.11p. This section presents the message generation models that have been implemented to conduct this study. The study focuses on basic awareness messages that are constantly broadcasted by vehicles and support a wide range of V2X applications. These messages include basic information about the transmitting vehicle such as its position or speed. We consider different types of models to generate awareness messages. This goes from simple models that generate messages periodically and of constant size to models that generate messages following the ETSI CAM standard. Different models are considered to analyze the performance under periodic and constant size messages and also under aperiodic messages of variable size. This is done so that our study is not constrained to a specific standard (in particular, the ETSI CAM standard) and our conclusions provide indications for different message types. The implemented models are described in the following sub-sections and their characteristics are summarized in Table I.

TABLE I.  
MESSAGE GENERATION MODELS

MODEL NAME	CAM size	Time-intervals between CAMs
Simplified	Fixed size (200 bytes)	Fixed (100ms or 200ms)
3GPP	Four consecutive messages of 190 bytes each followed by one message of 300 bytes	Fixed (100ms or 200ms)
Empirical CAM	Following complete empirical CAM model in [26]	Following complete empirical CAM model in [26]
Empirical-size	Following empirical separate size model in [26]	Fixed (100ms or 200ms)
Empirical-time	Fixed size (200 bytes)	Following empirical separate time-interval model in [26]

#### A. SIMPLIFIED MODEL

Many of the studies reported to date consider simple message generation models that do not implement specific standards such as CAM or BSM. Many studies consider a constant message size of 200 Bytes and periodic messages with a time between messages generally equal to 100ms. This is for example the case of the IEEE 802.11p studies reported in [4] and [21] as well as the LTE-V2X studies in [22] and [23]. We have implemented this simplified message generation model for comparison. Our implementation considers messages of constant size (200 Bytes) with a fixed time between messages of 100ms or 200ms.

#### B. 3GPP MODEL

We have also implemented the message generation model utilized by the 3GPP during the LTE-V2X standardization process [11]. This model also considers periodic messages with a constant time between messages equal to 100ms. However, the model considers two message sizes as follows: four out of five consecutive messages have a constant size of 190 Bytes and the fifth message has a size of 300 Bytes. This pattern is repeated periodically. This model is commonly utilized in the literature to evaluate the performance and efficiency of LTE-V2X (e.g. [24], [25]).

#### C. EMPIRICAL CAM MODEL

The two previous models are simple but do not generate messages following any specific vehicular message standard such as CAM or BSM. To adequately evaluate the operation and performance of IEEE 802.11p and LTE-V2X, it is necessary to also consider models that generate messages following vehicular standards. To this aim, this study focuses on CAMs that have been specified by ETSI in [12]. CAM messages (or CAMs) are generated at the Facilities layer of the ETSI ITS Communications Architecture. Their format and generation rules are defined by ETSI in [12] and are independent of the underlying wireless technology (IEEE 802.11p or LTE-V2X). The generation of CAMs is based on the mobility of the transmitting vehicle. A vehicle checks

every  $T\_CheckCamGen \leq 100ms$  the variation of its position, speed and heading since it generated its last CAM. The vehicle generates a new CAM if its position has changed more than 4m, its speed has changed more than 0.5m/s or its heading has changed more than  $4^\circ$  [12]; the speed and heading variations are computed as absolute values. A CAM is also generated if the time elapsed since the last generated CAM is equal to or higher than 1s. It should be noted that the time between CAMs is variable and a multiple of  $T\_CheckCamGen$ . In particular, the time between CAMs depends on the mobility of vehicles and vehicles will generate more CAMs per second when their speed or acceleration is higher. Current CAM generation rules establish that CAM messages are not necessarily periodic. In fact, the measurements reported in [14] show that it is unlikely that the time between consecutive CAMs is constant for more than 3 CAM messages, except when the vehicle is stopped.

The size of CAM messages is not constant either. A CAM includes one ITS PDU header, one basic container and one high frequency container [12]. The basic container includes information about the transmitting vehicle such as its position. The high frequency container contains dynamic information such as the acceleration, heading or speed of the transmitting vehicle. Optionally, a CAM can also include one low frequency container and one special vehicle container. The size of each CAM depends on the optional containers and the optional data elements included in each container. For example, the high frequency container is mandatory but its size is variable because 7 of its 16 data elements are optional. Security certificates also have an impact on the amount of data that is finally transmitted and they are not included in all CAMs [14]. The size of CAMs is therefore variable and depends on the vehicular context and the implementation (e.g. how the vehicle's path history is coded in the optional low frequency container) [14].

An accurate evaluation of IEEE 802.11p and LTE-V2X requires the use of a CAM generation model that accurately represents the variation in size and time between messages included in the CAM format and generation rules specified by ETSI. To this aim, this study utilizes a realistic CAM generation model presented in [26]. This model was derived from a set of empirical measurements of two OEMs that implemented the ETSI CAM standard. The model produces CAM messages with variable size and time between messages following the mobility-based rules specified in ETSI. In particular, we utilize the Volkswagen-Highway empirical model reported in [26] and provided open-source by the authors. We will refer to this model as the *Empirical CAM model*. This model was created by the authors from the analysis of real traces presented in [14] and collected by Volkswagen in highway scenarios. The traces were collected with equipment implementing the CAM standard, in particular the CAM Facilities layer *C2C-CC profile 1.3* [14]. The model is based on  $m$ th order Markov sources, and

models the size of CAMs and the time interval between CAMs. The model is able to capture the cross-correlation present between the size of each CAM and the time interval to the next CAM as demonstrated in [26]. The model also models the existing correlation between the current CAM and the previous five CAMs [26]. The model follows the CAM standard and therefore checks every  $T\_CheckCamGen$  whether a CAM message should be generated.  $T\_CheckCamGen$  was set equal to 100ms during the trials where the traces were collected. However, it was observed that there was a random jitter (with zero mean and standard deviation of 3.235ms) between CAMs that resulted in that CAMs are not strictly generated at multiples of 100ms. This jitter is also included in the model. The study in [26] demonstrates that the *Empirical CAM model* is able to generate CAM messages with sizes and time intervals between CAMs that accurately mimic the empirical traces described in [14]. It is important to emphasize the high variability of the size of CAMs and the time between CAMs present in the traces and modeled in the implemented *Empirical CAM model*. This variability is illustrated in and Fig. 7. Fig. 7 plots a sample of the traces collected by Volkswagen in a highway and presented in [14]. The sample shows the variability of the size of CAMs and the time between CAMs. Fig. 8 plots the PDF (Probability Density Function) of the CAM sizes and time intervals between CAMs from the traces collected in the trials. The figure clearly shows that CAM messages are not periodic and their size is not constant. The implemented *Empirical CAM model* accurately matches the variability illustrated in Fig. 7 and Fig. 8. Modelling this variability is critical to accurately

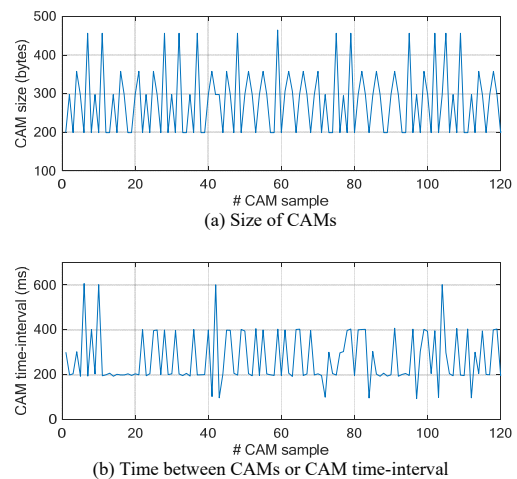


FIGURE 7. Sample of the empirical traces presented in [14] and collected by Volkswagen in a highway.

evaluate the performance of IEEE 802.11p and LTE-V2X in realistic conditions when implementing ETSI standards. The variability present in the generation of CAMs can impact differently IEEE 802.11p and LTE-V2X since they implement different MAC protocols.

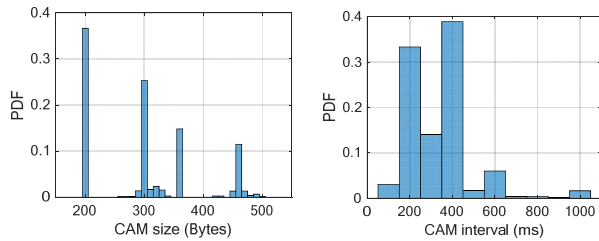


FIGURE 8. PDF of the size of CAMs and the time intervals between CAMs obtained from the traces collected and presented in [14].

#### D. EMPIRICAL SEPARATE MODELS

The Empirical CAM model allows analyzing how IEEE 802.11p and LTE-V2X handle the broadcast transmission of aperiodic messages of variable size that are generated following the ETSI CAM standard. It is also interesting to understand which effect (variable size or time between messages) has a higher impact on the operation and performance of both V2X technologies. To this aim, we utilize variations of the Empirical CAM model (see Table I) where we fix one of the parameters (size or time between messages) and the other parameter is modelled following the principles of the *Empirical CAM model*. These separate models are also presented in [26]. We will refer to as *Empirical-size* the model that fixes the time interval between CAMs and models the variability of the size of CAMs. Similarly, we refer to as *Empirical-time* the model that fixes the size of CAMs and models the variability present in the time between CAMs.

#### V. SIMULATION ENVIRONMENT

The comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X mode 4 has been conducted by means of simulations. To this aim, we use the Veins simulation framework that integrates the network simulator OMNET++ and the road traffic simulator SUMO. We have implemented the LTE-V2X mode 4 radio interface following the 3GPP standards [27]. The implementation was validated in [28]. We have also evolved the IEEE 802.11p radio interface available in OMNET++ to include the capture effect. In addition, we have implemented over OMNET++ all the CAM generation models previously described.

##### A. SIMULATION SCENARIO

This study considers a 5km highway scenario. Statistics are only collected from vehicles located in the center 2km to avoid border effects. We model four different traffic densities:

- *60veh/km*. In this case, the scenario has 3 lanes in each driving direction and the vehicles' speed is 140km/h. This scenario corresponds to the *Highway Fast* scenario defined by the 3GPP in [11].
- *120veh/km*. This scenario has 3 lanes per driving direction but the vehicles' speed is 70km/h due to the higher traffic density. This scenario corresponds to the *Highway Slow* scenario defined by the 3GPP in [11].

- *200veh/km*. This scenario has 3 lanes per driving direction and the vehicles' speed is 70km/h.
- *400veh/km*. This scenario considers 5 lanes per driving direction and the vehicles' speed is 70km/h.

All four scenarios correspond to a service level C according to the Highway Capacity Manual [29], i.e. vehicles can drive with speeds close to the free flow speed but freedom to maneuver within the traffic stream is restricted.

##### B. CONFIGURATION OF IEEE 802.11P AND LTE-V2X

IEEE 802.11p and LTE-V2X are configured to operate over a 10 MHz channel in the 5.9 GHz frequency band. The pathloss is modeled using the WINNER+ B1 pathloss model. The shadowing effects are modeled using a log-normal distribution with zero mean and a standard deviation of 3dB. Spatial shadowing correlation is modeled following the 3GPP guidelines in [11]. The PHY layer performance of IEEE 802.11p and LTE-V2X is modeled using BLER (Block Error Rate)-SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) curves from [3] where both technologies are evaluated under the same conditions (including fast fading). The curves in [3] report a better PHY layer performance of LTE-V2X compared to IEEE 802.11p; LTE-V2X requires around 3dB less SINR to achieve the same BLER performance than IEEE 802.11p. Simulations are also conducted using the same PHY layer performance (in particular, the one for LTE-V2X) for both technologies. The objective is to analyze how the two technologies compare if the IEEE 802.11p PHY layer performance is significantly improved as claimed in [30].

IEEE 802.11p and LTE-V2X are configured to transmit at 23dBm and use the same Modulation and Coding Scheme (QPSK with coding rate of 0.5, i.e. MCS 6 in the case of LTE-V2X). However, different sensitivity levels are considered for each technology. Simulations have been conducted using the minimum sensitivity levels defined in the corresponding standards: -90.4dBm for LTE-V2X [31] and -85dBm for IEEE 802.11p [32]. Simulations have also been conducted with better sensitivity levels corresponding to those reported for commercial devices or prototypes; these values are used as baseline in this study. In particular, we utilize for LTE-V2X the sensitivity level of the prototype in [33]: -103.5dBm. For IEEE 802.11p, we consider a sensitivity level of -92dBm that can be easily reached by commercial devices [34].



Two important parameters to be configured in IEEE 802.11p are the *Capture Effect* and *Clear Channel Assessment* (CCA) thresholds. The capture effect is generally implemented in IEEE 802.11 chipsets [15]. The minimum increase in received signal strength to abandon the current frame and start receiving a new frame (capture effect threshold) is normally set to 10dB [15]. Fig. 9 shows the impact of the capture effect on the PDR (Packet Delivery Ratio) obtained with IEEE 802.11p. The figure has been obtained considering the *Empirical CAM model* and two traffic densities. The figure clearly shows that the capture effect significantly improves the reliability of IEEE 802.11p, especially at short distances. The capture effect is then modeled in this study given its widespread implementation and the positive effect on the performance of IEEE 802.11p. The impact of the CCA on the PDR of IEEE 802.11p is shown in Fig. 10. The figure shows that the lower the CCA threshold, the higher the PDR performance. We then configure in our study the CCA threshold 0.5dB higher than the sensitivity level (minimum standard value or commercial reference) used in IEEE 802.11p.

We configure LTE-V2X with 5 sub-channels per sub-frame following the ETSI recommendations in [18]. Each sub-channel has 10RBs and we consider the adjacent PSCCH-PSSCH configuration (i.e. a TB and its associated SCI are transmitted in adjacent RBs). Table II shows the number of sub-channels needed to transmit CAMs of different sizes considering the configured sub-channelization

TABLE II  
SUB-CHANNELS PER PACKET SIZE IN LTE-V

Packet size (bytes)	CAM model	Number of sub-channels
190	3GPP	2
200	Simplified, Empirical CAM, Empirical-time	2
300	3GPP, Empirical CAM, Empirical-size	3
360	Empirical CAM, Empirical-size	3
455	Empirical CAM, Empirical-size	4

and the use of MCS 6 (i.e. QPSK with coding rate of 0.5). The reported CAM sizes correspond to those used in the different CAM message generation models. The RSRP threshold has been configured with a low value (-140dBm) so that the sensing-based SPS scheme excludes all sub-channels for which an SCI from another vehicle is correctly received; [20] showed that this is the best possible configuration of the RSRP threshold. The probability  $P$  to maintain the same sub-channel(s) when the *Reselection Counter* is depleted is set to 0 following [20]. Increasing  $P$  does not significantly improve the performance but can produce packet collisions that persist over longer periods of time. However, we also analyze in this study  $P=0.8$  to verify that the trends are confirmed for different values of  $P$ . LTE-V2X is configured without packet retransmissions since they tend to overload the channel and reduce performance. Nevertheless, we will also analyze the impact of packet retransmissions for low traffic densities; this is the scenario where retransmissions can be more beneficial since the risk to overload the channel is smaller.

A key parameter in the configuration of LTE-V2X is the selection of the RRI. In this study, we set the RRI equal to the time interval between messages when this interval is constant (e.g. in the *Simplified model* and the *3GPP model*). However, to the authors' knowledge, there is no study that has identified the optimum value of the RRI, or the optimum method to configure the RRI, when the time interval between messages is not constant (e.g. in the case of the *Empirical CAM model*). For this case, we propose and evaluate the performance of LTE-V2X considering three different strategies to configure the RRI:

- Strategy 1: RRI is fixed and equal to 100ms since 100ms is the minimum time interval between CAMs.
- Strategy 2: RRI is fixed and equal to 200ms since 200ms and 400ms are the most frequent time intervals between CAMs in the traces used to create the *Empirical CAM model* (72% of the transmissions used one of these two time intervals).
- Strategy 3: RRI is set equal to the time interval of the last CAM generated. This strategy is chosen since it was observed for 50% of the transmissions recorded in the empirical traces that the following time interval was equal to the previous one.

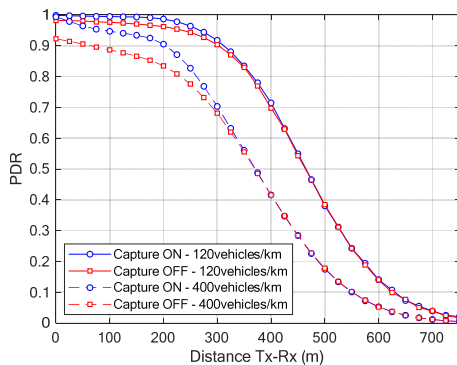


FIGURE 9. PDR of IEEE 802.11p with and without capture effect.

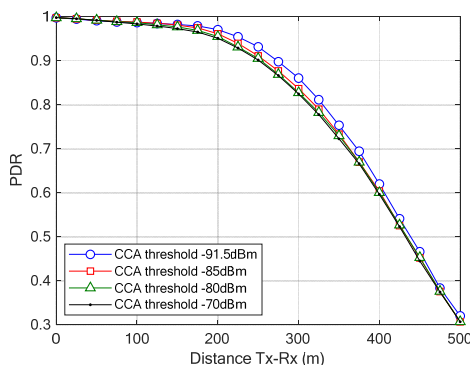


FIGURE 10. PDR of IEEE 802.11p with different CCA threshold values.

### C. METRICS

The performance and operation of IEEE 802.11p and LTE-V2X is compared using several metrics. The performance is mainly estimated by means of the Packet Delivery Ratio (PDR) and the Packet Inter-Reception (PIR). The PDR is the average ratio of packets correctly received to the total number of transmitted packets. It is represented as a function of the distance between the transmitting and receiving vehicles. The PIR is the time between two consecutive packets (transmitted by the same vehicle) that are correctly received. The PIR is used to monitor errors resulting from persistent packet collisions. To this aim, we represent the PIR as a cumulative distribution function (CDF) of all transmissions between vehicles that are at a maximum distance of 100m. This short distance is chosen to be able to observe errors resulting from persistent packet collisions. Choosing larger distances would also include errors resulting from propagation effects and it will be more challenging to observe the impact of persistent packet collisions.

We also estimate the average ratio of packets lost due to propagation errors and packet collisions<sup>2</sup>. These ratios are also shown as a function of the distance between transmitting and receiving vehicles. The metric Propagation error estimates the average ratio of packets lost because they are received with a signal strength below the sensitivity level or because the SNR (Signal to Noise Ratio) is too low to correctly decode the packet. The metric Collision error estimates the average ratio of packets lost due to packet collisions. This error occurs when packets collide and a packet cannot be correctly decoded because the SINR is too low due to the interference generated by other vehicles. For IEEE 802.11p, this metric also includes the packets that a receiver discards because it is receiving at the same time another packet and the capture effect threshold is not surpassed.

Another important metric is the Channel Busy Ratio (CBR). This metric is used to estimate the channel load. In IEEE 802.11p (Fig. 11.a), it is computed as the ratio of time that the channel is sensed as busy (i.e. the RSSI is higher than the CCA threshold). In LTE-V2X (Fig. 11.b), the CBR is the ratio of sub-channels that experience an RSSI higher than a threshold to the total number of sub-channels in the observation time window. For IEEE 802.11p, the RSSI threshold is set up 0.5dB higher than the sensitivity level like for the CCA threshold.

We also compute metrics to quantify the challenges experienced by the LTE-V2X mode 4 sensing-based SPS scheme when transmitting messages of variable size and time interval. In particular, we compute the following metrics:

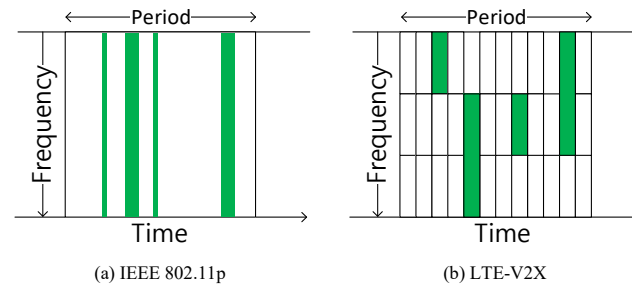


FIGURE 11. Estimation of the CBR.

