

# Optimización de HERA: Herramienta de Reducción de datos RadioAstronómicos

Antonio Vera Pérez<sup>(1)</sup>, Pablo Corral González<sup>(2)</sup>, Juan Ángel Vaquerizo Gallego<sup>(3)</sup>,  
Miguel Aljaro Palacios<sup>(4)</sup>, Guillermo De Scals Martín<sup>(5)</sup>

[antonio.vera@pldspace.com](mailto:antonio.vera@pldspace.com)

<sup>(1)</sup> Dpto. de Aviónica, Payload Aerospace SL, Elche 03203, España

<sup>(2)</sup> Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad Miguel Hernández de Elche, 03202, España.

<sup>(3)</sup> Unidad de Cultura Científica, Centro de Astrobiología CSIC-INTA, Torrejón de Ardoz, 28850, España.

<sup>(4)</sup> Dpto. de Ingeniería de Computadores, Universidad Miguel Hernández de Elche, 03202, España.

<sup>(5)</sup> Dpto. de Física Aplicada, Universidad Miguel Hernández de Elche, 03202, España.

**Abstract-** This document provides information about the software developed in LabVIEW for the reduction of radio astronomy data obtained by the PARTNER DSS 61 radio telescope. Taking advantage of the advances made in the last decades in computer science, this software version provides a wide range of data analysis and visualization tools, such as the use of configurable filtering by Wavelet Transform, different methods of estimating the system temperature or automatic storage of results in a database, among others. In this way, with this new program and the antenna control software, it is possible to offer to the student a set of professional tools that allow taking the study of the universe to any personal computer.

## I. INTRODUCCIÓN

Desde que fuera creado PARTNeR (Proyecto Académico del RadioTelescopio de NASA en Robledo) en 2004, se han llevado a cabo diferentes tareas de adaptación y mejoras para la nueva aplicabilidad educativa del radiotelescopio DSS 61 [1]. Aprovechando la funcionalidad de almacenamiento de los resultados de observación por el nuevo software de control, se comenzó a diseñar un programa de análisis y reducción de datos radioastronómicos que permitiera a los científicos obtener los resultados de observación de forma más rápida. Este programa recibió el nombre de HERA (Herramienta de Reducción de datos RadioAstronómicos).

Sin embargo, esta primera versión de HERA no quedó finalizada completamente y presentaba ciertas limitaciones para una posible extensión a su uso educativo. Por este motivo, se decidió llevar a cabo el diseño y desarrollo de un nuevo software de análisis tomando como base el nombre del primer programa, siguiendo así la simbología mitológica que gira alrededor de la radioastronomía.

En este documento, se analizan cada una de las mejoras introducidas en la nueva versión de HERA, así también como la descripción de la metodología empleada. El artículo está dividido como sigue: en la sección II, se comentan sus características principales. En la sección III se resume la estructura general. En IV se analiza el programa de análisis de fuentes puntuales, en V el programa relativo a las fuentes extensas y en VI se reflejan las conclusiones finales de dicho estudio.

## II. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

HERA es una herramienta diseñada en LabVIEW cuya funcionalidad puede resumirse principalmente en tres bloques secuenciales: reducción de los datos radioastronómicos, análisis de los datos reducidos y visualización de los resultados.

Las principales características de diseño de HERA se resumen en los siguientes puntos:

- Diseño modular: el programa HERA ha sido diseñado por módulos independientes que proporcionan distintas funcionalidades. Cada módulo constituye una pestaña de la interfaz de usuario, y la independencia entre ellos ofrece una serie de ventajas, como una mayor comprensibilidad del proceso de reducción, un aumento de la eficiencia, o una menor carga de computación.
- Uso *offline*: a diferencia de como ocurre con el programa de control de la antena, HERA no trabaja en tiempo real. Esto ofrece una importante ventaja, como es la posibilidad de seguir llevando a cabo sesiones de radioastronomía en momentos donde el radiotelescopio no pueda utilizarse.
- Proceso de extracción de datos automatizado: el uso de una misma estructura de almacenamiento de los resultados de observación ha permitido poder diseñar un mecanismo de extracción de éstos totalmente automatizado.

