

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 606 642**

51 Int. Cl.:

**H04S 1/00** (2006.01)

**H04S 3/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.03.2013 PCT/US2013/033233**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.09.2013 WO13142653**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.03.2013 E 13714810 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.10.2016 EP 2829082**

54 Título: **Método y sistema para generación de función de transferencia relacionada con la cabeza mediante mezcla lineal de funciones de transferencia relacionadas con la cabeza**

30 Prioridad:

**23.03.2012 US 201261614610 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**24.03.2017**

73 Titular/es:

**DOLBY LABORATORIES LICENSING CORPORATION (100.0%)  
1275 Market Street  
San Francisco, CA 94103, US**

72 Inventor/es:

**MCGRATH, DAVID S.**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

**ES 2 606 642 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Método y sistema para generación de función de transferencia relacionada con la cabeza mediante mezcla lineal de funciones de transferencia relacionadas con la cabeza

5

REFERENCIA CRUZADA PARA SOLICITUDES DE PATENTES RELACIONADAS

Esta solicitud reivindica la prioridad para la solicitud de patente provisional de Estados Unidos nº 61/614,610, presentada con fecha 23 de marzo de 2012.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

CAMPO DE LA INVENCION

15 La presente invención se refiere a métodos y sistemas para realizar una interpolación sobre funciones de transferencia relacionadas con la cabeza (HRTF) para generar funciones HRTF interpoladas. Más concretamente, la invención se refiere a métodos y sistemas para realizar una mezcla lineal sobre funciones HRTF acopladas (esto es, sobre valores que determinan las funciones HRTF acopladas) para determinar las funciones HRTF interpoladas, para realizar un filtrado con las funciones HRTF interpoladas y para predeterminar las funciones HRTF acopladas para tener propiedades de modo que se pueda realizar una interpolación en una manera especialmente deseable (mediante mezcla lineal).

20

El documento AU732016 da a conocer un método para generar funciones HRTF interpoladas, en donde la interpolación se realiza en un conjunto de funciones HRTF que se obtiene por alineación temporal y una fase mínima que convierte las funciones HRTF originales.

25

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

30 Mediante esta idea inventiva, que se incluye en las reivindicaciones, la expresión de realizar una operación “sobre” señales o datos (p.ej., filtrado, escalamiento o transformación de las señales o datos) se utiliza en un amplio sentido para indicar la realización de la operación directamente sobre las señales o datos, o sobre versiones procesadas de las señales o datos (p.ej., sobre versiones de las señales que se han sometido a un filtrado preliminar antes de la realización de la operación correspondiente).

30

35 A través de esta idea inventiva que se incluye en las reivindicaciones, la expresión “mezcla lineal” de valores (p.ej., coeficientes que determinan funciones de transferencia relacionadas con la cabeza) indica la determinación de una combinación lineal de los valores. En este caso, la realización de una “interpolación lineal” sobre funciones de transferencia relacionada con la cabeza (HRTFs) para determinar una función HRTF interpolada indica la realización de una mezcla lineal de los valores que determinan las funciones HRTF (determinación de una combinación lineal de dichos valores) para determinar valores que determinen la función HRTF interpolada.

40

A través de esta idea inventiva que se incluye en las reivindicaciones, el término “sistema” se utiliza en un amplio sentido para indicar un dispositivo, un sistema o subsistema. A modo de ejemplo, un subsistema que pone en práctica un mapeado de puesta en correspondencia puede referirse como un sistema de mapeado (o un mapeador) y un sistema que incluye dicho subsistema (p.ej., un sistema que realiza varios tipos de procesamiento sobre la entrada de audio, en donde el subsistema determina una función de transferencia para uso en una de las operaciones de procesamiento) puede referirse también como un sistema de mapeado (o un mapeador).

45

A través de esta idea inventiva, que se incluye en las reivindicaciones, el término “presentar” indica el proceso de convertir una señal de audio (p.ej., una señal de audio multicanal) en una o más alimentaciones de altavoces (en donde cada alimentación de altavoz es una señal de audio a aplicarse directamente a un altavoz o a un amplificador y altavoz en serie), o el proceso de convertir una señal de audio en una o más alimentaciones de altavoces y convertir las alimentaciones de altavoces en sonido utilizando uno o más altavoces. En este último caso, la presentación se refiere, a veces, como presentación “por” los altavoces).

50

A través de esta idea inventiva, que se incluye en las reivindicaciones, los términos “altavoz” y “caja acústica” se utilizan de forma sinónima para indicar cualquier transductor de emisión de sonido. Esta definición incluye los altavoces puestos en práctica como múltiples transductores (p.ej., altavoces de graves y de agudos).

55

A través de toda esta idea inventiva, que se incluye en las reivindicaciones, la expresión verbal “incluye” se utiliza en un amplio sentido para indicar “es o incluye” y otras formas del verbo “incluir” se utilizan en el mismo amplio sentido. A modo de ejemplo, la expresión de “un filtro que incluye un filtro de realimentación” (o la expresión “un filtro que incluye un filtro de realimentación”) indica aquí un filtro que es un filtro de realimentación (esto es, no incluye un filtro de reenvío) o un filtro que incluye un filtro de realimentación (y al menos otro filtro).

60

A través de esta idea inventiva, que se incluye en las reivindicaciones, el término “virtualizador” (o “sistema

65

virtualizador”) indica un sistema acoplado y configurado para recibir N señales de audio de entrada (indicativas del sonido desde un conjunto de localizaciones origen) y para generar M señales de audio de salida para reproducción por un conjunto de M altavoces físicos (p.ej., auriculares y altavoces) situados en localizaciones de salida diferentes de las localizaciones origen, en donde cada uno de N y M es un número mayor que uno. N puede ser igual o diferente que M. Un virtualizador genera (o intenta generar) las señales de audio de salida de modo que cuando se reproducen, el usuario en escucha percibe las señales reproducidas como siendo emitidas desde las localizaciones origen en lugar de las localizaciones de salida de los altavoces físicos (las localizaciones origen y las localizaciones de salida son relativas al usuario en escucha). A modo de ejemplo, en el caso de que  $M = 2$  y  $N = 1$ , un virtualizador mezcla la señal de entrada para generar señales de salida izquierda y derecha para una reproducción estéreo (o reproducción por auriculares). A modo de otro ejemplo, en el caso de que  $M = 2$  y  $N > 3$ , un virtualizador realiza una mezcla descendente de las N señales de entrada para su reproducción estéreo. En otro ejemplo en el que  $N = M = 2$ , las señales de entrada son indicativas de sonido procedente de dos localizaciones origen posteriores (detrás de la cabeza del usuario en escucha) y el virtualizador genera dos señales de audio de salida para su reproducción por altavoces estéreo situados en frente del usuario en escucha de modo que el usuario en escucha perciba las señales reproducidas como siendo emitidas desde las localizaciones origen (por detrás de la cabeza del usuario en escucha) en lugar de las localizaciones de altavoces (en frente de la cabeza del usuario en escucha).

Las Funciones de Transferencia Relacionadas con la Cabeza (“HRTFs”) son las características de filtros (representadas como respuestas de impulsos o respuestas de frecuencia) que representan la manera en que el sonido en el espacio libre se propaga a los dos oídos de una persona humana. Las funciones HRTF varían de una persona a otra y variando también dependiendo del ángulo de llegada de las ondas acústicas. La aplicación de un filtro de HRTF del oído derecho (esto es, aplicación de un filtro que tenga una respuesta de impulsos de HRTF del oído derecho) a una señal sonora,  $x(t)$ , produciría una señal filtrada de HRTF,  $x_R(t)$ , indicativa de la señal sonora como se percibiría por un usuario en escucha después de propagarse en una dirección de llegada específica desde una fuente origen al oído derecho del usuario en escucha. La aplicación de un filtro HRTF del ID (esto es, la aplicación de un filtro que tenga una respuesta de impulsos de HRTF del oído izquierdo) a la señal sonora,  $x(t)$ , produciría una señal filtrada de HRTF,  $x_L(t)$ , indicativa de la señal sonora que se hubiera percibido por el usuario en escucha después de la propagación en una dirección de llegada específica desde una fuente origen al oído izquierdo del usuario en escucha.

Aunque las funciones HRTF se suelen referir, en esta descripción, como “respuestas de impulsos”, cada una de dichas funciones HRTF podría referirse alternativamente por otras expresiones, incluyendo “función de transferencia”, “respuesta de frecuencia” y “respuesta de filtro”. Una función HRTF podría estar representada como una respuesta de impulsos en el dominio del tiempo o como una respuesta de frecuencia en el dominio de la frecuencia.