- *Counter reselection ratio.* Ratio of messages for which there is a reselection due to the depletion of the *Reselection Counter* to the total number of messages generated.
- *Size reselection ratio.* Ratio of messages that produce a size reselection to the total number of messages generated.
- *Latency reselection ratio.* Ratio of messages that produce a latency reselection to the total number of messages generated.
- *Total reselection ratio.* Ratio of messages that produce a reselection (counter, size or latency) to the total number of messages generated. It should be noted that this ratio is not equal to the sum of the other three ratios since it is possible that a message generates several types of reselections and this is counted as a single reselection when computing the total reselection ratio.
- *Ratio of unused sub-channels.* Average ratio of unused sub-channels in the reserved sub-channels used to transmit a message or TB.
- *Ratio of unutilized reservations.* Average ratio of reservations that are completely left unutilized (i.e. no sub-channels in the reservation are used) to the total number of reservations. This metric only accounts for unutilized reservations that are not due to an additional reselection since additional reselections are already considered in the size and latency reselection ratios.

## VI. COMPARISON OF IEEE 802.11p AND LTE-V2X

### A. PERIODIC MESSAGES

The performance of IEEE 802.11p and LTE-V2X is first compared considering periodic messages using the *Simplified model* and the *3GPP model*. Fig. 12 compares the PDR achieved when messages are periodic and of constant size (i.e. *Simplified model* in Section IV.A). Messages are generated every 200ms. LTE-V2X is then configured with the second strategy to select the RRI (i.e. RRI=200ms). The results are depicted for four traffic densities and have been obtained considering the baseline parameters specified in Section V.B.

<sup>2</sup> We also estimated the percentage of packet lost due to half duplex errors and the loss of the SCI in LTE-V2X. Few packets were lost due to these types of errors in the conducted simulations, and we omit them in this study.

Fig. 12.a shows that under low traffic densities LTE-V2X outperforms IEEE 802.11p. Low traffic densities generate a low channel load (Table III). When the channel load is low, the MAC has a low impact on the PDR compared to the physical layer. This is actually visible in Fig. 13 that shows

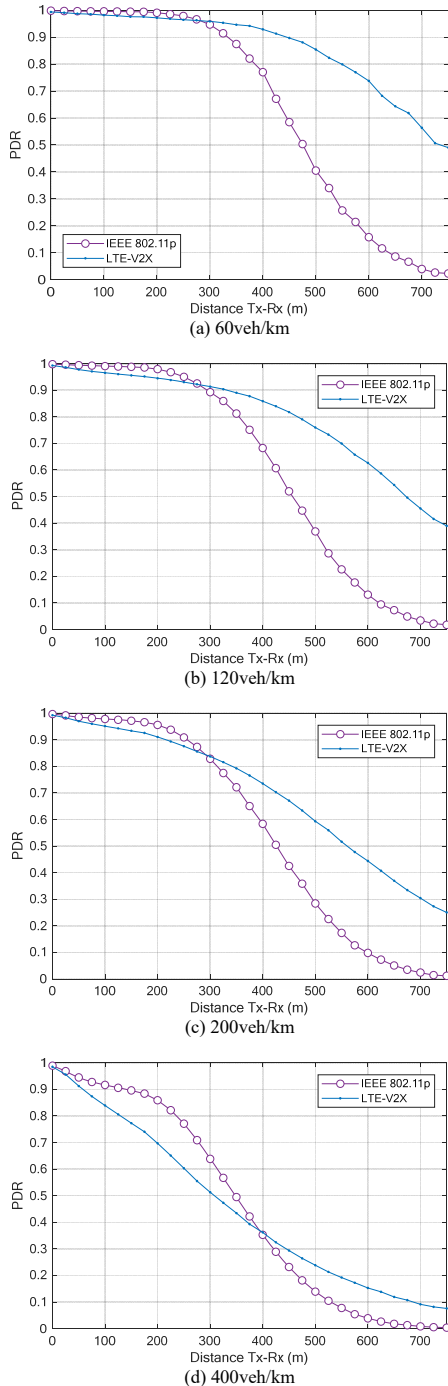


FIGURE 12. PDR experienced with periodic messages (every 200ms) of constant size (Simplified model).

<sup>3</sup> Fig. 13 does not represent the percentage of LTE-V2X packets lost due to half-duplex errors or an incorrect reception of the SCI since they were negligible.

the percentage of packets lost due to packet collisions and propagation errors<sup>3</sup>. The figure shows that under low traffic densities most packets are lost due to propagation errors since there are few packet collisions.

The figure also shows that IEEE 802.11p increases the percentage of packets lost due to propagation errors compared to LTE-V2X since LTE-V2X has a better physical layer in the selected baseline configuration. This explains why LTE-V2X outperforms IEEE 802.11p at medium and large distances. IEEE 802.11p achieves a slightly higher PDR at short distances thanks to the capture effect. LTE-V2X suffers some packet collisions at short distances even if the traffic density is low. These collisions are caused by the reselections that are part of the sensing-based SPS scheme and that can occur when several vehicles select new sub-channels around the same time because their *Reselection Counter* reached zero (Fig. 2). The *counter reselection ratio* is equal to 0.1 in this scenario<sup>4</sup>. This type of collisions is particularly present between vehicles at short distances since these vehicles will sense similar RSRP and RSSI levels at all sub-channels when executing the sensing-based SPS scheme. Vehicles at short distances might then select the same sub-channels in their lists  $L_2$  (Section II.B) which increases the risk of packet collisions. This effect is analyzed in detail in [28].

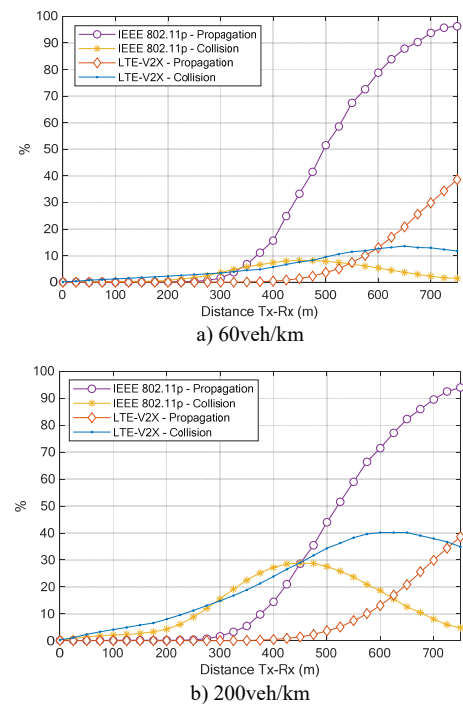


FIGURE 13. Percentage of packets lost due to propagation and collision errors when messages are periodic and of constant size (Simplified model).

<sup>4</sup> *Reselection Counter* is randomly selected between 5 and 15. The average value is then 10, i.e. a reselection due to the depletion of *Reselection Counter* for 1 out of every 10 packets.



TABLE III  
CHANNEL BUSY RATIO (CBR)<sup>5</sup>

Model	Density (veh/km)	IEEE 802.11p	LTE-V2X
Simplified (200ms period)	60	0.12	0.119
	120	0.233	0.237
	200	0.376	0.386
	400	0.654	0.638
Empirical CAM	60	0.101	0.095
	120	0.206	0.186
	200	0.334	0.289
	400	0.61	0.485

Fig. 12 shows that IEEE 802.11p and LTE-V2X see their PDR degrade when the load increases. The degradation observed for IEEE 802.11p is due to the increase of the CBR (Table III) that augments packet collisions due to the hidden terminal problem. This is visible in Fig. 13 that shows how the percentage of packets collisions increases with the load for IEEE 802.11p. LTE-V2X is also prone to the hidden terminal effect since SPS is sensing-based. This is reflected in Fig. 13 that also shows how the packet collisions increase with the traffic density (and hence the channel load) for LTE-V2X as well. However, the increase is higher for LTE-V2X that sees its performance degrade more strongly under the highest traffic densities (Fig. 12.d). This is the case because packet collisions in LTE-V2X are not only caused by the hidden terminal effect but also by the reselections that are part of the sensing-based scheme and that can occur when *Reselection Counter* is depleted. The risk of packet collisions due to these reselections increases with the traffic density as discussed in Section III.A and illustrated in Fig. 13. This is why packet collisions increase more with the traffic density for LTE-V2X than IEEE 802.11p even for periodic messages of constant size.

Fig. 12 has been obtained considering the *Simplified model* for the generation of messages. This model creates periodic messages of constant size. Fig. 14 compares the PDR achieved when considering the *3GPP model* for two traffic densities. This model does not abide to any particular V2X standard (e.g. ETSI or SAE standards) and creates periodic messages of two possible sizes. The time interval between messages has been set constant and equal to 200ms. LTE-V2X is then configured with the RRI equal to 200ms. Fig. 12 and Fig. 14 cannot be directly compared because different traffic models result in different average CBR levels even for the same traffic density<sup>6</sup>. However, the same trends are observed for the two figures under low traffic densities, i.e. LTE-V2X outperforms IEEE 802.11p (except for short distances) due to the better physical layer. Fig. 14

shows a higher degradation than Fig. 12 for LTE-V2X compared to IEEE 802.11p under a traffic density of 200veh/km. In fact, IEEE 802.11p outperforms LTE-V2X except for large distances (again due to higher impact of the physical layer at large distances). The difference is not due to the different CBR levels but mainly to the introduction of two message sizes with the *3GPP model*. As explained in Section III.B, variable message sizes introduce additional reselections. These additional reselections contribute towards increasing the risk of packet collisions in LTE-V2X as the traffic density increases. For the *3GPP model*, the size reselection ratio is equal to 0.062 and the counter reselection ratio is equal to 0.084<sup>7</sup>. The *3GPP model* results in a total reselection ratio of 0.146 compared to 0.1 for the *Simplified model* that only experiences reselections due to the depletion of the *Reselection Counter*. The risk of packet collisions increases with the number of reselections when the traffic density augments. The *3GPP model* also results in an average ratio of unused sub-channels equal to 0.307. Unused sub-channels reduces the efficiency of LTE-V2X when transmitting messages of different sizes that require a different number of sub-channels.

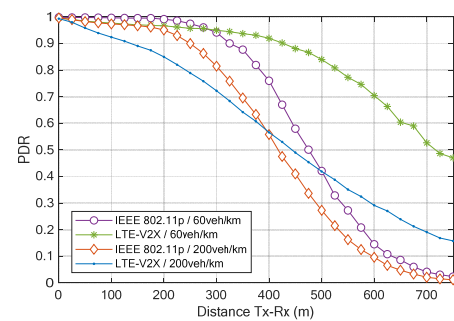


FIGURE 14. PDR experienced with periodic messages of two sizes (*3GPP model*).

### B. APERIODIC MESSAGES OF VARIABLE SIZE

Fig. 15 compares the PDR achieved by IEEE 802.11p and LTE-V2X when transmitting aperiodic messages of variable size using the Empirical CAM model (Section IV.C). It should be reminded that the Empirical CAM model generates CAM messages following the ETSI standard. Fig. 15 has been obtained under the same simulation conditions as Fig. 12. However, Fig. 15 includes the evaluation of the different strategies to select the RRI since messages are aperiodic with the Empirical CAM model.

Fig. 15.a and Fig. 12.a show that similar trends are

<sup>5</sup> We cannot directly compare the CBR experienced in IEEE 802.11p and LTE-V2X since they are computed differently (Fig. 11) and we consider different sensitivity levels.

<sup>6</sup> The *3GPP model* results in a CBR equal to 0.13 and 0.131 for LTE-V2X and IEEE 802.11p when the density is 60veh/km. These values increase to 0.395 and 0.41 respectively. The *3GPP model* results in slightly higher CBR levels than the *Simplified model* due to the introduction of a larger message size.

<sup>7</sup> This value is not equal to 0.1 because if a new sub-channel(s) is selected for a message of small size when *Reselection Counter* is depleted, the selected sub-channel(s) will not be maintained for all following *Reselection Counter* transmissions since a message of bigger size will be generated before the counter is depleted and an additional reselection will be necessary.

observed with both models under low traffic densities: LTE-V2X outperforms IEEE 802.11p at medium and large distances due to its better physical layer, but IEEE 802.11p slightly outperforms LTE-V2X at short distances due to the capture effect and the reselections embedded in the design of the LTE-V2X sensing-based scheme that can generate packet collisions and that affect vehicles at short distances.

Fig. 15 shows that the PDR also degrades when the load

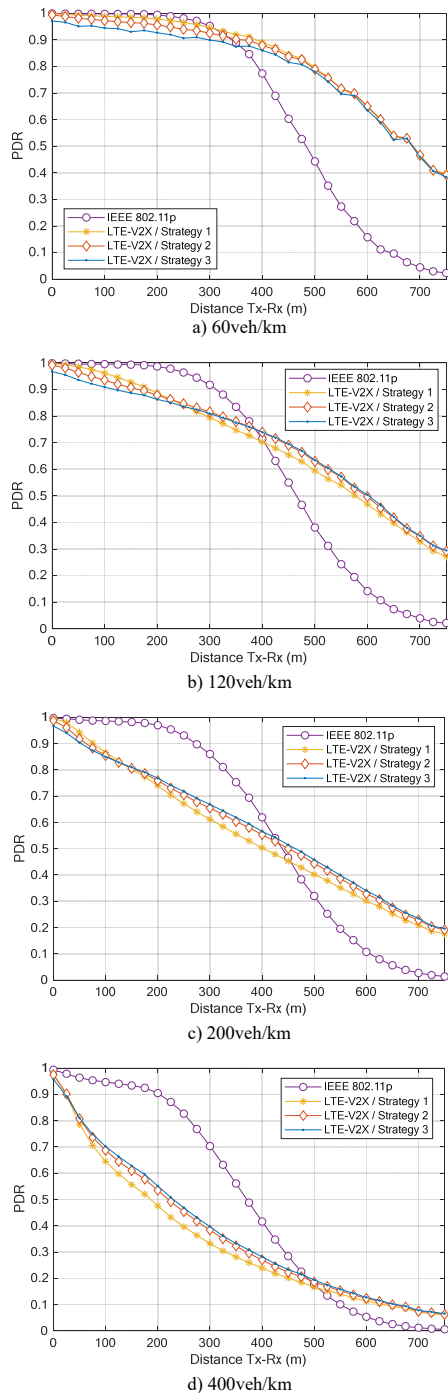


FIGURE 15. PDR experienced with aperiodic messages of variable size (Empirical CAM model).

increases. However, the comparison of Fig. 15 and Fig. 12 shows that the degradation is significantly higher for LTE-V2X than IEEE 802.11p when messages are aperiodic and of variable size (Empirical CAM model) compared to when messages are periodic (Simplified model and 3GPP model). In fact, Fig. 15 shows that IEEE 802.11p significantly outperforms LTE-V2X when the traffic density (and channel load) increases under the presence of aperiodic messages. The higher degradation with the load observed in Fig. 15 (Empirical CAM model) than in Fig. 12 (Simplified model) for LTE-V2X compared to IEEE 802.11p is due to the significant impact of aperiodic messages of variable size on the operation and performance of LTE-V2X. This impact is smaller on IEEE 802.11p. IEEE 802.11p is mainly affected by the hidden terminal problem when the load increases independently of whether messages are periodic or aperiodic and whether they are of constant or variable size. On the other hand, LTE-V2X is affected by the hidden terminal problem and the challenges explained in Section III when handling aperiodic messages of variable size. The effect of these challenges is visible when comparing Fig. 16 and Fig. 13. The comparison shows that the difference in terms of percentage of packets lost due to collisions between LTE-V2X and IEEE 802.11p increases more with the load when messages are aperiodic than when they are periodic. Periodic messages only generate reselections due to the depletion of the Reselection Counter. These reselections are also present with aperiodic messages of variable size. However, aperiodic messages of variable size also generate the additional reselections explained in Section III.B. The risk of packet collisions increases for LTE-V2X with the load when the total number of reselections increases. This number is higher with aperiodic messages of variable size than with periodic messages. In addition, variations in the size of messages or the time interval between messages increase the number of unused sub-channels and unutilized reservations. This also increases the risk of packet collisions since it reduces the number of available sub-channels and hence increases the probability that two vehicles will select the same sub-channel(s). All these factors are analyzed in detail in the next sub-section. These factors explain why LTE-V2X experiences more packet collisions than IEEE 802.11p, and why packet collisions increase more in LTE-V2X with aperiodic messages of variable size than with periodic messages. It should be noted that the increase of packet collisions in LTE-V2X when messages are aperiodic explains why a lower CBR is measured in LTE-V2X with aperiodic messages than with periodic messages for the same traffic density (Table III). An increase of packet collisions reduces the CBR since two packets that collide generate half the channel load than they would generate if they do not collide. This also influences the fact that LTE-V2X experiences lower CBR levels than IEEE 802.11p for the same traffic density, in particular when messages are aperiodic (Empirical CAM model).

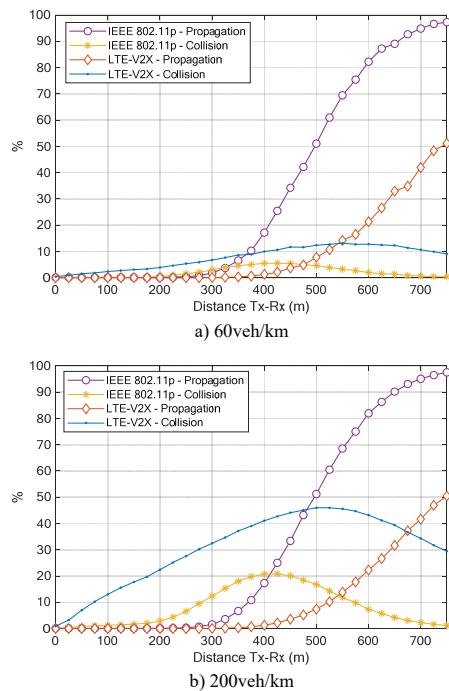


FIGURE 16. Percentage of packets lost due to propagation and collision errors when messages are aperiodic and of variable size (*Empirical CAM model*).

### C. ANALYSIS OF THE OPERATION OF LTE-V2X WITH APERIODIC MESSAGES OF VARIABLE SIZE

This section analyzes the operation of LTE-V2X to better understand the trends discussed in the previous sections and the degradation of LTE-V2X under the presence of aperiodic messages of variable size. This includes an evaluation of the impact on LTE-V2X of the strategies to select the RRI.

Table IV shows the ratio of reselections<sup>8</sup> when transmitting aperiodic messages of variable size (*Empirical CAM model*). Reselections can occur because: 1) *Reselection Counter* reaches zero (counter reselection ratio); 2) a new message does not fit in the reserved resources (size reselection ratio); or 3) new resources must be selected to meet the latency deadline of a new message (latency reselection ratio). If there were no additional reselections (e.g. when considering the *Simplified model*), reselections would only be generated when *Reselection Counter* reaches zero. In this case, the total reselection ratio would be equal to 0.1 since *Reselection Counter* is uniformly distributed between 5 and 15 and there would then be a reselection on average for every 10 packets. Table IV shows that the total reselection ratio is higher than 0.1 for all strategies to select the RRI when messages are aperiodic. This shows that LTE-V2X experiences additional reselections when handling aperiodic messages of variable size. These additional reselections actually prevent the depletion of *Reselection Counter*, and new resources are selected before *Reselection*

<sup>8</sup> The ratios are independent of the traffic density since they are computed considering the messages generated per vehicle.

*Counter* reaches zero. This is why the counter reselection ratio is smaller than 0.1 for all strategies to select the RRI. These strategies have an impact on the size and latency reselection ratios. If the RRI is set equal to 100ms (strategy 1), the latency reselection ratio is close to zero<sup>9</sup> since 100ms is the minimum time between CAMs in the *Empirical CAM model* and the risk to overpass the latency deadline is minimum. The latency reselection ratio increases with the second and third strategies. For example, sub-channels are reselected due to the latency deadline for 16.9% of the messages generated when the RRI is set equal to 200ms (strategy 2). This number increases for the third strategy since the RRI can take values higher than 200ms. Reselections due to changes in the size of messages are present with the three strategies to select the RRI. Table IV shows that the size reselection ratio increases with the latency reselection ratio. When there is a reselection due to the latency deadline, it is possible that the new message or CAM has a small size. If this is the case, it is probable that the reserved sub-channels are not sufficient to transmit following messages of larger size. If this is the case, additional reselections would be needed. If there are no latency reselections (strategy 1), the selected sub-channels would be maintained for longer if the reselection is done for a message of large size; in this case, the selected sub-channels can be maintained until *Reselection Counter* reaches zero. These results show that the strategy to select the RRI has a direct impact on the latency and size reselection ratios.

