

Medición de Respuestas Impulsivas de Cabeza Individuales utilizando Secuencias Binarias de Golay

Resumen: Una onda sonora es transformada por el torso, la cabeza y las orejas, antes de alcanzar los tímpanos de un oyente. Estas transformaciones son diferentes para cada oído, ángulo de incidencia y varían de persona a persona. Las respuestas impulsivas de cabeza (HRIRs) en el dominio del tiempo, o las funciones de transferencia de cabeza (HRTFs) en el dominio de la frecuencia, caracterizan la transmisión entre una fuente sonora y los tímpanos de una persona. En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de medición de HRIRs, que utiliza como señal de excitación códigos de Golay. Estas secuencias binarias brindan buenos resultados con ruido de fondo elevado y crea respuestas impulsivas sin los ruidos espurios y modulaciones que suelen incorporar los barridos sinusoidales en estas condiciones. Los resultados obtenidos en mediciones a un simulador de cabeza y torso son coherentes con estudios similares. Se analizan además las principales características de los perfiles espectrales de las HRTFs medidas, que resultan en indicios para localizar una fuente sonora.

Palabras Claves: HRIR, HRTF, sistema de medición, códigos de Golay.

Abstract: A sound wave is transformed by the torso, head and ears, before reaching the eardrums of a listener. These changes are different for each ear, angle of incidence, and vary from person to person. Head-related impulse responses (HRIRs) in the time domain, or head-related transfer functions (HRTFs) in the frequency domain, characterized the transmission between a sound source and the eardrums of a subject. This paper presents a HRIR measurement system, which uses Golay codes as excitation signal. These binary sequences give good results with high background noise and create impulsive responses without the artifacts and modulations that usually incorporate sinusoidal sweeps in these conditions. Results of measurements carried out in a head and torso simulator are coherent with similar studies. Also the main features of the spectral profiles of the HRTFs, which result in cues to localize a sound source, are analyzed.

Keywords: HRIR, HRTF, measurement system, Golay codes.

Fabián C. Tommasini^{1,2,*}, R. Martín Guido¹, Oscar A. Ramos^{1,2} y G. Agustín Cravero¹

¹Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada al CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Maestro M. López y Cruz Roja Argentina, Córdoba, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

*ftommasini@frc.utn.edu.ar

E-mail de contacto: gjbergues@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Aspectos bien definidos de las ondas sonoras que llegan a los tímpanos de una persona llevan información que un ser humano utiliza para localizar con precisión una fuente en el espacio (Blauert 1997; Wightman Kistler 1989a; Wightman y Kistler 1989b). El estudio de las alteraciones que se producen en la cabeza y el torso se remonta al siglo XIX cuando Lord Rayleigh enunció la teoría Duplex. Firestone (1930) realizó un abordaje teórico-experimental considerando a la cabeza como una esfera rígida y analizó los niveles de presión sonora en dos polos separados por 180° emulando la ubicación de los oídos. Concluyó que la diferencia de nivel entre ambos polos –originada por la difracción provocada por la cabeza– es función de la frecuencia y de la dirección de la onda incidente. La diferencia de nivel entre el oído izquierdo y el derecho se conoce como diferencia interaural de nivel (interaural level difference, ILD). Las ILDs son despreciables por debajo de los 500 Hz, debido que la longitud de onda es mayor al diámetro de la cabeza, y crecen rápidamente hasta alcanzar su valor máximo alrededor de los 4000 Hz, cuando la fuente se encuentra enfrentada a uno de los oídos. Continuando con el modelo esférico de la cabeza, Kuhn (1977) realizó estudios teóricos, que validó con mediciones, sobre la diferencia de los tiempos de arribo de la onda sonora a ambos oídos. Dedujo que para todas las frecuencias audibles dependían solo del ángulo de incidencia, pero diferían según la banda de frecuencia considerada: eran mayores para bajas frecuencias (hasta 500 Hz), mínimos para frecuencias medias (entre 1000 y 1500 Hz) y aumentaban para frecuencias altas (> 3000 Hz). Esta diferencia se conoce como diferencia interaural de tiempo (interaural time difference, ITD).

Además de estas dos evidencias, las ondas sonoras se dispersan, refractan y cancelan en las protuberan-

cias y cavidades de las orejas. Esto da origen a una serie de picos y valles en la zona de frecuencias medias y altas (entre los 4000 y 12000 Hz) que se desplazan dependiendo del ángulo de incidencia de la onda sonora. Las reflexiones y difracciones producidas en el torso y hombros afectan también esta región del espectro (Kuhn 1977; Shaw 1974). Las variaciones en el dominio de la frecuencia de las ondas que alcanzan ambos tímpanos pueden ser descriptas como un proceso de filtrado natural que depende de la dirección de incidencia y de la anatomía del individuo.

En resumen, la ILD, la ITD y las transformaciones espectrales son las claves que el ser humano utiliza para localizar una fuente sonora en el espacio. Estas claves se encuentran presentes en las respuestas impulsivas de cabeza (head-related impulse responses, HRIRs) y en las funciones de transferencia de cabeza (head-related transfer functions, HRTFs), que caracterizan la transmisión entre una fuente sonora y los tímpanos de las personas en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, respectivamente.