Podemos definir la dirección de llegada en términos de los ángulos de Azimuth y de Elevación (Az, El), o en los términos de un vector unitario  $(x, y, z)$ . A modo de ejemplo, en la Figura 1 la dirección de llegada del sonido (en los oídos del usuario en escucha 1) pueden definirse en términos de un vector unitario  $(x, y, z)$ , en donde los ejes x e y son según se ilustra, y el eje z es perpendicular al plano de la Figura 1 y la dirección de llegada del sonido puede definirse también en términos del ángulo Azimuth Az ilustrado (p.ej., con un ángulo de Elevación, El, igual a cero).

La Figura 2 ilustra la dirección de llegada del sonido (emitido desde la posición origen S), en la localización L (p.ej., la localización del oído de un oyente), definida en los términos de un vector unitario  $(x, y, z)$ , en donde los ejes x, y, y z son según se ilustra, y en términos del ángulo Azimuth Az y del ángulo de Elevación, El.

Es frecuente realizar medidas de las funciones HRTFs para individuos que emiten sonido desde diferentes direcciones y la captura de la respuesta en los oídos del usuario en escucha. Pueden realizarse mediciones próximas al tímpano del usuario en escucha o a la entrada del canal del oído bloqueado, o mediante otros métodos que son bien conocidos en esta técnica. Las respuestas de HRTF medidas pueden modificarse de varias maneras (también conocidas en esta técnica) para compensar la ecualización del altavoz que se utiliza en las mediciones, así como para compensar la ecualización de auriculares que se utilizarán más tarde en la presentación del material binaural al escuchante.

Un uso tipo de funciones HRTF es como respuestas de filtros para el procesamiento de la señal previsto para crear la ilusión del sonido en 3D, para un usuario en escucha que utiliza auriculares. Otros usos típicos para las funciones HRTF incluyen la creación de una reproducción mejorada de señales de audio a través de los altavoces. A modo de ejemplo, es convencional utilizar funciones HRTF para poner en práctica un virtualizador que genera señales de audio de salida (en respuesta a las señales de audio de entrada indicativas de sonido procedente de un conjunto de localizaciones origen) de modo que, cuando las señales de audio de salida sean reproducidas por altavoces, se perciben como siendo emitidas desde las localizaciones origen en lugar de desde las localizaciones de los altavoces físicos (en donde las localizaciones origen y las localizaciones de salida son relativas al usuario en escucha). Virtualizadores pueden ponerse en práctica en una amplia diversidad de dispositivos multimedia que contienen altavoces estéreo (televisiones, PCs, iPod docks) o están previstos para utilizarse con altavoces estéreo o con auriculares.

Un sonido envolvente virtual puede ayudar a crear la percepción de que existen más fuentes de sonido que altavoces físicos existen (p.ej., auriculares o altavoces). En condiciones normales, al menos dos altavoces se requieren para un usuario en escucha normal para percibir el sonido reproducido como si se emitiera desde múltiples fuentes origen. Es convencional para los sistemas envolventes virtuales utilizar funciones HRTF para generar señales de audio que, cuando se reproducen por altavoces físicos (p.ej., un par de altavoces físicos) situados en frente de un usuario en escucha se perciben en los tímpanos del oyente como sonido procedente de altavoces en cualquiera de una amplia diversidad de posiciones (incluyendo las posiciones detrás del usuario en escucha).

La mayor parte o la totalidad de los usos convencionales de las funciones HRTF se beneficiarían de las formas de realización de la invención.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

En una clase de formas de realización, la invención es un método para realizar una mezcla lineal en funciones HRTF acopladas (esto es, sobre valores que determinan las funciones HRTF acopladas) para determinar una función HRTF interpolada para cualquier dirección de llegada especificada dentro de una gama (p.ej., una gama que abarca al menos 60 grados en una plana o una gama completa de 360 grados en un plano) en donde las funciones HRTF acopladas han sido predeterminadas para tener propiedades de modo que la mezcla lineal pueda realizarse en ellas (para generar funciones HRTF interpoladas) sin introducir una distorsión de filtrado tipo peine importante (en el sentido de que cada función HRTF interpolada determinada por dicha mezcla lineal tenga una respuesta de magnitud que no presente ninguna distorsión de filtrado tipo peine importante).

En condiciones normales, la mezcla lineal se realiza sobre valores de un “conjunto de funciones HRTF acopladas” predeterminado, en donde el conjunto de funciones HRTF acopladas comprende valores que determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas, correspondiendo cada una de las funciones HRTF acopladas a una de entre un conjunto de al menos dos direcciones de llegada. En condiciones normales, el conjunto de funciones HRTF acopladas incluye un pequeño número de funciones HRTFs acopladas, cada una para una dirección diferente de entre un pequeño número de direcciones de llegada dentro de un espacio (p.ej., un plano, o parte de un plano) y una interpolación lineal realizada sobre funciones HRTF acopladas en el conjunto determina una función HRTF para cualquier dirección de llegada especificada en el espacio. En condiciones normales, el conjunto de funciones HRTF acopladas incluye un par de funciones HRTF acopladas (una función HRTF acoplada del oído izquierdo y una función HRTF acoplada del oído derecho) para cada uno de entre un pequeño número de ángulos de llegada que abarcan un espacio (p.ej., un plano horizontal) y se cuantizan para una resolución angular particular. A modo de ejemplo, el conjunto de funciones HRTF acopladas puede consistir en un par de funciones HRTF acopladas para cada uno de doce ángulos de llegada alrededor de un círculo de 360 grados, con una resolución angular de 30 grados (esto es, ángulos de 0, 30, 60, ..., 300 y 330 grados).

En algunas formas de realización, el método inventivo utiliza (p.ej., incluye las etapas de determinación y de utilización) un conjunto de funciones HRTF de base que determina, a su vez, un conjunto de funciones HRTF acopladas. A modo de ejemplo, el conjunto de funciones HRTF de base puede determinarse (a partir de un conjunto de funciones HRTF acopladas predeterminado) realizando un ajuste de mínimos cuadrados, u otro proceso de ajuste, para determinar los coeficientes del conjunto de funciones HRTF de base de modo que el conjunto de funciones HRTF de base determine el conjunto de funciones HRTF acopladas para estar dentro de una exactitud adecuada (predeterminada). El conjunto de funciones HRTF de base “determina” el conjunto de funciones HRTF acopladas en el sentido de que la combinación lineal de valores (p.ej., coeficientes) del conjunto de funciones HRTF de base (en respuesta a una dirección de llegada especificada) determine la misma función HRTF (para estar dentro de la exactitud adecuada) determinada por una combinación lineal de las funciones HRTFs acopladas en el conjunto de funciones HRTF acopladas en respuesta a la misma dirección de llegada.

Las funciones HRTF acopladas, generadas o utilizadas en formas de realización típicas de la invención, difieren de las funciones HRTF normales (p.ej., funciones HRTF físicamente medidas) al tener un retardo de grupo inter-aural notablemente reducido a las altas frecuencias (por encima de una frecuencia de acoplamiento), mientras que proporcionan todavía una respuesta de fase inter-aural bien adaptada (en comparación con la que se proporciona por un par de funciones HRTF normales del oído izquierdo y del oído derecho) a bajas frecuencias (inferiores a la frecuencia de acoplamiento). La frecuencia de acoplamiento es mayor que 700 Hz y normalmente menor que 4 kHz. Las funciones HRTFs acopladas de un conjunto de funciones HRTF acopladas generadas (o utilizadas) en formas de realización típicas de la invención se suelen determinar a partir de las funciones HRTF normales (para las mismas direcciones de llegada) modificando intencionadamente las respuesta de fase de cada función HRTF normal por encima de la frecuencia de acoplamiento (para obtener una función HRTF acoplada correspondiente). Esta operación se realiza de modo que la respuesta de fase de todos los filtros HRTF acoplados en el conjunto estén acoplados por encima de la frecuencia de acoplamiento (es decir, de modo que la diferencia entre la fase de cada función HRTF acoplada del oído izquierdo y cada función HRTF acoplada del oído derecho sea al menos prácticamente constante como una función de la frecuencia, para todas las frecuencias prácticamente superiores a la frecuencia de acoplamiento, y preferentemente, de modo que la respuesta de fase de cada función HRTF acoplada en el conjunto sea al menos prácticamente constante como una función de frecuencia para todas las

frecuencias prácticamente superiores a la frecuencia de acoplamiento).