Table V reports the ratio of unused sub-channels and unutilized reservations for the three strategies to select the RRI. Table IV and Table V show that the ratio of unused sub-channels is inversely related with the number of reselections. The selected sub-channels can be maintained until

TABLE IV  
RESELECTION RATES (EMPIRICAL CAM MODEL)

RRI strategy	Latency reselection	Size reselection	Counter reselection	Total reselection
1	0.001	0.076	0.081	0.155
2	0.169	0.134	0.047	0.313
3	0.234	0.169	0.03	0.387

TABLE V  
UNUSED SUB-CHANNELS AND UNUTILIZED RESERVATIONS (EMPIRICAL CAM MODEL)

RRI strategy	Rate of unused sub-channels	Rate of unutilized sub-reservations
1	0.225	0.815
2	0.18	0.367
3	0.143	0.118

*Reselection Counter* reaches zero if the following messages fit in the selected sub-channels until *Reselection Counter* is depleted. This is more probable if the sub-channels were originally selected for a message of large size. If this is the case, it is actually probable that more sub-channels are

<sup>9</sup> The ratio is not equal to zero due to the jitter.

reserved for the transmission of the following messages (or CAMs in our study) than actually needed for most of these messages (until *Reselection Counter* reaches zero). As a result, there is a higher probability to increase the number of sub-channels that are reserved but not used when the selected sub-channels are maintained for longer. On the other hand, a high number of reselections (e.g. due to the latency deadline) reduces the possibility to maintain the selected sub-channels until *Reselection Counter* reaches zero and therefore decreases the ratio of unused sub-channels. This explains the trends observed in Table V for the different strategies to select the RRI. The first strategy (i.e. RRI=100ms) reduces the ratio of reselections but increases the ratio of unused sub-channels. The second and third strategies increase the number of reselections but reduce the ratio of unused sub-channels. This is because more frequent reselections allow better adjusting the selected sub-channels to the actual size of the different messages. We should remember that unutilized reservations could result in packet collisions since other vehicles have fewer sub-channels available to reserve, and hence there is a higher risk that two vehicles reserve the same sub-channels. This risk is small when the channel load is small since there is a large number of available sub-channels. However, it increases with the channel load. This explains why the first strategy performs better than the other two strategies when the traffic density (and channel load) is low, but it performs worse when the traffic density increases (Fig. 15). The first strategy reduces the total reselection ratio but increases the number of unused sub-channels. A lower reselection ratio is positive for LTE-V2X and the negative effects of a large number of unused sub-channels appear under high traffic densities and channel loads.

Table V shows that the ratio of unutilized reservations is higher when the RRI is low. In particular, the first strategy results in a very high number of reservations that are never utilized. If a vehicle makes a reservation and does not transmit a TB in this reservation, it will not be able to announce its following transmissions. The other vehicles will then believe that the corresponding sub-channels will be free, and the risk of packet collisions increases for the following transmissions. The first strategy to select the RRI is the one that is more exposed to this risk since it results in many reservations (68.9% of all the reservations made) that are never utilized to transmit a TB or message. The first strategy therefore increases the ratio of unused sub-channels and unutilized reservations (Table V). We should note that the negative effect of unused sub-channels or unutilized reservations increases with the traffic density and channel load since there is more demand for resources and therefore the risk of packet collisions increases. This explains why the first strategy to select the RRI performs better with respect to the other strategies under low traffic densities than under higher ones (Fig. 15). The first strategy increases the ratio of unused sub-channels and unutilized reservations. However, it also decreases the ratio of reselections (Table IV) and

therefore reduces the risk of packet collisions due to frequent reselections. Opposite trends are observed for the other strategies with different values for the metrics depending on the selection of the RRI. This explains why the three strategies result in similar PDR performance (Fig. 15) levels with some differences depending on the traffic density and channel load. It also explains why none of the evaluated strategies can actually solve the challenges of LTE-V2X explained in Section III. Each strategy tends to reduce or mitigate one of the challenges but this is generally achieved at the expense of degrading the others. Fig. 17 provides a more graphical view of the differences between strategies to select the RRI. Fig. 17 clearly shows that none of the three strategies can actually minimize all challenges present in the sensing-based SPS scheme of LTE-V2X under the presence of aperiodic messages of variable size. For example, while the first strategy minimizes the ratio of reselections it maximizes the ratio of unutilized reservations. The contrary effect is observed with the third strategy. In the remaining sections, results for LTE-V2X will be shown with the best strategy to select the RRI in each scenario although there are no significant differences between strategies.

Finally, we would like to note that all the challenges quantified in this section are not present when considering periodic messages of constant size (i.e. *Simplified model*). In this case, only the counter reselection ratio (and the total reselection ratio) is equal to 0.1 since *Reselection Counter* is uniformly distributed between 5 and 15 and there would then be a reselection on average for every 10 packets. All other ratios shown in Table IV and Table V are equal to zero. As we introduce variability in the message generation patterns, the challenges discussed in this section emerge.

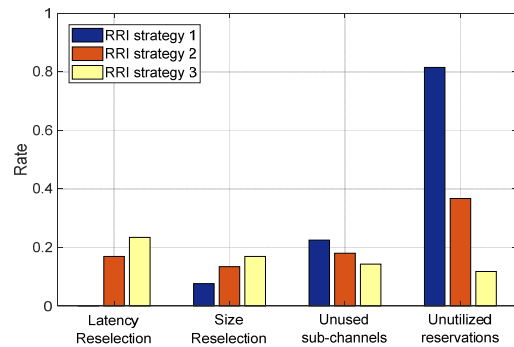


FIGURE 17. Impact of the strategies to select the RRI in LTE-V2X.

#### D. MESSAGE SIZE VS TIME BETWEEN MESSAGES

The previous sections have shown that variations in size and time between messages (characteristic of the ETSI CAM messages) significantly degrade the performance of LTE-V2X mode 4 compared to IEEE 802.11p when the traffic density or channel load increases. This section analyzes the impact of variations of size and time between messages separately. To this aim, we utilize the *Empirical-size* and



*Empirical-time* models described in Section IV.D. These models fix the size of messages or the time between messages, and model the other variable following the empirical traces. Fig. 18 depicts the PDR achieved with LTE-V2X mode 4 and IEEE 802.11p under medium CBR levels<sup>10</sup>. Fig. 18.a represents the PDR when the time between CAMs is fixed at 200ms (the RRI is set equal to 200ms) and the size of CAM varies. Fig. 18.b represents the PDR when the size of CAMs is fixed at 200 bytes and the time between CAMs varies (results are shown for the first strategy to select the RRI). Fig. 18 clearly shows that both variations in size or time between CAMs have a negative effect on the performance of LTE-V2X mode 4. We should note that Fig. 18.a has been obtained with a larger CBR than Fig. 18.b. In this case, and considering the trends observed in both figures, it is possible to conclude that variations in the time between messages or CAMs have a higher negative impact on the performance of LTE-V2X than variations in the size of CAMs. However, variations in the size of messages have also a relevant impact on LTE-V2X.

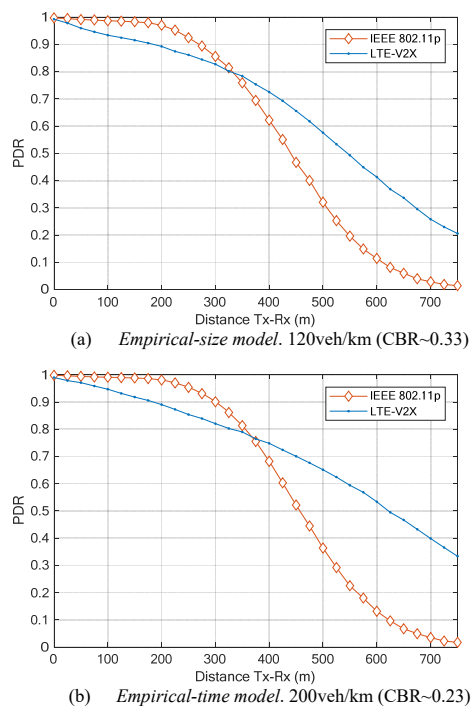


FIGURE 18. PDR experienced when CAM messages are generated following the Empirical separate models.

### E. OTHER CONFIGURATIONS

The previous evaluations have shown that different strategies to select the RRI cannot solve the challenges experienced by the LTE-V2X sensing-based SPS scheme when handling

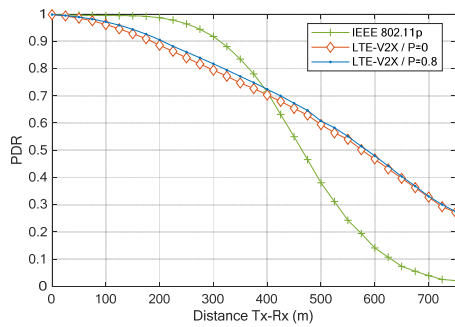
messages of variable size and time interval. We now analyze the possibility to mitigate these challenges with the probability  $P$  to maintain the same sub-channel(s) when the *Reselection Counter* is depleted or with packet retransmissions. The previous evaluations have been conducted with  $P=0$  following the findings in [20]. Fig. 19 compares the PDR experienced with aperiodic messages of variable size (*Empirical CAM model*) when  $P$  is set equal to 0 and 0.8. LTE-V2X is configured with the first strategy to select the RRI and the RRI is set equal to 100ms. This is the strategy that will mostly benefit from increasing  $P$  since it has the highest counter reselection ratio and the lowest size and latency reselection ratios (Table IV). Fig. 19 shows that IEEE 802.11p outperforms LTE-V2X when handling aperiodic messages of variable size independently of the value of  $P$ . Increasing  $P$  should reduce the probability to select different sub-channels when *Reselection Counter* is equal to 0 and therefore the total number of reselections. This is actually the case since increasing  $P$  from 0 to 0.8 reduces the total reselection ratio from 0.155 to 0.04 under the evaluated conditions. Reducing the number of reselections should improve the PDR. However, Fig. 19 shows that the improvement is small. This is because reducing reselections by increasing  $P$  augments some of the other inefficiencies observed in LTE-V2X when transmitting aperiodic messages of variable size. In particular, increasing  $P$  to 0.8 augments the ratio of unused sub-channels from 0.225 to 0.282 and the ratio of unutilized reservations from 0.689 to 0.889. Augmenting these ratios reduces the capacity and increases the risk of packet collisions which ultimately impacts the PDR. This explains why there is no significant gain in PDR in Fig. 19 when increasing  $P$  from 0 to 0.8<sup>11</sup>.

The small improvement in PDR observed in Fig. 19 with  $P=0.8$  is obtained at the expense of increasing the probability of persistent packet collisions between two vehicles. If two vehicles select the same sub-channel(s) at a given moment, the probability that their packet collisions will persist over time increases with  $P$ . This is because higher values of  $P$  decrease the probability to select new sub-channel(s) when *Reselection Counter* reaches 0, and therefore also decrease the probability to break persistent packet collisions between vehicles. This is visible in Fig. 20 that plots the PIR (Packet Inter-Reception time) when LTE-V2X utilizes the first strategy to select the RRI. The figure shows that  $P=0.8$  increases the probability of experiencing a PIR of several seconds. A value of  $P$  equal to 0 is recommended in this case since the PDR is not highly improved when  $P$  is increased to 0.8, and persistent packet collisions can represent a significant safety risk. Fig. 20 also shows that IEEE 802.11p is less prone to persistent packet collisions than LTE-V2X.

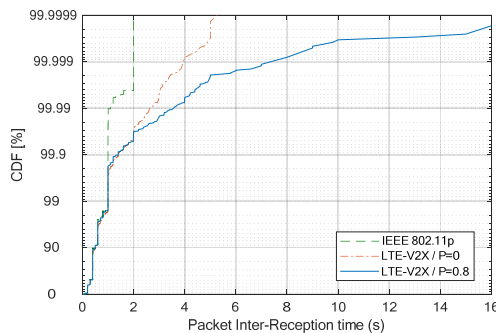
<sup>10</sup> Each model generates messages differently and the same traffic density results in different CBR levels. We then have to consider different traffic densities to achieve medium CBR levels with both models.

<sup>11</sup> The second and third strategies to select the RRI result in more latency and size reselections than the first strategy (Table IV). These additional

reselections result in that vehicles will have to select more frequently new sub-channels before the *Reselection Counter* is depleted. In this case, increasing  $P$  would have a smaller impact on the second and third strategies.



**FIGURE 19.** Impact of  $P$  on the PDR with aperiodic messages of variable size (*Empirical CAM model*). Results are shown for a traffic density of 120veh/km. Similar trends have been observed for other traffic densities.

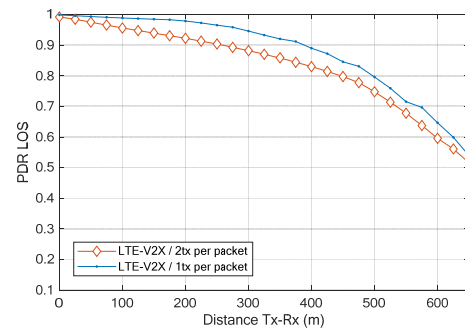


**FIGURE 20.** Impact of  $P$  on the PIR with aperiodic messages of variable size (*Empirical CAM model*). Results are shown for a traffic density of 120veh/km. Similar trends have been observed for other traffic densities.

The impact of  $P$  on LTE-V2X mode 4 when transmitting periodic messages was evaluated by the authors in [20]. This study considered both the *Simplified model* and the *3GPP model*. The study showed that augmenting  $P$  can slightly improve the PDR with periodic messages of constant size because vehicles tend to maintain the same sub-channels when *Reselection Counter* is depleted. This benefit was particular noticeable under low channel loads. However, the study also showed that augmenting  $P$  can degrade the PDR when the channel load increases and LTE-V2X transmits periodic messages of constant size (*Simplified model*). The positive impact of augmenting  $P$  was more visible (although the improvement in PDR was not very high) when the periodic messages have different sizes (i.e. with the *3GPP model*). This was the case because the reduction of reselections caused by augmenting  $P$  compensated the additional reselections resulting from variations in the size of messages. Readers are referred to [20] for a complete analysis of the impact of  $P$  when transmitting periodic messages (including numerical results of the discussed trends).

LTE-V2X offers the possibility to transmit each packet twice to increase the reliability of sidelink V2X communications. Authors demonstrated in [10] that retransmissions can have a positive impact under low traffic

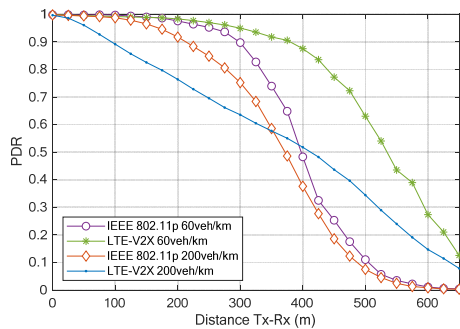
densities. However, the impact of retransmissions is negative when the channel load increases since retransmissions augment the probability of packet collisions. The analysis in [10] was conducted considering periodic messages. Fig. 21 shows that retransmissions actually degrade the performance of LTE-V2X mode 4 (configured with the RRI equal to 100ms) even under low traffic densities when transmitting aperiodic messages of variable size (*Empirical CAM model*). Retransmissions increase the channel load<sup>12</sup> and the load amplifies the challenges of the sensing-based SPS scheme under the presence of aperiodic messages of variable size (Section III). This is why the PDR is degraded in Fig. 21 when retransmissions are allowed. These results limit the benefit of retransmissions to weak links under very low channel load levels.



**FIGURE 21.** Impact of retransmissions in LTE-V2X. Traffic density of 60veh/km.

The results shown so far have been obtained with the sensitivity levels reported for commercial devices or prototypes (-92dBm for IEEE 802.11p and -103.5dBm for LTE-V2X). These sensitivity levels are higher than the minimum sensitivity levels specified in IEEE 802.11p (-85dBm) and LTE-V2X (-90.4dBm) standards. We now analyze the performance when considering these minimum sensitivity levels. Fig. 22 shows the PDR achieved when both standards operate with their minimum sensitivity levels and they transmit aperiodic messages of variable size (*Empirical CAM Model*); LTE-V2X is configured with the first strategy to select the RRI that is set equal to 100ms. It should be noted that LTE-V2X has a better minimum sensitivity level than IEEE 802.11p. Reducing the sensitivity level reduces the communication range and hence decreases the CBR. A lower CBR benefits LTE-V2X since it reduces the impact of the challenges present in the sensing-based SPS of LTE-V2X when transmitting aperiodic messages of variable size (Section III). This explains why LTE-V2X improves its performance at short and medium distances compared to IEEE 802.11p in Fig. 22. However, the same trends previously described with aperiodic messages are observed in Fig. 22 when comparing LTE-V2X and IEEE 802.11p at medium and high distances.

<sup>12</sup> Retransmissions increase the CBR from 0.095 to 0.187 when the traffic density is 60 veh/km and we use the *Empirical CAM model*.



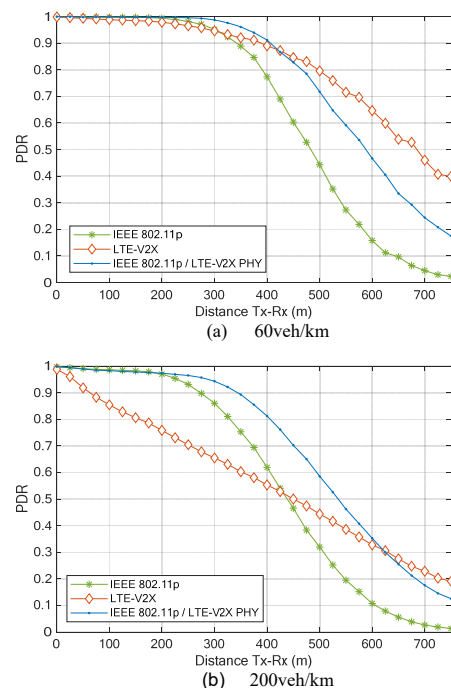
**FIGURE 22.** PDR using minimum sensitivity levels for both standards. Results are shown for 60veh/km and 200veh/km when transmitting aperiodic messages of variable size (*Empirical CAM model*).

The analysis of the empirical CAM traces reported in [14] showed that CAMs were not always generated in multiples of 100ms and that there is in fact some jitter. This jitter is included in the *Empirical CAM model* as described in Section IV.C. We have analyzed whether the jitter produces additional reselections due to the latency deadline. Our analysis has shown that the impact of the jitter on the performance of LTE-V2X mode 4 is negligible and the same PDR is achieved whether the jitter is included or not in the generation of CAM messages. This is because the jitter is small (its standard deviation is around 3ms) and nearly does not have an impact on the latency reselection ratio.

#### F. SAME PHYSICAL LAYER FOR IEEE 802.11p AND LTE-V2X

The previous results have been obtained considering the physical layer performance reported in [3] as well as different sensitivity levels for both standards. All these configurations result in a worse link budget and physical layer for IEEE 802.11p compared to LTE-V2X. Certain studies claim that the physical layer of IEEE 802.11p can be improved with better receiver designs [30]. We then compare in Fig. 23 the performance of LTE-V2X and IEEE 802.11p when both standards are configured with the same sensitivity levels and achieve the same physical layer performance (using for both standards the BLER-SINR curves of LTE-V2X reported in [3]). This evaluation addresses a hypothetical scenario where IEEE 802.11p can overcome its lower physical layer performance compared to LTE-V2X. We should note that the results reported in Fig. 23 have been obtained considering a different thermal noise for both standards since IEEE 802.11p utilizes the complete 10 MHz bandwidth for each transmission while LTE-V2X only utilizes a subset of RBs or sub-channels depending on the size of the messages. Fig. 23 plots the PDR when IEEE 802.11p is configured with its physical layer and sensitivity level (IEEE 802.11p in Fig. 23) and when it is configured with the physical layer and sensitivity levels of LTE-V2X (IEEE 802.11p/LTE-V2X PHY in Fig. 23). Fig. 23 compares the PDR with again two traffic densities and considering aperiodic CAMs of variable size (*Empirical CAM model*).