Para recrear en una persona una imagen auditiva virtual de una fuente sonora, es necesario reproducir en sus tímpanos, mediante transductores apropiados, los mismos estímulos sonoros que produciría dicha fuente en la situación real. Esto se consigue filtrando un sonido originado por una fuente sonora en campo libre por las HRIRs del oyente para luego reproducirlo mediante auriculares.

Se puede advertir que, debido a las diferencias de tamaño y formas de la anatomía de las personas, las HRIRs medidas a diferentes sujetos difieren notablemente. Se ha comprobado que estas diferencias antropométricas entre individuos tienen serias implicancias perceptuales (Wenzel et al. 1993). La vivencia auditiva que experimenta un sujeto que utiliza un

conjunto de HRIRs medidas a otra persona (HRIRs no individuales), se degrada notablemente: comete errores al localizar una fuente sonora y la percibe difusa y ubicada alrededor del rostro (Middlebrooks 1999). Por el contrario, si las HRIRs corresponden al propio individuo (HRIRs individuales), la fuente sonora es percibida compacta, externa y bien definida en una posición del espacio (Ramos y Tommasini 2014).

De esta manera, la medición de HRIRs individuales se vuelve importante para aplicaciones donde es necesaria una simulación precisa de la escena acústica, tal es el caso de entornos auditivos virtuales (Tommasini 2012; Tommasini et al. 2014) y para validación de métodos de personalización de HRTFs (Hu et al. 2008; Tommasini et al. 2015).

Actualmente, existen varios sistemas de medición de HRIRs en diferentes laboratorios de acústica del mundo (Algazi et al. 2001; Begault et al. 2006; Masiero et al. 2012; Zotkin et al. 2006), cada uno con diferentes grados de precisión, tiempos y estrategias de medición, como así también diferentes costos de implementación. En este trabajo se presenta un desarrollo de bajo costo de un sistema de medición de HRIRs basado en un instrumento virtual programado en LabVIEW (National Instruments Inc.) y hardware específico, el cual utiliza secuencias binarias de Golay como señal de excitación.

Zhou et al. (1992) proponen el uso de esta técnica para medir respuestas impulsivas del oído externo, pero sin hacer uso de un sistema de medición automatizado. En la actualidad el uso de códigos de Golay para medición de HRTFs no es muy extendido. Por esto también se indaga sobre la idoneidad de este método a partir de resultados de mediciones, analizando las principales características de las HRIRs y HRTFs obtenidas.

MEDICIÓN DE UN CONJUNTO DE HRIR

En general, las HRIRs se miden en un recinto libre de reflexiones sonoras para diferentes posiciones discretas de una fuente ubicada sobre una superficie esférica de alrededor de un metro de radio. Se utilizan micrófonos miniatura colocados a la entrada de ambos conductos auditivos de la persona. La cual se ubica en el centro de la esfera, y se utilizan altavoces como fuentes sonoras. (Wightman y Kistler 1989a; Algazi et al. 2001).

La ubicación de la fuente se especifica mediante un sistema de coordenadas esféricas. El origen es la intersección de tres planos: el plano horizontal o acimutal paralelo al piso, que contiene una línea imaginaria que une ambos oídos; el plano medio, que divide la cabeza simétricamente en derecha-izquierda; y el plano frontal, perpendicular a los dos anteriores y divide en frente-detrás del sujeto (Figura 1). Cada posición está definida por los ángulos de acimut θ y de elevación Φ .

Si $\theta = 0$ y $\Phi = 0$, la fuente está ubicada al frente del sujeto. Si $\theta < 0$, la fuente está a la izquierda del plano medio, y si $\theta > 0$, a la derecha. De igual manera, si $\Phi < 0$, la fuente está por debajo del plano horizontal, y si $\Phi > 0$ por arriba. La posición de la fuente se especifica mediante el par (θ, Φ) .

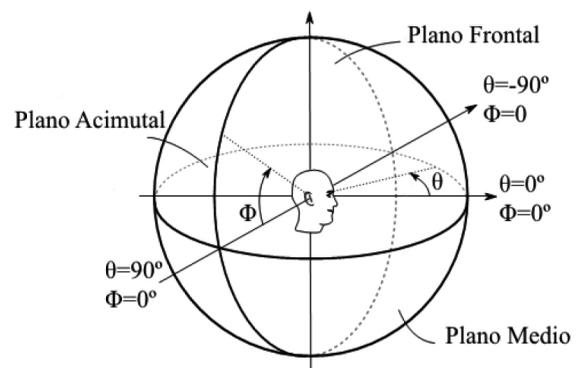


Figura 1 - Sistema de coordenadas utilizado -adaptado de Blauert (1997).

La HRTF en campo libre para una determina posición (θ, Φ) , se define como la relación entre la presión sonora medida en un punto del canal auditivo para una determinada posición $p(\theta, \Phi, f)$ y la presión sonora medida en un punto de referencia $p_0(f)$ que se corresponde con el centro de la cabeza del sujeto (centro de coordenadas), cuando este está ausente (Blauert 1997).

$$HRTF(\theta, \Phi, f) = \frac{p(\theta, \Phi, f)}{p_0(f)} \quad (1)$$

Idealmente, si ambas capturas son realizadas utilizando la misma cadena de medición (micrófonos, amplificadores, parlantes, etc.), la influencia del sistema resultará despreciable.