En formas de realización típicas, el método inventivo incluye las etapas de:

5 (a) en respuesta a una señal indicativa de una dirección de llegada especificada (p.ej., datos indicativos de la dirección de llegada especificada), realizar una mezcla lineal de datos indicativos de funciones HRTF acopladas de un conjunto de funciones HRTF acopladas (en donde el conjunto de funciones HRTF acopladas comprende valores que determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas, correspondiendo cada una de las funciones HRTF acopladas a una de entre un conjunto de al menos dos direcciones de llegada) para determinar una función HRTF para la dirección de llegada especificada; y

10 (b) realizar un filtrado de funciones HRTF en una señal de entrada de audio (p.ej., datos de audio en el dominio de la frecuencia indicativos de uno o más canales de audio, o datos de audio en el dominio del tiempo indicativos de uno o más canales de audio), utilizando la función HRTF para la dirección de llegada especificada. En algunas formas de realización, la etapa (a) incluye la etapa de realizar la mezcla lineal sobre coeficientes de un conjunto de funciones HRTF de base para determinar la función HRTF para la dirección de llegada especificada, en donde el conjunto de funciones HRTF de base determina el conjunto de funciones HRTF acopladas.

20 En algunas formas de realización, la invención es un dispositivo de mapeado de correspondencia de funciones HRTF (y un método de mapeado de correspondencia puesto en práctica por dicho dispositivo de mapeado de HRTF) configurado para realizar la interpolación lineal (esto es, una mezcla lineal de) funciones HRTF acopladas de un conjunto de funciones HRTF acopladas, para determinar una función HRTF para cualquier dirección de llegada especificada dentro de un margen (p.ej., un margen que abarca al menos 60 grados en un plano o una gama completa de 360 grados en un plano o incluso la gama completa de ángulos de llegada en tres dimensiones). En algunas formas de realización, el dispositivo mapeador de funciones HRTF está configurado para realizar una mezcla lineal de coeficientes de filtro de un conjunto de funciones HRTF de base (que, a su vez, determina un conjunto de funciones HRTF acopladas) para determinar una función HRTF para cualquier dirección de llegada especificada en un margen (p.ej., un margen que abarca al menos 60 grados en un plano, o una gama completa de 360 grados en un plano o incluso la gama completa de ángulos de llegada en tres dimensiones).

30 En una clase de formas de realización, la invención es un método y un sistema para realizar un filtrado de HRTF en una señal de entrada de audio (p.ej., datos de audio en el dominio de la frecuencia indicativos de uno o más canales de audio, o datos de audio en el dominio del tiempo indicativos de uno o más canales de audio). El sistema incluye un dispositivo mapeador de HRTF (acoplado para recibir una señal, p.ej., datos, indicativos de una dirección de llegada) y un subsistema de filtros de HRTF (p.ej., etapa) acoplado para recibir la señal de entrada de audio y configurado para filtrar la señal de entrada de audio utilizando una función HRTF determinada por el mapeador de correspondencia de HRTF en respuesta a la dirección de llegada. A modo de ejemplo, el dispositivo mapeador puede memorizar (o estar configurado para acceder) datos que determinan el conjunto de funciones HRTF de base (que, a su vez, determina un conjunto de funciones HRTF acopladas) y puede configurarse para realizar una combinación lineal de coeficientes del conjunto de funciones HRTF de base en una manera determinada por la dirección de llegada (p.ej., una dirección de llegada, especificada como un ángulo un vector unitario, que corresponde a un conjunto de datos de audio de entrada asignados al subsistema de filtro de funciones HRTFs) para determinar un par de funciones HRTF (esto es, una función HRTF del oído izquierdo y una función HRTF del oído derecho) para la dirección de llegada. El subsistema de filtros de funciones HRTF puede configurarse para filtrar un conjunto de datos de audio de entrada que se le asignan, con un par de funciones HRTF determinadas por el dispositivo mapeador para una dirección de llegada correspondiente a los datos de audio de entrada. En algunas formas de realización, el subsistema de filtros de HRTF pone en práctica un virtualizador p.ej., un virtualizador configurado para procesar datos indicativos de señal de audio de entrada monofónica para generar canales de salida de audio izquierdo y derecho (a modo de ejemplo, para la presentación a través de auriculares con el fin de proporcionar a un oyente una impresión de sonido emitido desde una fuente en la dirección de llegada especificada). En algunas formas de realización, el virtualizador está configurado para generar señales de audio de salida (en respuesta al audio de entrada indicativo del sonido procedente de una fuente fija) indicativo del sonido procedente de una fuente que está suavemente panoramizada entre ángulos de llegada en un espacio abarcado por un conjunto de funciones HRTF acopladas (sin introducir ninguna distorsión de filtrado tipo peine importante).

55 Utilizando un conjunto de funciones HRTF acopladas determinado en conformidad con una clase de formas de realización de la invención, la señal de audio de entrada puede procesarse de modo que parezca llegar desde cualquier ángulo en un espacio abarcado por el conjunto de funciones HRTF acopladas, incluyendo los ángulos que no corresponden exactamente a las funciones HRTFs acopladas que se incluyen en el conjunto, sin introducir ninguna distorsión de filtrado de tipo peine importante.

60 Formas de realización típicas de la invención determinan (o determinan y utilizan) un conjunto de funciones HRTF acopladas que satisface los tres criterios siguientes (a veces referidos aquí por conveniencia como la "Regla Dorada"):

65 1. La respuesta de fase inter-aural de cada par de filtros de HRTF (esto es, cada función HRTF del oído izquierdo

y cada función HRTF del oído derecho creada para una dirección de llegada especificada) que se crean a partir del conjunto de funciones HRTF acopladas (mediante un proceso de mezcla lineal), adaptando la respuesta de fase inter-aural de un par correspondiente de funciones HRTF normales del oído izquierdo y del oído derecho con error de fase menor que el 20 % (o más preferentemente, con un error de fase menor que el 5 %) para todas las frecuencias inferiores a una frecuencia de acoplamiento. La frecuencia de acoplamiento es mayor que 700 Hz y suele ser inferior a 4 kHz. Dicho de otro modo, el valor absoluto de la diferencia entre la fase de la función HRTF del oído izquierdo creada a partir del conjunto y la fase de la función HRTF del oído derecho correspondiente creada a partir del conjunto difieren menos del 20 % (o más preferentemente, menos del 5 %), respecto al valor absoluto de la diferencia entre la fase de la función HRTF normal del oído izquierdo correspondiente y la fase de la función HRTF normal del oído derecho correspondiente, en cada frecuencia inferior a la frecuencia de acoplamiento. En frecuencias superiores a la frecuencia de acoplamiento, la respuesta de fase de los filtros de HRTF que se crean a partir del conjunto (mediante el proceso de mezcla lineal), se desvían del comportamiento de las funciones HRTF normales, de modo que el retardo del grupo inter-aural (a dichas altas frecuencias) es notablemente reducido en comparación con las funciones HRTF normales;

2. La respuesta de magnitud de cada filtro de HRTF creado a partir del conjunto (mediante un proceso de mezcla lineal) para una dirección de llegada está dentro del margen previsto para las funciones HRTF normales para la dirección de llegada (p.ej., en el sentido de que no presentan ninguna distorsión de filtrado tipo peine importante en relación con la respuesta de magnitud de un filtro de HRTF normal típico para la dirección de llegada); y
3. El margen de ángulo de llegada que puede abarcarse por el proceso de mezcla (para generar un par de funciones HRTF para cada ángulo de llegada en el margen mediante un proceso de mezcla lineal de funciones HRTF acopladas en el conjunto) es al menos de 60 grados (y preferentemente es de 360 grados).

Un aspecto de la idea inventiva es un sistema configurado para realizar cualquier forma de realización del método inventivo. En algunas formas de realización, el sistema inventivo es o incluye un procesador de uso general o especial (p.ej., un procesador de señal digital de audio) programado con software (o firmware) y/o de cualquier otro modo configurado para realizar una forma de realización del método inventivo. En algunas formas de realización, el sistema inventivo el sistema inventivo se pone en práctica mediante una configuración apropiada (p.ej., mediante programación) un procesador de señal digital de audio (DSP) configurable. El procesador DSP de audio puede ser un procesador DSP de audio convencional que sea configurable (p.ej., programable mediante software o firmware apropiado o de cualquier otro modo, configurable en respuesta a los datos de control) para realizar cualquiera de una diversidad de operaciones sobre la señal de audio de entrada así como para realizar una forma de realización del método inventivo. En condiciones operativas, el DSP de audio que ha sido configurado para realizar una forma de realización del método inventivo en conformidad con la invención está acoplado para recibir al menos una señal de audio de entrada, y al menos una señal indicativa de una dirección de llegada, y el DSP realiza normalmente una diversidad de operaciones sobre dicha señal de audio además de realizar su filtrado de HRTF en conformidad con la forma de realización del método inventivo.

