

Holografía acústica con un ordenador portátil

Iván Martí Vidal

Observatorio Espacial de Onsala (Suecia)

Abstract

We present an experiment of acoustic holography, performed with inexpensive material (a multimedia microphone, two speakers, and a computer). This experiment is based on the *Aperture Synthesis Technique*, which is widely used in astronomical interferometry. We also describe some basic concepts of interferometry and provide the necessary software to the reader, to perform this experiment by him/herself. This experiment can be used to help the students better understand some basic principles of wave propagation (e.g., the Huygens law).

1.- Introducción

Así como una fotografía nos muestra la distribución de la intensidad de la luz que ilumina una escena, un holograma (del griego *holos*, que significa *completo*) guarda *toda* la información (es decir, de amplitud y de fase) de la onda luminosa, de forma tal que puede reproducirse con precisión el frente de ondas que ilumina una escena en una dirección determinada. Así pues, un holograma reproduce una imagen tridimensional de la escena grabada.

La holografía no se restringe a la grabación de ondas luminosas (que es su uso más conocido), sino a cualquier tipo de fenómeno ondulatorio. Esto incluye, por supuesto, al sonido. En el presente artículo, describiremos una forma sencilla y barata de grabar un *holograma acústico*, usando para ello una computadora doméstica y un *set multimedia* (un micrófono y dos altavoces).

2.- Interferómetros

Los interferómetros son dispositivos que nos permiten *medir interferencias*, bien entre distintas ondas, o bien entre distintas partes de una misma onda. El interferómetro más sencillo posible es el llamado de *dos elementos*. La onda a interferir pasa, en este caso, por dos puntos del espacio (que es donde se sitúan los elementos del interferómetro) de forma tal que el instrumento produce la interferencia entre las señales que han pasado por cada elemento. Por *elementos* podemos entender desde rendijas (o sea, el clásico experimento de Young) hasta telescopios (en el caso de la interferometría astronómica).

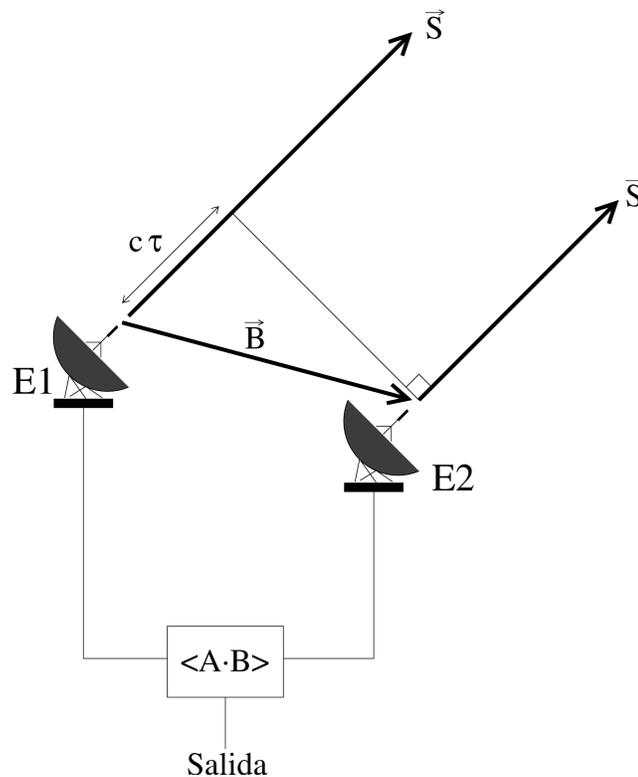


Figura 1: Interferómetro astronómico de dos elementos (llamados **E1** y **E2**), \vec{S} es el vector que apunta en la dirección de la fuente observada y \vec{B} es el vector *línea de base* (ver texto). Normalmente, la señal entra por cada elemento en tiempos distintos (separados por un retraso τ).