MÉTODO DE MEDICIÓN

La respuesta impulsiva caracteriza a un sistema lineal e invariante en el tiempo, independientemente de su naturaleza. La determinación de dicha respuesta, consiste en aplicar a la entrada del sistema un impulso de banda ancha $x(t)$ y registrar su respuesta o salida $y(t)$. Ambas están relacionadas por la respuesta impulsiva del sistema evaluado. Es decir:

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (2)$$

Donde $h(t)$ es la respuesta impulsiva y el símbolo $*$ denota convolución. Su equivalente en el dominio de la frecuencia es $Y(f) = X(f) \cdot H(f)$, entonces:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (3)$$

donde $H(f)$ es la función de transferencia de cabeza, e $Y(f)$ y $X(f)$ son las transformadas de Fourier de $y(t)$ y $x(t)$, respectivamente.

Sin embargo, últimamente han adquirido mayor preponderancia, métodos indirectos de medición, desarrollados originalmente para mediciones de recintos. Los mismos básicamente consisten en excitar el sistema con señales que poseen características particulares y luego pos-procesar las respuesta para obtener la respuesta impulsiva. De esta manera se consigue un mayor control de la distorsión producto de la medición y una mejora sustancial en la relación señal-ruido (S/R). Entre estos métodos se encuentran las secuencias de máxima longitud (Rife y Vanderkooy 1989), el barrido senoidal, lineal o exponencial (Farina 2000; Müller y Massarani 2001) y los códigos de Golay (Golay 1961; Foster 1986).

Este último método brinda buenos resultados con ruido de fondo elevado, creando respuestas impulsivas sin los ruidos espurios y modulaciones que suelen incorporar los barridos en estas condiciones (Warren 2014). Además, debido a la naturaleza iterativa de las secuencias de Golay, esta señal de excitación brinda la posibilidad de crear pares que pueden ser directamente concatenados sin la necesidad de silencios intermedios, logrando minimizar el tiempo de medición.

También existen limitaciones particulares para la medición de HRTFs utilizando esta técnica (Zahorik 2000). Aunque tomando algunas consideraciones al momento de realizar las mediciones se pueden superar; por ejemplo, realizando mediciones de corta duración, utilizando funciones ventanas para eliminar la respuesta de la sala, e inmovilizando la cabeza de los participantes mediante algún soporte.

Códigos de Golay

Los códigos de Golay son conjuntos de secuencias complementarias binarias con los valores 1 y -1 (Golay

1961). Se construyen a partir de lo que se conoce como semillas o pares de Golay:

$$a[n] = [1 \quad 1] \tag{4}$$

$$b[n] = [1 \quad -1] \tag{5}$$

Se puede construir una secuencia de longitud L utilizando de forma recursiva estas semillas. Una propiedad importante de estas secuencias es que la suma de las autocorrelaciones de los pares complementarios a[n] y b[n] es igual a la función $\delta[n]$ delta de Kronecker con amplitud 2L:

$$a[n] * a[n] + b[n] * b[n] = 2L\delta[n] \tag{6}$$

donde * es el operador de autocorrelación.

Si $ra[n] = a[n] * h[n]$ es la respuesta del sistema cuando se le aplica a la entrada una secuencia a[n], y $rb[n] = b[n] * h[n]$ es la respuesta cuando la entrada es una secuencia b[n], entonces la respuesta impulsiva h[n] se puede obtener mediante:

$$h[n] = \frac{1}{2L} (a[n] * r_a[n] + b[n] * r_b[n]) \tag{7}$$

Es necesario considerar que las secuencias sólo contienen 1's y -1's, lo que significa que la señal contendrá el máximo nivel de potencia posible. Esta propiedad resulta en una señal de excitación con mayor relación S/R respecto a un simple impulso. El factor de mejora es del orden de $10 \log(2L)$ (Zhou et al., 1992).

Arco de soporte

El arco de soporte es utilizado para montar un altavoz móvil (Figura 2). Tiene un radio de 0,80 m, y se encuentra graduado con los ángulos de azimut y eleva-

ción (paso de 5º). El arco fue diseñado para minimizar la influencia en el campo sonoro, además durante el proceso de medición los soportes se cubren con material absorbente.



Figura 2 - Renderizado computacional del arco de soporte con el altavoz móvil.

La persona debe sentarse en el medio del arco. La silla está equipada con un pequeño apoya cabeza para mantener quieta la cabeza del sujeto durante las mediciones. En primer lugar se mide el hemisferio frontal y luego se rota la silla para medir el hemisferio posterior.

Sistema de medición

El esquema del sistema de medición se presenta en la Figura 3. Las respuestas son adquiridas por micrófonos binaurales (Brüel&Kjær modelo 4101) ubicados a las entradas de los conductos auditivos derecho e izquierdo y digitalizadas por el módulo de adquisición inalámbrico (National Instruments NI 9234) vía una conexión Wi-Fi. El altavoz utilizado es un Pioneer TS-G1040 de 4" de dos vías. El rango de frecuencia de interés fue reducido a valores entre 200 Hz y 16 kHz.