LTE-V2X is configured with the best strategy to select the RRI (i.e. the first strategy in Fig. 23.a and the second in Fig. 23.b). Fig. 23 shows that improving the physical layer and sensitivity levels of IEEE 802.11p improves the performance of IEEE 802.11p for all distances. This reduces the benefits of LTE-V2X under low traffic densities and augments the gains of IEEE 802.11p over LTE-V2X when the traffic density and channel load augment. We should also highlight that the capture effect results in that IEEE 802.11p can maintain or improve the PDR at short distances even if the communication range (and therefore the probability to interfere other vehicles) increases with a better physical layer and sensitivity level. We can observe in Fig. Fig. 23.a that LTE-V2X improves the PDR at large distances compared to IEEE 802.11p even when IEEE 802.11p is evaluated with the same physical layer and sensitivity level than LTE-V2X. This is due to the impact of noise since LTE-V2X utilizes less bandwidth to transmit a message compared to IEEE 802.11p that utilizes the complete 10 MHz channel and is then more affected by noise.



**FIGURE 23.** PDR when IEEE 802.11p is configured with the physical layer and sensitivity levels of LTE-V2X (802.11p/LTE-V2X PHY in the figure). Results are reported for aperiodic messages of variable size (*Empirical CAM model*).

#### VII. CONCLUSIONS

This paper has presented an in-depth system level comparison of the performance that can be achieved with IEEE 802.11p and LTE-V2X when transmitting periodic and aperiodic messages with constant or variable size. The comparison has been conducted with different message generation models so that it is possible to analyze the impact of the time between messages and their size. This has



included simple models that generate periodic messages of constant size but also a realistic model that generates messages following the ETSI CAM standard. This model was developed using field traces collected by OEMs that implemented the ETSI standard. The conducted analysis has demonstrated that LTE-V2X can achieve better performance than IEEE 802.11p under low channel loads if it has a better physical layer performance. Under low channel loads, the MAC has a lower impact on the performance than the physical layer. However, IEEE 802.11p outperforms LTE-V2X when the channel load increases even if it has a lower physical layer performance. The gains obtained with IEEE 802.11p are present even with periodic messages of constant size but they significantly augment when messages are aperiodic and vary their size. This is the case because the sensing-based SPS scheme included in LTE-V2X experiences important challenges when handling aperiodic messages and messages of variable sizes. These challenges have been demonstrated and quantified in this study for the first time. The study has also shown that these challenges cannot be completely overcome with certain configurations of LTE-V2X (as currently defined by the 3GPP standard) since each configuration analyzed mitigates one challenge but aggravates others. We would like to highlight that this study has been conducted considering the ETSI CAM standard that is being deployed in Europe (and maybe other regions of the world). Other regions might implement other standards for the generation of the basic awareness messages, and each standard may generate messages with different patterns (in terms of size and time between messages). It would be interesting that other studies replicate this analysis considering these standards if realistic message generation models would be available. However, we would like to note that the challenges described for the LTE-V2X MAC exist by design of the standard and their impact will depend on the characteristics of the messages to be transmitted. Such dependency is less present in IEEE 802.11p that includes a simpler but more flexible MAC. We would also like to highlight that this study has been conducted considering different message generation models that go from completely periodic messages of constant size (which is the best possible scenario for LTE-V2X) to aperiodic messages of variable size following the ETSI CAM standard. Other message generation standards (e.g. BSM) will create message patterns different from CAM but these patterns will be bounded by the periodic and constant size scenario considered in this study and the aperiodic and variable size one represented by the ETSI CAM standard.

## REFERENCES

- [1] A. Filippi, K. Moerman, V. Martinez, A. Turley, "IEEE802.11p ahead of LTE-V2V for safety applications," NXP and Autotalks whitepaper, Sep. 2017.
- [2] 5G Automotive Association, "An assessment of LTE-V2X (PC5) and 802.11p direct communications technologies for improved road safety in the EU," 5GAA white paper, Dec. 2017.
- [3] J. Hu *et al.*, "Link level performance comparison between LTE V2X and DSRC," *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 2 (2), pp. 101-112, Jun. 2017.
- [4] M. Sepulcre, J. Gozalvez, B. Coll-Perales "Why 6Mbps is not (always) the Optimum Data Rate for Beaconing in Vehicular Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16 (12), pp. 3568-3579, Dec. 2017.
- [5] R. Molina-Masegosa and J. Gozalvez, "System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and Its Distributed Scheduling," *Proc. 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Sydney, NSW, 2017, pp. 1-5.
- [6] L. Zhao *et al.*, "The performance comparison of LTE-V2X and 802.11p," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, Porto (Portugal), 3-6 Jun. 2018.
- [7] M. Wang *et al.*, "Comparison of LTE and DSRC-Based connectivity for Intelligent Transportation Systems," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, Sydney (Australia), 4-7 Jun. 2017.
- [8] TV. Nguyen *et al.*, "A comparison of cellular vehicle-to-everything and dedicated short range communication," *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Torino (Italy), 27-29 Nov. 2017.
- [9] T. Shimizu *et al.*, "Comparison of DSRC and LTE-V2X PC5 mode 4 Performance in High Vehicle Density Scenarios," *Proc. ITS World Congress*, Singapore, 21-15 Oct. 2019.
- [10] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, "LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 30-39, Dec. 2017.
- [11] 3GPP, "TR 36.885 Study on LTE-based V2X services (v14.0.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jul. 2016.
- [12] ETSI, "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service," EN 302 637-2 V1.4.1, Jan. 2019.
- [13] SAE International, DSRC Technical Committee, "Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary," SAE J2735, Nov. 2009.
- [14] CAR 2 CAR Communication Consortium, "Survey on ITS-G5 CAM statistics," TR2052, V1.0.1, Dec. 2018.
- [15] Q. Chen *et al.*, "Overhaul of IEEE 802.11 Modeling and Simulation in NS-2," *Proc. ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems (MSWIM '07)*, Chania (Greece), 22-26 Oct. 2007.
- [16] 3GPP, "TS 36.213 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (v14.12.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Sep. 2019.
- [17] 3GPP, "TS 36.331 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (v14.12.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Sep. 2019.
- [18] ETSI, "TS 103 613 Access layer specification for ITS using LTE-V2X communication in the 5.9 GHz frequency band," V1.1.1, Nov. 2018.
- [19] 3GPP, "TS 36.321 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (v14.11.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jun. 2019.
- [20] R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre, J. Gozalvez, "Configuration of the C-V2X mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communications," *Proc. 14th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN 2018)*, 6-8 December, 2018, Shenyang, China.
- [21] M. Noor-A-Rahim *et al.*, "Performance Analysis of IEEE 802.11p Safety Message Broadcast With and Without Relaying at Road Intersection", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23786-23799, Apr. 2018.
- [22] A. Bazzi *et al.*, "Study of the Impact of PHY and MAC Parameters in 3GPP C-V2V mode 4," *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Taipei (Taiwan), 5-7 Dec. 2018.
- [23] A. Mansouri *et al.*, "A First Investigation of Congestion Control for LTE-V2X mode 4," *Proc. IEEE WONS*, 22-24 Jan. 2019.

- [24] A. Nabil *et al.*, "Performance Analysis of Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling in C-V2X Networks," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Chicago, IL, USA, 23-30 Aug. 2018.
- [25] A. Bazzi *et al.*, "Optimizing the Resource Allocation of Periodic Message With Different Sizes in LTE-V2V," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43820-43830, 2019.
- [26] R. Molina-Masegosa, M. Sepulcre, J. Gozalvez, F. Berens and V. Martinez, "Empirical Models for the Realistic Generation of Cooperative Awareness Messages in Vehicular Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [27] 3GPP, "TS 36.300 E-UTRA and E-UTRAN; Overall description; Stage 2 (v14.11.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Sep. 2019.
- [28] M. Gonzalez-Martín, M. Sepulcre, R. Molina-Masegosa and J. Gozalvez, "Analytical Models of the Performance of C-V2X mode 4 Vehicular Communications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1155-1166, Feb. 2019.
- [29] HCM 2010: Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, USA, 2010.
- [30] A. Turley, K. Moerman, A. Filippi, V. Martinez, "C-ITS: Three observations on LTE-V2X and ETSI ITS-G5. A comparison." NXP Whitepaper, 2018.
- [31] 3GPP, "TS 36.101 E-UTRA; User Equipment (UE) radio transmission and reception (v14.13.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Oct. 2019.
- [32] IEEE Computer Society, LAN/MAN Standards Committee, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *IEEE Std 802.11™-2012*, Mar. 2012.
- [33] 5GAA, "V2X Functional and Performance Test Report; Test Procedures and Results," 5GAA Report, Apr. 2019.
- [34] Cohda Wireless, "Cohda Mobility MK5 Module Datasheet," V1.2.0, May, 2015.



**MIGUEL SEPULCRE** received a Telecommunications Engineering degree in 2004 and a Ph.D. in Communications Technologies in 2010, both from Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Spain. He was awarded by the COIT (Spanish official association of Telecommunication Engineers) with the ONO prize to the best Ph.D. thesis. He has been visiting researcher at ESA in Noordwijk (The Netherlands) in 2004, at Karlsruhe Institute of Technology (Germany) in 2009, and at Toyota InfoTechnology Center in Tokyo (Japan) in 2014. He serves as Associate Editor for *IEEE Vehicular Technology Magazine* and *IEEE Communications Letters*. He was TPC Co-Chair of IEEE VTC2018-Fall, IEEE/IFIP WONS 2018 and IEEE VNC 2016. He is now Associate Professor at the Communications Engineering Department of UMH, and member of UWICORE research laboratory working in wireless vehicular networks.



**RAFAEL MOLINA-MASEGOSA** received a Telecommunications Engineering Degree from the University of Granada (UGR), Spain. During his studies, he worked on brain image processing at the Signal Processing and Biomedical Applications (SiPBA) group at UGR. In December 2015, he joined the UWICORE research laboratory from the Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Spain, where he is currently conducting his PhD working on C-V2X and 5G vehicular networks.



**JAVIER GOZALVEZ** received an electronics engineering degree from the Engineering School ENSEIRB (Bordeaux, France), and a PhD in mobile communications from the University of Strathclyde, Glasgow, U.K. Since October 2002, he is with the Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Spain, where he is currently a Full Professor and Director of the UWICORE laboratory. At UWICORE, he leads research activities in the areas of vehicular networks, 5G and beyond networks, and industrial wireless networks. He is an elected member to the Board of Governors of the IEEE Vehicular Technology Society (VTS) since 2011, and served as President of the IEEE VTS in 2016 and 2017. He was an IEEE Distinguished Lecturer for the IEEE VTS, and served also as IEEE Distinguished Speaker. He is the Editor in Chief of the *IEEE Vehicular Technology Magazine*. He was the General Co-Chair and founder of the IEEE Connected and Automated Vehicles Symposium 2018 and 2019, and the General Co-Chair of the IEEE VTC-Spring 2015 conference.



# System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and its Distributed Scheduling

Rafael Molina-Masegosa and Javier Gozalvez

Universidad Miguel Hernandez de Elche (UMH)  
UWICORE laboratory, <http://www.uwicore.umh.es>  
Avda. de la Universidad, s/n, 03202, Elche, Spain  
[rafael.molinam@umh.es](mailto:rafael.molinam@umh.es), [j.gozalvez@umh.es](mailto:j.gozalvez@umh.es)

**Abstract**— The 3GPP has recently published the first version of the Release 14 standard that includes support for V2V communications using LTE sidelink communications (referred to as LTE-V, LTE-V2X, LTE-V2V or Cellular V2X). The standard includes a mode (mode 4) where vehicles autonomously select and manage the radio resources without any cellular infrastructure support. This is highly relevant since V2V safety applications cannot depend on the availability of infrastructure-based cellular coverage, and transforms LTE-V into a possible (or complimentary) alternative to 802.11p. The performance of LTE-V2V in mode 4 is highly dependent on its distributed scheduling protocol (sensing-based Semi-Persistent Scheduling) that is used by vehicles to reserve resources for their transmissions. This paper presents the first evaluation of the performance and operation of this protocol under realistic traffic conditions in urban scenarios. The evaluation demonstrates that further enhancements should be investigated to reduce packet collisions.

**Keywords**— *LTE-V, LTE-V2X, LTE-V2V, Cellular V2X, V2V, Vehicle to Vehicle, resource management, distributed scheduling, sensing-based Semi-Persistent Scheduling, 5G, D2D, vehicular networks, cooperative ITS, C-ITS.*

## I. INTRODUCTION

Connected vehicles will rely on V2V (Vehicle-to-Vehicle) communications to deploy active safety services. V2V communications are generally characterized by the transmission of small packets (referred to as beacons or CAM messages) with strict latency and reliability requirements. Important research efforts have been devoted over the last years to develop V2V communications using the IEEE802.11p/WAVE and ITS G5 standards. Some studies (e.g. [1]) have highlighted the difficulty of the 802.11p medium access to guarantee QoS levels and ensure the networks' scalability. As an alternative to 802.11p, the Third Generation Partnership Project (3GPP) published in September 2016 the first version of the Release 14 [2] standard that includes support for V2V communications using LTE sidelink communications (commonly referred to as LTE-V, LTE-V2X, LTE-V2V or Cellular V2X). Certain reports claim that LTE-V improves the link budget compared to 802.11p [3]. Modifications to this first version were published in December 2016 [4].

LTE sidelink was introduced for public safety D2D (Device to Device) communications in Release 12. Release 14 introduces two new modes (mode 3 and mode 4) specifically designed for V2V communications [4,5]. In mode 3, two vehicles directly communicate with each other, but the selection and management of the resources is done by the

cellular infrastructure. In mode 4, vehicles autonomously select and manage the resources without any cellular infrastructure support. Mode 4 is highly relevant for vehicular networks as V2V safety applications cannot depend on the availability of infrastructure-based cellular coverage. Release 14 introduces important changes for mode 3 and mode 4 with respect to modes 1 and 2 in Release 12. Modes 1 and 2 were designed with the objective to prolong the battery lifetime through energy-efficient LTE sidelink (D2D) protocols. On the other hand, modes 3 and 4 have been designed with the objective to satisfy the V2V communications requirements in terms of high reliability, low latency and network scalability. To this aim, Release 14 modifies the organization and management of radio resources. In particular, it eliminates the time division of resources into SA (Scheduling Assignment) and Data periods, and organizes resources (RBs, Resource Blocks) into frequency sub-channels. Vehicles can now reserve a resource and transmit a packet at any point in time. This can reduce the latency at the expense of the energy-efficiency since vehicles need to be permanently in reception mode (i.e. discontinuous reception is not anymore possible in modes 3 and 4). Another important novelty introduced in mode 4 is the distributed scheduling protocol used by vehicles to autonomously select their radio resources when they cannot rely on the assistance of the cellular infrastructure<sup>1</sup>. The protocol is referred to as sensing-based Semi-Persistent Scheduling (SPS). Its objective is to improve the reliability of V2V communications without overloading the channel with retransmissions. To this aim, it exploits the periodic nature of beacons or CAM packets, and introduces a semi-persistent reservation of resources. Vehicles can then sense the previous transmissions to estimate which resources are free and avoid packet collisions. The capacity for LTE sidelink mode 4 to guarantee reliable V2V communications strongly depends on the adequate operation of the sensing-based SPS scheme. To date, the only studies available that have analyzed its performance are those presented at the 3GPP working groups (e.g. [6])<sup>2</sup>. These studies generally focus only on Packet Delivery Ratio (PDR) performance, and they consider simple mobility models that do not reflect realistic traffic patterns. These patterns can have a significant impact on e.g. packet collisions or scalability evaluations. This study extends the current state of the art by presenting what is to the authors' knowledge, the first analysis

<sup>1</sup> D2D nodes randomly select the radio resources in mode 2 of Release 12. Up to four retransmissions per packet are allowed to increase reliability.

<sup>2</sup> [7] presents an analysis of V2V communications using an earlier version of LTE sidelink that does not correspond to that presented under Release 14.

of the performance and operation of V2V communications using the 3GPP LTE sidelink mode 4 under realistic mobility patterns in a urban scenario. In addition, this paper analyses the operation of the sensing-based SPS resource allocation process, and quantifies the type of transmission errors encountered in order to identify areas where further improvements should be investigated.

## II. LTE-V2V MODE 4 COMMUNICATIONS

### A. Frame structure and Resource Pool Framework

This study considers the scenario where 10MHz of spectrum is exclusively reserved for V2V communications<sup>3</sup>. Modes 3 and 4 divide the channel bandwidth in sub-channels. The number of RBs (of 180kHz) per sub-channel can vary. A Transport Block (TB) contains a full beacon or CAM packet. A node that wants to transmit a TB must also transmit an associated Sidelink Control Information (SCI)<sup>4</sup> message that other nodes must correctly receive to be able to decode the transmitted TB. The first two RBs of each sub-channel (Pool SCI+Data in Fig. 1) can be used to transmit an SCI or part of a TB. The rest of RBs of a sub-channel can only be used to transmit the TB (Pool Data Only in Fig. 1). The SCI must always be transmitted in the same sub-frame as the associated TB, and occupies the first 2 RBs of the first utilized sub-channel. The TB is transmitted in the RBs following the SCI, and can occupy RBs of the other sub-channels depending on the size of the TB. The standard considers the option that the SCI and associated TB do not occupy adjacent RBs. However, the TB cannot be divided, and adjacent RBs must always be used for its transmission. The transmission of an SCI and its associated TB in the same sub-frame is referred to as SCI+TB in this paper.

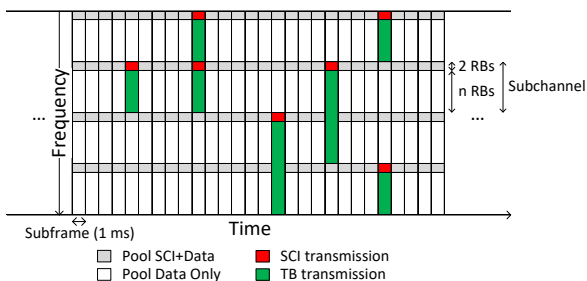


Fig. 1. Frame structure and example of the utilization of resources.

### B. Sensing-based Semi-Persistent Scheduling

Vehicles can reserve sub-channels to transmit several consecutive packets using the sensing-based SPS scheme that is here described [5,8]. Packets can be transmitted every 100 sub-frames (i.e. 10 packets per second) or in multiples of 100 sub-frames (up to a minimum of 1 packet per second). The packet transmission interval is indicated in the SCI so that other vehicles can estimate which sub-channels could be free. Let's suppose that a vehicle  $V$  needs to reserve new sub-channels at time  $T$  in order to transmit a packet. It can reserve

<sup>3</sup> The 3GPP standards also consider the option where a given channel can be shared in overlay mode between V2V and other type (e.g. cellular) of communications.

<sup>4</sup> Also referred to as SA Scheduling Assignment in 3GPP working groups.

sub-channels between  $T$  and the established maximum latency (equal or lower than 100ms [5]). This time period is referred to as selection window. Within the selection window, a candidate resource to be reserved is defined as a group of adjacent sub-channels within the same sub-frame where the SCI+TB to be transmitted fits. The vehicle analyzes all Candidate Resources (CR) in the selection window, and excludes those for which:

- It has correctly received in the last 1000 subframes an SCI from another vehicle indicating that it will utilize such resource at the same time as it would need it to transmit one of its packets;
- And the RBs utilized to transmit the TB associated to the received SCI (previous condition) experience an average Reference Signal Received Power (RSRP) higher than a given threshold<sup>5</sup>. The number of non-excluded candidate resources must be equal or higher than 20% of all candidate resources in the selection window. If not, this second condition is executed iteratively with a 3dB higher RSRP threshold at each iteration until the 20% target is met.

Vehicle  $V$  creates then a list of non-excluded candidate resources. The total number of candidate resources in the list must be equal to 20% of the candidate resources in the selection window. The list is composed of the candidate resources that experienced the lowest average RSSI (Received Signal Strength Indicator) over all its RBs in all the previous  $T_{CR}-100*j$  sub-frames (Fig. 2);  $j$  is an integer variable that takes the values from 1 to 10. Vehicle  $V$  randomly chooses one of the candidate resources in the list, and reserves it for the next *Resource Counter* packet transmissions. This counter is randomly set between 5 and 15. After each packet transmission, the *Resource Counter* is decremented by one, and when it is equal to zero<sup>6</sup>, new resources must be selected again with probability  $(1 - P)$ .  $P$  can be set between 0 and 0.8. Even if the same resources are maintained when *Resource Counter* reaches zero, the value of *Resource Counter* must be again randomly chosen between 5 and 15.

