

MEDIDA DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE UN MANIQUÍ ACÚSTICO

PACS REFERENCE: 43.60+d,43.64+r

Pico, Rubén; Ramis, Jaime; Redondo, Javier ; Alba, Jesús;

Escuela Politécnica Superior de Gandia

C/ Nazaret-Oliva s/n

46700

Grau de Gandia

Spain

96283000

rpico@fis.upv.es , jramis@fis.upv.es, fredondo@fis.upv.es, jesalba@fis.upv.es

ABSTRACT

The aim of this work is to show the process of measurement and results of the Head Related Transference Function (HRTF) of an acoustic dummy. In order to do it, we have registered, with two microphones, the impulse response in the ears of the dummy. These responses were obtained through the emission of pseudo-random sequences MLS, sampled at a frequency of 44.1kHz. A total 233 measures have been taken for different points located at 1.5 meters of the dummy. These results will permit the generation of signals with sound location effects, and the recreation of specific sound environments.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es mostrar el proceso de medida y los resultados de la función de transferencia de la cabeza (HRTF) de un maniquí acústico. Para ello hemos registrado con dos micrófonos la respuesta a un impulso en los oídos del maniquí. Estas respuestas se obtuvieron mediante la emisión de secuencias pseudo-aleatorias muestreadas a una frecuencia de 44.1kHz. Se han realizado un total de 233 medidas para diferentes puntos situados a 1.5 metros del maniquí. Estos resultados permitirán generar señales con efectos de localización del sonido, así como recrear entornos sonoros particulares.

INTRODUCCIÓN

La tecnología de sonido tridimensional (3-D) ha experimentado un enorme crecimiento las últimas dos décadas. Los campos de aplicación de este tipo de sistemas sonoros son muy diversos: desde la comunicación (video conferencias que incorporan sistemas de reproducción 3D), las aplicaciones militares (control remoto) y las medicales (caracterización de pérdidas auditivas sobre la base de pérdidas en la capacidad de localización) hasta los sistemas sonoros desarrollados por la industria del entretenimiento y la simulación. Todos estos sistemas recrean un determinado entorno sonoro en el oyente a través de la audición binaural virtual. El conocimiento de los mecanismos subyacentes a la audición binaural es necesario para la correcta implementación de estos dispositivos.

La capacidad de localización es posible gracias a que nuestro cerebro compara lo que oímos en ambos oídos. La localización de las bajas frecuencias se basa en la percepción de la

diferencia de tiempos de llegada a ambos oídos. Por el contrario para altas frecuencias, el mecanismo de localización es la diferencia de intensidades entre las señales que se oyen en ambos oídos. Ambos mecanismos se pueden caracterizar por medio de dos parámetros: Diferencia de Tiempo Interaural (ITD) y la Diferencia de Intensidad Interaural (IID). Además de estos parámetros, la función de transferencia de la cabeza (HRTF - *Head Related Transfer Function*), caracteriza estas propiedades de filtrado espacial del oído externo, la cabeza y el torso sin incluir la función de transferencia del canal auditivo. Ésta función varía de forma compleja, con el azimut, la elevación, el alcance, la frecuencia, y además, varía significativamente de una persona a otra persona.

Por razones técnicas, resulta más sencillo realizar medidas de la respuesta impulsional de la cabeza (HRIR – *Head Related Impulse Response*). Para obtener la HRTF basta con realizar la transformada de Fourier de la HRIR. Esta función es obtenida por medio de la medida en ambos canales de la respuesta a un impulso. Una vez obtenida la HRTF de cada uno de los oídos para cualquier posición de la fuente, se pueden sintetizar señales binaurales precisas de una fuente individual o serie de fuentes. En el proceso de medida de las funciones HRTF se han empleado secuencias pseudo-aleatorias [1]. Estas secuencias MLS (Maximum Length Sequence) permiten realizar la deconvolución rápida de la respuesta impulsional del sistema mediante la correlación de la señal medida con la secuencia original con un algoritmo rápido FHT (Fast Hadamard Transform).



