

¿QUÉ ES LA RED CARMELO?

Enric Fraile Algeciras.

Sociedad de Observadores de Meteoros y Cometas de España.

Correo electrónico: comisionradio@somyce.org

Resumen. (Se trata de la traducción del artículo original realizado por el grupo CARMELO en marzo de 2024): La red de receptores CARMELO (Cheap Amatorial Radio Meteor Echoes LOgger) construida hasta la fecha, aunque pequeña, demuestra el potencial de este innovador proyecto en el campo de la observación de meteoros mediante el método de dispersión de meteoros.

El sistema mide y representa las formas de onda y la frecuencia de cada eco de meteorito individual recibido de una forma nunca vista por ningún observador aficionado.

Este artículo describe algunos tipos de formas de onda que muestra el sistema y analiza, si está presente, el eco frontal, destacando su desplazamiento Doppler. También se describe una posible metodología para calcular la velocidad del meteorito en función de la distancia recorrida por el eco de radio.

Asimismo, se muestra la superposición de mediciones realizadas sobre el mismo evento por diferentes observadores mediante el registro de la secuencia temporal y se plantea la hipótesis de un método para calcular la velocidad a partir de los tiempos de retardo registrados por cada observación individual.

Abstract. (This is a translation of the original article written by the CARMELO group in March 2024): The CARMELO (Cheap Amatorial Radio Meteor Echoes LOgger) receiver network built so far, although small, shows the potential of this innovative project in the field of meteor observation using the meteorscatter method.

The system measures and represents the waveforms and frequency of each individual meteor echo received in a way never seen before by any amateur observer.

This article describes some types of waveforms displayed by the system, and analyses, if present, the head echo highlighting its Doppler shift. A possible methodology for calculating the speed of the meteor as a function of the distance travelled by the radio echo is also described.

It also shows the overlapping of measurements taken on the same event by different observers by recording the temporal sequence and hypothesizes a method for calculating the speed starting from the delay times recorded by each individual observation.

1. ¿Qué es CARMELO?

El proyecto CARMELO para la recepción de meteoros de radio se describe en la página principal de su sitio web [1]

Otra descripción se publicó en el periódico electrónico “E Meteor News” en 2022 [2], mientras que la descripción de sus primeros meses de funcionamiento se publicó en el mismo periódico en 2023 [3]

Para resumir brevemente lo descrito en los artículos mencionados: CARMELO (Registrador Económico de Ecos de Meteoros de Radio Amateur) consta esencialmente de dos unidades: el receptor y el servidor que procesa los datos recibidos.

1.1. El equipo.

El equipo consiste en un receptor asequible para la mayoría de los astrónomos o radioaficionados interesados, y es completamente digital. A diferencia de otras experiencias de dispersión de meteoros para aficionados, CARMELO no utiliza receptores de radio ni ordenadores personales.

En él, un microprocesador (Raspberry) realiza esencialmente tres funciones:

- Controla un adaptador SDR (Radio Definida por Software) que se sintoniza para escuchar la frecuencia del transmisor elegido por el usuario.
- Muestra la señal de radio, calcula su FFT, mide la amplitud y la frecuencia, y reconoce la presencia de un eco de meteorito.
- Escribe los datos en un archivo de registro que luego envía al servidor.

El dispositivo debe estar conectado a una antena adecuada para recibir la frecuencia elegida, correctamente orientada y ubicada en un lugar abierto y lo más alejado posible del suelo o de edificios.

También debe estar conectado a un módem que permita el acceso a internet.

1.2. El servidor.

El servidor recibe datos en tiempo real. Dado que los datos se generan con dispositivos y software idénticos, se basan en un único estándar y, por lo tanto, son comparables entre sí.

El servidor crea páginas que pone a disposición del usuario; en ellas se puede ver:

- La distribución de los receptores CARMELO en el territorio.
- Las estadísticas del número de eventos registrados hora a hora, que permiten identificar la tendencia de las lluvias de meteoros.
- Todos los eventos registrados en la semana actual representados gráficamente para identificar, para cada uno, la amplitud de la señal, la duración del eco y el observador.
- Al seleccionar un meteorito en esta representación gráfica, se abre la página que representa gráficamente los dos datos medidos con la FFT: la forma de onda y la frecuencia recibida.
- Si el meteorito elegido ha sido observado por más de tres observadores simultáneamente, el servidor crea la superposición de las distintas formas de onda, permitiendo el análisis de los diferentes tiempos de recepción.

2. La red de receptores CARMELO.

La principal diferencia entre los radares de meteoros profesionales y los de aficionados radica en si cuentan o no con un transmisor dedicado.

Los astrónomos aficionados utilizan transmisores de otros fabricantes: muy potentes, con una frecuencia en VHF (Muy Alta Frecuencia) y ubicados a gran distancia.

Desafortunadamente, el abandono de la transmisión de televisión con un estándar analógico en favor del digital y la migración de las emisiones a UHF ha privado a los observatorios de aficionados de muchos transmisores utilizables.

Esta conversión se produjo primero en Europa y luego en EE. UU.

De hecho, actualmente en Europa el mejor transmisor utilizable, si no el único, es el militar de Graves, mientras que en EE. UU. esos pocos transmisores terrestres digitales que se mantuvieron en VHF han reducido drásticamente su potencia.

Por esta razón, la recepción de CARMELO, ubicada en EE. UU., ahora es menor en comparación con años anteriores.

Al momento de escribir este artículo, la red CARMELO en operación cuenta con un receptor en EE. UU., unos diez receptores en Italia y uno en Croacia.

3. La página de eventos.

Esta página registra todos los meteoros observados por la red durante la última semana.

Cada evento se representa frente al tiempo de registro en la escala de abscisas y la potencia radioeléctrica máxima en la de ordenadas.

Cada evento se caracteriza por un símbolo y un color que corresponde al observador que lo registró.

El tamaño del símbolo es proporcional a la duración de la grabación. Al pasar el ratón sobre cada evento, aparece un cuadro que resume los datos esenciales de la grabación; todo esto automáticamente.

4. Las formas de onda.

Al hacer clic en el evento, se pueden ver simultáneamente la forma de onda y la frecuencia: esto es posible porque el servidor grafica el resultado obtenido del cálculo FFT realizado en cada muestreo individual del eco del meteoro de radio.

Las formas de onda son de varios tipos: desde las más similares a los impulsos característicos de los meteoros poco densos hasta las más largas y planas, características de los meteoros superdensos.

Las duraciones varían desde unos cincuenta milisegundos hasta varios segundos. El límite inferior de la duración de la detección de meteoros subdensos viene dado por la duración de los muestreos: en CARMELO, para detectar un meteoro, se necesitan al menos dos muestreos consecutivos.

La duración de cada muestreo depende del rendimiento de los microprocesadores y varía entre un mínimo de 8 y un máximo de 20 milisegundos. Hemos observado que Raspberry p4 aparentemente idénticos, acoplados a adaptadores idénticos, incluso ejecutando el mismo programa, no tienen la misma velocidad.

Con la nueva Raspberry p5, la velocidad aumenta aproximadamente un 25 %.

Los meteoros superdensos muestran la curva descendente esperada considerando la disolución del cilindro de plasma ionizado a través de la recombinación de electrones libres de iones.