El software del sistema fue desarrollado utilizando la plataforma LabVIEW. El mismo se encarga de construir las señales de excitación (secuencia de Golay y

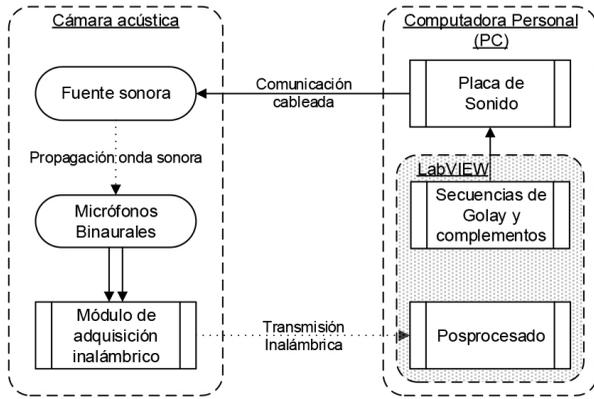


Figura 3 - Esquema del sistema de medición.

su complemento) de longitud $L = 215 = 32768$; reproducirlas por la interfaz de audio de la computadora personal; leer las respuestas digitalizadas por el módulo de adquisición; pos-procesar y construir los archivos de audio con las respuestas impulsivas de ambos oídos.

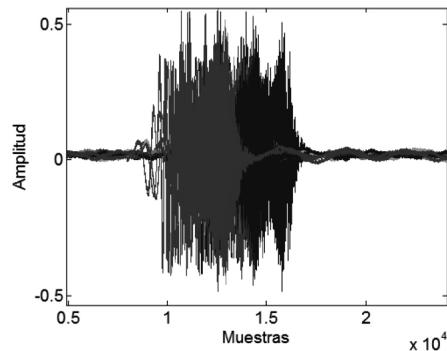
Mediciones repetidas del mismo espacio capturadas en una ubicación fija diferirán principalmente en el ruido. Esto brinda la oportunidad de diferenciar los efectos del objeto de medición (orejas, cabeza y torso) de cualquier ruido acumulado durante el proceso de medición (Schroeder 1979). El promediado de múltiples mediciones promediará también el ruido. Asumiendo que el ruido de las diferentes señales capturadas está decorrelacionado, este promediado reducirá su amplitud total, produciendo una respuesta impulsiva más precisa, con mejor relación S/R (Foster 1986).

Para realizar el promediado, se debe alinear temporalmente las diferentes respuestas (Figura 4a). Para ello se realiza lo siguiente:

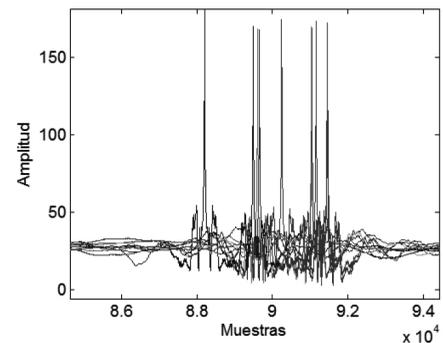
(a) cada una de estas respuestas se correlaciona con la primera (por tratarse de señales altamente coherentes entre sí, la correlación es máxima para $\tau = 0$);

(b) las diferencias en muestras de las correlaciones máximas (Figura 4b) es utilizada para desplazar las respuestas individuales (Figura 4c);

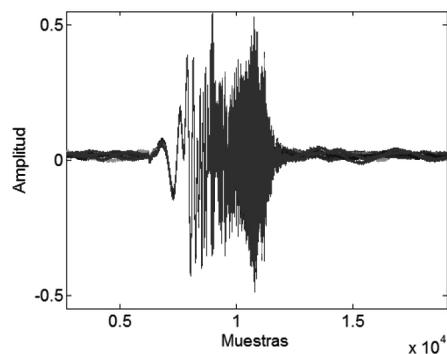
(c) luego se procede a calcular la media (Figura 4d), que se realiza tanto para las respuestas obtenidas de las secuencias de Golay como para sus complementos; y (d) finalmente, se obtiene la respuesta impulsiva mediante la Ecuación 7.



(a)



(b)



(c)

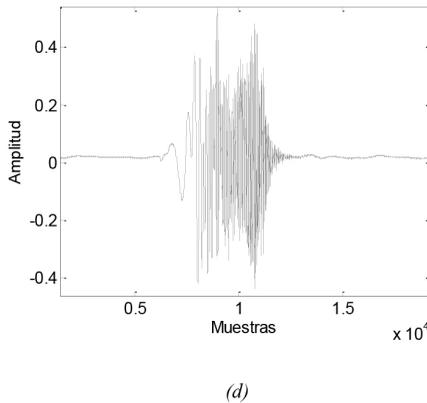


Figura 4 - (a) Señales capturadas; (b) correlaciones entre la primera señal y las restantes; (c) señales alineadas en el tiempo; y (d) promedio temporal de las señales.

Como se mencionó anteriormente, la HRTF para una posición en particular, es igual a la relación entre la presión sonora en un punto del canal auditivo y la presión sonora correspondiente al centro de la cabeza, mientras la persona está ausente (Ecuación 1). Esta referencia, que es válida para todas las posiciones, es medida por uno de los micrófonos binaurales al comienzo de cada sesión. Finalmente, sea $h(\theta, \Phi, f)$ la respuesta impulsiva determinada para una posición en particular del sistema de coordenadas esférico y $h_0(f)$ la respuesta impulsiva de referencia, la HRIR se puede calcular haciendo:

$$HRIR(\theta, \Phi, f) = F^{-1} \left\{ \frac{F\{h(\theta, \Phi, f)\}}{F\{h_0(f)\}} \right\} \quad (8)$$

donde F y F^{-1} son la transformada directa e inversa de Fourier, respectivamente.