Figura 1: Configuración experimental para la medida de las funciones HRTF en cámara anecoica

El proceso de medida es el siguiente: se generan secuencias MLS en la fuente y se registran las señales binaurales por medio de los micrófonos instalados en un maniquí acústico. Estas señales son posteriormente deconvolucionadas para obtener la respuesta impulsional binaural. Este proceso de medida se repite para las diferentes posiciones relativas entre el maniquí y la fuente. Las medidas se realizaron en cámara anecoica.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El objetivo de este trabajo es medir dichas funciones utilizando para ello un maniquí acústico. Las medidas se realizaron por medio de un ordenador equipado con una tarjeta de audio conectado a un sistema radiante de caja cerrada. El maniquí acústico utilizado para las medidas es de medio torso y sus medidas son 82.5 cm de altura por 31.5 cm de anchura. Está fabricado con plástico endurecido de color crema con una cavidad hueca en su interior. Se han utilizado dos micrófonos de campo libre de media pulgada y unos conectores en forma de L para poder introducirlos en los oídos del maniquí acústico. Los micrófonos están alimentados por una fuente de alimentación. Las salidas preamplificadas de la fuente de alimentación se enviaron a dos entradas estereofónicas de la tarjeta de audio del ordenador. El sistema radiante utilizado tiene una respuesta prácticamente plana hasta 4kHz. De esta forma, la fuente es un elemento transparente en el proceso de medida. La figura 2 muestra la respuesta en frecuencia del sistema

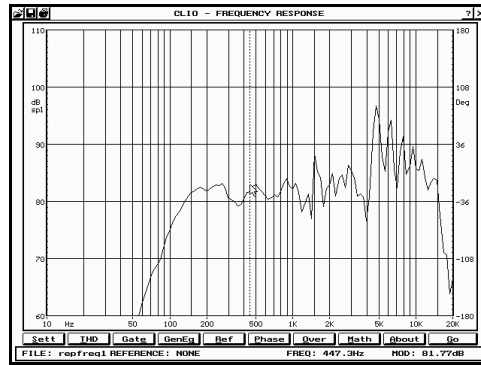


Figura 2: Respuesta en frecuencia del sistema radiante utilizado

SECUENCIAS PSEUDO-ALEATORIAS (MLS)

Como hemos dicho anteriormente, la respuesta al impulso se obtiene usando secuencias binarias pseudo-aleatorias de máxima longitud MLS (acrónimo de las palabras inglesas *Maximum Length Sequences*) [2]. Para obtener la respuesta binaural se ha utilizado una secuencia tipo 14A. Ésta es la primera de las secuencias de máxima longitud pseudo-aleatorias de 14 bits; tiene, por tanto, un longitud de $N=2^{14}-1 = 16383$ muestras. La longitud de las secuencias limita inferiormente la frecuencia que podemos registrar en el proceso de medida de la respuesta impulsional. En nuestro caso, la frecuencia de muestreo es de 44100 muestras, consecuentemente la frecuencia mínima es: $44100/16383=2.7\text{Hz}$. Para aumentar la relación señal-ruido se han empleado 16 repeticiones de esta secuencia de forma consecutiva ($16 \cdot N$ muestras). El promedio de las 16 señales registradas reduce el ruido de fondo puesto que éste no es coherente con la señal.

De forma simultánea a la emisión de estas secuencias, registramos las señales que captan dos micrófonos situados en los oídos del maniquí acústico (canal izquierdo y derecho). La deconvolución de las señales grabadas permite obtener la respuesta al impulso de cada una de las señales registradas por los micrófonos para una configuración determinada (orientación de la fuente respecto del maniquí).

RESULTADOS

Las medidas se realizaron en la cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de Gandia (EPSG) de la *Universidad Politécnica de Valencia* (UPV). El maniquí acústico se montó sobre un sistema robótico multipropósito capaz de efectuar giros en sentido vertical (variación del acimut: α) y horizontal (variación de la elevación: β) bajo control computacional. La figura 3 muestra la pantalla de control en PC del sistema robótico