Otros aspectos de la invención son métodos para generar un conjunto de funciones HRTF acopladas (p.ej., uno que satisface la denominada Regla Dorada aquí descrita), un soporte legible por ordenador (p.ej., un disco) que memoriza (en forma tangible) un código para programar un procesador u otro sistema para realizar cualquier forma de realización del método inventivo, y un soporte legible por ordenador (p.ej., un disco) que memoriza (en forma tangible) datos que determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas, en donde el conjunto de funciones HRTF acopladas ha sido determinado en conformidad con una forma de realización de la invención (p.ej., para satisfacer la denominada Regla Dorada aquí descrita).

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La Figura 1 es un diagrama que ilustra la definición de una dirección de llegada del sonido (en los oídos del usuario en escucha) en términos de un vector unitario  $(x, y, z)$  en donde el eje  $z$  es perpendicular al plano de la Figura 1 y en términos del ángulo Azimuth  $Az$  (con un ángulo de Elevación,  $EI$ , igual a cero).

La Figura 2 es un diagrama que ilustra la definición de una dirección de llegada del sonido (emitido desde una posición de origen  $S$ ) en la localización  $L$ , en términos de un vector unitario  $(x, y, z)$  y en términos del ángulo Azimuth  $Az$  y del ángulo de Elevación,  $EI$ .

La Figura 3 es un conjunto de trazados (magnitud respecto al tiempo) de pares de respuesta de impulsos de funciones HRTF convencionalmente determinadas para ángulos de Azimuth de 35 y 55 grados (etiquetado  $HRTF_L(35,0)$  y  $HRTF_R(35,0)$  y  $HRTF_L(55,0)$  y  $HRTF_R(55,0)$ ), un par de respuestas de impulsos de HRTF convencionalmente determinadas (medidas) para un ángulo de Azimuth de 45 grados (etiquetado  $HRTF_L(45,0)$  y  $HRTF_R(45,0)$ ), y un par de respuestas de impulsos sintetizados HRTF para un ángulo de Azimuth de 45 grados (etiquetado  $(HRTF_L(35,0) + HRTF_L(55,0))/2$  y  $(HRTF_R(35,0) + HRTF_R(55,0))/2$ ) generado mediante la mezcla lineal de las respuestas de impulsos de HRTF convencionales para ángulos de Azimuth de 35 y 55 grados.

La Figura 4 es un gráfico de la respuesta de frecuencia de la función HRTF del oído derecho sintetizada ( $(HRTF_R$

(35,0) +  $HRTF_R(55,0)/2$ ) de la Figura 3 y la respuesta de frecuencia de la función HRTF del oído derecho verdadera para un ángulo de Azimuth de 45 grados ( $HRTF_R(45,0)$ ) de la Figura 3.

5 La Figura 5(a) es un trazado de las respuestas de frecuencia (magnitud respecto a la frecuencia) de los no sintetizados 35, 45 y 55 grados, con la función  $HRTF_{RS}$  del oído derecho de la Figura 3.

La Figura 5(b) es un trazado de las respuestas de fase (fase respecto a frecuencia) de los no sintetizados 35, 45 y 55 grados con la función  $HRTF_{RS}$  del oído derecho de la Figura 3.

10 La Figura 6(a) es un trazado de las respuestas de fase del oído derecho, de las funciones HRTF acopladas (generadas en conformidad con una forma de realización de la invención) para ángulos de Azimuth de 35 y 55 grados.

15 La Figura 6(b) es un trazado de las respuestas de fase del oído derecho, de las funciones HRTF acopladas (generadas en conformidad con otra forma de realización de la invención) para ángulos de Azimuth de 35 y 55 grados.

20 La Figura 7 es un trazado de las respuestas de frecuencia (magnitud respecto a la frecuencia) de una función HRTF del oído derecho convencionalmente determinada para un ángulo de Azimuth de 45 grados (etiquetado como  $HRTF_R(45,0)$ ), y un trazado de la respuesta de frecuencia de una función HRTF del oído derecho (etiquetado ( $HRTF^z_R(35, 0) + HRTF^z_R(55, 0)/2$ )) determinado en conformidad con una forma de realización de la invención mediante una mezcla lineal de las funciones HRTF acopladas (también determinadas en conformidad con la invención) para ángulos de Azimuth de 35 y 55 grados.

25 La Figura 8 es un gráfico (trazado de magnitud respecto a la frecuencia con la frecuencia expresada en unidades del índice  $k$  del contenedor de FFT) de una función de ponderación  $W(k)$ , utilizada en algunas formas de realización de la invención para determinar las funciones HRTFs acopladas.

30 La Figura 9 es un diagrama de bloques de una forma de realización del sistema inventivo.

La Figura 10 es diagrama de bloques de una forma de realización del sistema inventivo, que incluye un dispositivo mapeador de correspondencia de funciones HRTF 10 y un procesador de audio 20, y está configurado para procesar una señal de audio monofónica, para presentación a través de auriculares, con el fin de proporcionar a un usuario en escucha una impresión de un sonido localizado en un ángulo de Azimuth especificado, Az.

35 La Figura 11 es un diagrama de bloques de otra forma de realización del sistema inventivo, que incluye un mezclador 30 y un dispositivo mapeador de HRTF 40.

40 La Figura 12 es un diagrama de bloques de otra forma de realización del sistema inventivo.

La Figura 13 es un diagrama de bloques de otra forma de realización del sistema inventivo.

#### DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS FORMAS DE REALIZACIÓN PREFERIDAS

45 Numerosas formas de realización de la presente invención son tecnológicamente posibles. Será evidente para los expertos en esta técnica, a partir de la presente idea inventiva, cómo proceder para su puesta en práctica. Formas de realización del sistema inventivo, soporte y método se describirán haciendo referencia a las Figuras 3 a 13.

50 En este caso, un "conjunto" de funciones HRTF indica un conjunto de funciones HRTF que corresponden a múltiples direcciones de llegada. Una tabla de consulta puede memorizar un conjunto de funciones HRTF, y puede proporcionar (en respuesta a la entrada indicativa de una dirección de llegada) un par de funciones HRTF del oído izquierdo y del oído derecho (incluidas en el conjunto) que corresponden a la dirección de llegada. En condiciones normales, una función HRTF del oído izquierdo y una función HRTF del oído derecho (correspondientes a cada dirección de llegada) están incluidas en un conjunto.

55 Las funciones HRTF del oído izquierdo y del oído derecho puestas en práctica como respuestas de impulsos de longitud finita (que es la manera en la que se suelen poner en práctica) se referirá a veces, aquí como:  $HRTF_L(x, y, z, n)$  y  $HRTF_R(x, y, z, n)$ , respectivamente, en donde  $(x, y, z)$  identifican el vector unitario que define la dirección de llegada correspondiente (como alternativa, las funciones HRTF se definen con referencia a los ángulos de Azimuth de elevación, Az y El, en lugar de las coordenadas de posición  $x, y$  y  $z$ , en algunas formas de realización de la presente invención) y en donde  $0 \leq n \leq N$ , en donde N es del orden de magnitud de los filtros de FIR, y  $n$  es el número de muestras de respuestas de impulsos. A veces, para mayor simplicidad, haremos referencia a dichos filtros sin referencia a las muestras de respuesta de impulsos que los comprenden (p.ej., los filtros serán referidos como ( $HRTF_L(x, y, z)$  o  $HRTF_L(Az, El)$ ), cuando no surge ninguna confusión a partir de la emisión de referencia al número de muestras de respuesta de impulsos,  $n$ .

En este caso, la expresión "HRTF normal" indica una respuesta de filtro que se asemeja estrechamente a la denominada Función de Transferencia relacionada con la Cabeza de un sujeto humano real. Una función HRTF normal puede crearse por cualquiera de una diversidad de métodos bien conocidos en esta técnica. Un aspecto de la presente invención es un nuevo tipo de función HRTF (referido aquí como una función HRTF acoplada) que difiere de las funciones HRTF normales en formas específicas a describirse.

En este caso la expresión "conjunto de funciones HRTF de base" indica un conjunto de respuestas de filtro (en general, coeficientes de filtro FIR) que pueden combinarse linealmente juntas para generar funciones HRTF (coeficientes de HRTF) para diversas direcciones de llegada. Numerosos métodos son conocidos en esta técnica para obtener conjuntos de tamaño reducido de coeficientes de filtro, incluyendo el método que se suele referir como un análisis de componentes principales.