Es necesario considerar que, a pesar que las mediciones se realizan en una cámara tratada acústicamente y se recubre con material absorbente todos los soportes metálicos, la HRIR aún puede contener reflexiones no deseadas provenientes de diferentes

superficies de la cámara de medición y de algunos elementos cercanos a los micrófonos. Sin embargo, como ya han mostrado otros autores (Brown y Duda 1998), la totalidad de la HRIR está completamente contenida en los primeros 2 ms de la respuesta impulsiva. Con el propósito de eliminar dichas reflexiones, la HRIR es procesada mediante una ventana de Hann modificada (desplazada temporalmente), como lo muestra la Figura 5.

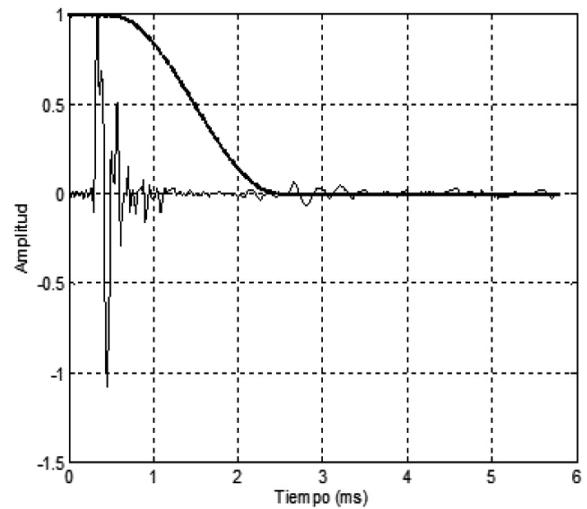


Figura 5 - Ventana de Hann desplazada que se aplica a la HRIR.

Por último, hay que destacar que el sistema propuesto tiene un bajo costo comparado con otros desarrollos similares citados anteriormente, dado que está basado en un instrumento virtual y el arco de soporte fue un desarrollo propio.

RESULTADOS

Con el objetivo de validar el sistema, se han efectuado mediciones preliminares en un maniquí simulador de cabeza y torso (Head and Torso Simulator, HATS) marca Brüel&Kjær modelo 4128-C con pabellones auriculares blandos derecho (DZ-9769) e izquierdo (DZ-9770).

Se utilizaron los micrófonos binaurales Brüel & Kjær 4101 insertados a la entrada de ambos conductos auditivos (Figura 6). Los cuales se encontraban a una altura de 1,20 m del piso.



Figura 6 - HATS Brüel & Kjær 4128-C con los micrófonos binaurales Brüel & Kjær 4101.

Las mediciones se realizaron en una cámara tratada acústicamente de 4,20 m de largo por 3,80 m de ancho y 2,60 m de altura. El tiempo de reverberación es de ~170 ms en las frecuencias medias y el ruido de fondo de ~17 dBA SPL.

A modo de ejemplo se reportan mediciones en cuatro posiciones específicas ($0^\circ, 0^\circ$), esto significa que la fuente sonora está ubicada al frente del sujeto; ($+90^\circ, 0^\circ$), la fuente está directamente enfrentada al oído derecho; ($-90^\circ, 0^\circ$), la fuente está enfrentada al oído izquierdo; y ($+180^\circ, 0^\circ$), la fuente se encuentra por detrás del sujeto. Se eligieron estas posiciones ya que las HRIRs y las HRTFs muestran características particulares identificables y comprobables, como se verá posteriormente.

En la Figura 7 se muestran las HRIRs resultantes de ambos oídos, mientras que en la Figura 8 se muestran las HRTFs correspondientes.

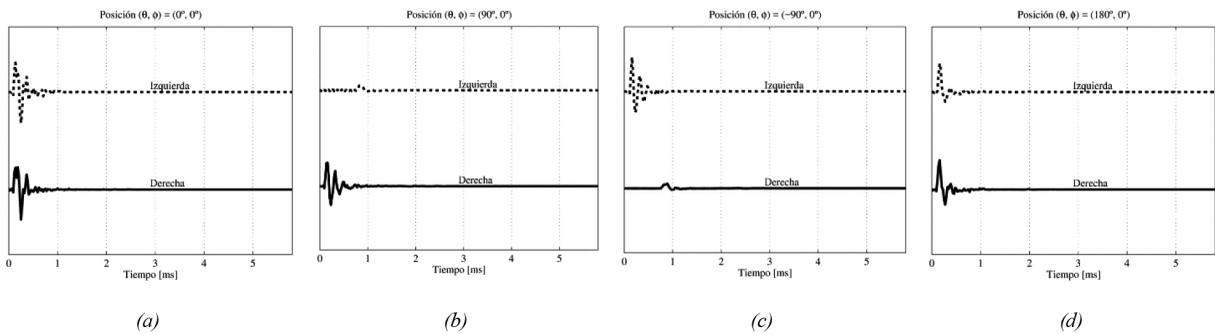


Figura 7 - HRIRs para el oído izquierdo y oído derecho. Se muestran cuatro posiciones: (a) $(0^\circ, 0^\circ)$, (b) $(+90^\circ, 0^\circ)$, (c) $(-90^\circ, 0^\circ)$ y (d) $(+180^\circ, 0^\circ)$.