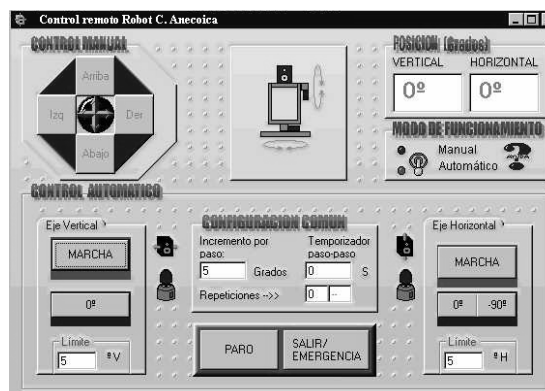


Figura 3: Pantalla de control en PC del sistema robótico construido en la Cámara Anecoica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

El acimut a y la elevación b (ver figura 4) definen la posición de la fuente de sonido para los diferentes puntos de medida en una esfera imaginaria que rodea la cabeza del maniquí acústico. Con el objetivo de simplificar la toma de medidas, se diseñó una configuración para la cual utilizamos únicamente el motor de eje vertical. La fuente se montó sobre un arco de aluminio de tal manera que se podía situar en cualquier punto del plano vertical (elevación φ)

con respecto al maniquí acústico. El arco se coloca con su centro de curvatura en el centro de la cabeza del maniquí, de forma que la distancia entre éste y la fuente es siempre la misma: 1.5m. De esta manera, basta con desplazar el maniquí acústico en sentido horizontal para obtener todas las medidas de una semiesfera. Elegimos un sistema de referencia para el cual la posición en la que la fuente se encuentra enfrente del maniquí acústico corresponde a los ángulos $\theta=0^\circ$ de acimut y $\varphi=0^\circ$ elevación.

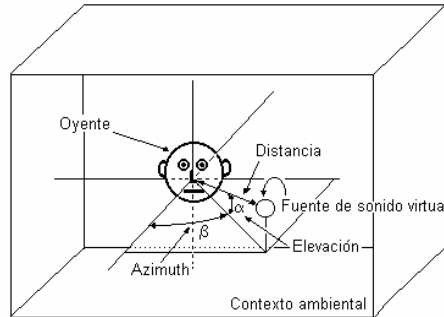


Figura 4a: Sistema de coordenadas elegido para la posición de la fuente.

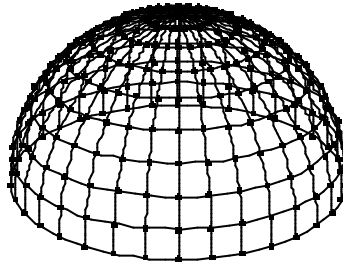


Figura 4b: Representación gráfica de los puntos de medida en los que se sitúa la fuente

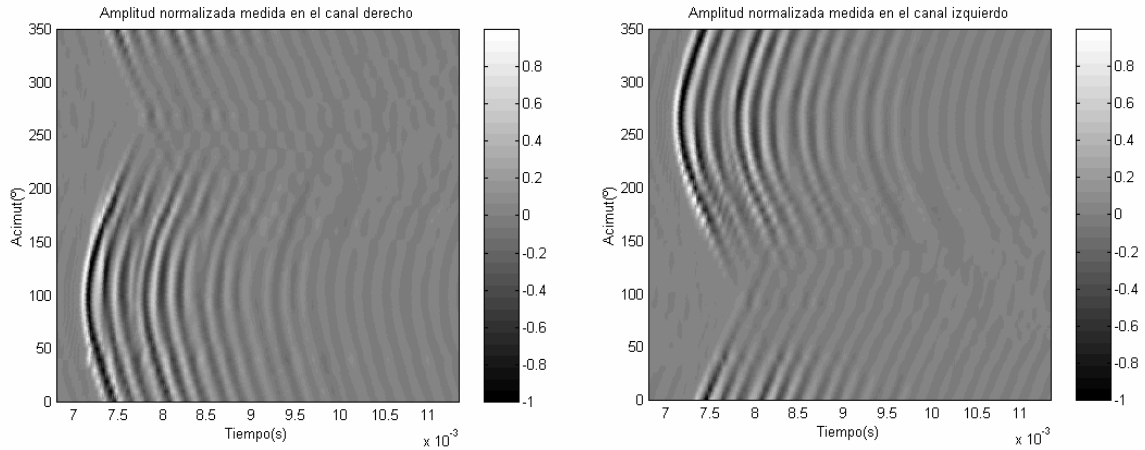
En el proceso de medida se registra la respuesta para todas las posiciones del motor correspondiente al plano horizontal. Con este objeto se gira el motor respecto de su eje vertical. Se procede análogamente para diferentes elevaciones de la fuente en el arco. En esta configuración, las diferentes medidas se distribuyen homogéneamente en una semiesfera alrededor del maniquí. El maniquí acústico gira en el sentido de las agujas del reloj hasta completar la vuelta de 360° . La fuente, por otra parte, se desplaza en de 10° en 10° a lo largo del arco describiendo una trayectoria curva desde $\beta=0^\circ$ hasta $\beta=90^\circ$ de elevación. En este punto, la fuente se encuentra justo encima del maniquí acústico. La figura 5 muestra los diferentes puntos de medida repartidos en una semiesfera centrada en el maniquí acústico.