## III. ESTRUCTURA GENERAL

HERA está estructurado en un menú principal que da acceso a dos programas de análisis según la fuente sea puntual o extensa. Ambos programas están a su vez constituidos por un conjunto de módulos de la interfaz de usuario, donde cada uno de ellos puede diferenciarse según al bloque funcional al que pertenece (ver *Fig. 1*).

## IV. FUENTES PUNTALES

En los siguientes apartados se describe de forma detallada el funcionamiento del software de análisis de fuentes puntuales diferenciando cada uno de los tres bloques funcionales.

### A. Reducción de datos

La información de estudio de una fuente puntual son los tránsitos, los cuales representan la distribución de la temperatura de brillo del objeto según el ángulo horario donde se ha realizado el muestreo.

El proceso de reducción de datos comienza con la extracción de estos valores de temperatura de brillo, y para ello, HERA presenta dos métodos:

- ❖ Extracción simple: extrae los valores de temperatura asociados a un tránsito sobre una fuente.
- ❖ Extracción múltiple: extrae los valores de temperatura asociados a varios tránsitos sobre la fuente, de los cuales se realiza una media. Este método generalmente proporciona resultados de medición más fiables.

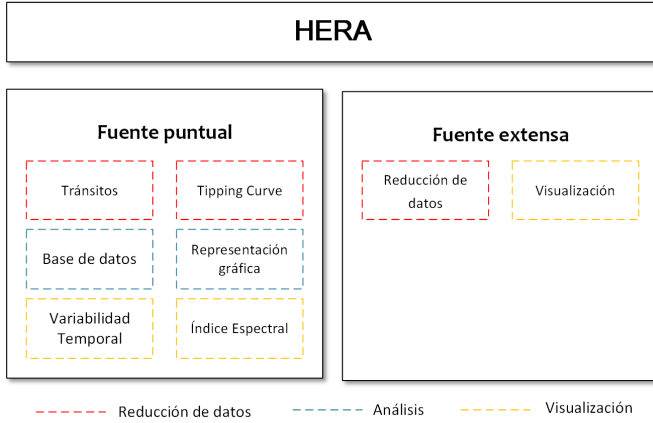


Fig. 1. Estructura general de HERA

Los valores de temperatura de brillo extraídos hacen referencia a la radiación de la fuente medida en la antena, la cual dista mucho de ser igual a la radiación real de la fuente. La diferencia entre ambos parámetros viene impuesta por las contribuciones no deseadas que modifican las propiedades de las ondas electromagnéticas emitidas por la fuente. Esta relación queda simplificada matemáticamente a través de [2]:

$$T_m = T_{sist} + A_{atm} \cdot T_f \quad (1)$$

donde  $T_m$  es la temperatura de brillo de la fuente medida en la antena, que a su vez corresponde a los valores extraídos de un tránsito,  $T_f$  es la temperatura real de la fuente,  $A_{atm}$  es la atenuación atmosférica y  $T_{sist}$  es el ruido total añadido a la señal de la fuente definido como temperatura del sistema, en el que vienen implícitos el ruido introducido por el sistema receptor y el ruido debido a la emisividad del cielo.

Siguiendo este modelo, el objetivo del proceso de reducción es determinar la información radiométrica real de la fuente tras la estimación de las componentes no deseadas añadidas a la información recibida. Los métodos para averiguar cada una de estas componentes son diferentes. Mientras la estimación de la atenuación atmosférica se realiza por medio del uso de las *tipping curve* siguiendo la misma metodología descrita en [2], la estimación del ruido de cielo se realiza directamente a partir de los datos del tránsito.

Normalmente, la obtención del ruido de cielo debería ser un proceso sencillo. Sin embargo, el bajo rango dinámico de las fuentes estudiadas en PARTNeR y la no uniformidad de las alas del tránsito, que corresponden a los valles de lo que se asemeja

a una distribución gaussiana, conlleva tener que emplear complejas herramientas de estimación.