En este caso, la expresión "mapeador de HRTF" indica un método o sistema que determina un par de respuestas de impulsos de HRTF (una respuesta del oído izquierdo y una respuesta del oído derecho) en respuesta a una dirección de llegada especificada (p.ej., una dirección especificada como un ángulo o como un vector unitario). Un mapeador de funciones HRTF puede operar utilizando un conjunto de funciones HRTF y puede determinar el par de funciones HRTF para la dirección especificada seleccionando la función HRTF en el conjunto cuya dirección de llegada correspondiente es la más próxima a la dirección de llegada especificada. Como alternativa, un mapeador de funciones HRTF puede determinar cada función HRTF para la dirección demandada interpolando entre funciones HRTF en el conjunto, en donde la interpolación está entre funciones HRTF en el conjunto que tienen direcciones de llegada correspondientes próximas a la dirección demandada. Ambas de estas técnicas (coincidencia más cercana e interpolación) son bien conocidas en esta técnica.

A modo de ejemplo, un conjunto de funciones HRTF puede contener un conjunto de coeficientes de respuesta de impulsos que representan funciones HRTF para múltiples direcciones de llegada, incluyendo varias direcciones en el plano horizontal (El=0). Si el conjunto incluye entradas para (Az=35°, El=0°) y (Az=55°, El=0°), en tal caso, un mapeador de funciones HRTF podría proporcionar una respuesta de HRTF estimada para (Az=45°, El=0°) mediante alguna forma de mezcla:

$$\begin{aligned} HRTF_L(45,0) &= \text{mix}(HRTF_L(35,0), HRTF_L(55,0)) \\ HRTF_R(45,0) &= \text{mix}(HRTF_R(35,0), HRTF_R(55,0)) \end{aligned} \quad (1.1)$$

Como alternativa, un mapeador de funciones HRTFs puede producir los filtros de HRTF para un ángulo de llegada particular mediante una mezcla lineal de coeficientes de filtros juntos a partir de un conjunto de funciones HRTF de base. Una exposición más detallada de este ejemplo se proporciona en la descripción siguiente con respecto a las funciones HRTF acopladas de formato B.

Se está intentando realizar cada operación de mezcla de las ecuaciones (1.1) mediante una promediación simple de las respuestas de impulsos, p.ej., como sigue:

$$\begin{aligned} HRTF_L(45,0,n) &= \frac{HRTF_L(35,0,n) + HRTF_L(55,0,n)}{2} \\ HRTF_R(45,0,n) &= \frac{HRTF_R(35,0,n) + HRTF_R(55,0,n)}{2} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Sin embargo, el método de interpolación lineal simple para la mezcla (p.ej., como en las ecuaciones (1.2)) de funciones HRTF convencionalmente generadas da lugar a problemas debido a la existencia de diferencias importantes de retardos de grupo entre las respuestas que se mezclan (p.ej., respuestas convencionalmente determinadas  $HRTF_R(35,0)$  y  $HRTF_R(55,0)$  en las ecuaciones (1.2)).

La Figura 3 ilustra respuestas de impulsos de funciones HRTF normales típicas para ángulos de Azimuth de 35 y 55 grados (las respuestas etiquetadas  $HRTF_L(35,0)$  y  $HRTF_R(35,0)$ , y las respuestas etiquetadas  $HRTF_L(55,0)$  y  $HRTF_R(55,0)$  en la Figura 3) junto con un par de funciones HRTF de 45 grados de Azimuth (medidos) verdaderas (etiquetado  $HRTF_L(45,0)$  y  $HRTF_R(45,0)$  en la Figura 3). La Figura 3 ilustra, además, un par de funciones HRTF de 45 grados sintetizadas (etiquetado  $(HRTF_L(35,0) + HRTF_L(55,0))/2$  y  $(HRTF_R(35,0) + HRTF_R(55,0))/2$  en la Figura 3), generadas promediando las respuestas de 35 y 55 grados en la manera ilustrada en las ecuaciones (1.2). La Figura 4 ilustra las respuestas de frecuencia de las funciones promediadas (" $(HRTF_R(35,0) + HRTF_R(55,0))/2$ ") con respecto a los valores verdaderos de la función HRTF del oído derecho (" $HRTF_R(45,0)$ ") para el ángulo de Azimuth de 45 grados.

En la Figura 5(a), las respuestas de frecuencia (magnitud respecto a la frecuencia) de los filtros de  $HRTF_R$  de 35, 45 y 55 grados verdaderos (de la Figura 3) son objeto de trazado. En la Figura 5(b), las respuestas de fases (fase respecto a la frecuencia) de los filtros de  $HRTF_R$  de 35, 45 y 55 grados verdaderos (de la Figura 3) son objeto de trazado.



Como es evidente a partir de la Figura 3, las respuestas de impulsos de funciones  $HRTF_R(35,0)$  y  $HRTF_R(55,0)$  muestran retardos notablemente diferentes (según se indica por la frecuencia de coeficientes cercanos a cero al inicio de cada una de estas respuestas de impulsos). Estos retardos iniciales son causados por el tiempo dedicado a la propagación del sonido al oído más distante (puesto que los ángulos de Azimuth de 35, 45 y 55 grados implican que el sonido alcance primero el oído izquierdo y por ello, existirá un retardo para el oído derecho, y este retardo aumentará a medida que aumente el valor de Azimuth (desde a 35 a 55 grados). Es también evidente a partir de la Figura 3 que las respuestas de la función  $HRTF_R(45,0)$  tiene un retardo inicial que está, algunas veces, entre los retardos de las respuestas de 35 y 55 grados (como estaría previsto). Sin embargo, la respuesta creada por la promediación de las respuestas de impulsos de 35 y 55 grados parece ser muy disimilar a la respuesta de impulsos de 45 grados verdaderos ( $HRTF_R(45,0)$ ). Esta diferencia, que es bastante notable en los trazados de respuestas de impulsos de la Figura 3, es incluso más evidente en las respuestas de impulsos de la Figura 4.

A modo de ejemplo, existe una muesca profunda en la Figura 4 a aproximadamente 3.5 kHz en la respuesta de filtro que fue creada promediando las funciones HRTF de 35 y 55 grados. La función HRTF de 45 grados "correcta" (etiquetada " $HRTF_R(45,0)$ " en la Figura 4) no tiene una muesca a aproximadamente 3.5 Hz. Por ello es evidente que la operación de mezcla realizada para generar la respuesta promediada " $(HRTF_R(35,0) + HRTF_R(55,0))/2$ " introdujo indeseablemente la muesca, lo que es un ejemplo de introducción de un artefacto normalmente referido como "filtrado en peine". Obsérvese que las muescas (artefactos de filtrado de tipo peine) aparecen también en la Figura 4 en la respuesta de filtros sintetizada (creada promediando las funciones HRTFs de 35 y 55 grados), a las frecuencias de 10 kHz y 17 kHz.

La causa de este filtrado en peine (*combing*) puede observarse examinando la respuesta de fase de los filtros de  $HRTF_R$ , según se ilustra en la Figura 5(b). Es evidente a partir de la Figura 5(b) que, a la frecuencia de 3.5 kHz, la función HRTF de 35 grados para el oído derecho tiene un desplazamiento de fase de -600 grados mientras que la función HRTF de 55 grados para el oído derecho tiene un desplazamiento de fase de -780 grados. La diferencia de fase de 180 grados entre los filtros de 35 y 55 grados significa que cualquier suma de estos filtros (como ocurriría cuando son promediados), dará lugar a una cancelación parcial de la respuesta a la frecuencia de 3.5 kHz (y por lo tanto, aparece la muesca profunda ilustrada en la Figura 4).

Aunque sería deseable utilizar técnicas de interpolación lineal (tal como el método de promediación anteriormente descrito) para poner en práctica un mapeador de correspondencia de funciones HRTF, los problemas de filtrado en peine (*combing*) del tipo descrito presentan una dificultad importante, puesto que las muescas resultantes darán lugar a artefactos audibles en las funciones HRTF que se producen tal como un mapeador de funciones HRTFs. Si la resolución espacial del conjunto de funciones HRTF se aumenta (p.ej., utilizando un conjunto mayor, con mediciones realizadas en una rejilla de escala más fina), los problemas de formación de muescas, *notching*, seguirán estando normalmente presentes (pero las muescas en la respuesta interpolada pueden aparecer a frecuencias más altas).