El número de medidas para cada serie horizontal depende de la posición vertical de la fuente. El criterio elegido para asignar el número de medidas correspondientes a cada elevación es proporcional al ángulo sólido definido por cada plano horizontal y el centro de la esfera. Así, si la elevación es mayor se pierde resolución en el plano horizontal y el número de medidas a realizar es menor. En la siguiente tabla se representa el número de medidas en cada plano horizontal para cada posición de la fuente en el arco (elevación) y el incremento en grados entre medidas.

| Elevación ($^\circ$) | Número de medidas | Incremento ($^\circ$) |
|------------------------|-------------------|-------------------------|
| 0 | 36 | 10 |
| 10 | 36 | 10 |
| 20 | 36 | 10 |
| 30 | 30 | 12 |
| 40 | 30 | 12 |
| 50 | 24 | 15 |
| 60 | 20 | 18 |
| 70 | 12 | 30 |
| 80 | 8 | 45 |
| 90 | 1 | --- |

Tabla 1: Medidas realizadas para la obtención de las funciones HRTF

Por lo tanto, se ha realizado un total de 233 medidas de dos canales cada una de las respuestas impulsionales para los diferentes puntos de la semiesfera centrada en el maniquí. En las figuras 5 y 6 se representa en escala de grises el conjunto de las respuestas impulsionales medidas en el plano horizontal (elevación $\beta=0^\circ$). El eje de ordenadas corresponde a la orientación acimutal de la fuente respecto de la normal al eje interaural y el eje vertical es la escala temporal. En las medidas del canal izquierdo vemos que la el micrófono registra señal llega antes para un acimut de 0° a 90° de acimut, la señal llega más tarde puesto que el oído izquierdo se aleja de la fuente. A partir de 90° el retardo disminuye hasta el mínimo en 270° .



Figuras 5 y 6: Respuestas impulsionales binaurales en el plano horizontal (elevación 0°)

En este caso, la fuente está situado a la izquierda del maniquí y su posición más próxima al micrófono del canal izquierdo. Por esta razón, el tiempo de llegada de la señal es mínimo. En el canal derecho ocurre lo contrario.

Diferencia de intensidad interaural

En los mecanismos de la audición binaural subyacen los procesos de localización del oído humano. Se han propuesto diferentes parámetros para cuantificar diferentes aspectos de la fenomenología de la audición binaural. Uno de estos parámetros es la *diferencia de intensidad interaural* (IID – Interaural Intensity Difference) [3]. Ésta es la diferencia entre las intensidades que llegan a los oídos izquierdo y derecho. Un evento sonoro situado a la izquierda del oyente provocará una sensación sonora más intensa en su oído izquierdo que en el izquierdo.

$$IID = I_{izq} - I_{der}$$

La figura 7 muestra el valor del IID normalizado a partir de las respuestas binaurales medidas en función del acimut para las diferentes elevaciones. El valor máximo del IID corresponde a 270° ya que en este caso la fuente está situado a la izquierda del maniquí acústico. Sucede al contrario a 90° ; la fuente está a la derecha del maniquí el valor del IID es negativo y mínimo. No obstante, conforme aumenta la elevación de la fuente respecto del maniquí, la diferencia de nivel es menor.