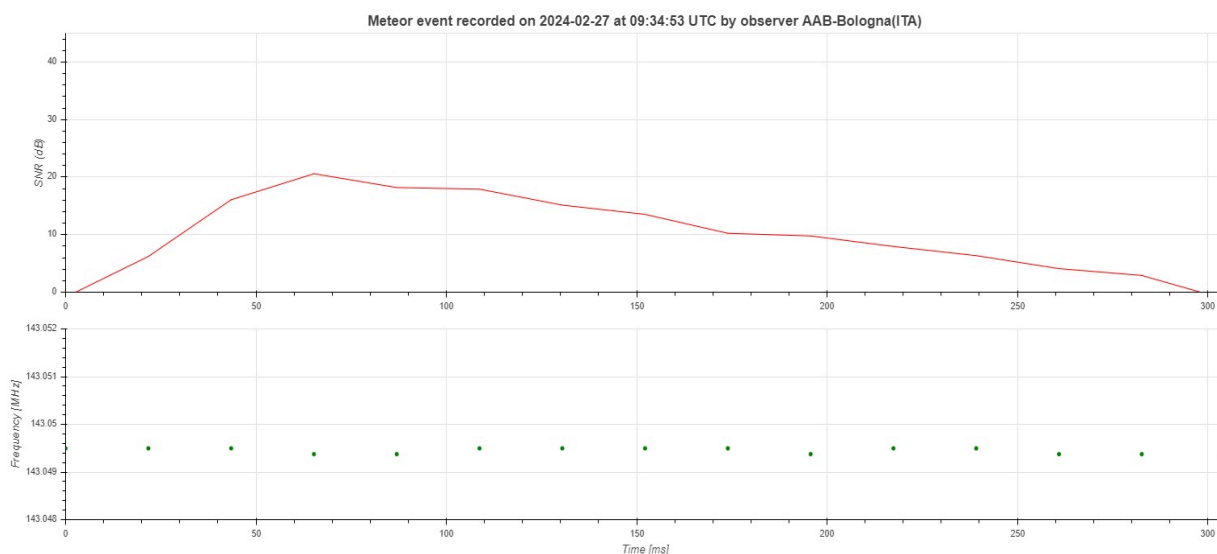


Figura 1. Gráfico con forma de onda (arriba en rojo) y frecuencia (abajo en verde)

Otras formas de onda, en cambio, muestran un colapso vertical repentino.

Algunos meteoros superdensos muestran un comportamiento sorprendente a primera vista.

Tras un período de saturación, aparecen oscilaciones con una duración de unos cien milisegundos. Estas oscilaciones también anulan la señal. Podría pensarse que este comportamiento se debe a la presencia de vientos a gran altitud que, como sabemos, pueden fragmentar el cilindro de electrones libres y generar ecos que llegan tras diferentes longitudes de trayectoria y con distintas fases.

Esta interpretación contradice dos observaciones: las oscilaciones no son aleatorias, es decir, con diferente duración y amplitud; además, no hay variaciones en la frecuencia recibida que sugieran desplazamientos en el espacio.

Más bien, estas oscilaciones sugerirían zonas de Fresnel, aunque la presencia de estas zonas sea una característica física en el dominio espacial, mientras que lo que observamos es en el dominio temporal. Los ecos con este tipo de oscilación aparecen exclusivamente en recepciones de larga duración (superior a un segundo) y presentan oscilaciones en un rango de frecuencia de aproximadamente 3 a 8 períodos por segundo.

Otra posible interpretación se refiere al funcionamiento del transmisor, que, como se mencionó, es un radar militar. No disponemos de información precisa al respecto y, por lo tanto, no podemos saber si la potencia transmitida sufre variaciones a lo largo del tiempo que justifiquen este tipo de variaciones en la señal recibida, ya que dichas variaciones, como se mencionó, no presentan una tendencia que se repita regularmente.

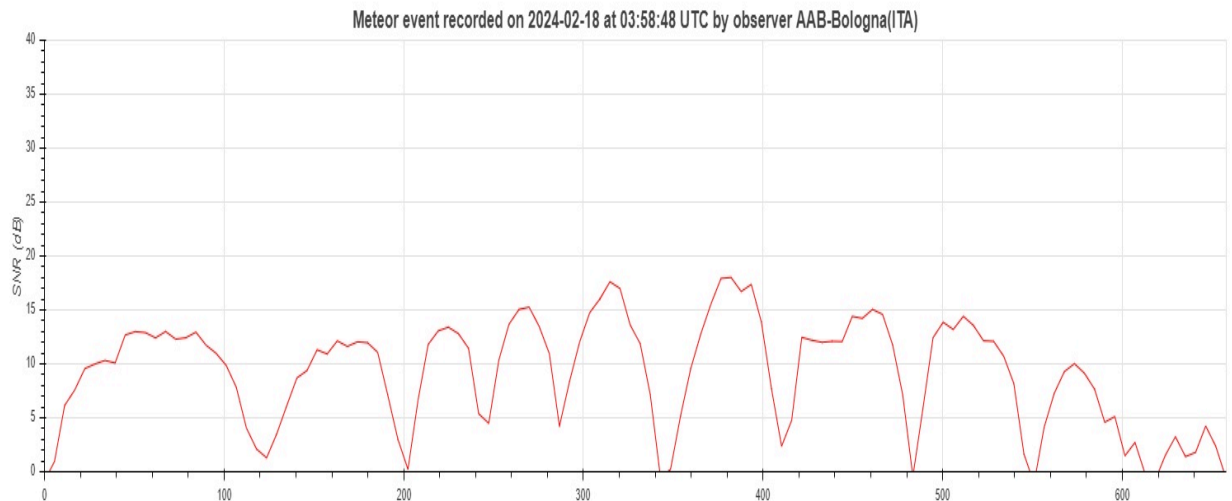


Figura 2. Oscilaciones.

Las formas de onda ilustradas hasta ahora se refieren a la recepción de ecos procedentes del punto de reflexión P a lo largo del cilindro de plasma formado por ionización y, por consiguiente, por la creación de electrones libres (véase la Figura 3).

En el punto P se dan las condiciones fundamentales de reflexión:

- En él, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- P es también el punto de tangencia entre la recta que representa el meteorito y la elipse que tiene como focos el transmisor y el receptor.
- Además, el plano sobre el que se encuentra el triángulo TPR es ortogonal a la trayectoria del meteorito.

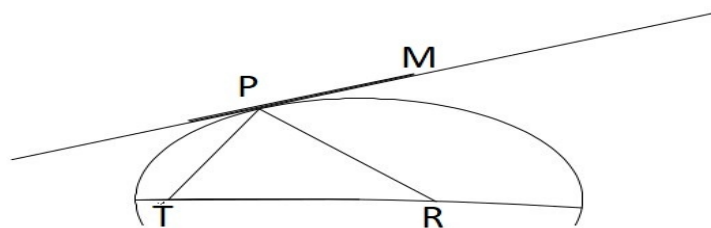


Figura 3. La condición de reflexión: T es el transmisor, R el receptor, P el punto de reflexión colocado en el cilindro de electrones ionizados (Cis Verbeeck, Jean-Louis Rault, 2022)

3. El eco de cabeza.

Como se mencionó, sin la realización de la condición de reflexión especular, no se produce recepción; sin embargo, es posible que antes de la creación de este cilindro, o incluso independientemente de ella, sea posible que un receptor identifique el eco de cabeza.