En función del tipo de tránsito y características de sus alas (ver *Tabla 1*), HERA ofrece dos métodos para la estimación de la temperatura de sistema:

- ❖ Método simple: el valor estimado de  $T_{sist}$  corresponde con el mínimo del tránsito.
- ❖ Método polinómico: proporciona una estimación más precisa de la temperatura de sistema. Para ello, a través de unos cursores sobre la gráfica, el usuario determina qué componentes están asociadas al ruido de cielo, para posteriormente realizar un ajuste polinómico de orden parametrizable. El valor estimado del ruido de sistema se obtiene a partir de la media de los valores del ajuste polinómico.

TABLA I. Parámetros de elección del método de detección y eliminación de temperatura de sistema.

| Método polinómico                           | Método simple  |
|---|--|
| Inclinación en las alas del tránsito.       | Componente continua de ambas alas aproximadamente iguales. |
| Elevadas fluctuaciones en la zona de cielo. | Bajas fluctuaciones.                                       |

Una vez eliminado el ruido base restando el valor estimado a todo el tránsito, la temperatura de la fuente atenuada por la atmósfera  $T_f'$  se obtiene de la diferencia entre el valor máximo del tránsito y el ruido base estimado (ver *Fig. 2*). Es decir:

$$T_f' = \text{máx}\{f(\theta)\} - E[T_{sist}] \quad (2)$$

donde  $f(\theta)$  es la función tránsito de la temperatura de brillo según el ángulo horario y  $E[T_{sist}]$  es el valor estimado de la temperatura de sistema según el método empleado.

Debido a la posible presencia de fluctuaciones en la región de la fuente que pueden generar un error adicional en el cálculo del valor máximo del tránsito, HERA lleva a cabo un ajuste gaussiano por medio de la siguiente expresión [3]:

$$F(x) = A + B \cdot \exp\left(-\left(\frac{(x-D)}{C}\right)^2\right) + E(x-D) \quad (3)$$

donde A representa la componente continua del tránsito, B la amplitud máxima del ajuste gaussiano, D la muestra a la amplitud máxima, C el ancho de haz a media altura y E el error producido por el nivel de continua.

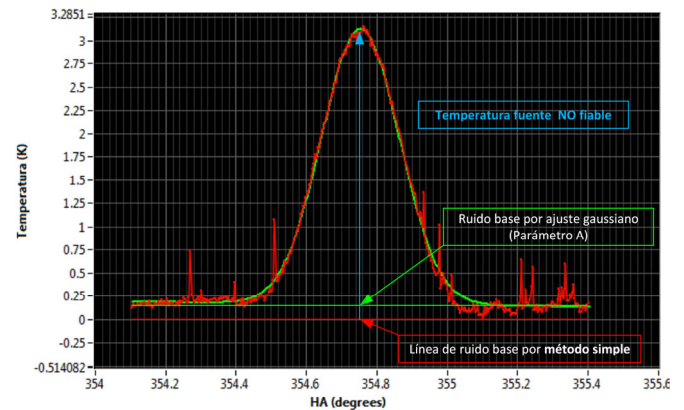


Fig. 2. Ejemplo de comparación del parámetro A con la línea cero correspondiente al ruido base eliminado.

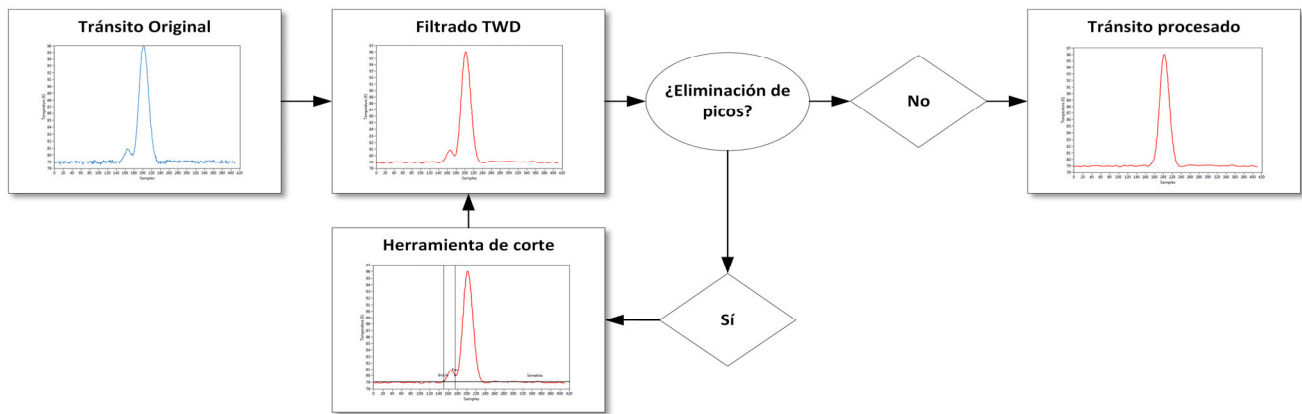


Fig. 3. Diagrama de funcionamiento del módulo de tratamiento de señal.