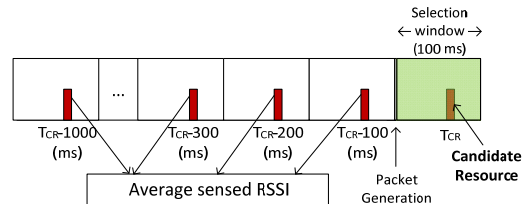


Fig. 2. Estimation of average RSSI of a candidate resource

The reliability of V2V communications can be increased in LTE sidelink mode 4 by retransmitting each packet once<sup>7</sup>. The sensing-based SPS scheme creates a second list of candidate resources for the redundant SCI+TB transmission. Let's suppose that the original SCI+TB transmission took place in a candidate resource in sub-frame  $SF$ . This second list is made of all candidate resources in the selection window that are located in the time interval  $[SF-15ms; SF+15ms]$ , except for all the

<sup>5</sup> If  $V$  receives several SCIs from the same interfering vehicle reserving a given CR, it will utilize the most recent one to estimate the average RSRP.

<sup>6</sup> New resources need to be reserved also if the packet to be transmitted at a given point in time does not fit in the sub-channels previously reserved.

<sup>7</sup> Referred in 3GPP standards as HARQ retransmission.



candidate resources in  $SF$ . The sensing-based SPS scheme randomly selects a resource from this second list for the redundant SCI+TB transmission.

### III. SIMULATION ENVIRONMENT

This study evaluates the performance and operation of LTE sidelink mode 4 for V2V communications using the Veins simulation platform. Veins integrates OMNET++ for wireless networking simulation with the open-source traffic simulation platform SUMO. We have implemented in Veins a new interface for LTE sidelink mode 4.

The evaluation has been done under the Urban Case scenario defined in [9] and that is generally utilized by the 3GPP working groups. The scenario models a Manhattan grid layout of 9 by 7 building blocks. Each block has a size of 250m by 433m. Each street has 2 lanes in each direction, and the width of each lane is equal to 3.5m. Each street has a 3m sidewalk on each side. To avoid border effects, the results presented in this paper correspond to those obtained on a single street between the four central intersections of the scenario. Random vehicular routes are generated using SUMO, and the average traffic density has been set to 85 vehicles per kilometer following the indications in [9] for the urban scenario. In [9], vehicles are initially positioned in the scenario using a spatial Poisson distribution, and they move at a constant speed of 60 km/h. This modelling does not reflect realistic traffic patterns as vehicles overrun each other, and it does not take into account, for example, the traditional stop and go at intersections. This simple modelling can have important implications in the evaluation of LTE-V2V as it will not be able to adequately capture the potential packet collisions that could be generated at intersections where higher densities of vehicles generally concentrate. Using SUMO, our simulations consider realistic traffic patterns as the mobility of vehicles is implemented using the Krauss car following model. Vehicles have then a variable speed based on their location and surrounding traffic context. The maximum speed has been set to 15 km/h in order to achieve the density of 85 vehicles per km considered in [9].

The propagation is modeled using the WINNER+ B1 pathloss model for Manhattan layouts. The shadowing is modeled with a log-normal distribution with 3dB standard deviation under LOS (Line of Sight) conditions and 4dB under NLOS (Non Line of Sight). We have implemented the shadowing spatial correlation as in [9] with a decorrelation distance of 10m. The pathloss and shadowing are used to estimate the SINR (Signal to Interference Noise Ratio) for each received packet. The estimated SINR is used together with the BLER (Block Error Rate)-SINR curves presented in [10] to estimate the BLER for each received packet. This BLER value is used together with a random number to decide whether the packet is correctly decoded or not. Our simulations consider a single 10MHz channel at 5.9GHz that is exclusively reserved for V2V communications. We assume perfect synchronization and all vehicles transmit at 23dBm. The noise figure is set to 9dB and In-Band Emissions (IBE) are modeled as in [9].

Packets are generated following the model described in [9] that provides a simplified representation of the CAM and BSM packets transmitted in vehicular networks [11]. The model

generates packets with a period of 100ms. One out of every five packets has a size of 300 bytes, while the other packets have a size of 190 bytes. The 300 bytes packets are coded with a MCS (Modulation and Coding Scheme) using QPSK and a  $\frac{1}{2}$  code rate (TBs occupy 20 RBs). The 190 bytes packets are coded with a MCS using QPSK and a 0.7 code rate (TBs occupy 10 RBs). The 3GPP Release 14 standards do not specify the value for certain parameters: number of RBs per sub-channel, maximum permitted latency, RSRP threshold, and  $P$ . This study considers sub-channels of 12 RBs (2 RBs for SCI or TB, and 10 RBs only for TB). The 10MHz channel (with 50 RBs of 180kHz per sub-frame) can then accommodate 4 sub-channels. The transmission of 190-bytes packets completely occupy a sub-channel. The 300-bytes packets occupy the first 22 RBs of two adjacent sub-channels in the same sub-frame. The maximum latency has been set to 100ms, and the selection window is equal to 100 sub-frames. The average RSRP threshold has been set to -110dBm.  $P$  has been set equal to 0.

### IV. RESULTS

Sufficient simulations have been conducted to guarantee a relative error below 5% for all results presented in this section. Fig. 3 illustrates the Packet Delivery Ratio (PDR) obtained with V2V communications using LTE sidelink mode 4. The PDR is represented as a function of the distance between transmitter and receiver. Fig. 3 corresponds to the PDR for all transmissions in the scenario, while Fig. 4 and Fig. 5 represent it only for V2V transmissions under LOS and NLOS conditions respectively. All three figures depict the PDR achieved when utilizing the sensing-based SPS scheme to select resources (*Sensing*) and when such resources are randomly selected (*Random*). The PDR is shown when each packet is transmitted using one SCI+TB transmission or two (for redundancy). The depicted results show that the sensing-based SPS scheme improves the performance over a random selection of resources for short and medium distances, and in particular under LOS conditions. The difference between the sensing-based SPS scheme and a random selection of resources decreases with the distance. In addition, it is important noting that the gains achieved with the sensing-based SPS scheme are higher when each packet is transmitted only once. When redundancy is added, the PDR improves, but there is little difference in urban scenarios between assigning radio resources randomly or using the sensing-based SPS scheme included in the 3GPP Release 14 standard.

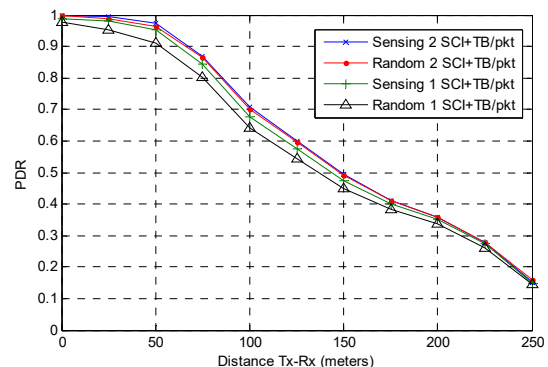


Fig. 3. PDR as a function of the distance between transmitter and receiver.

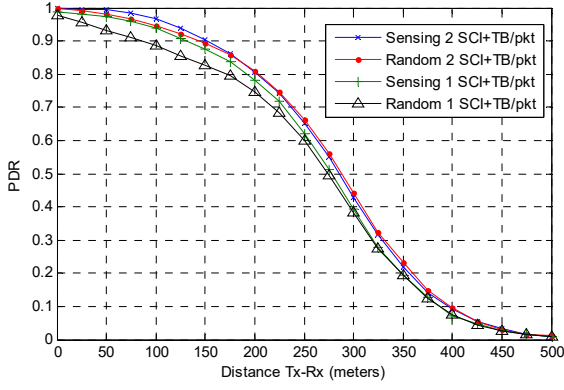


Fig. 4. PDR as a function of the distance between transmitter and receiver under LOS conditions.

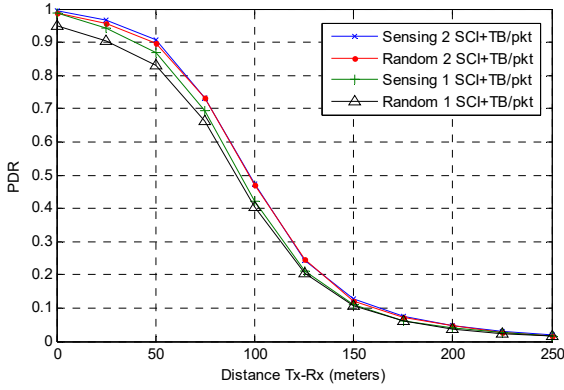


Fig. 5. PDR as a function of the distance between transmitter and receiver under NLOS conditions.

To understand the results and trends depicted in Figs. 3 to 5, it is necessary to analyze the operation of the sensing-based SPS scheme. To this aim, we have analyzed the different type of transmission errors that can occur. Such errors are analyzed per single SCI+TB transmission of each packet, and we focus on the TB transmission errors that can be classified as:

1) *Half-Duplex*. A TB cannot be received because the receiver was transmitting in the same sub-frame.

2) *Propagation*. The reception of the TB fails because it has not been received with sufficient SNR to correctly decode it. This type of error excludes those quantified in 1), and does not consider interference/collisions.

3) *Collision*. The reception of a TB fails because it has not been received with sufficient SINR to correctly decode it as a result of the interference/collisions from other vehicles. This type of error excludes those quantified in 1) and 2).

4) *No SCI*. To correctly receive a TB, it is necessary to also correctly receive the associated SCI. This error quantifies the occasions in which the transmission of a TB did not experience any of the errors quantified in 1), 2) and 3), but the TB cannot be correctly received because the reception of the associated SCI failed.

A TB is then correctly received when none of the four type of errors occur. To calculate the relevance of each transmission error, we denote as  $N_{total}$  the total number of transmitted TBs.

$N_{error}$  denotes the total number of transmitted TBs that have not been correctly received.  $N_{sensed}$  represents the number of TBs that have been received with sufficient SNR, and hence do not experience Half-Duplex or propagation errors.  $N_{sensed}$  includes the TBs correctly received and those that fail due to collisions or because the associated SCI is not correctly received. The variables and types of errors are represented in Fig. 6.

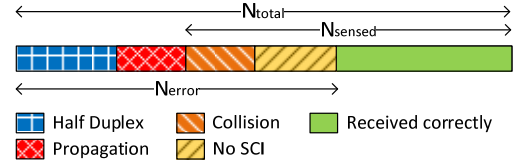


Fig. 6. Types of TB transmission errors.

Fig. 7 represents the percentage of TBs incorrectly received per type of transmission error as a function of the distance between transmitter and receiver. The depicted percentage values are computed with respect to  $N_{total}$ , and hence provide an indication of the relevance of each type of error in absolute terms. Fig. 8 also represents the percentage of TBs incorrectly received per type of transmission error, but in this case the percentage values are computed with respect to  $N_{error}$ . Fig. 8 hence provides an indication of the relative relevance of each type of error as a function of the distance (the sum of percentage errors for a given distance in Fig. 8 is equal to 100%). Finally, Fig. 9 depicts the percentage of TBs incorrectly received due to collisions (again estimated with respect to  $N_{sensed}$ ). This metric has been estimated to analyze the relevance of packet collisions, and hence provide valuable information about whether the sensing-based SPS scheme is adequately managing the resources. Figs. 7 to 9 correspond to the performance achieved with the sensing-based SPS scheme defined in LTE sidelink mode 4 for V2V communications under LOS. Similar trends have been observed for NLOS, although the effects are experienced at shorted distances.

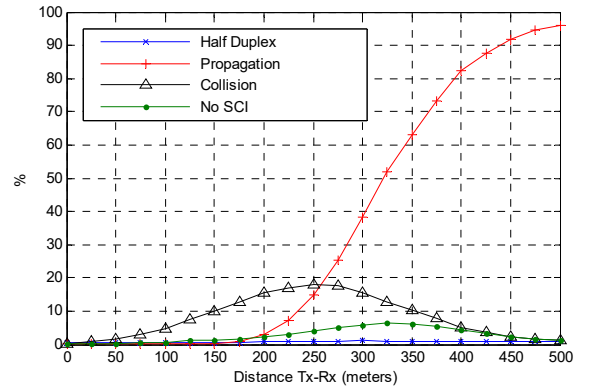


Fig. 7. Percentage of TBs incorrectly received per type of transmission error as a function of the distance between transmitter and receiver (values estimated with respect to  $N_{total}$ ). Single SCI+TB transmission per packet.



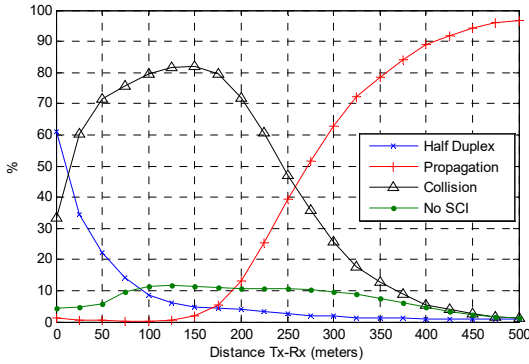


Fig. 8. Percentage of TBs incorrectly received per type of transmission error as a function of the distance between transmitter and receiver (values estimated with respect to  $N_{error}$ ). Single SCI+TB transmission per packet.

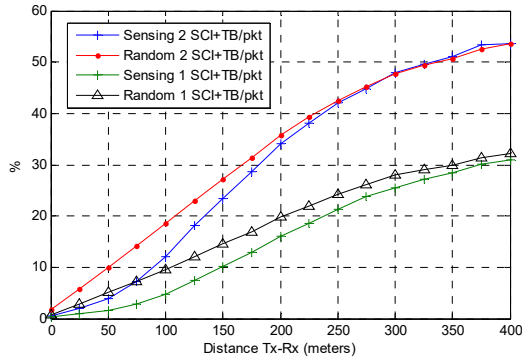


Fig. 9. Percentage of TBs incorrectly received due to collisions as a function of the distance between transmitter and receiver (with respect to  $N_{sensed}$ ).

Fig. 8 shows that packet collisions are the predominant TB transmission error up to 250m under LOS conditions. From this point onwards, most transmission errors are due to propagation conditions. When looking in absolute terms, Fig. 7 shows that the percentage of TB transmissions that suffer collisions is actually non negligible. For example, at 250m distance, around 20% of all transmitted TBs are incorrectly received due to collisions with other vehicles that share the same resources. These results show that there is a considerable margin of improvement, and further enhancements to the sensing-based SPS scheme should be investigated.

Fig. 9 shows that the TB transmission errors due to packet collisions increase with the distance<sup>8</sup>. The probability that interfering vehicles can produce sufficient interference to provoke a transmission error decreases when transmitter and receiver are at short distances. This probability increases when the distance increases, which explains the trends observed in Fig. 9. This figure also compares the operation of the sensing-based SPS scheme with a random selection of resources per vehicle. It is interesting to observe that the major gains achieved with the sensing-based SPS scheme are obtained at short to medium distances, and when only one transmission is done per packet (i.e. no redundancy is introduced). This trend

<sup>8</sup> It is important to remember that the values reported in Fig. 9 are obtained with respect to  $N_{sensed}$ , i.e. without consider propagation errors as in Fig. 7. The percentage of collision errors in Fig. 7 decreases with the distance from 250m simply because these results are computed with respect to  $N_{total}$ , and as shown in Fig. 8 propagation errors are predominant from this distance.

is explained by the impact of the hidden terminal problem when the distance between transmitter and receiver increases. The relevance of this problem increases with the channel utilization as observed in Fig. 9. When redundancy is introduced, sensing-based SPS results in the same probability of packet collision as vehicles randomly selecting their resources. This result is due to the process defined in sensing-based SPS to identify the candidate resources. When packet collisions increase, more SCIs are incorrectly received and hence resources that are occupied by interfering vehicles are not excluded from the list of candidate resources explained in Section II.B. This results in more packet collisions, and the gains obtained with the sensing-based SPS scheme are reduced.

## V. CONCLUSIONS

This paper has presented the first evaluation of the performance and operation of LTE-V2V mode 4 communications under realistic traffic conditions in urban scenarios. The study has also analyzed and quantified the different type of transmissions errors that the sensing-based SPS protocol can suffer. The conducted evaluation has demonstrated that the protocol can experience significant packet collisions, and its benefits decrease with the distance between transmitter and receiver and the channel load. Further enhancements to the sensing-based SPS protocol, or alternative schemes, should hence be investigated.

## REFERENCES

- [1] G. Araniti, C. Campolo, M. Condoluci, A. Iera and A. Molinaro, "LTE for Vehicular Networking: A Survey," IEEE Communications Magazine, Volume: 51, Issue: 5, May, 2013.
- [2] 3GPP TS 36.300, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2," Rel-14 V14.0.0, Sep. 2016.
- [3] 5G Americas, "V2X Cellular Solutions", Oct. 2016.
- [4] 3GPP TS 36.300, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2," Rel-14 V14.1.0, Dec. 2016.
- [5] 3GPP TS 36.213, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures," Section 14, Rel-14 V14.1.0, Dec. 2016.
- [6] R1-1609955, "Remaining Issues for V2V," Qualcomm Incorporated, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #86b, Lisbon, Portugal, Oct. 2016.
- [7] S. Chen, J. Hu, Y. Shi and L. Zhao, "LTE-V: A TD-LTE based V2X Solution for Future Vehicular Network," IEEE Internet of Things Journal, in press.
- [8] 3GPP TS 36.321, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification," Rel-14 V14.1.0, Dec. 2016.
- [9] 3GPP TR 36.885, "Study on LTE-based V2X Services," Annex A: Evaluation methodology, Rel-14 V14.0.0, Jun. 2016.
- [10] R1-160284, "DMRS enhancement of V2V," Huawei, HiSilicon, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #84, St Julian's, Malta, Feb. 2016.
- [11] R1-153803, "V2V Traffic model and performance metrics," Huawei, HiSilicon, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #82, Beijing, Aug. 2015.



# An IEEE 802.11p-Assisted LTE-V Scheduling for Reliable Multi-Link V2X Communications

Rafael Molina-Masegosa, Javier Gozávez and Miguel Sepulcre  
Universidad Miguel Hernandez de Elche (UMH)  
UWICORE laboratory, <http://www.uwicare.umh.es>  
Avda. de la Universidad, s/n, 03202, Elche, Spain  
[rafael.molinam@umh.es](mailto:rafael.molinam@umh.es), [j.gozalvez@umh.es](mailto:j.gozalvez@umh.es), [msepulcre@umh.es](mailto:msepulcre@umh.es)

**Abstract**—V2X deployments using IEEE 802.11p have already been announced, and the 3GPP has published the first Cellular V2X standard based on LTE-V. The limitations of IEEE 802.11p and LTE-V, and the increasing requirements of enhanced V2X applications, raise the question of whether existing V2X standards can provide the reliability levels required to support large scale deployments and the introduction of connected automated driving. Redundancy (two or more V2X links) can increase the reliability, but the gains can be limited if the various links are correlated. IEEE 802.11p and LTE-V utilize sensing-based scheduling schemes, and their MAC errors can hence be correlated since they both suffer packet collisions due to the hidden terminal problem. To address this limitation, this paper proposes the design of multi-link V2X communications where the operation of a link is adjusted with the information received through the other link. This approach is applied in this paper to design an IEEE 802.11p-assisted LTE-V scheduling scheme for multi-link and multi-RAT V2X communications. The proposed scheme is designed to increase the reliability of V2V communications in intersections under NLOS conditions.

**Keywords**—LTE-V, scheduling, multi-link, V2X, V2V, vehicular networks, LTE-V2X, Cellular V2X, C-V2X, multi-RAT, IEEE 802.11p, DSRC, connected automated vehicles, reliability, 5G V2X.

## I. INTRODUCTION

V2X (Vehicle to Everything) communications will facilitate the introduction of advanced traffic safety and management applications, and will support the development of connected automated vehicles by extending their awareness range beyond line of sight. Toyota, Volkswagen and GM have already announced V2X deployments using IEEE 802.11p technology and the DSRC (US) and ITS G5 (EU) standards. Significant efforts have also been devoted lately to develop cellular and 5G solutions for V2X communications. For example, the Third Generation Partnership Project (3GPP) published under Release 14 a Cellular V2X (C-V2X) standard based on LTE that is commonly known as LTE-V or LTE-V2X [1]. This standard evolves the LTE PC5 or Sidelink interface, and introduces two modes of operation. The LTE-V mode 4 does not require support from the cellular infrastructure, and vehicles autonomously select their radio resources. In LTE-V mode 3, vehicles directly communicate with each other, but their radio resources are selected and assigned by the cellular network. Release 15 is analyzing improvements to LTE-V, and

a study item has been recently created to develop a 5G NR interface for V2X communications [2].