El eco de cabeza se genera en la parte frontal del meteoróide de radio, donde la ablación del meteoróide genera la primera aparición del plasma, que adquiere una forma esferoidal. En esta forma, la reflexión es omnidireccional y, por lo tanto, se puede recibir independientemente de las condiciones típicas de la reflexión especular, descritas anteriormente.

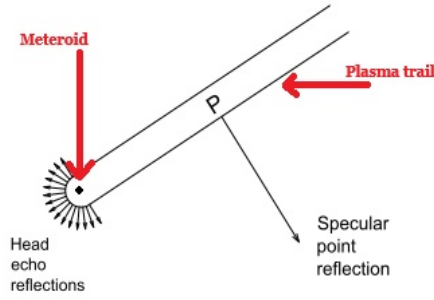


Figura 4. Representación artística de los dos tipos de reflexión.

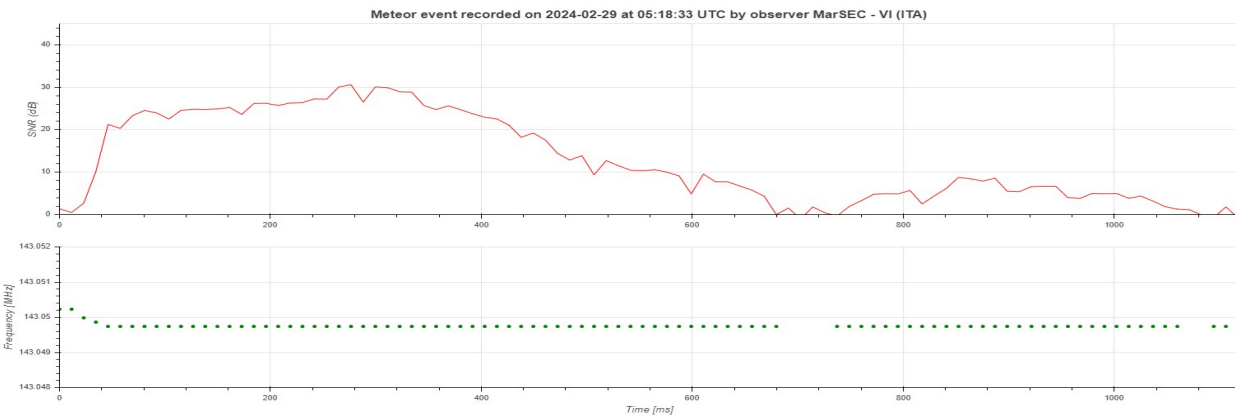


Figura 5. Eco de cabeza. Durante los primeros 50 milisegundos, la señal proviene de la esfera de plasma causada por el meteorito que avanza en la ionosfera. La potencia recibida (en rojo) es baja y la frecuencia (en verde) muestra el desplazamiento Doppler.

En el caso del meteorito de la Figura 5, se observa que los primeros 50 milisegundos describen el eco de cabeza: la señal es muy débil en comparación con la debida al cilindro de electrones libres que se crea después de los primeros 50 milisegundos.

A pesar de la pequeña cantidad de potencia recibida, el desplazamiento Doppler debido a la velocidad del meteorito es evidente.

CARMELO registra la frecuencia de cada muestreo con una precisión de ± 61 Hz.

$$v_m = \frac{\Delta f}{2f_0} c \quad (1)$$

La ecuación del desplazamiento Doppler en el caso de una recepción por dispersión frontal, como en nuestro caso, donde Δf es el desplazamiento Doppler, f_0 la frecuencia del transmisor y c la velocidad de la luz. (Richardson y Kuneth, 1998).

El desplazamiento Doppler se debe a la variación de la velocidad medida en la componente radial del movimiento del meteorito: esta variación sigue la tendencia de la ecuación:

$$\Delta f = \text{sgn}(\Delta t) \sqrt{\left(\frac{2f_0}{c}\right)^2 \frac{v_m^2}{\frac{r_0^2}{v_m^2 \Delta t} + 1}} \quad (2)$$

Donde asigna el signo algebraico debido a la aproximación o partida, fo es la frecuencia del transmisor, la velocidad del meteoro, la distancia entre el meteoro y el receptor y la duración del desplazamiento Doppler observado. (Richardson y Kuneth 1998).

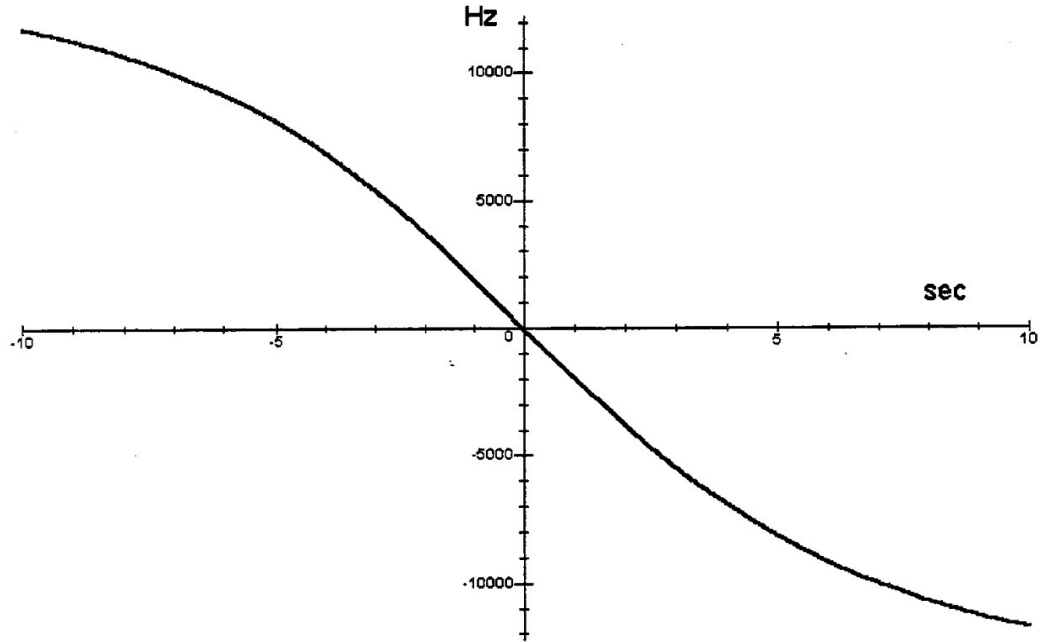


Figura 6. Tendencia teórica del desplazamiento Doppler.