En la figura 1, mostramos un ejemplo de interferómetro (radio)astronómico de dos elementos. La señal proveniente del espacio entra por ambos radiotelescopios y es interferida en un receptor común. La distancia entre los radiotelescopios de uno de estos interferómetros puede ser de hasta varios miles de kilómetros. Esto es lo que se conoce como *interferometría de muy larga base (VLBI)*. En estos casos, la señal de cada telescopio se graba localmente en discos duros, que son después transportados (en avión) a un lugar común. La señal de los radiotelescopios es entonces interferida en una súper computadora (llamada *correlador*). Cuando se hace *VLBI*, es como si las interferencias estuviesen *latentes* o *congeladas* en una especie de *limbo de tiempo*, esperando a ser generadas en el correlador semanas (¡o años!) después de que la señal primitiva entrase por cada elemento del interferómetro para ser capturada en los discos duros. Debido, además, a las enormes distancias entre telescopios, efectos muy sutiles (desde derivas en los relojes atómicos usados para grabar las señales hasta ínfimos efectos relativistas) pueden afectar y afectan a la delicada señal interferométrica, aunque hoy en día podemos corregir todos estos efectos con mucha precisión. Gracias a esta refinada técnica, hoy podemos observar astros con una resolución angular equivalente a poder discernir, desde un metro de distancia, la longitud que crece un cabello humano *durante una fracción segundo*.

3.- Síntesis de apertura

Supongamos que estamos observando una fuente con un interferómetro de dos elementos. Cada elemento dispone de un receptor con un cierto ancho de banda (que suponemos muy estrecho). Puede demostrarse que la correlación temporal de las señales que pasan por los elementos del interferómetro

tiene forma de *seno-cociente*¹, es decir,

$$\left\langle S_1(t)S_2^*(t+\tau') \right\rangle = \text{Sinc}(\Delta\nu(\tau+\tau')), \quad \text{Ec. 1}$$

donde $\Delta\nu$ es el ancho de banda de observación, $\langle \dots \rangle$ representa la media temporal, S_1 y S_2^* son la señal que entra por el elemento 1 y el complejo-conjugado de la señal que entra por el elemento 2, respectivamente; τ es el retraso en la llegada de la señal a cada elemento (ver Figura 1) y τ' es el retraso en la correlación. Si la fuente emisora está suficientemente lejos del interferómetro, el máximo valor de la correlación (es decir, el valor en el pico de la seno-cociente de la ecuación 1), que podemos llamar *pico de visibilidad*, V , viene dado por una amplitud y una fase que obedecen a la ecuación

$$V = \Phi\left(\frac{u}{\lambda}, \frac{v}{\lambda}\right) \quad \text{con} \quad \Phi = F(I(x, y)) \quad , \quad \text{Ec. 2}$$

donde $I(x, y)$ es la distribución espacial de intensidad de la fuente emisora, F es el operador *transformada de Fourier* (Φ es la transformada de Fourier de I), V es el pico de la visibilidad, (u, v) son las coordenadas de uno de los elementos del interferómetro (ya sea una rendija o un telescopio) respecto al otro (esto es lo que llamamos *línea de base*) y λ es la longitud de onda de observación. La ecuación 2 es el corazón de la técnica de síntesis de apertura, que les valió el premio Nobel de Física a Martin Ryle y Tony Hewish en 1974 y que hoy es también usada, con algunas variaciones, en otros campos como la tomografía computerizada.

Si disponemos ahora de más de dos elementos en el interferómetro, cada par de ellos puede considerarse un interferómetro independiente. Por lo tanto, podemos medir varias visibilidades, V_i , correspondientes a las coordenadas (u_i, v_i) de la línea de base del i -ésimo par de telescopios. Con toda esta información, es posible resolver la ecuación 2 de forma más o menos robusta y calcular la distribución de intensidad de la fuente, $I(x, y)$, a partir de nuestro conjunto de medidas, V_i .

4. Descripción del experimento

El fundamento de este experimento es la reproducción de un sonido estéreo y su grabación con un micrófono desde distintos puntos del espacio. Hemos grabado en un CD (o mp3) una señal de ruido estéreo, con una frecuencia central de 3 KHz y un ancho de banda de 10 Hz. El lector puede obtener un archivo de audio de ejemplo (junto con el resto de software necesario para realizar este experimento) desde la dirección web:

<http://www.uv.es/radioastronomia/outreach>

Colocamos los altavoces cerca del borde de una mesa, a una distancia de unos 50-75 cm uno del otro. Frente a los altavoces, a unos 3 metros de distancia, colocamos otra mesa (ver Figura 2). A esta segunda mesa le habremos practicado una serie de pequeñas marcas a lo largo del borde, que serán los puntos en los que situaremos el micrófono para grabar el holograma (unas diez o quince marcas son suficientes). La típica separación entre marcas consecutivas debería ser de escasos centímetros.