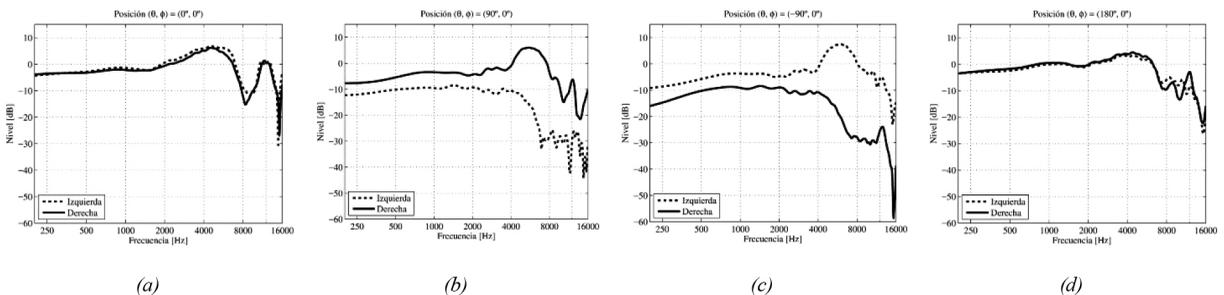


Figura 8 - HRTFs para el oído izquierdo y oído derecho. Se muestran cuatro posiciones: (a) $(0^\circ, 0^\circ)$, (b) $(+90^\circ, 0^\circ)$, (c) $(-90^\circ, 0^\circ)$ y (d) $(+180^\circ, 0^\circ)$.

En las HRIRs de esta figura no se observan los artefactos mostrados en el trabajo de Zahorik (2000). Esto se debe principalmente a que la respuesta capturada ha sido procesada con una ventana temporal, los tiempos de medición son pequeños y la cabeza permanece quieta al momento de la medición.

Los valores de ITD obtenidos son 0 μ s para las posiciones frontal y posterior, y ± 667 μ s para las posiciones laterales. Al utilizar la ecuación de Rayleigh para calcular la distancia entre los pabellones auriculares resulta en 178,1 mm, lo cual es equivalente al valor que se puede medir con un calibre en el HATS.

DISCUSIÓN

Como se dijo anteriormente, para las posiciones frontal (0° , 0°) y posterior ($+180^\circ$, 0°), el valor de ITD es nulo. Esto se puede observar en las Figuras 7a y 7d, donde el tiempo de comienzo de ambas HRIRs es el mismo, ya que la fuente sonora se encuentra a la misma distancia de ambos oídos. Por el contrario, para las posiciones laterales (90° , 0°) y (-90° , 0°), el valor de ITD es de alrededor 667 ms, que concuerda con la diferencia de los caminos recorridos por las ondas sonoras para alcanzar ambos oídos. Esto se puede observar también en las Figuras 7b y 7d.

La amplitud de las HRIRs del oído ipsilateral (oído enfrente a la fuente) es sensiblemente mayor a la del oído contralateral (oído no enfrente) (Figuras 7b y 7c y Figuras 8b y 8c). En este caso la cabeza ejerce un apantallamiento acústico sobre él (Brown y Duda 1998). En la posición frontal y posterior (Figuras 8a y 8d) la magnitud de las HRTFs son prácticamente idénticas (la incidencia de las ondas sonoras es la misma para ambos oídos).

Analizando las HRTFs son evidentes algunas características relevantes que no se pueden observar clara-

mente en las HRIRs, pero que tienen un rol decisivo en la percepción auditiva (Blauert 1997; Iida et al. 2007). Se observa en la Figura 8 una serie de picos y valles (conocidos como notches en inglés) muy notables como resultado de resonancias y cancelaciones que se originan en las diferentes protuberancias y cavidades de los pabellones auriculares (ver Figura 9 para más detalles).

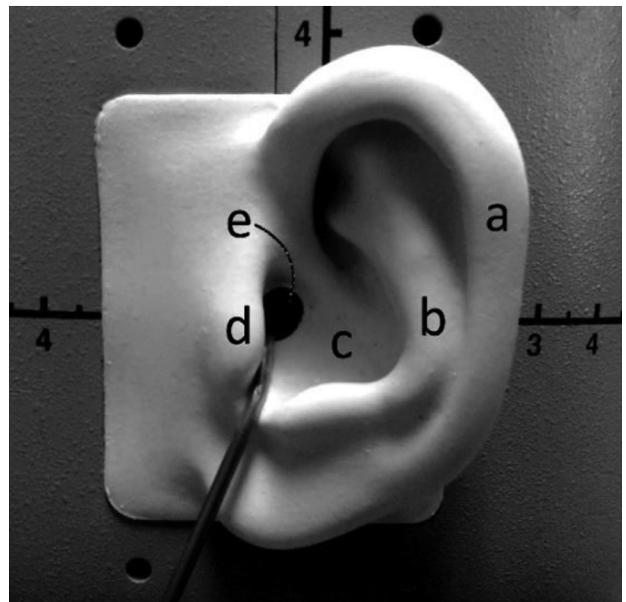


Figura 9 - Protuberancias y cavidades del pabellón auricular: (a) helix, (b) antihelix, (c) cavidad de la concha, (d) trago, y (e) conducto auditivo.