En la Figura 6 se puede ver la curva teórica calculada por Richardson y Kuneth en su artículo. La segunda parte de la curva, después del tiempo , se puede ignorar, ya que la señal que se aleja casi nunca es visible, eclipsada por la reflexión especular. En consecuencia, (2) se reduce a:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{2f_0}{c}\right)^2 \frac{v_m^2}{\frac{r_0^2}{v_m^2 \Delta t} + 1}} \quad (3)$$

A partir de la ecuación (3) es posible reproducir sintéticamente la misma curva:

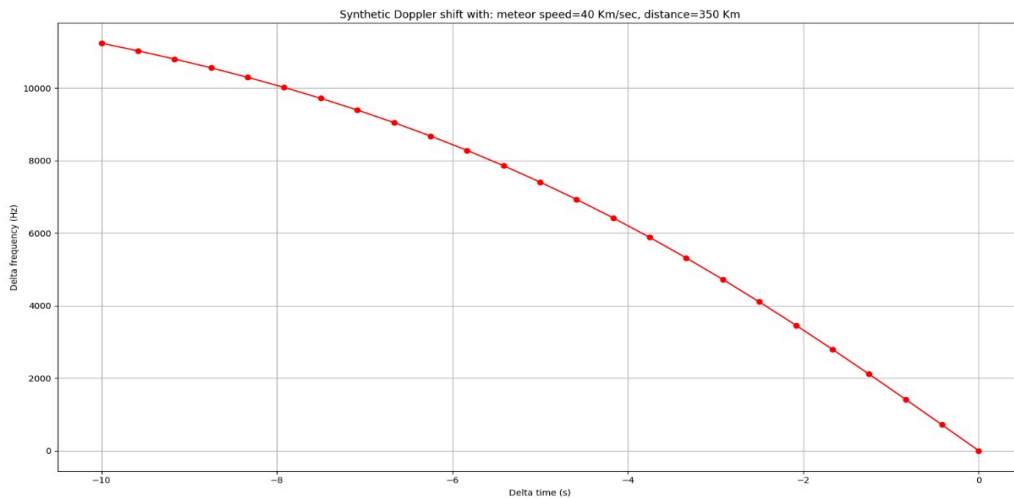


Figura 7. La curva de la ecuación (2) reproducida en la computadora utilizando las mismas cantidades utilizadas por los autores (Richardson y Kuneth 1998).

Fijando cualquier valor dentro de (3) podemos resaltar cómo, para valores altos de (es decir, meteoros rápidos), y valores bajos de (es decir, recepciones relativamente cercanas) la parte inicial de la curva tiende a una asíntota en la que:

$$\Delta f = 2 \frac{v_m f_0}{c} \quad (4)$$

De donde es posible obtener:

$$v_m = \frac{\Delta f}{2f_0} c \quad (5)$$

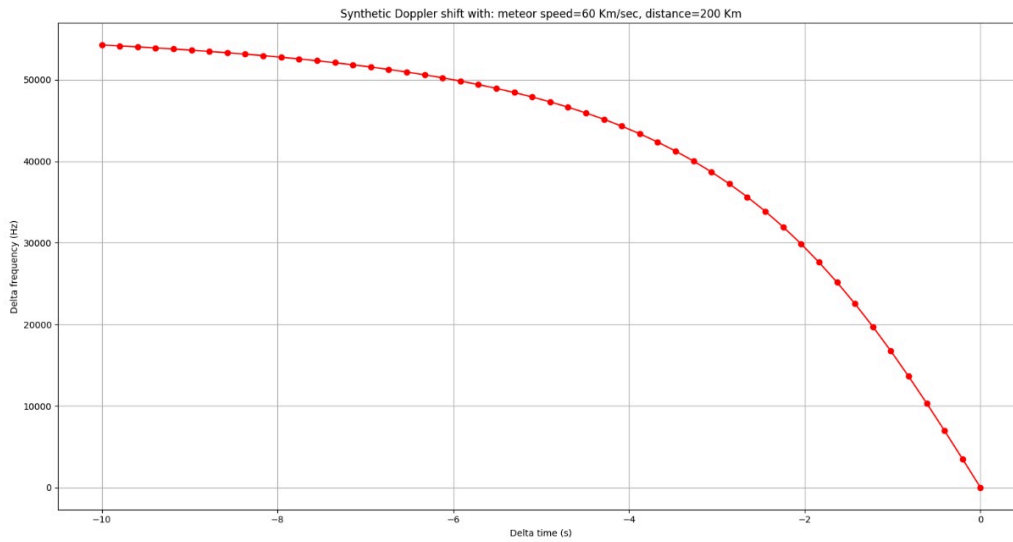


Figura 8. La curva de la función (2) para alto.

Reescribiendo (3) para calcular la velocidad del meteoro en función de los demás parámetros obtendremos:

$$v_m = \sqrt[4]{\frac{(\Delta f)^2 c^2 r_0^2}{4 f_0^2 \Delta t}} * \left(1 - \frac{c^2 \Delta t}{4 f_0^2}\right)^{-1} \quad (6)$$

En la Figura 9, consideramos una recepción con un desplazamiento Doppler evidente. En ella, es igual a 396 ms, mientras que es de 1587 Hz.

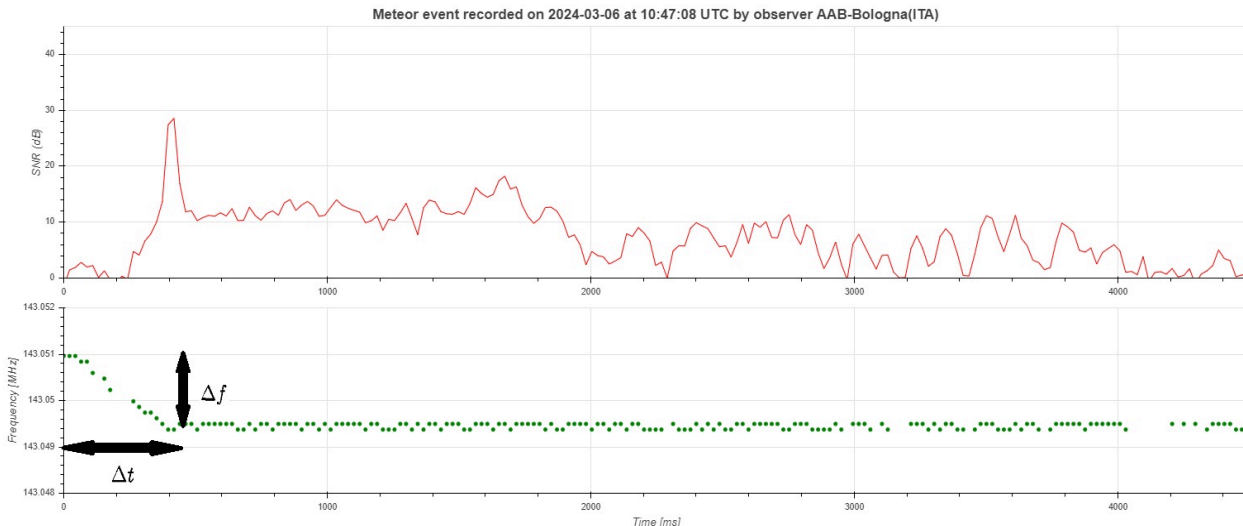


Figura 9. Δf y Δt en el desplazamiento Doppler.

Suponiendo una distancia de 250 km (a medio camino entre Graves y Bolonia) y sustituyendo estos valores en (6), la velocidad del meteoro es de 26 km/s.

De forma más general, en la Figura 10 representamos la curva derivada de (6) para cada valor de distancia entre el meteoro y el receptor.