1 Seno-cociente: $\text{Sinc}(x) = \sin(x)/x$

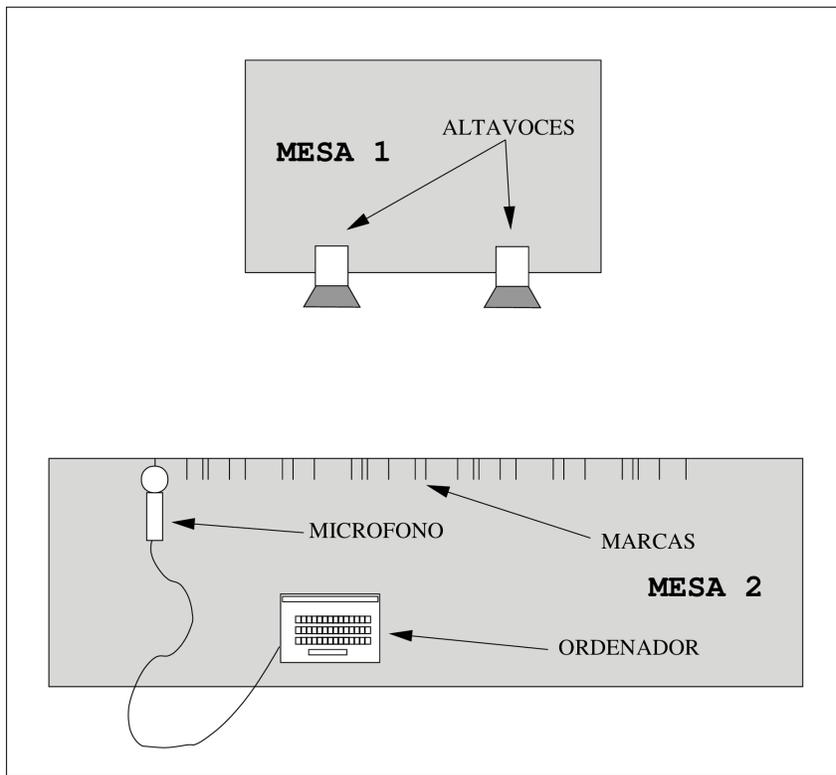


Figura 2: Disposición de los altavoces y el micrófono en nuestro experimento de holografía acústica.

Conectamos el micrófono a un ordenador portátil (también puede usarse una grabadora digital, en sustitución del micrófono y el portátil) y lo colocamos en el borde de la segunda mesa, sobre la primera de las marcas. Iniciamos entonces la grabación. Acto seguido, reproducimos el ruido estéreo por los altavoces.

Una vez reproducido todo el archivo de sonido por los altavoces, finalizamos la grabación, guardamos el archivo de audio en formato OGG o PCM *sin aplicarle ninguna compresión*, colocamos el micrófono sobre la segunda marca de la mesa y repetimos el proceso de grabación. Continuamos, de la misma forma, grabando distintos archivos de audio (uno por cada posición del micro sobre las marcas de la segunda mesa).

Cuando hayamos terminado, tendremos una serie de archivos de audio, tantos como marcas haya en la segunda mesa. Es muy importante que la grabación se haga sin demasiado ruido ajeno al experimento (es decir, en un ambiente silencioso), a ser posible en el exterior (para minimizar las reverberaciones) y sin viento (que afecta de manera distinta a la forma del frente de ondas en cada grabación). También sería deseable que el suelo no fuera demasiado liso y/o rígido (para minimizar el efecto del eco en el suelo).

El siguiente paso es la sincronización de los archivos de audio. Todas las grabaciones deben comenzar más o menos en la misma porción de la señal para que la correlación funcione (es decir, el retraso, τ , debe ser lo más pequeño posible; ver ecuación 1). Como ayuda para esta parte del experimento, el archivo de ruido estéreo contiene, al comienzo, un corto pulso de alta frecuencia que

puede ayudarnos a sincronizar los archivos usando cualquier programa de edición de sonido.

Una vez tenemos todos los archivos de audio *sincronizados*, es decir, comenzando más o menos en el mismo punto de la señal, procedemos a correlacionar las distintas grabaciones. La correlación y la generación del holograma pueden realizarse con la ayuda del programa **Holo_Acoustic.py**, escrito en el lenguaje *Python* y disponible en nuestra dirección web. Existen multitud de intérpretes de *Python* para distintas plataformas (Linux, Windows, MacOS).