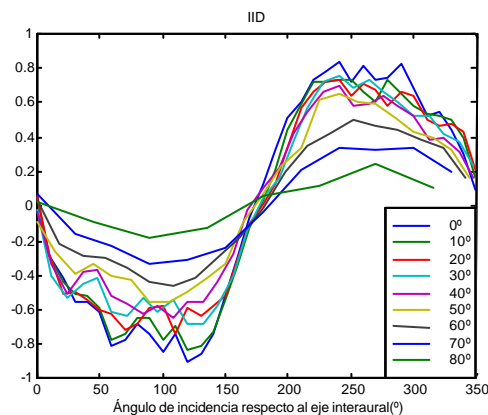


Figura 7: Diferencia de intensidad interaural en función del acimut para diferentes elevaciones.

Diferencia de tiempo interaural

El IID depende mucho de la frecuencia. En la percepción de señales de alta frecuencia, se nota el efecto de sombra de la cabeza y las diferencias de intensidad son mayores. Sin embargo, para la localización de fuentes que emiten bajas frecuencias ($f \leq 500\text{Hz}$) los efectos de la difracción son notables y, por tanto, el nivel de intensidad que percibimos en ambos oídos es similar. No obstante, existe otro mecanismo auditivo que nos permite localizar las fuentes emisoras: la percepción de la diferencia de fase entre las señales que llegan a ambos oídos. Así, la *diferencia de tiempo interaural* (ITD - Interaural Time Difference) es un parámetro que nos permite explicar nuestra capacidad de localización de fuentes de baja frecuencia [3]. En la figura 8 se puede ver el ITD en función del acimut para diferentes elevaciones de la fuente. Se puede ver que la diferencia de tiempos de llegada es máxima para 90° y mínima para 270° . Al igual que para el IID, los valores máximo y mínimo son menos pronunciados conforme aumenta la elevación de la fuente.

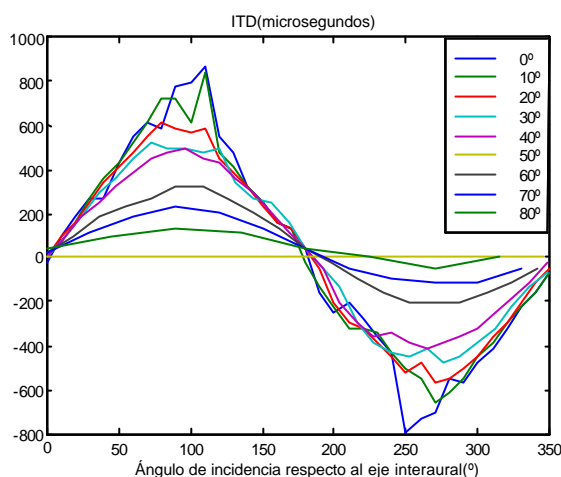


Figura 8: Diferencia de tiempo interaural en función del acimut para diferentes elevaciones

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito el procedimiento para la medición de las funciones de transferencia de la cabeza. Estas funciones caracterizan los mecanismos de la audición binaural. La capacidad de localización es posible gracias a que nuestro cerebro compara lo que oímos en ambos oídos. A partir de la respuesta impulsional binaural se ha medido la Diferencia de Tiempo Interaural (ITD) y la Diferencia de Intensidad Interaural (IID) para diferentes posiciones de la fuente respecto del oyente. A partir de estas funciones se realizarán experimentos psicoacústicos de localización, en particular se evaluarán las pérdidas de capacidad de localización en función del grado de reverberación.

REFERENCIAS

- [1] Rife D.D. and Vanderkooy J., Transfer Function Measurement with Maximum-Length Sequences, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 37, 1989 June.
- [2] Davies W.D.T., Generation and properties of maximum length sequences, In *Control*, 1966 June/July/August.
- [3] Gardner, W.G. and Martin K. D., Hrtf Measurements of a KEMAR, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 97, 3907-3908, 1995.
- [4] Moller, H., Sorensen, M.F., Hammershoi, D. and Jensen, C. B., Head-Related Transfer Functions of Human Subjects, *J. Aud. Eng. Soc.*, Vol. 43, 300-321, 1995.
- [5] J. Blauert, *Spatial Hearing*, 2nd ed., J. S. Allen, trans., MIT Press, Cambridge, Mass (1997)
- [6] W. M. Jartrmann, How we localize sound, *Physics Today*, November 1999