En una clase de forma de realización, la presente invención es un mapeador de funciones HRTF que puede determinar un par de funciones HRTFs ( $HRTF_L$  y  $HRTF_R$ ) para una dirección de llegada arbitraria, formando una suma ponderada de funciones HRTF de una biblioteca pequeña (conjunto) de funciones HRTF especialmente generadas (p.ej., un conjunto de menos de 50 funciones HRTFs). Si el conjunto contiene L entradas ( $d = 1, \dots, L$ ), el mapeador puede calcular:

$$\begin{aligned}
 HRTF_L(x, y, z, n) &= \sum_{d=1}^L WL_d^{x,y,z} \times IR_d(n) \\
 HRTF_R(x, y, z, n) &= \sum_{d=1}^L WR_d^{x,y,z} \times IR_d(n)
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

en donde los valores WL y WR son conjuntos de coeficientes de ponderación (cada uno para una dirección de llegada específica, determinada por las coordenadas x, y, y z, y el índice del conjunto, d), y los coeficientes  $IR_d(n)$  son las respuestas de impulsos en el conjunto.

Las funciones HRTF generadas específicamente (referidas aquí como "funciones HRTF acopladas" o "filtros HRTF acoplados") en el conjunto inventivo de las funciones HRTF (referido aquí como un "conjunto de funciones HRTF acopladas") se crean de forma artificial (p.ej., modificando las funciones HRTF "normales") de modo que las respuestas en el conjunto puedan mezclarse linealmente según las ecuaciones (1.3) para obtener funciones HRTF para direcciones de llegada arbitrarias. El conjunto de funciones HRTF acopladas suele incluir un par de funciones HRTF acopladas (una función HRTF del oído izquierdo y una función HRTF del oído derecho) para cada uno de varios ángulos de llegada que abarcan un espacio dado (p.ej., un plano horizontal) y son objeto de cuantización para una resolución angular particular (p.ej., un conjunto de funciones HRTF acopladas representa ángulos de llegada con una resolución angular de 30 grados alrededor de un círculo de 360 grados: 0, 30, 60, ..., 300 y 330 grados). Las funciones HRTF acopladas en el conjunto se determinan de modo que difieran de las funciones HRTF "normales" (verdaderas, p.ej., medidas) para los ángulos de llegada del conjunto. Concretamente, difieren en cuanto que la respuesta de fase de cada función HRTF normal se

modifica intencionadamente por encima de una frecuencia de acoplamiento específica (para obtener una función HRTF acoplada correspondiente). Más concretamente, la respuesta de fase de cada función HRTF normal es intencionadamente modificada de modo que la respuesta de fase de todos los filtros de HRTF acoplados en el conjunto estén acoplados por encima de la frecuencia de acoplamiento (esto es, de modo que la diferencia de fase inter-aural, entre las fases de cada función HRTF acoplada del oído izquierdo y cada función HRTF acoplada del oído derecho, sea al menos prácticamente constante como una función de la frecuencia para todas las frecuencias prácticamente superiores a la frecuencia de acoplamiento y preferentemente, de modo que la respuesta de fase de cada función HRTF acoplada en el conjunto sea al menos prácticamente constante como una función de la frecuencia para todas las frecuencias prácticamente superiores a la frecuencia de acoplamiento).

La creación de los conjuntos de funciones HRTF acopladas hace uso de la denominada Teoría Dúplex de Localización de Sonidos, propuesta por Lord Rayleigh. La teoría del dúplex se basa en que las diferencias de retardo en las funciones HRTF proporcionan importantes pistas para los escuchantes humanos a más bajas frecuencias (hasta una frecuencia en la gama desde aproximadamente 1000 Hz a aproximadamente 1500 Hz) y que las diferencias de amplitud proporcionan pistas importantes para los escuchantes humanos a más altas frecuencias. La teoría de dúplex no implica que las propiedades de fases o retardos de las funciones HRTF, a más altas frecuencias, carezcan totalmente de importancia, sino que simplemente son de importancia relativamente más baja, con diferencias de amplitud siendo más importantes a las altas frecuencias.

Para determinar un conjunto de funciones HRTF acopladas, se comienza seleccionando una "frecuencia de acoplamiento" ( $F_c$ ), que es la frecuencia por debajo de la que cada par de las funciones HRTF acopladas para una dirección de llegada (es decir, funciones HRTF acopladas del oído izquierdo y del oído derecho para la dirección de llegada) tienen una respuesta de fase inter-aural (la fase relativa entre los filtros del oído izquierdo y del oído derecho, como una función de la frecuencia) que adapta estrechamente la respuesta de fase inter-aural de las funciones HRTFs "normales" de la izquierda y de la derecha para la misma dirección de llegada. En formas de realización preferidas, las respuestas de fases inter-aurales se adaptan estrechamente en el sentido de que la fase de cada función HRTF acoplada está dentro del 20 % (o más preferentemente, dentro del 5 %) de la fase de la función HRTF "normal" correspondiente, para frecuencias inferiores a la frecuencia de acoplamiento.

Para apreciar el concepto de la "adaptación estrecha" observada entre respuestas de fase inter-aurales, se considera la respuesta de fase de 35 y 55 grados de las funciones HRTF<sub>RS</sub> acopladas ( $HRTF^z_R(35, 0)$ ,  $HRTF^z_R(55, 0)$ ,  $HRTF^c_R(35, 0)$ , y  $HRTF^c_R(55, 0)$ ), según se ilustra en las Figuras 6(a) y 6(b). Las respuestas de magnitud de estas funciones HRTF acopladas (no trazadas en las Figuras 6(a) y 6(b)) son las mismas que las de las funciones HRTF "normales" correspondientes (esto es,  $HRTF_R(35, 0)$  y  $HRTF_R(55, 0)$  de las Figuras 5(a) y 5(b)) a partir de las cuales se determinaron (de modo que las respuestas de magnitud son las mismas que las trazadas en la Figura 5(a)). Para determinar cada una de las funciones HRTF<sub>RS</sub> acopladas desde una función HRTF normal correspondiente, solamente se modifica la respuesta de fase (relativa a la que tiene la función HRTF normal correspondiente) y solamente por encima de la frecuencia de acoplamiento (que es  $F_c = 1000$  Hz, en este ejemplo). El resultado de esta modificación de la respuesta de fase es permitir a las funciones HRTF acopladas mezclarse linealmente juntas sin causar la presencia de artefactos de filtros de peine indeseable (en el sentido de que cada función HRTF interpolada, determinada por dicha mezcla lineal, tiene una respuesta de magnitud que no presenta una distorsión de filtrado tipo peine importante).

De este modo, la respuesta de fase de  $HRTF^z_R(35, 0)$  de la Figura 6(a) se adapta estrictamente a la de la función  $HRTF_R$  normal (35, 0) de la Figura 5(b) por debajo de la frecuencia de acoplamiento ( $F_c = 1000$  Hz), la de la función  $HRTF^z_R(55, 0)$  de la Figura 6(a) que coincide estrechamente con la de la función  $HRTF_R$  normal (55, 0) de la Figura 5(b) por debajo de la frecuencia de acoplamiento ( $F_c = 1000$  Hz), la de la función  $HRTF^c_R(35, 0)$  de la Figura 6(b) que se adapta estrechamente a la de la función  $HRTF_R$  normal (35,0) de la Figura 5(b) inferior a la frecuencia de acoplamiento ( $F_c = 1000$  Hz) y la de la función  $HRTF^c_R(55, 0)$  de la Figura 6(b) se adapta estrechamente a la de la función  $HRTF_R$  normal (35, 0) de la Figura 5(b) inferior a la frecuencia de acoplamiento ( $F_c = 1000$  Hz). Las respuestas de fase de la función  $HRTF^z_R(35, 0)$  y  $HRTF^z_R(55, 0)$  de la Figura 6(a) difieren notablemente de las de la función  $HRTF_R$  normal (35, 0) y de la función  $HRTF_R(55, 0)$  normal de la Figura 5(b) superior a la frecuencia de acoplamiento, y las respuestas de fase de  $HRTF^c_R(35, 0)$  y  $HRTF^c_R(55, 0)$  de la Figura 6(b) difieren notablemente de la función  $HRTF_R(35, 0)$  normal y de la función  $HRTF_R(55, 0)$  normal de la Figura 5(b) superior a la frecuencia de acoplamiento.