5.- Análisis de los datos

El programa **Holo_Acoustic.py** correlaciona todos los pares posibles de grabaciones y busca la posición del *pico de correlación* en cada caso (es decir, el máximo de la seno-cociente de la ecuación 1). Podemos ver un ejemplo de franja de correlación en la Figura 3. Seguidamente, el programa calcula cuál es el retraso (residual) de la señal en cada grabación, de forma tal que las franjas para todos los pares posibles de correlaciones queden los más centradas posibles en el espacio de retrasos (este proceso es muy similar al que se usa en Radioastronomía para calibrar los datos interferométricos).

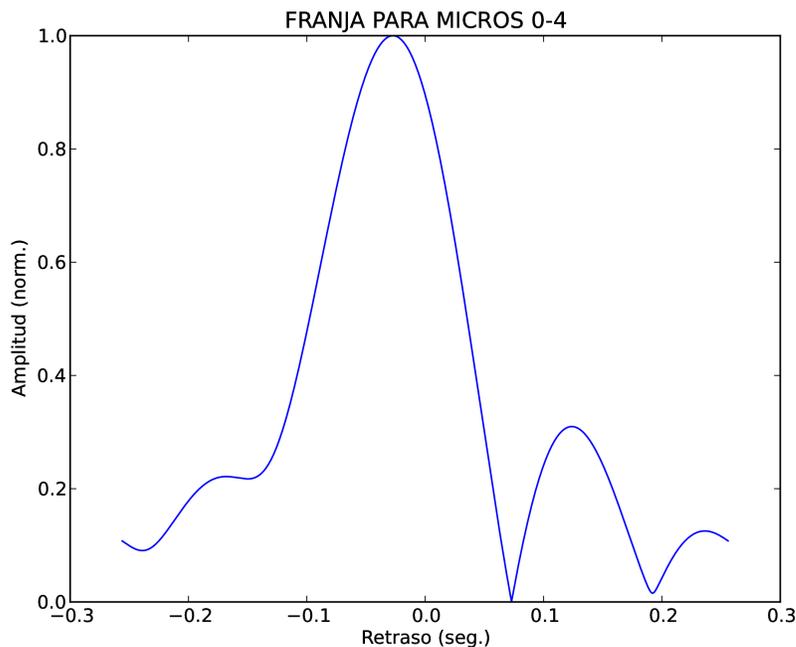


Figura 3: Amplitud de la franja de correlación (en el espacio de retrasos) entre dos de las grabaciones realizadas en nuestro experimento. La línea de base es, en este caso, de 50 centímetros.

Seguidamente, el programa estima la *ganancia* del micrófono en cada grabación. Tras todo este proceso de calibración, el programa genera una gráfica con la parte real de la correlación en función de la distancia entre los puntos donde se grabaron las señales (es decir, en función de la longitud de las líneas de base; ver Figura 4). Esta gráfica representa, básicamente, la transformada de Fourier de nuestra fuente de ruido estéreo.