Estas características de los perfiles espectrales de las HRTFs, juegan un papel relevante en la percepción auditiva (Iida, Yairi, y Morimoto 1998; Moore, Oldfield, y Dooley 1989). La primera resonancia se encuentra alrededor de los 4400 Hz, originada en la cavidad de la concha de la oreja y se corresponde con $1/4 \lambda$ (donde λ es la longitud de la onda), y coincide con la profundidad de la concha. Otra resonancia notable se visualiza alrededor de los 11,5 kHz. Esta se corresponde con el ancho de la cavidad de la concha y se conoce como resonancia transversal. Estas resonancias fueron estudiadas por Shaw en la década de 1970 (Shaw 1974) y

medidas mediante un dispositivo utilizando orejas de personas y réplicas. Luego fueron convalidadas por Kahana y Nelson (2006) utilizando simulación numérica sobre modelos computacionales de pabellones auriculares obtenidos mediante un escáner láser.

Una cancelación importante se observa alrededor de los 8,5 kHz. La cual se corresponde con el primer cero de un filtro peine (comb filter, en inglés) que se origina por la interacción, a la entrada del conducto, del sonido directo y una reflexión, en algún borde o protuberancia de la oreja. Algunos autores han demostrado que la reflexión más importante se produce en la pared posterior de la concha (Lopez-Poveda y Meddis 1996; Raykar, Duraiswami, y Yegnanarayana 2005). Debido a su forma irregular, la frecuencia de este valle varía con la posición de la fuente sonora, sobre todo cuando se cambia su elevación en el plano medio. Está demostrado que los seres humanos utilizan esta variación para ubicar una fuente sonora en el espacio (Iida, Yairi, y Morimoto 1998; Takemoto et al. 2012). Un valle de iguales características se observa alrededor de los 15 kHz.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el desarrollo de un prototipo de un sistema de medición de HRIRs individuales utilizando secuencias binarias de Golay.

El uso de secuencias de Golay como señales de excitación mejora notablemente la relación S/R de la medición. Brinda buenos resultados con ruido de fondo y crea respuestas impulsivas sin los ruidos espurios y modu-

laciones que suelen crear los barridos sinusoidales en estas condiciones

Además, para aumentar aún más esta relación S/R, el sistema realiza un promediado de capturas previamente determinadas.

Para ilustrar los resultados obtenidos, se presentaron las HRIRs medidas a un simulador de cabeza y torso (HATS) para cuatro posiciones particulares: (0° , 0°), ($+90^\circ$, 0°), (-90° , 0°) y ($+180^\circ$, 0°). Se discutieron sus características en el dominio del tiempo y de la frecuencia, resaltando las claves auditivas necesarias que el ser humano utiliza para localizar una fuente sonora. Se resaltaron las claves binaurales presentes en las HRIRs (ILD e ITD) y las claves monoaurales, presentes en el perfil espectral (HRTFs), como son las resonancias y las cancelaciones características. Se pudo observar que las HRIRs obtenidas con el sistema presentado son coherentes con los resultados de diferentes estudios.

Como trabajo futuro, se pretende realizar mediciones en seres humanos con el fin de estudiar las relaciones entre las HRIRs y los rasgos anatómicos de sus pabellones auditivos. Para dicho fin, simultáneamente se realizarán capturas de modelos tridimensionales de las orejas de las personas mediante un escáner 3D.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a David Novillo por la colaboración brindada. Este trabajo fue desarrollado en el marco del PID N° 1705 de la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