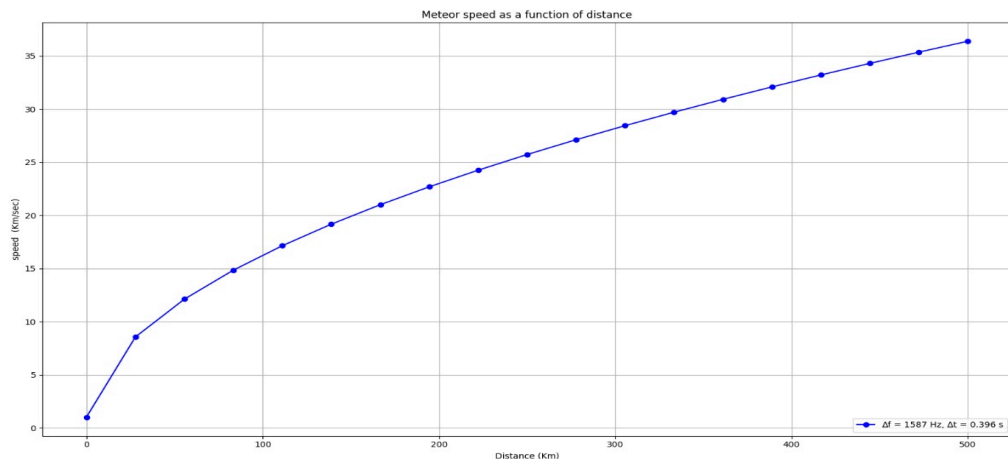


Figura 10. Velocidad del meteoro en función de la distancia al receptor

6. Recepciones simultáneas.

La red de receptores en funcionamiento al momento de escribir este artículo cubre una pequeña parte de nuestro país. Las distancias entre los observatorios varían desde decenas de kilómetros hasta varios cientos de kilómetros.

Muchos ecos de meteoros se observan simultáneamente en varios observatorios: esta condición puede comprobarse haciendo clic en el botón "Ver recepciones simultáneas".

Como puede observar, las recepciones simultáneas del mismo evento son más probables con receptores cercanos, pero, especialmente en el caso de los ecos más potentes, también pueden verse desde ubicaciones relativamente distantes.

Las formas de onda tienen diferentes amplitudes: esto depende de varios factores: en primer lugar, no todas las antenas tienen la misma ganancia y, sobre todo, no todas las condiciones de observación son óptimas: algunos observatorios tienen edificios o terrenos cerca de la antena, lo que les impide alcanzar las mejores condiciones de recepción. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que diferentes observadores reciben la señal desde distintos puntos de la trayectoria, por lo que es normal que el grado de ionización de los distintos puntos de la trayectoria sea, de hecho, diferente. Un punto con menor ionización conlleva, por lo tanto, una menor reflexión y una recombinación más rápida de iones y electrones libres, con la consiguiente menor duración del eco.

Las diferencias entre las formas de onda registradas por observadores distantes no siempre pueden explicarse con los argumentos expuestos; existen casos en los que diferentes formas de onda pueden interpretarse como comportamientos diferentes del radiometeor en distintos puntos de su trayectoria.

El gráfico de la Figura 12 muestra uno de los casos que a veces encontramos:

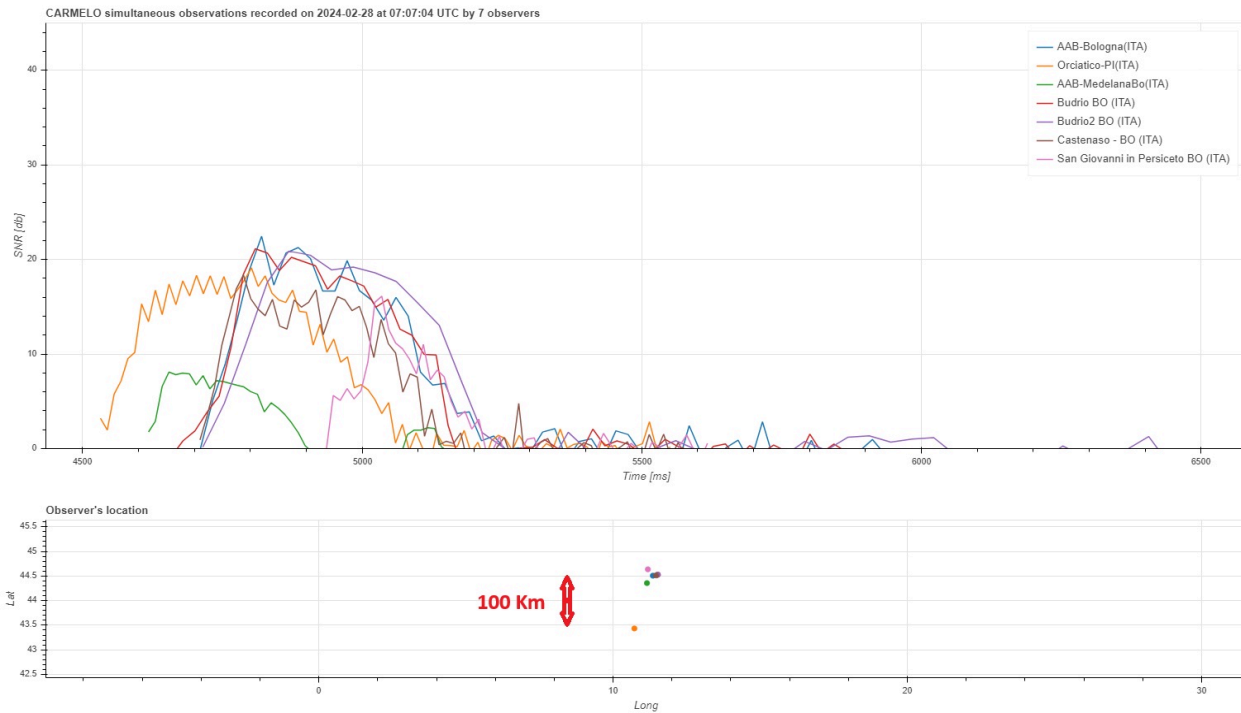


Figura 11. Superposición de formas de onda de 7 receptores diferentes. En la parte superior del gráfico se pueden observar las diferentes amplitudes de la potencia radioeléctrica recibida y los distintos instantes de recepción. En la parte inferior se reproduce la ubicación de los observadores interesados en el territorio.