Por otra parte, el ajuste gaussiano permite además comprobar el grado de fiabilidad del ruido base estimado en el paso anterior por medio de su comparación con el parámetro  $A$  (ver Fig. 2). Esta funcionalidad lógicamente es válida siempre y cuando el ajuste también sea fiable, es decir, su error cuadrático medio sea pequeño (ver Fig. 5).

Cuando el ajuste gaussiano no se adapta adecuadamente al tránsito, HERA proporciona un módulo de *Tratamiento de señal* mediante el cual se consigue minimizar los errores de estimación del ruido base y el pico del tránsito utilizando herramientas de filtrado por Transformada Wavelet y eliminación de fluctuaciones de baja frecuencia en la zona de cielo (ver Fig. 3).

Después de averiguar el valor de  $T_f'$  para cada banda de observación, el proceso de reducción de datos finaliza tras la estimación y eliminación de la atenuación atmosférica [4].

Tomando como base el procedimiento usado en PARTNeR para la eliminación de la atenuación atmosférica, HERA ha introducido como novedad en esta sección una mayor rapidez y sencillez en la obtención de los resultados.

### B. Análisis de la fuente puntual

El análisis de la fuente astronómica parte de los datos de temperatura de brillo y densidad de flujo obtenidos en la fase de reducción. El proceso de caracterización está enfocado en HERA a través del estudio del origen de radiación del cuerpo celeste y su variabilidad temporal para estimar otras características, como su tamaño.

El origen de radiación se averigua a partir del cálculo del índice espectral, cuya metodología viene descrita detalladamente en [5]. Según su valor, la radiación de la fuente puede clasificarse según radiación sincrotrón, de frenado, o radiación térmica.

Además de caracterizar el origen de la emisión de la fuente y así deducir sus propiedades físicas, también resulta interesante analizar la variabilidad de sus valores de emisión con el fin de buscar posibles patrones. Este es el objetivo del módulo de *variabilidad temporal*, y mediante la cual sería posible estimar el tamaño de estos objetos astronómicos en términos de años luz según la variación de su luminosidad [6].

### C. Herramientas de visualización de datos

Los módulos englobados como herramientas de visualización gráfica tienen como objetivo proporcionar una

perspectiva distinta del análisis radioastronómico que consolide los conceptos aprendidos.

Estas herramientas son:

- ❖ Simulación: a través de esta funcionalidad el usuario puede observar una simulación de la posición relativa de la fuente en coordenadas ecuatoriales y las líneas de visión de ésta a lo largo del movimiento de rotación terrestre (ver Fig. 5).
- ❖ Representación en 3D de los tránsitos reducidos: su objetivo es poder observar fácilmente la relación de los anchos de haz y las temperaturas de brillo de la fuente en cada banda.
- ❖ Base de datos: permite que los resultados obtenidos con HERA sean guardados de forma automática en una base de datos de Excel, proporcionando así una mayor organización de los resultados para posteriores análisis.
- ❖ Mapa galáctico: ofrece la posibilidad de representar las fuentes almacenadas en la base de datos en un mapa galáctico interactivo.