REFERENCIAS

- Blauert, Jens. "Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization" Cambridge, MA MIT Press. (1997).
- Wightman, Frederic L., y Doris J. Kistler; "Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis", *The Journal of the Acoustical Society of America* 85, (2), 858-67, (1989a).
- Wightman, Frederic L., y Doris J. Kistler; "Headphone simulation of free-field listening. II: Psychophysical validation", *The Journal of the Acoustical Society of America* 85, (2), 868-78, (1989b).
- Firestone, F.A., "The phase difference and amplitude ratio at the ears due to a source of pure tone", *The Journal of the Acoustical Society of America* 2, (2), 260-70, (1930).
- Kuhn, George F., "Model for the interaural time differences in the azimuthal plane", *The Journal of the Acoustical Society of America* 62, (1), 157-67, (1977).
- Shaw, Edgar A. G. "Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane", *The Journal of the Acoustical Society of America* 56, (6), 1848-61, (1974).
- Wenzel, Elizabeth M., Marianne Arruda, Doris J. Kistler, y Frederic L. Wightman, "Localization using nonindividualized head-related transfer functions", *The Journal of the Acoustical Society of America* 94, (1), 111-23, (1993).
- Middlebrooks, John C., "Virtual localization improved by scaling nonindividualized external-ear transfer functions in frequency", *The Journal of the Acoustical Society of America* 106, (3), 1493-1510, (1999).
- Ramos, Oscar Alberto, y Fabián Carlos Tommasini, "Magnitude Modelling of HRTF Using Principal Component Analysis Applied to Complex Values", *Archives of Acoustics* 39, (4), 477-482, (2014).
- Tommasini, Fabián C., "Sistema de simulación acústica virtual en tiempo real", (PhD thesis), Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 212, (2012).
- Tommasini, Fabián C., Oscar A. Ramos, Sebastián Ferreyra, y R. Martín Guido, "Sistema de realidad acústica virtual en tiempo real: AVR", *En Proc. of IX Congreso Iberoamericano de Acústica (FIA 2014)*, Valdivia, Chile (2014).
- Hu, Hongmei, Lin Zhou, Hao Ma, y Zhenyang Wu, "HRTF personalization based on artificial neural network in individual virtual auditory space", *Applied Acoustics* 69, (2), 163-72, (2008).
- Tommasini, Fabián C., Oscar A. Ramos, Mercedes X. Hüg, y Fernando Bermejo, "Usage of Spectral Distortion for Objective Evaluation of Personalized HRTF in the Median Plane", *International Journal of Acoustics and Vibration* 20, (2), 81-89, (2015).
- Algazi, V. R., R. O. Duda, D. M. Thompson, y C. Avendano, "The CIPIC HRTF database", *En Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001 IEEE Workshop on the*, 99-102, (2001).
- Begault, D.R., M. Godfroy, Joel D. Miller, A. Roginska, M.R. Anderson, y Elizabeth M. Wenzel, "Design and verification of HeadZap, a semi-automated HRIR measurement system", Paris France, (2006).
- Masiero, B., P. Dietrich, M. Pollow, J. Fels, y M. Vorländer, "Design of a fast individual HRTF measurement system", *Fortschritte der Akustik-DAGA 2012*, (2012).
- Zotkin, Dmitry N., Ramani Duraiswami, Elena Grassi, y Nail A. Gumerov, "Fast head-related transfer function measurement via reciprocity", *The Journal of the Acoustical Society of America* 120, (4), 2202-15, (2006).

- Zhou, Bin, Green, David M., y Middlebrooks, John C., "Characterization of external ear impulse response using Golay codes", *The Journal of the Acoustical Society of America* 92, (2), Pt. 1, 1169-1171, (1992).
- Rife, Douglas D., y John Vanderkooy., "Transfer-function measurement with maximum-length sequences", *J. Audio Eng. Soc* 37, (6), 419-444, (1989).
- Farina, Angelo, "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique", *En Paris, France, Audio Engineering Society*, (2000).
- Müller, Swen, y Paulo Massarani., "Transfer-Function Measurement with Sweeps", *Journal of the Audio Engineering Society* 49, (6), 443-71, (2001).
- Golay, M., "Complementary series", *IRE Transactions on Information Theory* 7, (2), 82-87, (1961).
- Foster, S., "Impulse response measurement using Golay codes", *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP '86*, 11,929-32, (1986).
- Zahorik, Pavel, "Limitations in using Golay codes for head-related transfer function measurement", *The Journal of the Acoustical Society of America* 107, (3), 1793-1796, (2000).
- Schroeder, M. R., "Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses", *The Journal of the Acoustical Society of America* 66, (2), (1979).
- Brown, C. P, y Richard O. Duda., "A Structural Model for Binaural Sound Synthesis", *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* 6, (5), 476-88, (1998).
- Iida, Kazuhiro, Motokuni Itoh, Atsue Itagaki, y Masayuki Morimoto, "Median plane localization using a parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues", *Applied Acoustics, Head- Related Transfer Function and its Applications*, 68, (8), (2007).
- Moore, Brian C. J., Simon R. Oldfield, y Gary J. Dooley, "Detection and discrimination of spectral peaks and notches at 1 and 8 kHz", *The Journal of the Acoustical Society of America* 85, (2), 820, (1989).
- Kahana, Yuvi, y Philip A. Nelson., "Numerical modelling of the spatial acoustic response of the human pinna", *Journal of Sound and Vibration*, 292, (1-2), 148-78, (2006).
- Lopez-Poveda, Enrique A., y Ray Meddis, "A physical model of sound diffraction and reflections in the human concha", *The Journal of the Acoustical Society of America* 100, (5), 3248, (1996).
- Middlebrooks, John C., "Virtual localization improved by scaling nonindividualized external-ear transfer functions in frequency", *The Journal of the Acoustical Society of America* 106, (3), 1493-1510, (1999).
- Raykar, Vikas C., Ramani Duraiswami, y B. Yegnanarayana, "Extracting the frequencies of the pinna spectral notches in measured head related impulse responses", *The Journal of the Acoustical Society of America* 118, (1), 364, (2005).
- Iida, Kazuhiro, Motoki Yairi, y Masayuki Morimoto, "Role of pinna cavities in median plane localization", *Proc. 16th Int'l Cong. on Acoust*, 845-846, (1998).
- Takemoto, Hironori, Parham Mokhtari, Hiroaki Kato, Ryouichi Nishimura, y Kazuhiro Iida., "Mechanism for generating peaks and notches of head-related transfer functions in the median plane", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132, (6), (2012).
- Warren, Christopher. "Impulse Response Measurement Using Complementary Sequences", (PhD thesis), USA, University of California San Diego, (2014).