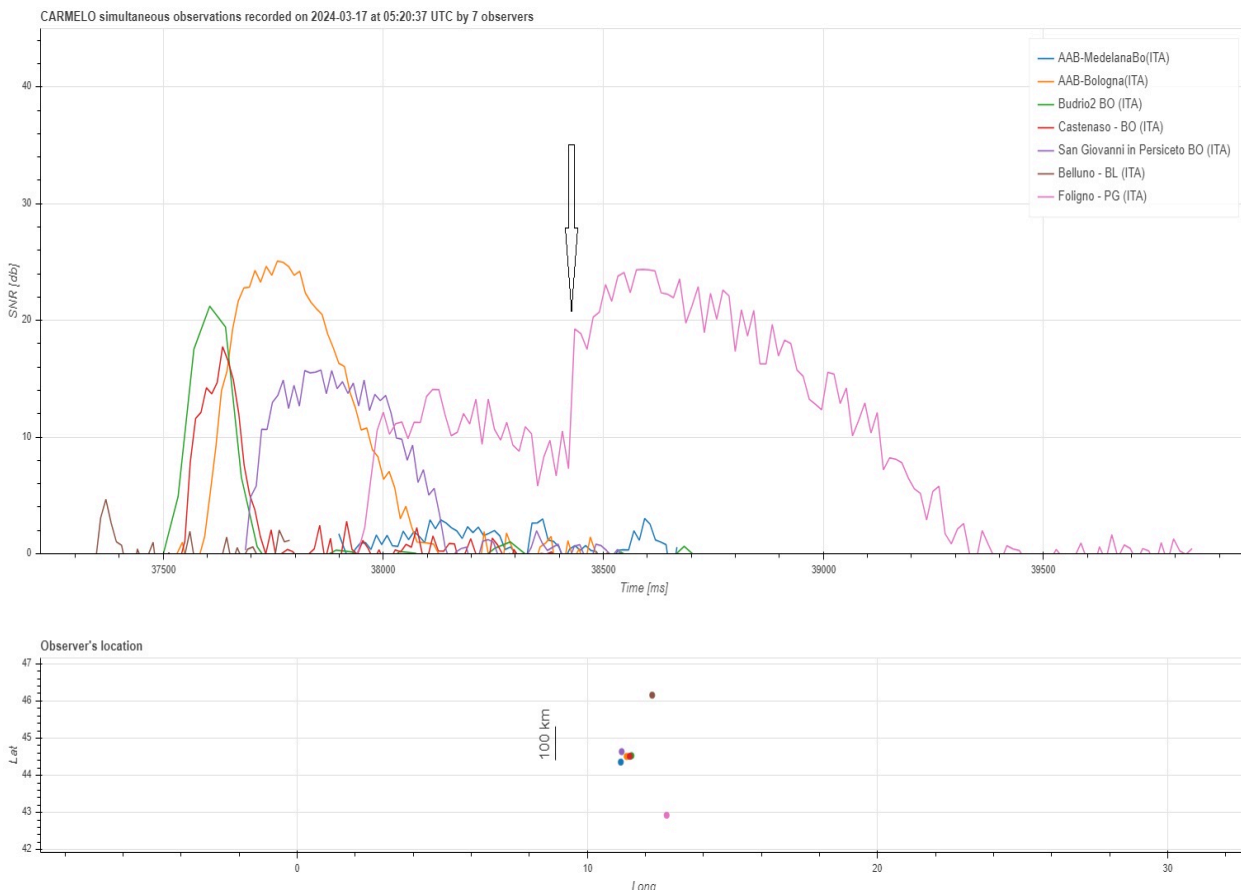


Figura 12. Después de aproximadamente un segundo y varias decenas de kilómetros recorridos, el radiometeor muestra un aumento repentino en la reflexión.

El último observador registra un aumento repentino de la potencia recibida.

La explicación de este hecho se puede atribuir a un error de medición del aparato, pero esta explicación no se sustenta en la experiencia adquirida durante tres años continuos de funcionamiento de CARMELO.

De lo contrario, se podría plantear la hipótesis de que la causa de este aumento de potencia reside en el funcionamiento del transmisor, y en particular en la variación de potencia debida a la rotación del haz de radiación de sus antenas. De hecho, el transmisor Graves, al ser militar, tiene parámetros técnicos difíciles de conocer, y la poca información disponible es escasa y anticuada.

Tras muchos años de observación, la impresión que tenemos es que algo ha cambiado y que las discontinuidades en el barrido del cielo realizado por las antenas Graves han, si no desaparecido, disminuido drásticamente.

Además, el hecho de que el aumento de la recepción de este meteoro de radio sea de unos diez dB, vertical y, sobre todo, detectado por un solo observador, descartaría esta hipótesis. Como alternativa a las explicaciones dadas anteriormente, se podría plantear la hipótesis de que en el momento del aumento de la potencia recibida, CARMELO “vio” una fragmentación del meteoróide y un consiguiente aumento en la producción de plasma ionizado.

Aunque no es común, la observación de aumentos repentinos en la potencia recibida también ocurre en otros casos.

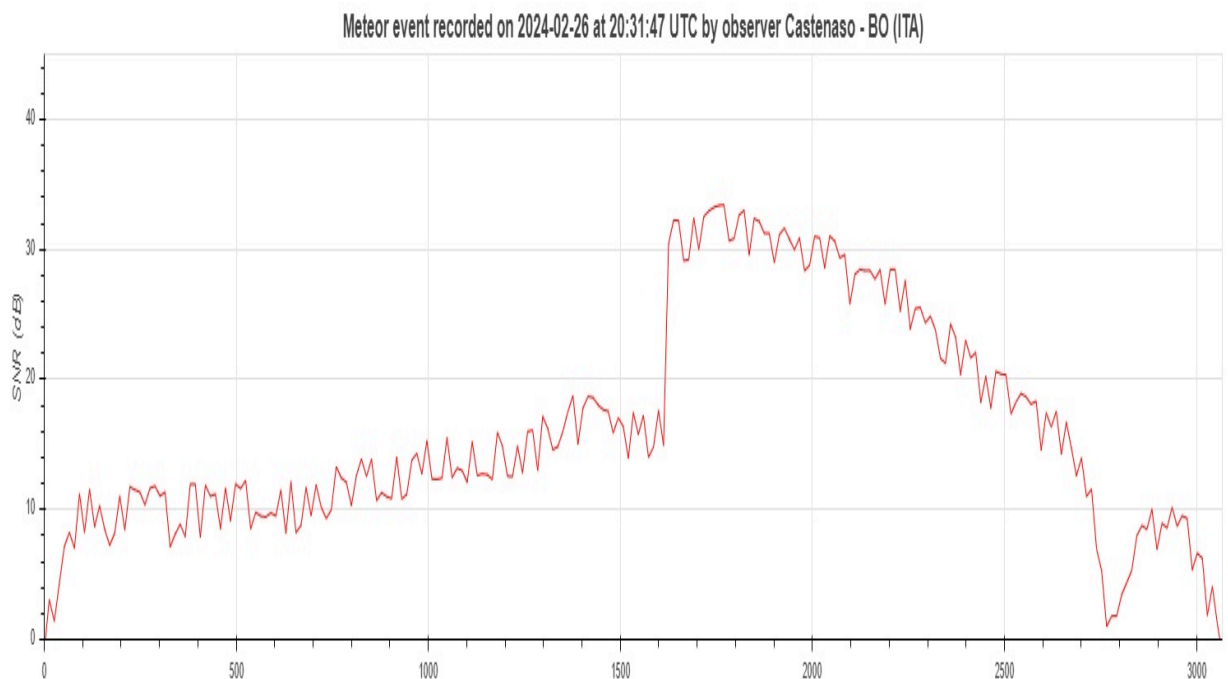


Figura 13. Otro caso de aumento repentino de la potencia recibida.

La observación más interesante se refiere a la secuencia temporal de los flancos ascendentes presentes en las formas de onda registradas por cada observador. Si asumimos que el instante en que la recepción presenta su flanco ascendente inicial es aquel en el que el radiometeor aparece en el punto de recepción en el espejo, podemos asociar los distintos tiempos a estos tránsitos.