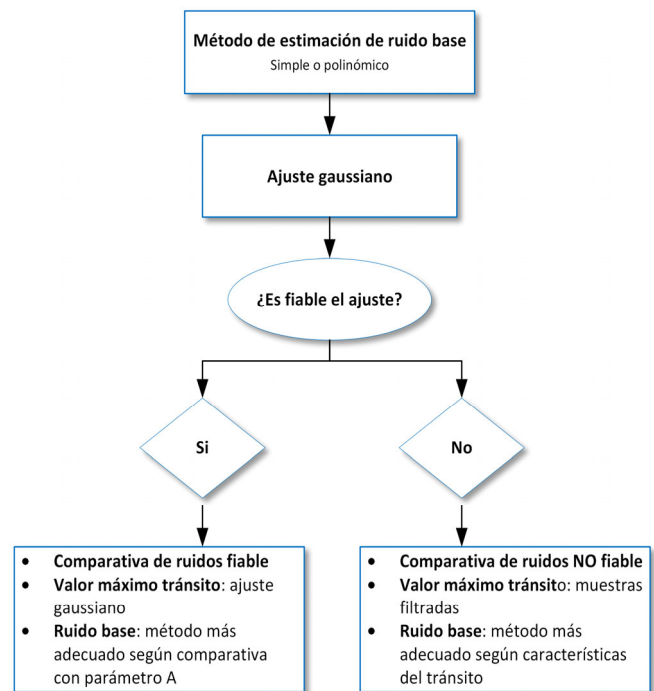


Fig. 4. Diagrama ilustrativo del proceso de obtención de la temperatura de la fuente atenuada por la atmósfera  $T_f'$ .

## V. FUENTES EXTENSAS

Para analizar las fuentes extensas se realizan mapeos, los cuales consisten en un conjunto de *tránsitos* o *scannes* realizados en ascensión recta para distintos valores de declinación, formando una estructura bidimensional.

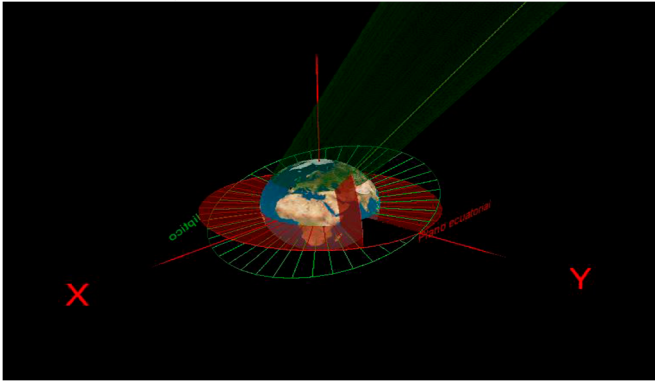


Fig. 5. Simulación de la situación de apuntamiento.

A continuación, se analizan los módulos en los que está compuesto el programa de fuentes extensas, describiendo la metodología empleada para el proceso de reducción de datos y las herramientas de visualización disponibles.

### A. Reducción de datos

El procedimiento de reducción en este caso sigue los mismos pasos que el programa de fuentes puntuales.

La herramienta de detección y eliminación de temperatura de sistema también está compuesta por dos métodos:

- ❖ Método simple: método análogo al programa de fuentes puntuales.
- ❖ Método complejo: se basa en la clasificación de los *scannes* entre aquellos que pasan por la fuente y los que sólo transcurren por la zona de cielo, de manera que el ruido base sea determinado únicamente a partir de éstos últimos. Esta clasificación de *scannes* se realiza de forma automática hallando la varianza de cada uno de los *tránsitos* que forman el mapeo y comparándola con la moda del vector varianza finalmente formado (ver Fig. 6). Finalmente, una vez establecidos los *scannes* pertenecientes a la zona de cielo, la temperatura de sistema es la media del conjunto de valores.

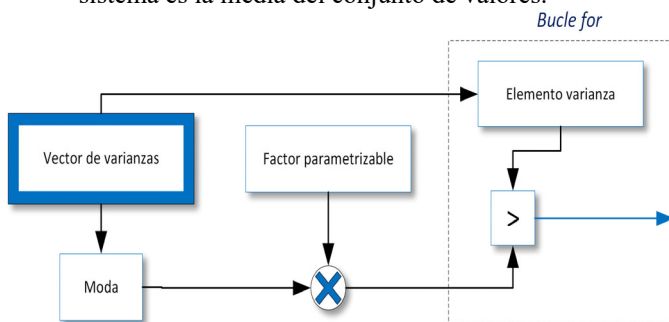


Fig. 6. Diagrama del algoritmo de clasificación entre *tránsitos* asociados a la zona de cielo y *tránsitos* asociados a la fuente astronómica.