Las respuestas de fase de las funciones  $HRTF^z_R(35, 0)$  y  $HRTF^z_R(55, 0)$  de la Figura 6(a) están acopladas a frecuencias superiores a la frecuencia de acoplamiento (de modo que las respuestas de fase inter-aurales determinadas a partir de ellas y la función  $HRTF^z_L(35, 0)$  y  $HRTF^z_L(55, 0)$  del oído izquierdo correspondiente coincidirían o casi coincidirían a las frecuencias notablemente superiores a la frecuencia de acoplamiento. De modo similar, las respuestas de fase de las funciones  $HRTF^c_R(35, 0)$  y  $HRTF^c_R(55, 0)$  de la Figura 6(b) están acopladas a frecuencias superiores a la frecuencia de acoplamiento (de modo que las respuestas de fase inter-aurales determinadas a partir de ellas y las funciones  $HRTF^c_L(35, 0)$  y  $HRTF^c_L(55, 0)$ , del oído izquierdo correspondientes, coincidirían o casi coincidirían a frecuencias notablemente superiores a la frecuencia de acoplamiento). Según se ilustra en la Figura 6(b), las respuestas de fase trazadas para las funciones  $HRTF^c_R(35, 0)$  y  $HRTF^c_R(55, 0)$  no se desvían entre sí en más de un ángulo aproximado de 90 grados y consideramos que se trata de la "coincidencia"

más próxima de las respuestas de fase, puesto que esta coincidencia asegura que estos filtros acoplados puedan ser objeto de mezcla lineal juntos sin causar un efecto de *combining* importante.

5 La Figura 7 es un trazado de la respuesta de frecuencia (magnitud respecto a la frecuencia) de funciones HRTF<sub>R</sub>(45,0) del oído derecho convencionalmente determinadas (normales) que se ilustran en la Figura 5(b), y un trazado de la respuesta de frecuencia de una función HRTF del oído derecho (etiquetada (HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(35, 0) + HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(55, 0)/2) determinada en conformidad con una forma de realización de la invención mediante una mezcla lineal de las funciones HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(35, 0) y HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(55, 0) de la Figura 6(a). La mezcla lineal se realiza añadiendo las funciones HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(35, 0) y HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(55, 0) y dividiendo la suma por 2. Como es evidente a partir de la Figura 7, la función HRTF del oído derecho de la idea inventiva (HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(35, 0) + HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(55, 0)/2) carece de artefactos de filtros de tipo peine.

15 En la Figura 6(a), la función HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(35,0) y la función HRTF<sup>z</sup><sub>R</sub>(55,0) en sus trazados de fase, muestran las respuestas de fase de "cero extendido" de estas funciones HRTFs acopladas. De modo similar, la Figura 6(b) ilustra la fase de los filtros de HRTF<sup>c</sup><sub>R</sub>(35,0) y HRTF<sup>c</sup><sub>R</sub>(55,0), con la fase (superior a la frecuencia de acoplamiento de 1 kHz) siendo modificada para un desvanecimiento suave hacia una fase constante (a frecuencias bastante superiores a la frecuencia de acoplamiento).

20 Las funciones HRTFs acopladas pueden crearse en conformidad con la invención mediante una diversidad de métodos. Un método preferido funciona tomando un par de funciones HRTF normales (esto es, funciones HRTFs del oído izquierdo/oído derecho medidas a partir de una cabeza ficticia o un sujeto real, o creadas a partir de cualquier método convencional para generar funciones HRTF adecuadas) y modificando la respuesta de fase de las funciones HRTF normales a altas frecuencias (superiores a la frecuencia de acoplamiento).

25 A continuación se describirán ejemplos de métodos para determinar un par de funciones HRTF acopladas del oído izquierdo y del oído derecho, a partir de un par de funciones HRTF normales del oído izquierdo y del oído derecho en conformidad con la invención.

30 Al poner en práctica estos métodos a modo de ejemplo, la modificación de la respuesta de fase de las funciones HRTF normales puede realizarse utilizando una función de ponderación del dominio de la frecuencia (a veces, referida como un vector de ponderación), W(k), en donde k es un índice que indica la frecuencia (p.ej., un índice de contenedor de FFT), que opera sobre la respuesta de fase de cada función HRTF original (normal). La función de ponderación W(k) debe ser una curva alisada, por ejemplo del tipo ilustrado en la Figura 8. En el caso típico de que las funciones HRTF normales sean utilizadas con el uso de una Transformada de Fourier Rápida (FFT) de longitud K, el índice k del contenedor FFT corresponde a la frecuencia:  $f = k \times F_s / K$ , en donde F<sub>s</sub> es la frecuencia de muestreo de la señal digital. En el ejemplo de la Figura 8 de la función de ponderación, si los índices del contenedor de frecuencia k<sub>1</sub> y k<sub>2</sub> corresponden a las frecuencias de 1 kHz y de 2 kHz, la frecuencia de acoplamiento, F<sub>c</sub>, es F<sub>c</sub> = 1 kHz, y k<sub>1</sub> ≈ 1000 × K/F<sub>s</sub>, y k<sub>2</sub> ≈ 2000 × K/F<sub>s</sub>.

40 En una clase de formas de realización del método inventivo para determinar las funciones HRTF acopladas (esto es, un par de funciones HRTF acopladas del oído izquierdo y del oído derecho para cada dirección de llegada en un conjunto de direcciones de llegada) de un conjunto de funciones HRTF acopladas en respuesta a las funciones HRTF normales (esto es, un par de funciones HRTF normales del oído izquierdo y del oído derecho para cada una de las dirección de llegada en el conjunto), el método incluye las etapas siguientes:

45 1. Utilizando una Transformada de Fourier Rápida de longitud K, convertir cada par de funciones HRTF normales, HRTF<sub>L</sub>(x,y,z,n) y HRTF<sub>R</sub>(x, y, z, n), en un par de respuestas de frecuencia, FR<sub>L</sub>(k) y FR<sub>R</sub>(k), en donde k es el índice

entero de los contenedores de frecuencias, con una frecuencia central  $f = \frac{k \times F_s}{K}$  (en donde  $-N/2 \leq k \leq N/2$ , y en donde F<sub>s</sub> es la tasa de muestreo);

50 2. a continuación, determinar los componentes de magnitud y de fase (M<sub>L</sub>, M<sub>R</sub>, P<sub>L</sub>, P<sub>R</sub>), de modo que se tenga FR<sub>L</sub>(k) = M<sub>L</sub>(k)e<sup>iP<sub>L</sub>(k)</sup> y FR<sub>R</sub>(k) = M<sub>R</sub>(k)e<sup>iP<sub>R</sub>(k)</sup>, y en donde los componentes de fase (P<sub>L</sub>,P<sub>R</sub>) no están siendo envolventes, de modo que cualesquiera discontinuidades de mayor magnitud que π se eliminan mediante la adición de múltiplos enteros de 2π a las muestras del vector, p.ej., utilizando la función "unwrap" de Matlab convencional);

55 3. Si el par de funciones HRTF normales corresponde a una dirección de llegada que radica en el hemisferio izquierdo (de modo que y>0), entonces realizar las etapas siguientes para calcular FR'<sub>L</sub> y FR'<sub>R</sub>:

60 (a) calcular el vector de fase modificado: P'(k) = (P<sub>R</sub>(k) - P<sub>L</sub>(k)) × W(k), en donde W(k) es la función de ponderación anteriormente definida; y

(b) a continuación, calcular FR'<sub>L</sub> y FR'<sub>R</sub> como sigue:

$$FR'_L(k) = M_L(k)e^{jP_L(k)}$$

$$FR'_R(k) = M_R(k)e^{j(P_L(k)+P'(k))};$$

5 4. Si el par de funciones HRTF normales corresponde a una dirección de llegada que radica en el hemisferio derecho (de modo que  $y < 0$ ), entonces, realizar las etapas de:

(a) calcular el vector de fase modificado:  $P'(k) = (P_L(k) - P_R(k)) \times W(k)$ ; y

10 (b) a continuación, calcular  $FR'_L$  y  $FR'_R$  como sigue:

$$FR'_L(k) = M_L(k)e^{j(P_R(k)+P'(k))}$$

$$FR'_R(k) = M_R(k)e^{jP_R(k)};$$

15 5. Si el par de funciones HRTF normales corresponde a una dirección de llegada que radica en el plano medial (de modo que  $y = 0$ ), entonces no existe necesidad alguna de modificar la fase de la respuesta del oído lejano, por lo que simplemente calculamos:

$$20 \quad FR'_L(k) = M_L(k)e^{jP_L(k)}$$

$$FR'_R(k) = M_R(k)e^{jP_R(k)};$$

y

25 6. Por último, utilizar la Transformada de Fourier Inversa para calcular las funciones HRTF acopladas (y añadir un retardo extra de  $g$  muestras para ambas funciones HRTFs acopladas) como sigue:

$$30 \quad HRTF_L^Z(x, y, z, n) = IFFT\{FR'_L(k) \times e^{-2\pi jgk/K}\}$$

$$HRTF_R^Z(x, y, z, n) = IFFT\{FR'_R(k) \times e^{-2\pi jgk/K}\}.$$

35 La modificación que se realiza para la respuesta de fase en la etapa 3 (o la etapa 4) dará lugar, con frecuencia, a algunas de las denominadas 'manchas de tiempo' de las respuestas de impulsos finales, de modo que un filtro HRTF FIR que era originalmente causal puede transformarse en un filtro FIR de tipo a-causal. Para proteger contra esta pérdida de tiempo, puede necesitarse un retardo añadido en ambos filtros de HRTF acoplados en el oído izquierdo y en el oído derecho, según se pone en práctica en la etapa 6. Un valor típico de  $g$  sería  $g = 48$ .