Some studies have shown that the reliability and scalability of IEEE 802.11p can be compromised under large scale and dense deployments [3]. In these scenarios, the sensing-based IEEE 802.11p Medium Access Control (MAC) scheme suffers from significant packet collisions. LTE-V improves the link budget in comparison to IEEE 802.11p [1][4]. However, its scheduling is also sensing-based, and is hence prone to packet collisions due to hidden terminal and half-duplex problems [5]. These constraints, and the increasing requirements to support enhanced V2X applications (eV2X) [6], raise the question of whether existing standards can provide the reliability levels required to support large scale deployments and the introduction of connected automated driving.

An approach for increasing the reliability of V2X communications is redundancy. In fact, Volvo already announced that its self-driving vehicles will have redundancy for everything<sup>1</sup>. It is hence reasonable to consider redundancy for V2X communications since V2X communications will be a fundamental component of connected automated driving. In this context, vehicles will simultaneously transmit packets over two (or more) V2X links, which will augment the probability to correctly receive a packet at the application level. If the various links implement the same radio interface, transmissions can be correlated. Larger gains could be expected if both links are uncorrelated, and transmissions can benefit from diversity and combining. In this context, this paper proposes the design of multi-link V2X communications where the operation of a link is adjusted with the information received through the other link in order to reduce correlations at the MAC level. The proposal is here applied to a multi-RAT V2V scenario where vehicles integrate two radio interfaces, one using IEEE 802.11p and the second one using LTE-V mode 4. Deployments have already been announced for IEEE 802.11p, while LTE-V increases the link budget. So combining the two radio interfaces is an interesting option since it will guarantee the capacity to communicate with vehicles only integrating IEEE 802.11p while improving the link level performance for the additional V2X link. In addition, both technologies have different physical and MAC layers, and hence some level of diversity between the two radio links exists. However, both

<sup>1</sup> <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/volvos-selfdriving-program-will-have-redundancy-for-everything>

This work was supported in part by the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness and FEDER funds under the projects TEC2014-57146-R and TEC2017-88612-R, and research grant PEJ-2014-A33622.

IEEE 802.11p and LTE-V mode 4 implement MAC schemes that are sensing-based and are hence prone to packet collisions generated by the hidden terminal problem. In this context, the proposed approach is here applied to design an IEEE 802.11p-assisted LTE-V scheduling scheme for multi-link and multi-RAT V2V communications. The proposed scheme is designed to increase the reliability of V2V communications in intersections under NLOS conditions.

## II. IEEE 802.11P-ASSISTED LTE-V SCHEDULING

The proposed scheduling scheme is designed to improve V2V communications between vehicles approaching an intersection under Non-Line of Sight (NLOS) conditions. Intersections account for more than 36% of accidents in the US [7]. In urban scenarios, buildings generally obstruct the LOS which significantly reduces the communications range of vehicles approaching an intersection under NLOS [8]. Reducing the communication range significantly degrades the capacity of vehicles to detect a potential risk at the intersection with sufficient time to react [9]. Intersections with NLOS also represent a significant challenge to automated vehicles. Automated vehicles can rely on their cameras, radars and lidars under LOS conditions. However, their sensing capacity significantly degrades in intersections under NLOS, and hence connected and automated vehicles will also significantly benefit from improved V2X communications under NLOS at intersections. To this aim, we consider that vehicles are equipped with IEEE 802.11p and LTE-V interfaces, and they can transmit each packet over both interfaces.

### A. LTE-V Mode 4

LTE-V divides its (10 or 20MHz) channels into sub-frames, Resource Blocks (RBs), and sub-channels. Sub-frames are 1ms long, and RBs are 180kHz wide. LTE-V defines sub-channels as a group of RBs in the same sub-frame. The number of RBs per sub-channel can vary. Sub-channels are used to transmit data and control information. The data is transmitted in Transport Blocks (TBs) and the control information in Sidelink Control Information (SCI) messages. A TB contains a full packet to be transmitted (e.g. a beacon), and each TB must be transmitted with its associated SCI. The SCI includes important control information that must be correctly received to be able to decode a transmitted TB. A TB and its associated SCI must always be transmitted in the same sub-frame.

LTE-V mode 4 defines a scheduling mechanism for vehicles to autonomously select their radio resources without any cellular infrastructure support [10]. The algorithm is known as sensing-based Semi-Persistent Scheduling (SPS). With SPS, vehicles sense previous transmissions from other vehicles to select free sub-channels or the sub-channels with lower probability to experience interference. Vehicles reserve the selected resources for a number of transmissions so that other vehicles can accurately estimate interference levels. Readers are referred to [1] for a detailed presentation of LTE-V mode 4 and its SPS scheduling. The authors demonstrated in [1] that LTE-V mode 4 can outperform IEEE 802.11p. However, the performance of LTE-V mode 4 can be affected by the well-known hidden terminal problem (that also affects IEEE 802.11p). LTE-V mode 4 hence suffers from packet

collisions and half-duplex errors [5]. The hidden-terminal problem particularly affects vehicles approaching an intersection under NLOS since they might not sense each other, and therefore select sub-channels resulting in packet collisions or half-duplex errors. The objective of this study is then to exploit multi-link V2X communications to design an alternative scheduling scheme for LTE-V (the IEEE 802.11p interface is not modified and operates following the standard). This scheme uses information received over the IEEE 802.11p link to schedule LTE-V transmissions and reduce packet collisions and half-duplex errors. The proposed IEEE 802.11p-assisted LTE-V scheduling is designed to improve the reliability of V2V communications in intersections under NLOS conditions.

### B. Proposal

The proposal divides the LTE-V sub-frames within the Selection Window into as many pools as incoming streets to an intersection (four in the example in Fig. 1a). Each pool is reserved for vehicles approaching the intersection through the same incoming street (see Fig. 1b). Consequently, vehicles approaching an intersection through different streets under NLOS conditions will never transmit on the same sub-frame. This eliminates possible packet collisions (resulting from the hidden terminal problem) and half-duplex errors between these vehicles that require reliable V2X communications to avoid possible safety risks at the intersection.

Vehicles within the same incoming street to an intersection sequentially select their transmission sub-frame in their corresponding pool. The selection is based on their increasing position in the queue of vehicles towards the intersection as illustrated in the example in Fig. 1c. Vehicles estimate their position in the queue using the location information of surrounding vehicles transmitted using IEEE 802.11p beacons<sup>2</sup> (generally known as BSMs or CAMs). Vehicles must share sub-frames if there are more vehicles in the queue than available sub-frames in the pool. In this case, the selection of sub-frames is also sequential and position-dependent. For example, the 6<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> vehicles in the queue in Fig. 1c select the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> sub-frames respectively since there are only 5 sub-frames in the pool. This approach maximizes the distance between vehicles using the same sub-frame. For each packet transmission, vehicles randomly select a sub-channel within the selected sub-frames. This randomization adds flexibility in the resource selection process when considering packets of different size. In addition, it reduces the probability of packet collisions when several vehicles share the same sub-frame. When a vehicle crosses an intersection and enters a new road segment, it reselects its sub-frame according to its position in the new road segment.

The proposed LTE-V scheduling scheme minimizes the transmission errors between vehicles experiencing the most challenging communication conditions, i.e. vehicles approaching an intersection under NLOS conditions. This is done at the expense of the vehicles driving on the same street. For these vehicles, the proposed scheme exploits IEEE 802.11p

<sup>2</sup> For robustness, the position is estimated considering all beacons received during the last second, and it is updated following the mobility of vehicles.

data to reduce possible packet collisions. It should be noted that the IEEE 802.11p radio interface is not modified (and hence does not prioritize NLOS transmissions over LOS ones), and that the performance of IEEE 802.11p is significantly better under LOS than under NLOS conditions [5]. The perception capacity of connected and automated vehicles is also higher under LOS than under NLOS conditions.

of 10m, and takes the same value for both radio interfaces. The link level performance of LTE-V is estimated using the BLER-SINR (Block Error Rate-Signal to Interference and Noise Ratio) curves from [11]. These curves were obtained from link-level simulations using the vehicular channel model in [12]. This study also considers the effect of In-Band Emissions (IBE) following [12]. The link level performance of IEEE 802.11p is taken into account by using the FER (Frame Error Rate) curves from [13].

Vehicles transmit data packets following the 3GPP traffic model for connected and automated vehicles [12]. In particular, vehicles periodically transmit data packets every 50ms or 20ms (20 or 50 packets per second). Vehicles transmit packets of 190 bytes, except one of every five packets that has a size of 300 bytes. The IEEE 802.11p interface is configured with the 18Mbps data rate since this data rate minimizes the channel load and maximizes the PDR [14]. Each TB is transmitted with its SCI (that occupies 2 RBs) in the same sub-frame. LTE-V is configured to transmit packets of 190bytes with the MCS9 modulation and coding scheme, and packets of 300bytes with the MCS7. This configuration results in that packets of 190 and 300 bytes occupy a TB with 10 RBs and 20 RBs respectively. The LTE-V bandwidth in a sub-frame is divided in four sub-channels with 12 RBs each. The adjacent SCI+TB transmission configuration is used [1]. As a result, SCI+TB packets use 1 and 2 sub-channels when the TB has a size of 190 and 300bytes respectively. Each SCI+TB packet can be transmitted once or twice as indicated in 3GPP standards.

This study implements the Urban Case road traffic scenario specified by 3GPP working groups [12]. This scenario simulates a Manhattan grid layout with 433mx250m building blocks. All streets have two lanes in each direction (four in total), and each lane is 3.5m wide. The scenario has 9x7 building blocks, and statistics are collected in the streets and intersections around the center of the scenario to avoid border effects. Vehicles are randomly dropped in the scenario and follow random routes in the Manhattan grid. Simulations have been conducted for an average traffic density of 90 vehicles per kilometer following the 3GPP specifications of the Urban Case scenario [12]. 3GPP studies usually consider a simplified mobility model where vehicles move at constant speed [12]. Our simulations use the Krauss car following model implemented in SUMO. This results in variable speeds depending on the location of vehicles and the traffic context.

#### IV. RESULTS

Fig. 2 plots the PDR (Packet Delivery Ratio) as a function of the road distance between transmitter and receiver when vehicles are approaching an intersection<sup>3</sup>. All the results depicted in Fig. 2 for LTE-V have been obtained using the sensing-based SPS scheduling included in mode 4. The results confirm that a standalone LTE-V mode 4 interface outperforms a standalone IEEE 802.11p interface due to its better link level performance. Adding a redundant IEEE 802.11p interface (i.e. each vehicle simultaneously transmits each packet over the two IEEE 802.11p interfaces) improves the PDR, but the

<sup>3</sup> Sufficient simulations have been conducted to ensure a relative error below 5% for all the results presented in this section.

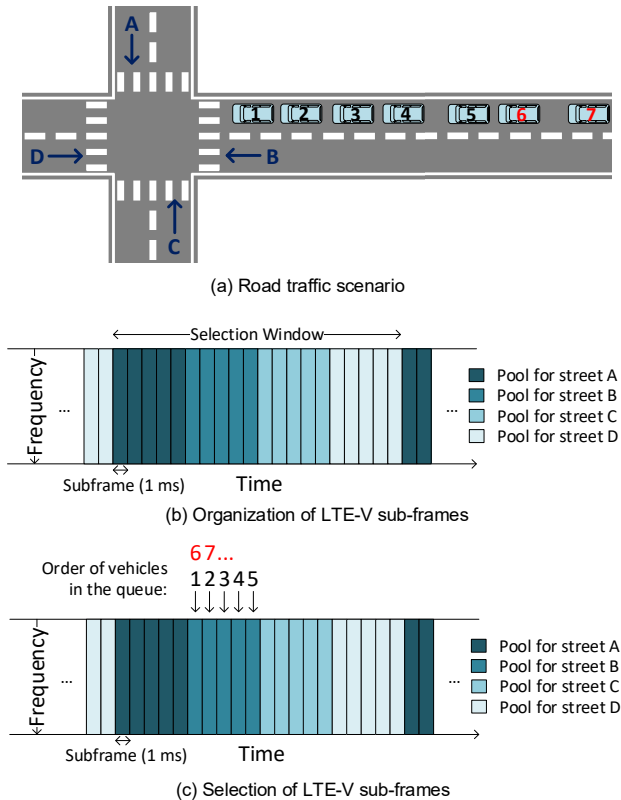


Fig 1. IEEE 802.11p-assisted LTE-V scheduling in intersection scenarios.

### III. SIMULATION ENVIRONMENT

The proposed solution has been evaluated using Veins, an open source simulator for vehicular networks. Veins integrates OMNeT++ (an event-based network simulator) and SUMO (a road traffic simulator). The current version of Veins includes an IEEE 802.11p interface for V2X communications. We have extended Veins to simulate multi-link and heterogeneous V2X communications, and we have implemented the LTE-V mode 4 interface [1]. The simulator can evaluate the performance achieved with standalone IEEE 802.11p and LTE-V mode 4 interfaces, and with various multi-link V2X configurations.

All the simulated radio interfaces operate at the 5.9GHz band (in 10MHz channels) with a transmission power of 23dBm. The noise figure has been set to 9dB. Following the 3GPP guidelines and recommendations [10], the radio propagation effects are modeled using the WINNER+ B1 model. This model implements a log-distance pathloss that differentiates between LOS and NLOS conditions, and models shadowing using a log-normal distribution with a standard deviation of 3dB for LOS and 4dB for NLOS conditions. The shadowing is spatially correlated with a decorrelation distance



improvement is low due to the high correlation of packet losses between the two radio interfaces. Higher gains are obtained when the second interface is LTE-V. It is important noting that the gains are also constrained by the strong propagation effects under NLOS conditions.

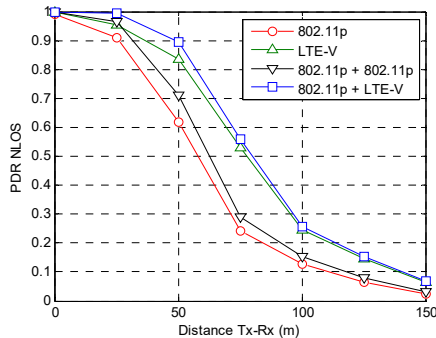


Fig 2. PDR as a function of the road distance between transmitter and receiver. LTE-V transmits one SCI+TB per packet (no retransmission). NLOS. Packet generation interval: 50ms (equivalent to packet rate of 20pps).

The results depicted in Fig. 2 for the 802.11p+LTE-V configuration have been obtained using the MAC defined in the IEEE and 3GPP standards. Both are sensing-based, and are hence similarly affected by the hidden-terminal problem. This limits the performance gain achievable with the addition of a second radio interface since packet losses due to collisions are correlated between both interfaces. Using a second interface that reduces such correlation could yield higher performance gains. This is in fact illustrated in Fig. 3a and Fig. 3b that compares the performance achieved with the proposed scheme (802.11p+802.11p-assisted LTE-V) and the performance obtained using the standard 802.11p+LTE-V configuration (i.e. the configuration achieving the best results in Fig. 2). Fig. 3a and Fig. 3b represent the PDR obtained between vehicles approaching an intersection under NLOS conditions. Fig. 3a corresponds to the case in which every packet is only transmitted once in LTE-V (no retransmission), and Fig. 3b corresponds to the case in which every packet is transmitted twice in LTE-V (with retransmission). The proposed scheme also uses two radio interfaces. The first one is a standard IEEE 802.11p interface, and the second one is an interface that implements the 802.11p-assisted LTE-V scheduling scheme presented in Section II. Fig. 3a and Fig. 3b show that the proposed scheme successfully improves the PDR under NLOS conditions. The largest improvements are obtained when the channel load is higher (i.e. 50pps and/or every packet is transmitted twice over the LTE-V interface), and hence packet collisions and half-duplex errors are more important in LTE-V. This is illustrated in Fig. 4 that represents the percentage of packets lost on the LTE-V interface due to packet collisions and half-duplex errors for vehicles under NLOS conditions. The figure compares the packets lost when LTE-V implements the standard sensing-based SPS scheduling and when it implements the proposed 802.11p-assisted LTE-V scheduling scheme<sup>4</sup>. Fig. 4 shows that when the channel load is high (e.g. when vehicles transmit 50 packets per second), the proposed 802.11p-assisted LTE-V scheduling scheme significantly

<sup>4</sup> All losses represented in Fig. 4 do not result in packet losses at the application level since packets are also transmitted via the IEEE 802.11p radio interface.

reduces the percentage of packets lost due to packet collisions compared to the standard LTE-V sensing-based scheme. This is particularly noticeable for distances between 50m and 75m where packet collisions are more frequent. The percentage of errors due to packet collisions decreases for higher distances because packet losses due to propagation effects become dominant [5]. Fig. 4 also shows that the proposed scheduling scheme completely eliminates the half-duplex errors that characterize the sensing-based LTE-V scheduling scheme and that are relevant when the load increases. The proposed 802.11p-assisted LTE-V scheduling scheme also significantly reduces packet collisions and eliminates half-duplex errors when the channel load decreases (i.e. when vehicles transmit 20pps). The improvements on the PDR are smaller than for higher channel loads because the percentage of packet errors due to collisions is smaller, and errors are mostly dominated by the high propagation losses due to the NLOS conditions.

Fig. 3c and Fig. 3d compare the PDR experienced by vehicles communicating under LOS conditions. The proposed scheme prioritizes NLOS transmissions, and hence slightly reduces the performance under LOS compared to the use of a standard 802.11p+LTE-V configuration<sup>5</sup>. However, the proposed scheme achieves a similar performance under LOS to the standard 802.11p+LTE-V configuration in high channel load scenarios (50pps). In addition, it is important noting that the communications range is larger under LOS (independently of the radio interfaces), and that the proposed scheme always

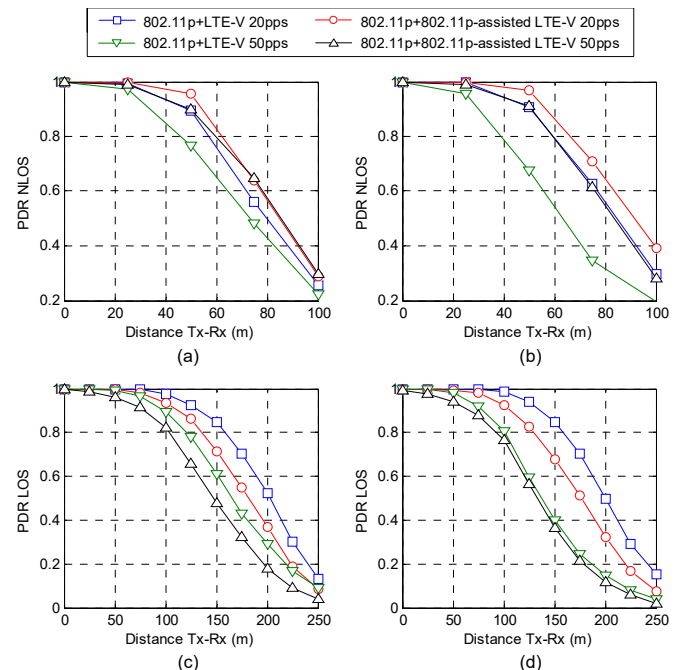


Fig 3. PDR as a function of the road distance between transmitter and receiver. (a) NLOS without LTE-V retransmissions, (b) NLOS with LTE-V retransmissions, (c) LOS without LTE-V retransmissions, (d) LOS with LTE-V retransmissions.

<sup>5</sup> This effect is produced because vehicles in adjacent intersections under LOS conditions can transmit using the same subframe and cause packet collisions if they select the same sub-channel. However, under LOS conditions, the performance of IEEE 802.11p and the available sensors of connected automated vehicles can be sufficient to satisfy the requirements and the redundant interface is not so important.



outperforms the use of single IEEE 802.11p radio interface. Table I summarizes the performance trade-offs observed when comparing the standard 802.11p+LTE-V configuration (Standard in Table I) and the proposed 802.11p+802.11p-assisted LTE-V scheme (Proposal in Table I). The table represents the communications range at which a PDR equal to 0.9 is guaranteed, and the relative variation between both configurations (a positive variation reflects an improvement of the Proposal configuration versus the Standard one). The proposed scheme can increase the communications range under NLOS by up to 70%. These improvements are important to successfully avoid collisions at intersections under NLOS.