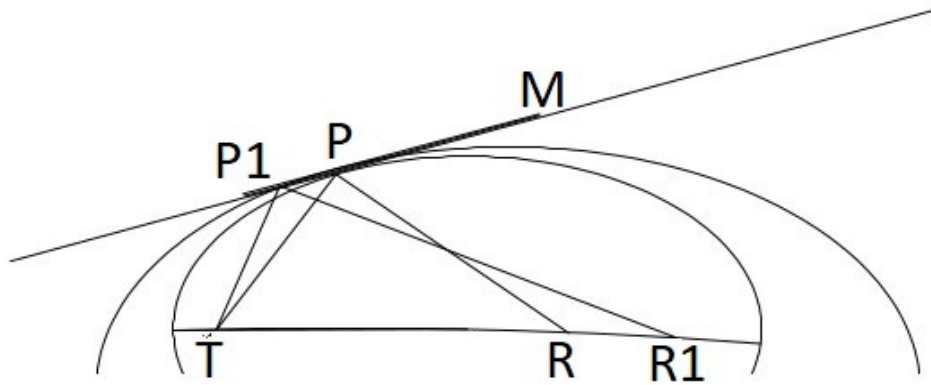


Figura 14. Diferentes receptores ven el mismo meteorito en diferentes puntos de su trayectoria.

Comparando los tiempos de subida de las distintas formas de onda es posible ver la progresión en el espacio de los diferentes momentos en que aparece el cilindro de electrones libres para cada observador.

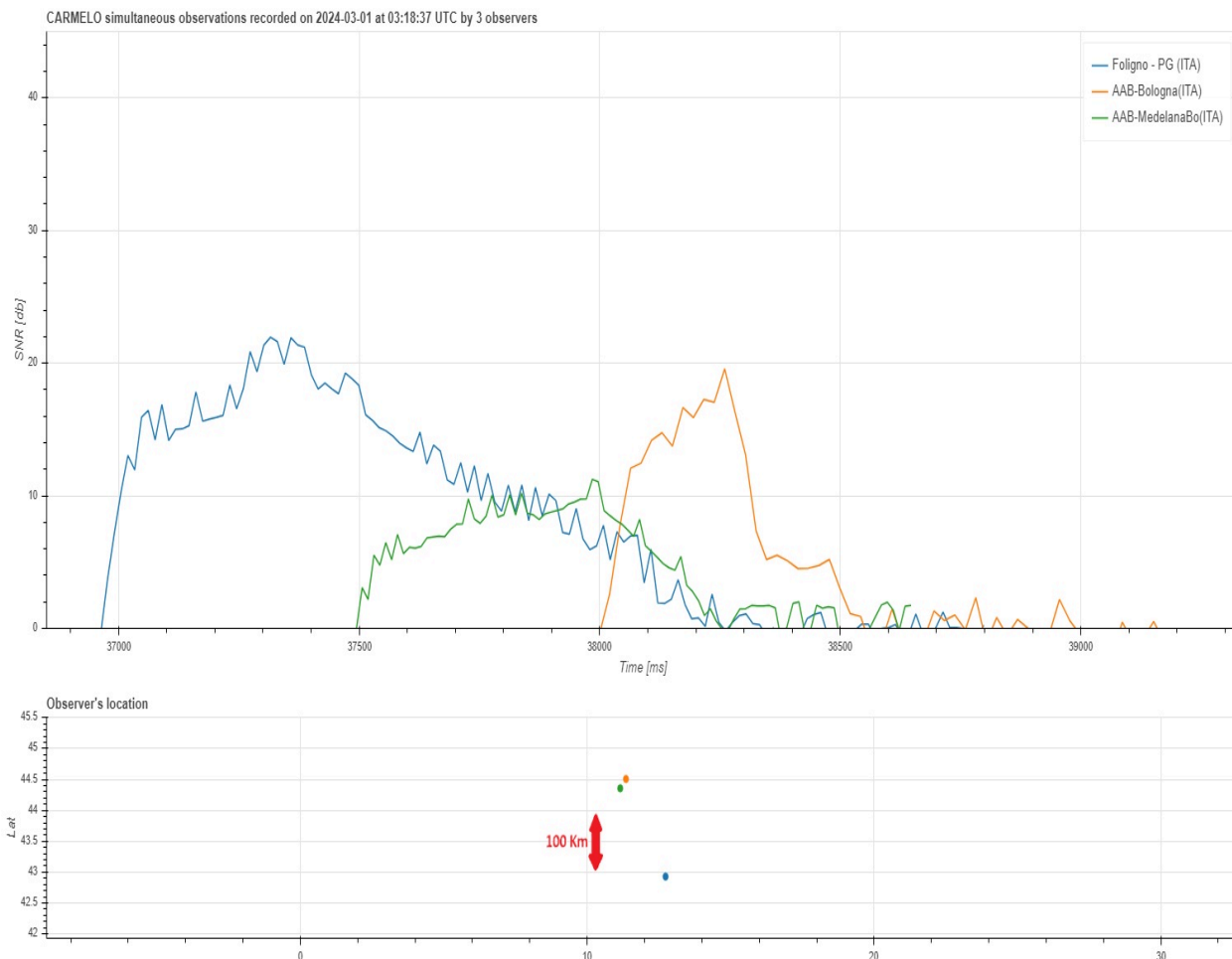


Figura 15. Recepción simultánea por tres observadores: las formas de onda son similares.

En las recepciones simultáneas, los tiempos de retardo siguen una secuencia que tiene una contraparte obvia en la ubicación del territorio: por ejemplo, en la Figura 15 podemos ver cómo la progresión temporal sugiere una trayectoria de suroeste a noreste.

En algunos casos, se producen recepciones simultáneas incluso entre receptores muy