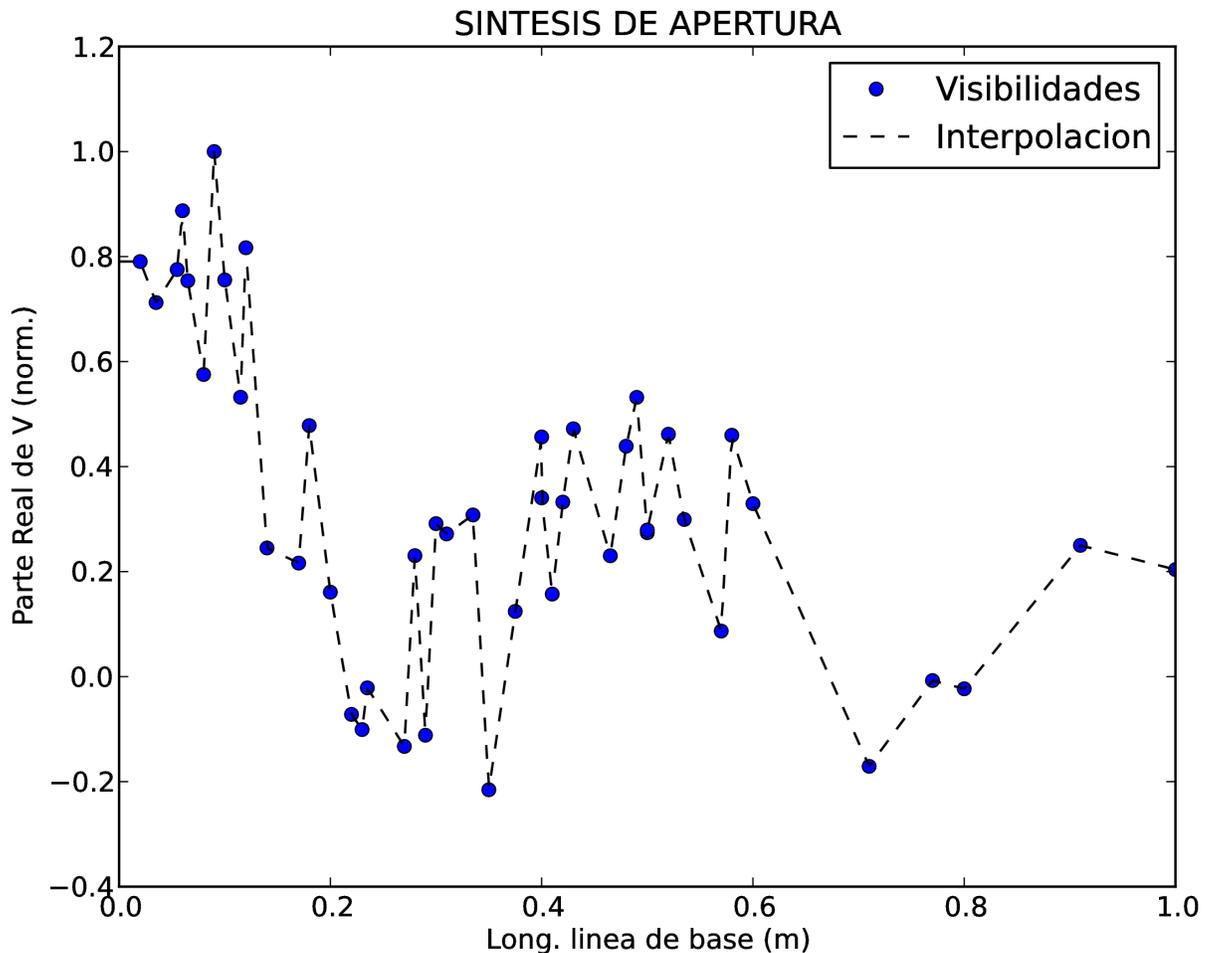


Figura 4: Parte real de la visibilidad (completamente calibrada) como función de la longitud de las líneas de base. Nótese la forma sinusoidal, típica de la transformada de Fourier de fuentes dobles (es decir, las compuestas por dos emisores compactos como nuestro par de altavoces).

5.1.- Reconstrucción del holograma acústico

Calculando la transformada inversa de Fourier de una ruda interpolación de nuestras visibilidades (línea discontinua de la Figura 4), el programa nos muestra, por fin, la reconstrucción de la fuente estéreo de sonido (Figura 5). Como vemos, nuestro experimento nos ha proporcionado la información necesaria y suficiente para poder reconstruir en nuestra computadora la distribución espacial de la fuente original de sonido. Hemos sido capaces, pues, de obtener información completa del frente de ondas proveniente de nuestros altavoces y, por lo tanto, de grabar un holograma acústico con nuestro ordenador.