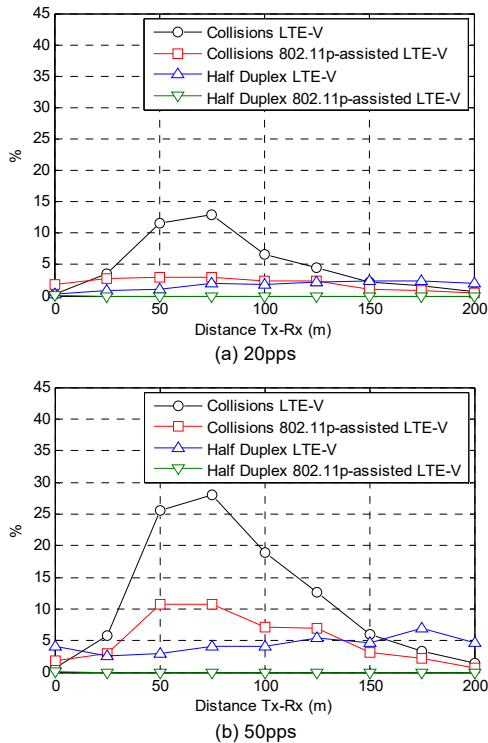


Fig 4. Percentage of packet errors on the LTE-V interface due to half duplex and packet collisions for vehicles under NLOS conditions.

TABLE I. COMMUNICATIONS RANGE (METERS) WITH PDR EQUAL TO 0.9

Packet rate (pps)	LTE-V retransmission	LOS-NLOS	Range - Standard	Range-Proposal	Relative variation
20	No	LOS	133.7	112.2	-16.1%
		NLOS	48.5	54.5	12.4%
	Yes	LOS	138.9	106.5	-23.3%
		NLOS	50.7	56.7	11.8%
50	No	LOS	97.5	79.0	-19.0%
		NLOS	33.7	50.1	48.7%
	Yes	LOS	79.7	66.9	-16.1%
		NLOS	29.9	50.9	70.2%

## V. CONCLUSIONS

This paper has proposed the design of multi-link V2X communications where the operation of a link is adjusted with information received through other links. The proposal is

applied in this paper to reduce possible correlations at the MAC level between the various links. In particular, the paper presents an IEEE 802.11p-assisted LTE-V scheduling scheme for multi-link V2V communications. The proposed scheme uses information received over an IEEE 802.11p link to design a scheduling scheme for a LTE-V link that reduces packet collisions resulting from the hidden terminal problem and eliminates half-duplex errors. The scheme presented in this paper has been designed to increase the reliability of V2V communications in intersections under NLOS conditions. However, the concept of multi-link V2X communications where the operation of a link is adjusted with information received through other links can be applied to other scenarios and objectives. The motivations for this study also raise the question of whether new V2X radio interfaces with different and complimentary characteristics compared to the existing IEEE 802.11p and LTE-V interfaces (both suffer similar problems e.g. at the MAC) should be created to obtain the benefits that multi-link V2X communications can provide.

## REFERENCES

- [1] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, "LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 30-39, Dec. 2017.
- [2] LG Electronics, "New SI proposal: Study on evaluation methodology of new V2X use cases for LTE and NR", 3GPP TSG RAN Meeting #75, Dubrovnik, Croatia, Mar. 2017.
- [3] M. Sepulcre, J. Gozalvez, O. Altintas and H. Kremo, "Integration of congestion and awareness control in vehicular networks", *Ad Hoc Networks*, vol. 37, part 1, pp. 29-43, February 2016.
- [4] A. Bazzi, B. M. Masini, A. Zanella and I. Thibault, "On the Performance of IEEE 802.11p and LTE-V2V for the Cooperative Awareness of Connected Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 11, pp. 10419-10432, Nov. 2017.
- [5] R. Molina-Masegosa and J. Gozalvez, "System level evaluation of LTE-V2V mode 4 communications and its distributed scheduling," *Proc. IEEE VTC2017-Spring*, pp. 1-5, Sydney, Jun. 2017.
- [6] 3GPP, "TR 22.886 Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services (v15.0.0, Release 15)," 3GPP, Tech. Rep., Mar. 2017.
- [7] National Highway Traffic Safety Administration, "Crash Factors in Intersection-Related Crashes: An On-Scene Perspective," Sep. 2010.
- [8] T. Abbas, et al., "Validation of a non-line-of-sight path-loss model for V2V communications at street intersections," *Proc. 13th Int. Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Tampere, 2013, pp. 198-203.
- [9] J. Gozalvez and M. Sepulcre, "Opportunistic technique for efficient wireless vehicular communications", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 2 (4), pp. 33-39, Dec. 2007.
- [10] 3GPP, "TS 36.300 E-UTRA and E-UTRAN; Overall description; Stage 2 (v14.3.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jun. 2017.
- [11] Huawei, HiSilicon, "R1-160284. DMRS enhancement of V2V," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #84, St. Julian's, Malta, Feb. 2016.
- [12] 3GPP, "TR 36.885 Study on LTE-based V2X services (v14.0.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jul. 2016.
- [13] G. Goubet, et al., "Low-Complexity Scalable Iterative Algorithms for IEEE 802.11p Receivers," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 9, pp. 3944-3956, Sept. 2015.
- [14] M. Sepulcre, et al., "Why 6 Mbps is Not (Always) the Optimum Data Rate for Beacons in Vehicular Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 12, pp. 3568-3579, Dec. 2017.



# Configuration of the C-V2X Mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communications

Rafael Molina-Masegosa, Javier Gozalvez and Miguel Sepulcre

Universidad Miguel Hernandez de Elche (UMH)

UWICORE laboratory, <http://www.uwicore.umh.es>

Avda. de la Universidad, s/n, 03202, Elche, Spain

rafael.molinam@umh.es, j.gozalvez@umh.es, msepulcre@umh.es

**Abstract**— The 3GPP has released the C-V2X standard to support V2X (Vehicle-to-Everything) communications using the LTE sidelink PC5 interface. This standard includes two modes of operation, and this study focuses on the Mode 4. This mode does not require the support of the cellular infrastructure, and vehicles can autonomously select their sub-channels for their V2V transmissions. The adequate operation of C-V2X Mode 4 requires a careful configuration of its main parameters. This study analyzes the optimum configuration of the parameters that mostly influence the operation and performance of C-V2X or LTE-V Mode 4. This analysis is conducted for different channel loads and traffic conditions. The conclusions obtained are compared with existing studies taking into account the importance of using accurate models for adequately configuring the C-V2X Mode 4 interface.

**Keywords**— Cellular V2X, C-V2X, LTE-V, LTE-V2X, PC5, V2V, vehicular networks, sidelink, semi-persistent scheduling, connected vehicles, automated vehicles, 5G V2X.

## I. INTRODUCTION

The 3GPP published in Release 14 the C-V2X standard (also known as LTE-V or LTE-V2X) that uses the LTE PC5 interface for V2V (Vehicle-to-Vehicle) communications [1]. This standard has been designed to support cooperative traffic safety and efficiency applications, and includes two modes of operation. In C-V2X Mode 3, vehicles communicate directly between them, but the communications are managed by the cellular infrastructure that selects the sub-channels or radio resources for each V2V transmission. On the other hand, C-V2X Mode 4 does not require the support from the cellular infrastructure, and vehicles autonomously select the sub-channels or radio resources for their V2V transmission. To this aim, the 3GPP standard defines a distributed semi-persistent scheduling scheme that all vehicles must implement. C-V2X Mode 4 is highly relevant since it can support V2V safety applications in the absence of coverage from the cellular infrastructure. As a result, a careful configuration of C-V2X Mode 4 is necessary to increase its communications range and capacity. The 3GPP standard does not fix or recommend concrete values for all the parameters that can be configured in C-V2X Mode 4. These parameters can be configured by the cellular network if vehicles operating in Mode 4 are under cellular coverage. However, they would need to be pre-configured when vehicles are out of the cellular coverage. Standardization bodies such as ETSI are currently defining

what should be the default configuration of C-V2X Mode 4 parameters [2]. Recent studies have also analyzed the configuration of some of the C-V2X Mode 4 parameters with sometimes differing conclusions [3-6]. The differences originate from the different modelling accuracy for some of the aspects that mostly influence the operation and performance of C-V2X Mode 4. This study complements existing studies by providing an independent analysis of C-V2X Mode 4 V2V communications, where we also identify and discuss the implementation and modeling aspects that have a major impact on the operation of C-V2X Mode 4, and that are at the origin of the differences observed in some of the studies published to date. To this aim, this study is conducted using a simulator that carefully implements the processes and models that mostly affect the operation and performance of C-V2X Mode 4. In particular, this study is conducted using the C-V2X Mode 4 simulator presented in [7][8]. The simulator is standard-compliant, and is configured following the 3GPP recommendations. This study also provides new insights compared to existing studies by analyzing the optimum configuration of C-V2X Mode 4 under different channel load levels and traffic patterns. As it is shown in this study, these two aspects have a significant influence on how to adequately configure the C-V2X Mode 4 standard.

## II. C-V2X MODE 4

### A. Physical Layer and Sub-channelization

C-V2X supports 10MHz and 20MHz channels, and uses SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access). The channel is divided into 1ms sub-frames and into Resource Blocks (RBs) of 180kHz each. C-V2X defines a sub-channel as a group of RBs in the same sub-frame. The number of RBs per sub-channel can vary depending on the packet size and the utilized Modulation and Coding Scheme (MCS). Sub-channels are used to transmit data and control information. The data is transmitted in Transport Blocks (TBs) over Physical Sidelink Shared Channels (PSSCH). The control information is transmitted in Sidelink Control Information (SCI) messages (also referred to as SA or Scheduling Assignment) over Physical Sidelink Control Channels (PSCCH) [9]. A TB contains a full packet and it can occupy one or several sub-channels. This packet can be for example a beacon or Cooperative Awareness Message (CAM), or any other event driven message. Each TB has an SCI associated, and both must always be transmitted in the same sub-frame. The SCI occupies 2 RBs and includes information such as the MCS used to transmit the TB, the RBs that the TB occupies, and the

---

This work was supported in part by the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness and FEDER funds under the projects TEC2014-57146-R and TEC2017-88612-R, and by the Generalitat Valenciana under the project AICO/2018/095.

resource reservation interval for the semi-persistent scheduling scheme. This interval refers to the periodicity used by vehicles to transmit their packets (in multiples of 100ms). The information on the SCI is critical, so the SCI must be correctly received to receive and decode the TB. Fig. 1 illustrates an example of C-V2X sub-channelization with 3 sub-channels. The figure differentiates the RBs used for TB and SCI transmissions.

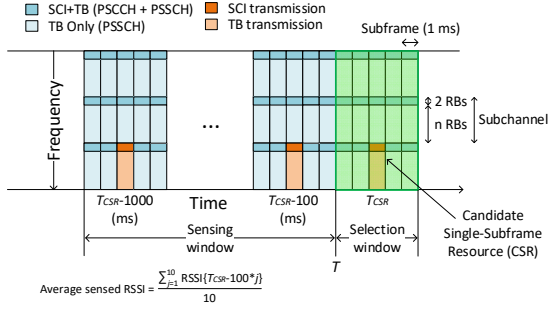


Fig. 1. C-V2X: sub-frames, sub-channels, Selection and Sensing windows.

### B. Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling

Vehicles autonomously select their sub-channels in C-V2X Mode 4. Although C-V2X Mode 4 operates without cellular infrastructure support, the cellular network can configure the C-V2X Mode 4 configurable parameters when vehicles are under cellular coverage. When they are not, vehicles must utilize pre-configured values for these parameters. These parameters include the carrier frequency, synchronization references, number of sub-channels per sub-frame, and number of RBs per sub-channel, among others [10]. The 3GPP standard does not specify a concrete value for each parameter, but the default values are currently being discussed for example in [2]. Vehicles select their sub-channels using the sensing-based Semi-Persistent Scheduling (SPS) scheme specified in Release 14 [9][11]. Vehicles reserve the selected sub-channels for a number of consecutive packet transmissions equal to *Reselection Counter*. *Reselection Counter* is randomly set between 5 and 15 every time new sub-channels must be reserved, and whenever packets are transmitted every 100ms (i.e. vehicles transmit 10 packets per second or 10 pps). Vehicles include the value of *Reselection Counter* in the SCI. After each transmission, *Reselection Counter* is decremented by one. When it is equal to zero, new resources or sub-channels must be selected and reserved with probability  $(1-P)$ . New resources must also be selected if a packet to be transmitted does not fit in the resources previously reserved.  $P$  can be configured to any value between 0 and 0.8. Higher values of  $P$  enable vehicles to maintain their selected resources for longer periods of time. The process followed by vehicles to select and reserve their resources or sub-channels is organized in three steps.

*Step 1.* Whenever a new resource must be selected, a vehicle  $V$  can reserve resources between the time  $T$  at which this new selection must be done, and the established maximum latency (equal or lower than 100ms [12]). This time period is referred to as Selection Window (Fig. 1). Within the Selection Window,  $V$  identifies the Candidate Single-Subframe Resources (CSRs) to be reserved. A CSR is a group of adjacent sub-channels within the same sub-frame where the packet or SCI+TB to be transmitted fits.

*Step 2.* Vehicle  $V$  has been sensing all packets transmitted within the Sensing Window that includes the last 1000 sub-frames before  $T$  (Fig. 1). The vehicle creates then a list  $L_1$  that includes all the CSRs in the Sensing Window except those that meet two conditions: (1)  $V$  has correctly received in the Sensing Window an SCI from another vehicle indicating that it will utilize this CSR at the same time as  $V$  will need it to transmit any of its next *Reselection Counter* packets; (2)  $V$  measures an average Reference Signal Received Power (RSRP) over the RBs utilized to transmit the TB associated to the SCI received from the other vehicle higher than a given threshold. This RSRP threshold is a configurable parameter. The two conditions must be simultaneously met in order for  $V$  to exclude a CSR. After Step 2 is executed,  $L_1$  must include at least 20% of all CSRs in the Selection Window. If not, Step 2 is iteratively executed until the 20% target is met, and the RSRP threshold is increased by 3dB in each iteration.

*Step 3.* Vehicle  $V$  creates a second list  $L_2$  of CSRs. The total number of CSRs in  $L_2$  must be equal to 20% of all CSRs in the selection window.  $L_2$  includes the CSRs from  $L_1$  (after Step 2) that experienced the lowest average RSSI (Received Signal Strength Indicator) over all its RBs. This RSSI value is averaged over all the previous  $T_{CSR}-100*j$  sub-frames ( $j \in \mathbb{N}$ ,  $1 \leq j \leq 10$ ) when vehicles transmit 10pps (Fig. 1). Vehicle  $V$  randomly chooses one of the CSRs in  $L_2$ , and reserves it for the next *Reselection Counter* transmissions.

The sensing-based SPS scheme can support also vehicles transmitting 20pps and 50pps. In this case, the following changes need to be applied to the scheduling: (1) the maximum tolerable latency is 50ms and 20ms for 20pps and 50pps, respectively, which reduces the Selection Window in Step 1; (2) the *Reselection Counter* is randomly selected between 10 and 30 for 20pps, and between 25 and 75 for 50pps; (3) in Step 3, the average RSSI is  $T_{CSR}-T_{IPI}*j$ , where  $T_{IPI}$  is equal to 50 for 20pps and to 20 for 50pps. The variable  $j$  takes values between 1 and 20 for 20pps, and between 1 and 50 for 50pps.

### C. C-V2X Mode 4 parameters

The operation and performance of C-V2X Mode 4 depend on a set of parameters that are analyzed in this study. This section discusses these parameters, and explains their relevance and influence on the operation and performance of C-V2X Mode 4.

*Probability P.* This is the probability that a vehicle maintains its previous CSRs when the *Reselection Counter* reaches zero. If  $P$  is set equal to zero, a vehicle will need to execute the sensing-based SPS scheme to select new CSRs when the counter is equal to zero. Increasing  $P$  produces two effects. First, increasing  $P$  reduces the number of CSR selections per second since vehicles tend to use the same CSRs during longer periods of time. This can have a positive effect on the operation of the sensing-based SPS scheme since vehicles have a more stable sensing environment when they have to select their CSR. However, increasing  $P$  can also produce a negative effect due to the mobility of vehicles. Let's suppose two vehicles that are moving in opposite directions, and that are transmitting in the same CSRs since they were out of their respective sensing ranges when they selected their CSRs. If these vehicles maintain their CSRs for long periods of time because  $P$  is set to high values, they will interfere each other when they get in range. In addition, if two vehicles

experience a packet collision, this collision will be recurrent and will happen for longer periods of time if  $P$  is set to a high value, which can have a very negative effect on the traffic safety of these two vehicles.

*Sensing Window.* During the execution of Step 3 of the sensing-based SPS scheme, vehicles must compute the average RSSI experienced by all the CSRs over the last second (Sensing Window) previous to  $T$ . The Sensing Window was fixed in the standard to 1 second in order to support applications where vehicles transmit 1pps. However, during one second, most of the vehicles have probably changed their transmitting sub-channel, in particular if  $P$  is set equal to 0. This can result in wrong estimations of the best CSRs. For example, it could result in that a CSR that has been freed before  $T$  by another vehicle is discarded because the average RSSI value is high. Similarly, it could result in that CSRs that have not been used by any vehicle during a large portion of the Sensing Window, but have been selected by a vehicle just before  $T$ , are considered as candidate CSRs because the average RSSI over the Sensing Window is low. These examples illustrate possible risks of using long Sensing Windows where the RSSI is simply averaged. Alternative strategies that are analyzed in this study include using shorter Sensing Windows, or maintaining a one second Sensing Window but giving more importance to the more recent RSSI values when computing the average RSSI over the Sensing Window. It should though be noted that the use of shorter Sensing Windows entails the challenge to support applications requiring 1pps.

*RSRP Threshold.* The C-V2X Mode 4 standard gives the option to modify the RSRP threshold used to decide if a given CSR is excluded in Step 2 of the sensing-based SPS scheme (provided its associated SCI has been correctly received). This threshold has been usually set in the evaluations conducted under the 3GPP working groups to a value sufficiently low so that a CSR is always excluded if its associated SCI is correctly received. It should though be remembered that Step 2 increases automatically the RSRP threshold if the percentage of excluded CSRs exceeds 80% of the Selection Window (e.g. when the channel load is high). However, setting the initial value of the RSRP threshold to a high value (e.g. because the channel load is high) would reduce the capability of Step 2 to exclude those CSRs whose SCI were correctly received. If these CSRs are not excluded, Step 3 could select them, and hence cause a packet collision.

*Transmit power.* The transmit power notably influences the communications range and the interference generated by vehicles. In principle, it would hence be reasonable to consider the possibility to reduce the transmission power of vehicles when the channel load is high, and increase it when it is not high. In fact, a low transmit power could reduce packet collisions. However, decreasing the transmit power reduces the communications range and the distance to the transmitter at which the hidden-terminal is more relevant.

*Size of  $L_2$ .*  $L_2$  is the list of CSRs built by Step 3 of the sensing-based SPS algorithm considering the RSSI measurements over the Sensing Window. The CSR selected by a vehicle to transmit its packets is randomly chosen among the CSRs in  $L_2$ . The size of the list  $L_2$  is defined as a percentage of the Selection Window, and this percentage is fixed by the 3GPP standard to 20%. Decreasing the size of  $L_2$  could

increase the packet collisions between nearby vehicles as there is less candidate CSRs, and nearby vehicles tend to exclude the same CSRs. So, if the size of  $L_2$  is small, there is a risk that the two nearby vehicles have the same CSRs in  $L_2$ . This risk is reduced if we increase the size of  $L_2$ . However, a larger size of  $L_2$  reduces the capacity of a vehicle to accurately select the most adequate CSR, since the CSR is finally selected randomly among all CSRs included in  $L_2$ .