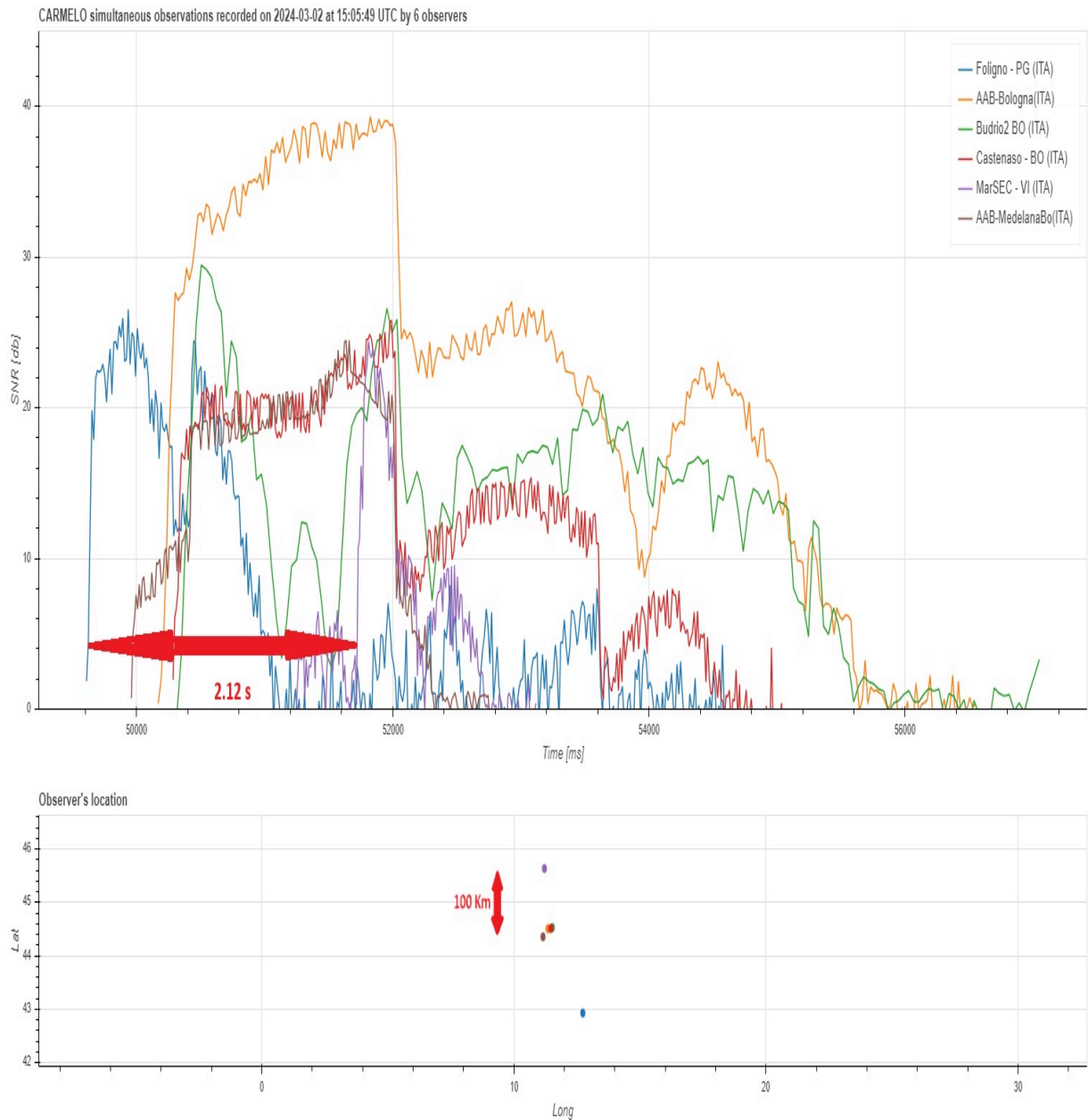


Figura 16. Recepción simultánea por 6 observadores. Los dos más distantes se encuentran a más de 300 km de distancia. El retardo entre los dos flancos de subida es de 2,12 segundos.

7. Cálculo de velocidades.

Las imágenes que se muestran aquí son una pequeña muestra de la cantidad de datos que la red CARMELO proporciona y pone a disposición de observadores y aficionados de forma continua y en tiempo real para cada meteoro observado.

¿Son suficientes los datos proporcionados por las observaciones de la red CARMELO para calcular las velocidades de los meteoros?

Este objetivo ha sido hasta ahora un sueño inalcanzable para los astrónomos aficionados, es decir, para quienes observan meteoros de radio utilizando transmisores de onda continua.

De hecho, la ausencia de una señal pulsada impide cualquier tipo de triangulación y medición de los diferentes tiempos de viaje de los ecos individuales recibidos por múltiples receptores.

Existen dos caminos diferentes: el de los desplazamientos Doppler de los ecos de cabeza y el de los retardos de tiempo en observaciones simultáneas.

- La ecuación (6) muestra la dependencia de con la distancia de recepción.

La distancia es un dato que se puede obtener de las observaciones de vídeo de la red de cámaras utilizada por diversos proyectos en curso de observación de meteoros, entre ellos Prisma, Fripon, GMN, UKMon, IMO Metrec y Cams.

De esta forma, la velocidad se puede calcular mediante el desplazamiento Doppler y será posible compararla con la calculada por las redes mencionadas mediante el análisis de los distintos fotogramas de vídeo disponibles.

- Como ya se mencionó en el párrafo 5, los ecos de frente no siempre están presentes en las recepciones. Esto se debe al menos a dos factores: en primer lugar, a su debilidad y, por lo tanto, a su casi indistinguibilidad del ruido; y, en segundo lugar, a que la orientación geométrica de la trayectoria no siempre permite que el eco de frente aparezca antes de que el meteoro pase por el punto P en relación con la reflexión especular.

Los datos proporcionados por la red CARMELO nos proporcionan los tiempos de retardo de aparición de los frentes de onda en los puntos de recepción especular observados a lo largo de la trayectoria del meteoro.

Nos preguntamos si es posible escribir un sistema de ecuaciones que sitúe los puntos mencionados a lo largo de la tangente a los n elipsoides que tienen como focos T y los puntos representados en la Figura 14.

De esta manera, sería posible delinear tanto la trayectoria como la velocidad. Para ello, es posible buscar los puntos y sus coordenadas mediante el método descrito por M. T. German (2023), calculando la distancia más corta en el camino Tentre los infinitos puntos de la trayectoria del meteoro.

En este caso, también será necesaria una comparación con las grabaciones de vídeo de las redes mencionadas.

8. Conclusiones.

Hasta ahora, la observación de la tasa horaria de actividad meteórica ha sido el único resultado de las experiencias de recepción de radiometeoros con el método de dispersión de meteoros en el ámbito amateur.

El proyecto CARMELO nos permite ir más allá de este objetivo.

Con CARMELO es posible ver en tiempo real la forma de onda de cada radiometeoro observado y analizar cualitativamente la física de cada evento: desde el eco de cabeza hasta la creación del cilindro de plasma reflectante y su disolución.

A nivel cuantitativo, los datos obtenidos nos permiten investigar el desplazamiento Doppler creado en el eco de cabeza y evaluar la velocidad del meteoro en función de la distancia de recepción.

La recepción simultánea del mismo evento por múltiples observadores ubicados en el territorio nos permite obtener los diferentes momentos en que el radiometeoro alcanza el punto de reflexión especular para cada uno de ellos.

El desarrollo de un análisis geométrico de la secuencia temporal puede conducir a la medición de la velocidad y a la evaluación de la trayectoria. El siguiente paso será elegir uno o más eventos que tengan una observación visual simultánea registrada en una de las diversas redes basadas en cámaras de vídeo dedicadas, y a partir de estos datos comparar posición, velocidad y trayectoria en busca de correspondencias tanto en el campo de medición del desplazamiento Doppler del eco de la cabeza, como en la secuencia temporal de recepciones simultáneas.

Bibliografía:

- [1] <http://www.astrofiliabologna.it/carmelo>
- [2] http://www.astrofiliabologna.it/static/file/carmelo/2022_emn.pdf
- [3] http://www.astrofiliabologna.it/static/file/carmelo/2022_emn.pdf
- [4] Cis Verbeeck, Jean-Louis Rault. Radio meteor observations. *HANDBOOK FOR METEOR OBSERVERS*: International Meteor Organization Edited by Jürgen Rendtel 2022
- [5] James Richardson and Werfried Kuneth (1998). *Revisiting the Radio Doppler Effect from Forward-scatter Meteor Head Echoes*. WGN, the Journal of the IMO 26:3
- [6] M. T. German (2023). *Ongoing meteor work*: WGN, the Journal of the IMO 51:4 pag 72 y siguiente