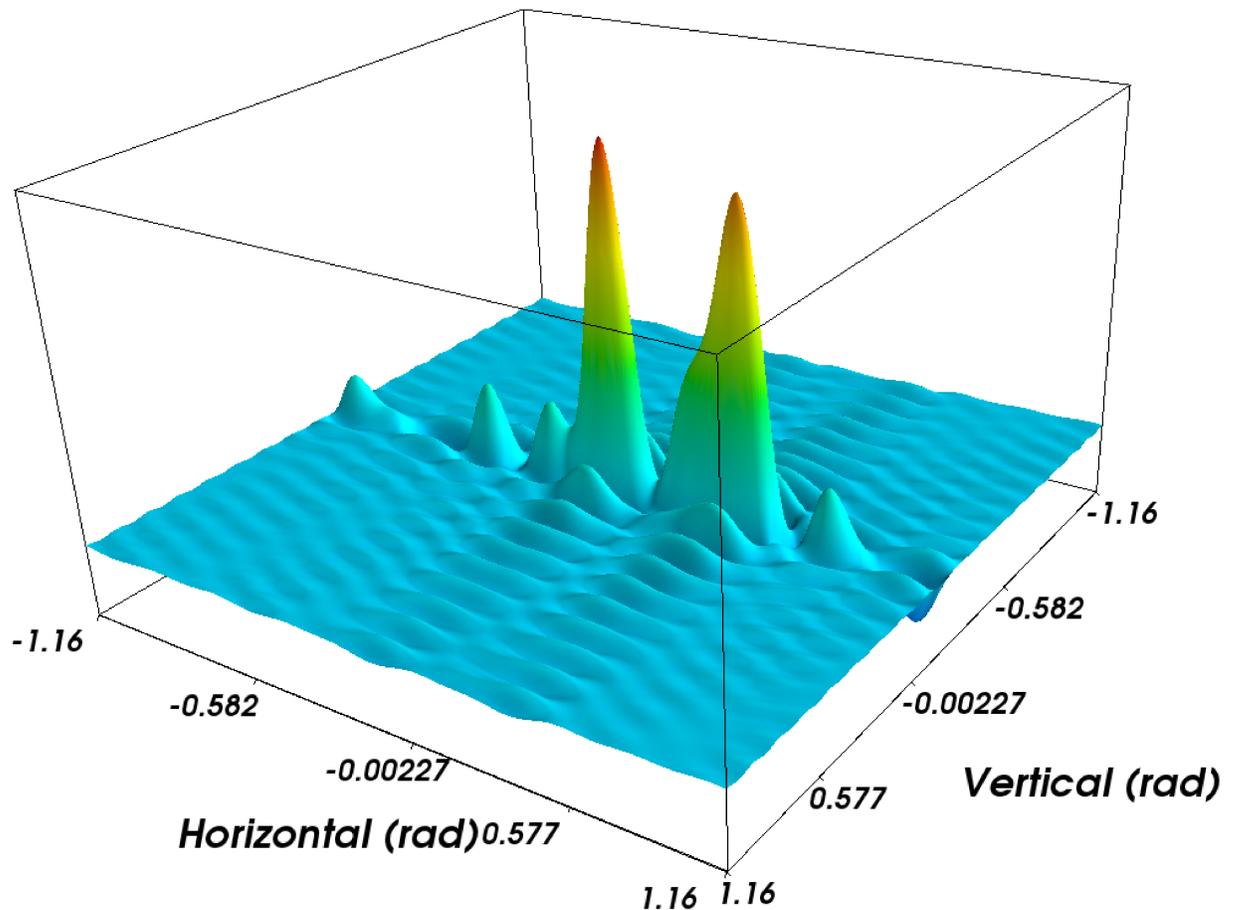


Figura 5: Imagen de los altavoces de nuestro experimento, obtenida usando técnicas de síntesis de apertura.

6.- Conclusiones

Hemos mostrado cómo puede usarse una computadora doméstica y un set multimedia para grabar información completa del frente de ondas de una fuente sonora. Hemos mostrado, además, como la técnica de *síntesis de apertura* (muy usada en Astronomía) puede utilizarse para reconstruir la fuente de sonido a partir de estas grabaciones *holográficas*. En resumen, hemos mostrado que es posible realizar *holografía acústica* con material al alcance de cualquiera, siempre que nos ayudemos de las técnicas adecuadas.

El lector puede complicar este experimento, por ejemplo colocando el micrófono en posiciones distribuidas en 2 o 3 dimensiones (en lugar de la distribución unidimensional sobre el borde de la mesa 2). El lector también puede generar sus propios archivos de ruido a frecuencias distintas (y con anchos de banda distintos) para comprobar cómo afectan estos cambios a la síntesis de apertura.

Una ligera modificación del software usado en este experimento podría permitir al lector realizar también, por ejemplo, experimentos de localización de fuentes de ruido en el espacio tridimensional, con la ayuda de varias grabadoras digitales distribuidas en distintos puntos del espacio.

Bibliografía

H. M. Smith 1976, **Principles of holography**, Wiley Ed. (USA)

A. R. Thompson, J. M. Moran, G. W. Swenson 2001, **Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy**, Wiley Ed. (USA)