### III. SIMULATION ENVIRONMENT

The analysis of the optimum configuration of C-V2X Mode 4 is conducted using VEINS, an open source framework for vehicular network simulations that integrates OMNeT++ and SUMO. We implemented in VEINS a C-V2X Mode 4 interface following the 3GPP specifications [12]. The developed C-V2X interface accurately implements the scheduling scheme described in section II, and takes into account the channel, traffic and mobility models in [12].

This study is conducted considering the Highway Slow scenario defined in [12] by the 3GPP. This scenario is a 5km highway segment with 6 lanes (3 lanes in each direction). The statistics have been extracted only from those vehicles that are in a road segment of 2km in the center of the scenario to avoid border effects. Following the 3GPP guidelines, the traffic density has been fixed to 120veh/km and the maximum vehicles' speed was set to 70km/h.

The implemented propagation model follows the 3GPP guidelines for evaluating C-V2X Mode 4. In particular, the simulator implements the WINNER+ B1 propagation model as in [12]. This model considers a log-distance pathloss to model the average propagation loss between transmitter and receiver at a given distance. It models the shadowing effect produced by the presence of surrounding obstacles using a log-normal random distribution with a standard deviation of 3dB. The shadowing correlation is modeled as specified in [12]. The PHY layer performance of C-V2X is modeled using the BLER (Block Error Rate)-SNR (Signal to Noise Ratio) curves in [13] that consider the fast fading effect. Following the 3GPP guidelines [12], we assume perfect time and frequency synchronization at sub-frame and sub-carrier levels and a noise figure of 9dB. Our simulator also implements the In-Band Emission model defined in [12].

All vehicles in the scenario transmit their beacons (also referred to as CAMs or BSMs) in a dedicated channel of 10MHz bandwidth in the 5.9GHz frequency band. Beacons are generated following the traffic model described in [12]. This model defines that beacons are periodically generated. One out of five beacons contains 300 bytes of data, and is referred to as LF (Low Frequency). The other four have 190 bytes, and are referred to as HF (High Frequency). LFs are transmitted in this study using MCS 7, and hence fit in 20 RBs [9] (22 RBs including the SCI). HFs are transmitted using MCS 9, and hence fit into 10 RBs (12 RBs including the SCI). The 10MHz channel is divided into 50 RBs per sub-frame that are used for V2V communications. The channel is divided into 4 sub-channels of 12 RBs each (10 RBs for the TB and 2 RBs for the SCI). As a result, LFs need 2 sub-channels to be transmitted, while HFs fit into one sub-channel. In addition to this traffic model defined in 3GPP, we also consider a traffic model where

all beacons have 190 bytes of data (HFs)<sup>1</sup>. For clarity, this simplified traffic model will be used by default to analyze and explain the optimum configuration of the C-V2X Mode 4 parameters. However, this paper will also present the results of the analysis for the 3GPP traffic model when the conclusions regarding the optimum configuration of C-V2X Mode 4 differ with respect to the simplified traffic model.

This study analyzes scenarios in which vehicles transmit 10 or 50 beacons or packets per second (pps), which correspond to beacon transmission intervals equal to 100ms and 20ms. By default, a transmission power of 23dBm is considered following 3GPP guidelines [12]. By default, the probability  $P$  of selecting new resources is set to  $P=0$ , i.e. all vehicles always select new resources when their *Reselection Counter* goes down to 0. Similarly, the default RSRP threshold used in Step 2 is set equal to -120dBm, which is sufficiently low to guarantee that a CSR is always excluded if its associated SCI is correctly received.

#### IV. C-V2X MODE 4 CONFIGURATION

##### A. Probability $P$

Fig. 2 shows the impact of the probability  $P$  of maintaining the selected resources or sub-channels on the Packet Delivery Ratio (PDR) as a function of the distance between transmitter and receiver. Fig. 2 shows that the PDR improves if we augment  $P$  to 0.6 when vehicles transmit 10pps. This is the case because augmenting  $P$  reduces the number of resource reservations, and hence provides a more stable sensing environment that benefits the operation of the sensing-based SPS scheme. As a result, vehicles tend to select resources that are less prone to suffer packet collisions. However, Fig. 2 shows that when the channel load increases<sup>2</sup>, augmenting  $P$  can reduce the PDR. An increase of the channel load reduces the communication range. In this case, if vehicles select a resource and maintain it for a long time, it is highly probable that due to their mobility they will get in range with vehicles that were previously not under their sensing range, and hence were not taken into account for the resource selection by the sensing-based SPS scheme. In this case, if vehicles maintain their resources for longer, they will experience packet collisions with these vehicles that enter into their sensing range after the resource has been reserved. [4] and [5] conclude that augmenting  $P$  increases the PDR as we have shown for 10pps. However, vehicles move at lower speeds in [4] and seem to be static in [5]. In addition, these studies do not consider the effect of increasing the channel load on their analysis, so the negative effects of augmenting  $P$  when vehicles move at higher speeds and the channel load increases are not detected.

Fig. 3 shows the effect of  $P$  on the PDR with the 3GPP traffic model that includes HF and LF packets. The comparison of Fig. 2 and 3 shows that the effect of  $P$  on the PDR varies with the traffic patterns. When vehicles generate packets of different sizes, and these packets require a different number of sub-channels, the number of reselections increases and the effectiveness of the sensing-based SPS scheme decreases. The number of reselections increases because larger LF packets

cannot be transmitted with the number of sub-channels reserved for smaller HF packets. Augmenting  $P$  decreases reselections, and improves the PDR independently of the channel load (Fig. 3). [3] uses the same traffic model and sub-channels configuration than Fig. 3, but does not find a significant effect of  $P$  on the average PDR. However, their analysis is based on average PDR, and hence does not capture the evolution of the PDR with the distance.

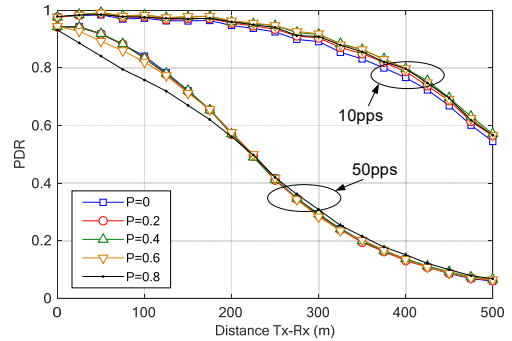


Fig. 2. Effect of  $P$  on the PDR.

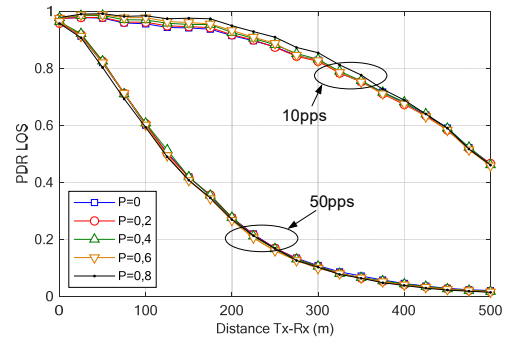


Fig. 3. Effect of  $P$  on the PDR when HF and LF packets require a different number of sub-channels.

The previous analysis has shown that augmenting  $P$  does not always increase the PDR. It is also important to analyze the effect of  $P$  on the Packet Inter-Reception (PIR) time. Augmenting  $P$  increases the time between resource reselections. This can be beneficial if the sensing-based SPS scheme results in that vehicles avoid selecting resources experiencing packet collisions. On the other hand, if two vehicles experience packet collisions, these collisions will be maintained for a longer period of time if  $P$  is high. These effects are illustrated in Fig. 4 that represents a CDF (Cumulative Distribution Function) of the PIR for different values of  $P$ . The figure corresponds to the scenario where vehicles transmit 10pps and all the packets have the same size. Fig. 4 shows that for the majority of transmissions, augmenting  $P$  reduces the PIR. However, large values of  $P$  significantly increase the PIR for the vehicles that experience persistent collisions, although such collisions are certainly less probable in Fig. 4. It should also be noted that, following the observations in Fig. 2, an increase in the channel load reduces the benefits of augmenting  $P$  on the PIR since the channel load increases the probability of packet collisions.

<sup>1</sup> From the resource management point of view, using a single beacon size is equivalent to increasing the MCS of the longer packets so that both long and short beacons use the same number of sub-channels.

<sup>2</sup> A similar trend would be observed if we augment the traffic density.



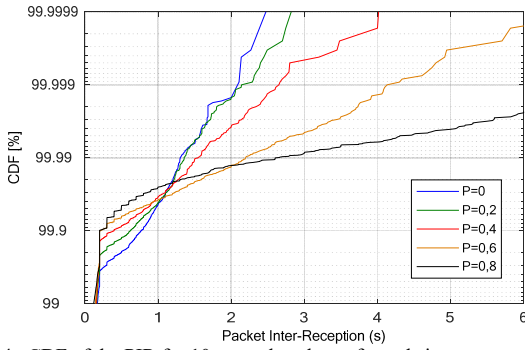


Fig. 4. CDF of the PIR for 10pps and packets of equal size.

### B. Sensing Window

The Sensing Window has been defined in 3GPP equal to 1 second. [4] analyzed the effect of reducing and increasing the Sensing Window for scenarios with 10pps, and found gains if the Sensing Window was reduced to 0.1 seconds. In [6], the authors found that higher gains were also possible by exponentially weighting the RSSI values in order to give higher priority to the more recent measures. However, [6] does not exactly implement the C-V2X mode 4 standard<sup>3</sup>, and hence the use of an exponential Sensing Window still needs to be validated with a standard-compliant C-V2X mode 4 implementation. In this study, we have analyzed the effect of the Sensing Window by comparing the PDR obtained with the standard implementation (RSSI is averaged over 1 second), shorter (0.1 and 0.5 seconds) Sensing Windows (still computing average RSSI values), and with an exponential Sensing Window of 1 second. Similar PDR values have been observed for all configurations when vehicles transmit 10pps. Small differences are though observed when vehicles transmit 50pps and the channel load increases (Fig. 5). In this scenario, the exponential Sensing Window outperforms the standard one. Gains are also observed when shortening the Sensing Window. However, this option should be carefully considered if vehicles transmit fewer packets per second (e.g. 1pps). The gains observed in our evaluations with the exponential Sensing Window are significantly smaller compared to those observed in [6]. This is due to the fact that [6] does not implement the standardized Step 2 of the sensing-based SPS scheme, and this step has a significantly higher impact on the operation of SPS than Step 3. This is actually observed in Fig. 6 that compares the PDR obtained with the standardized sensing-based SPS scheme to that obtained when only Step 2 or Step 3 of the scheme are implemented. No significant differences are observed when vehicles transmit 10pps because the channel load is low, most of the CSRs are available, and both steps can easily detect the CSRs with higher probability to suffer packet collisions. On the other hand, when vehicles transmit at 50pps, the channel load increases and there are more CSRs occupied. In this case, it is important to exclude the CSRs that are used by nearby vehicles since they will generate more interference. This is achieved by Step 2 that monitors the reception of SCIs. Since SCIs are transmitted with a robust MCS, the probability to correctly receive them is high, and Step 2 can exclude CSRs

<sup>3</sup> Instead of implementing the standardized Step 2 of the sensing-based SPS scheme, [6] implements for Step 2 the Step 3 defined in the standard but averaging RSRP values instead of RSSI ones. The exponential Sensing Window is then applied to the modified Step 2 and Step 3.

that can experience higher interference levels. Adding Step 3 actually does not show much improvement since Step 2 is already capable enough to eliminate these CSRs. In fact, only considering Step 3 of the sensing-based scheme reduces the PDR since the accuracy in the estimation of occupied CSRs is lower with Step 3 than with Step 2 (Fig. 6).

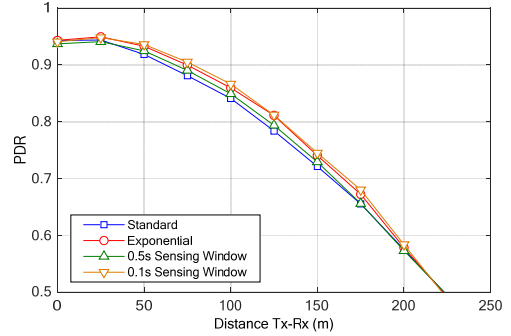


Fig. 5. Effect of the Sensing Window on the PDR with 50pps.

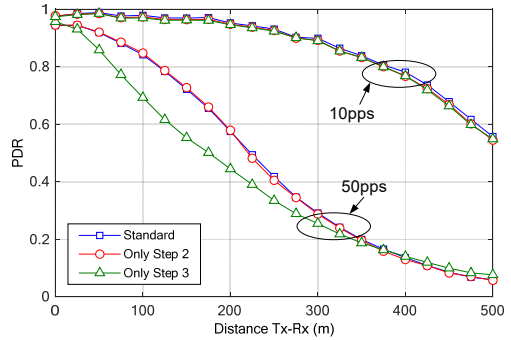


Fig. 6. Comparison of the PDR for different configurations of the sensing-based SPS scheme.

### C. RSRP Threshold

The previous section has illustrated the importance of Step 2 of the sensing-based SPS scheme. One key parameter in Step 2 is the RSRP threshold that is used to exclude CSRs. Simulations reported in 3GPP working group documents usually set up this threshold to a low value to make sure a CSR is excluded if the reception of an SCI indicated that another vehicle was planning to utilize it. [4] evaluated the impact of the initial RSRP threshold, and found that it did not have a major impact on the performance. However, the study only analyzed initial RSRP threshold values up to  $-90\text{dBm}$ . In Fig. 7, we analyze the effect of the initial RSRP threshold for a larger range of possible values (from  $-120\text{dBm}$  to  $-40\text{dBm}$ ), and considering scenarios with low and high channel load levels (varying the number of packets transmitted per second per vehicle). Similarly to the conclusions reported in [4], Fig. 7 shows that the initial RSRP threshold value does not have an impact on the PDR when the channel load is low (10pps). However, the initial RSRP threshold has a clear and significant impact on the PDR when the channel load increases (50pps). In this case, we observe that the PDR increases with the lowest values of the RSRP threshold, and a significant degradation is observed when it increases to  $-80\text{dBm}$ . When the initial RSRP threshold value is increased, Step 3 is more active in excluding CSRs from the  $L_1$  list. As shown in the previous section, Step 3 achieves the same results as Step 2 when the load is low. However, when the load increases, Step 3 is less effective than

Step 2 in excluding the CSRs that are more likely to experience high interference levels. So if we increase the initial RSRP threshold value, and hence depend on the effectiveness of Step 3 to exclude the adequate CSRs, the performance is degraded as observed in Fig. 7.

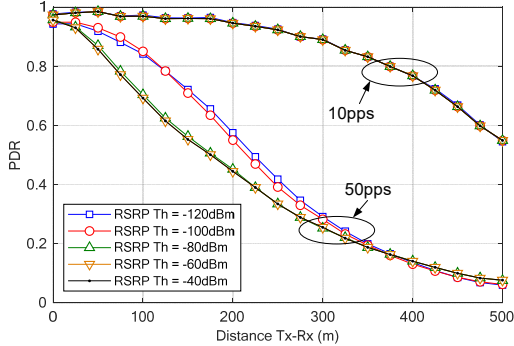


Fig. 7. Impact of the initial RSRP threshold value on the PDR.

#### D. Transmit Power

Fig. 8 shows the impact of the transmit power on the PDR as a function of the distance between transmitter and receiver. The figure shows that, independently of the channel load, the higher transmit powers evaluated in this study improve the PDR. Reducing the transmit power reduces the interference range, but also the distance at which the hidden terminal problem becomes more relevant. In addition, Step 2 is capable to exclude the CSRs experiencing higher interference levels, and considers as candidate resources those used by vehicles farther away. So, reducing in addition the transmit power does not improve the CSR selection process, and reduces instead the communications range, which explains the lower PDR values observed in Fig. 8.

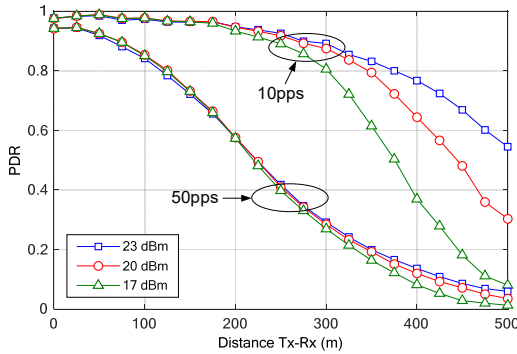


Fig. 8. Effect of the transmit power on the PDR.

#### E. Size of the $L_2$ list

The size of the  $L_2$  list is established to be equal to 20% of the Selection Window in the 3GPP standard. We have analyzed the impact of changing this size to 10% and 30% of the CSRs, and have found no significant impact when vehicles transmit 10pps and 50pps. When vehicles transmit 10pps, the channel load in our scenario is low, and there are always more than 30% of the CSRs that are unoccupied. In this case, increasing or reducing the size of  $L_2$  is irrelevant. When the channel load increases, if we decrease the size of  $L_2$  to 10%, vehicles can more accurately select the CSR since the effect of the final random selection is smaller. However, if we reduce the size of  $L_2$ , it is more probable that two close vehicles will have an overlapping  $L_2$ , so the packet collision probability between

these two vehicles increases. The opposite effects are observed if we increase the size of  $L_2$  to 30%, which explains why decreasing or increasing the size of  $L_2$  does not have any significant effect.

## V. CONCLUSIONS

This paper has evaluated the configuration of C-V2X Mode 4 under different channel load and traffic scenarios, and has identified those factors that are more relevant for an adequate configuration of the standard. The evaluation has been conducted following the 3GPP standard and guidelines, and the conclusions of our analysis have been compared with related studies. This study has shown the operating conditions for which increasing the probability  $P$  can improve the performance of C-V2X Mode 4. The study has also shown that although some improvements can be obtained using an exponential Sensing Window under high channel load levels, the gains are small since the effectiveness of the sensing-based scheme is mainly due to Step 2 of the algorithm and not to Step 3. The conducted analysis has also shown the benefits obtained using a low RSRP threshold in Step 2 and a high transmit power (within the standard limits). The results and conclusions presented in this paper are important for the community since they contribute to a better understanding of C-V2X Mode 4 and to its adequate configuration.

## REFERENCES

- [1] 3GPP, "TS 36.300 E-UTRA and E-UTRAN; Overall description; Stage 2 (v14.8.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Oct. 2018.
- [2] ETSI, "TS 103 613; ITS; Using LTE Vehicle to Everything communication in the 5.9 GHz frequency band; C-V2X Access Layer (v0.3.0)" ETSI Technical Specification, Oct. 2018.
- [3] A. Nabil, V. Marojevic, K. Kaur, C. Dietrich, "Performance Analysis of Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling in C-V2X Networks," *Proc. IEEE VTC2018-Fall*, pp. 1-5, Chicago, USA, Aug. 2018.
- [4] A. Bazzi, G. Cecchini, B.M. Masini, A. Zanella, "Study of the Impact of PHY and MAC Parameters in 3GPP C-V2V Mode 4," arXiv:1807.10699v1 [cs.NI], Jul. 2018.
- [5] B. Toghi, M.D. Saifuddin, M.O. Mughal, H.N. Mahjoub, Y.P. Fallah, J. Rao, S. Das, "Multiple Access in Cellular V2X: Performance Analysis in Highly Congested Vehicular Networks," arXiv:1809.02678v1 [cs.NI], Sep. 2018.
- [6] L.F. Abanto-Leon, A. Koppelaar, S. Heemstra de Groot, "Enhanced C-V2X Mode-4 Subchannel Selection," *Proc. IEEE VTC2018-Fall*, pp. 1-5, Chicago, USA, Aug. 2018.
- [7] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, "LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 30-39, Dec. 2017.
- [8] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, "System level evaluation of LTE-V2V mode 4 communications and its distributed scheduling," *Proc. IEEE VTC2017-Spring*, pp. 1-5, Sydney, Jun. 2017.
- [9] 3GPP, "TS 36.213 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (v14.8.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Oct. 2018.
- [10] 3GPP, "TS 36.331 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (v14.8.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Sep. 2018.
- [11] 3GPP, "TS 36.321 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (v14.8.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Sep. 2018.
- [12] 3GPP, "TR 36.885 Study on LTE-based V2X services (v14.0.0, Release 14)," 3GPP, Tech. Rep., Jul. 2016.
- [13] Huawei, HiSilicon, "R1-160284. DMRS enhancement of V2V," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #84, St. Julian's, Malta, Feb. 2016.