Respecto al proceso de eliminación de la contribución atmosférica, en fuentes extensas se sigue la misma metodología que en el programa de fuentes puntuales, salvo la diferencia de que en este caso es necesario averiguar cada uno de los valores de atenuación atmosférica asociados a los ángulos de elevación de cada *scan*.

Como funcionalidades auxiliares, HERA también dispone en este programa de herramientas de suavizado mediante filtrado por Transformada Wavelet y ajuste gaussiano de los *tránsitos* que han sido clasificados como *tránsitos* que pasan por la fuente. Lógicamente, esta última aplicabilidad es útil en aquellos mapeos con estructuras adecuadas a este tipo de ajustes (ver Fig. 7).

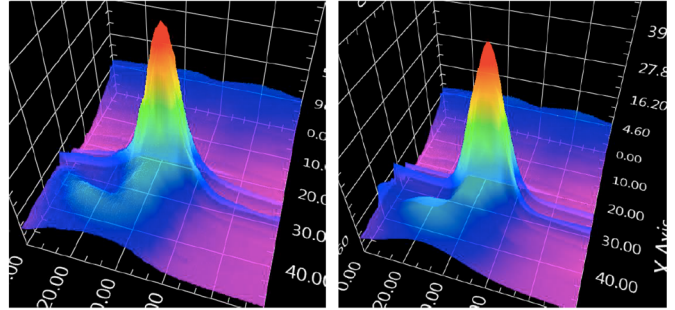


Fig. 7. Diferencia entre un mapeo reducido de Sagitario A\* sin utilizar un ajuste gaussiano (izquierda) y con ajuste gaussiano (derecha).

### B. Visualización

Esta pestaña tiene como objetivo proporcionar las herramientas de visualización de los resultados reducidos del mapeo. La interfaz está constituida por dos gráficos: uno de dos dimensiones donde se muestra la fuente en un mapa de colores, y un gráfico de tres dimensiones que proporciona una mejor perspectiva sobre la estructura del mapeo (ver Fig. 7).

## VI. CONCLUSIONES

Siguiendo las líneas de desarrollo llevadas a cabo en PARTNeR de ofrecer mejores herramientas para estudiar el mundo de la radioastronomía [7], HERA ha sido optimizada dotándola de un amplio número de nuevas funcionalidades.

Basándose en un diseño donde prima la simplicidad, fiabilidad y escalabilidad, se han implementado diferentes módulos que proporcionan herramientas parametrizables para la reducción y el análisis de los datos radioastronómicos. Por otro lado, una visualización que mostrara mapa de contornos de fuentes externas se implementará para la siguiente versión.

Con todo esto, el propósito final de HERA, es ofrecer una herramienta útil a los estudiantes para el estudio del universo, mediante la cuál, aprovechando su carácter *offline*, puedan llevar a cabo sus tareas en cualquier momento y desde cualquier ordenador personal.

## REFERENCIAS

- [1] Equipo PARTNeR. “Orígenes”. Disponible en: <http://www.partner.cab.inta-csic.es/index.php?Section=Origenes>.
- [2] Equipo PARTNeR. “Reducción de datos en PARTNeR”. PARTNeRama: Número 2. 2008.
- [3] S. Pérez Cano. “Diseño y desarrollo de software con LabVIEW para el control de la antena DSS 61 de PARTNeR”. 2008
- [4] Equipo PARTNeR. “Conceptos técnicos de un radiotelescopio y de la radiación recibida”. 2003.
- [5] Equipo PARTNeR. “Índice espectral de una radiofuente”. Disponible en: [http://partner.cab.inta-csic.es/Upload/201306/PARTNeR\\_actividad\\_indice\\_espectral.pdf](http://partner.cab.inta-csic.es/Upload/201306/PARTNeR_actividad_indice_espectral.pdf)
- [6] Marie-Helene Ulrich. “Variability of Active Galactic Nuclei”. Oxford Institute of Physics and MacMillan. 1999.
- [7] A. Vera Pérez “Diseño de software para análisis y reducción de datos radioastronómicos de la antena dss 61 de PARTNeR”. 2016