40 El proceso anteriormente descrito con referencia a las etapas 1-6 debe repetirse para cada par de los filtros  $HRTF_L$  y  $HRTF_R$  normales, para obtener cada filtro  $HRTF_L^Z$  acoplado y cada filtro  $HRTF_R^Z$  acoplado en el conjunto de HRTF acoplado. Pueden realizarse variaciones al proceso descrito.

45 A modo de ejemplo, la etapa 3(b) anterior ilustra que la respuesta de fase del canal izquierdo original se está preservando, mientras que la respuesta del canal derecho se genera utilizando la fase izquierda más la diferencia de fase derecha-izquierda modificada. Como una alternativa, las ecuaciones en la etapa 3(b) podrían modificarse para leerse:

$$\begin{aligned} FR'_L(k) &= M_L(k) \\ FR'_R(k) &= M_R(k)e^{jP'(k)} \end{aligned} \quad (1.4)$$

50 En este caso la respuesta de fase de la función HRTF del oído izquierdo original está completamente desechada, y la nueva función HRTF del oído derecho se plasma con la diferencia de fase derecha-izquierda modificada.

Otra variación sobre el método descrito implica el desplazamiento de fase de ambas funciones HRTF del oído izquierdo y del oído derecho (con desplazamientos de fase opuestos):

$$\begin{aligned} FR'_L(k) &= M_L(k)e^{-jP'(k)/2} \\ FR'_R(k) &= M_R(k)e^{jP'(k)/2} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Por supuesto, si las ecuaciones alternativas (1.4 o 1.5) son sustituidas en la etapa 3(b) anterior, entonces, deben

aplicarse las ecuaciones complementarias correspondientes en la etapa 4(b) (para permitir el caso en donde la dirección de llegada de la función HRTF está en el hemisferio derecho).

La simetría implícita por las ecuaciones (1.5) se emplea en otra clase de forma de realización del método inventivo para determinar las funciones HRTF acopladas (esto es, un par de funciones HRTF acopladas del oído izquierdo y del oído derecho para cada dirección de llegada en un conjunto de direcciones de llegada) de un conjunto de funciones HRTF acoplada en respuesta a las funciones HRTF normales (esto es, un par de funciones HRTF normales del oído izquierdo y del oído derecho para cada una de las direcciones de llegada en el conjunto). En estas formas de realización, el método incluye las etapas siguientes:

1. Utilizando una Transformada de Fourier Rápida de longitud  $K$ , convertir cada par de funciones HRTF normales,  $HRTF_L(x, y, z, n)$  y  $HRTF_R(x, y, z, n)$ , en un par de respuestas de frecuencia,  $FR_L(k)$  y  $FR_R(k)$ , en donde  $k$  es el

índice entero de los contenedores de frecuencia, que se centran a la frecuencia  $f = \frac{k \times F_s}{K}$  (en donde  $-N/2 \leq k \leq N/2$ , y en donde  $F_s$  es la tasa de muestreo);

2. a continuación, determinar los componentes de magnitud y de fase ( $M_L, M_R, P_L, P_R$ ), de modo que  $FR_L(k) = M_L(k)e^{jP_L(k)}$  y  $FR_R(k) = M_R(k)e^{jP_R(k)}$ , y en donde los componentes de fase ( $P_L, P_R$ ) están "no envueltas" (de modo que cualesquiera discontinuidades de magnitud mayor que  $\pi$  se eliminan mediante la adición de múltiplos enteros de  $2\pi$  para las muestras del vector, p.ej., utilizando la función de "no envolvente" de Matlab convencional);

3. calcular el vector de fase modificado:  $P'(k) = (P_R(k) - P_L(k)) \times W(k)$ ;

4. a continuación, calcular  $FR'_L$  y  $FR'_R$  son como sigue:

$$FR'_L(k) = M_L(k)e^{-jP'(k)/2}$$

$$FR'_R(k) = M_R(k)e^{jP'(k)/2};$$

y

5. por último, utilizar la transformada de Fourier inversa para calcular las funciones HRTFs acopladas (y añadir un retardo extra de  $g$  muestras para las funciones HRTFs acopladas):

$$HRTF_L^Z(x, y, z, n) = IFFT\{FR'_L(k) \times e^{-2\pi jgk/K}\}$$

$$HRTF_R^Z(x, y, z, n) = IFFT\{FR'_R(k) \times e^{-2\pi jgk/K}\}.$$

Un método alternativo (a veces referido aquí como un "método de extensión de fase constante") puede ponerse en práctica con la etapa siguiente (etapa 3a) realizada en lugar de la etapa 3 anterior:

3a. calcular el vector de fase modificado:

$$P'(k) = (P_R(k) - P_L(k)) \times W(k) + (P_R(k_1) - P_L(k_1)) \times (1 - W(k))$$

La ecuación modificada, establecida en la etapa sustituto 3a, tiene el efecto de forzar la fase ( $P'(k)$ ) a altas frecuencias para ser igual a la fase a la frecuencia de acoplamiento, según se ilustra en el ejemplo de la Figura 6(b).

A continuación, describimos otra clase de formas de realización de la invención en donde un conjunto de funciones HRTF acopladas se determina mediante un conjunto de funciones HRTF de base.

Un conjunto de funciones HRTF típico (p.ej., un conjunto de funciones HRTF acopladas) consiste en un conjunto de parámetros de respuestas de impulsos (funciones HRTF del oído izquierdo y del oído derecho), en donde cada par corresponde a una dirección de llegada particular. En este caso, la función de un mapeador de HRTF es tomar una dirección de llegada especificada (p.ej., determinada por un vector de dirección de llegada,  $(x, y, z)$ ) y determinar un par de filtros de  $HRTF_L$  y  $HRTF_R$  correspondiente a la dirección de llegada especificada, buscando funciones HRTF en un conjunto de funciones HRTF (p.ej., un conjunto de funciones HRTF acopladas) que estén próximas a la dirección de llegada especificada y realizar alguna interpolación sobre las funciones HRTF en el conjunto.

Si el conjunto de funciones HRTF ha sido generado en conformidad con la invención para comprender funciones HRTF acopladas (dichas funciones HRTF acopladas están "acopladas" a altas frecuencias según se describió con

anterioridad), entonces la interpolación puede ser una interpolación lineal. Puesto que se usa una interpolación lineal (mezcla lineal), ello implica que el conjunto de funciones HRTF acopladas puede determinarse por un conjunto de funciones HRTF de base. Un conjunto de funciones HRTF de base preferido de interés es la base armónica esférica (a veces referida como formato B).

El proceso bien conocido de un ajuste de mínimos cuadrados (u otro proceso de ajuste) puede utilizarse para representar un conjunto de funciones HRTF acopladas en términos de un conjunto de funciones HRTF de base, sobre la base de armónicos esféricos. A modo de ejemplo, un conjunto de armónicos esféricos de base de primer grado ( $H_w$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ , y  $H_z$ ), puede determinarse de modo que cualquier función HRTF del oído izquierdo (o del oído derecho) (para cualquier dirección de llegada específica  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , o cualquier dirección de llegada específica  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , en una gama que abarca al menos 60 grados) puede generarse como:

$$\begin{aligned} HRTF_L(x, y, z, n) &= H_w(n) + xH_x(n) + yH_y(n) + zH_z(n) \\ HRTF_R(x, y, z, n) &= H_w(n) + xH_x(n) - yH_y(n) + zH_z(n) \end{aligned} \quad (1.6)$$

en donde los cuatros conjuntos de coeficientes de filtros de FIR ( $H_w$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) del conjunto de funciones HRTF de base se determina para proporcionar un mejor ajuste de mínimos cuadrados para un conjunto de funciones HRTF acopladas. Poniendo en práctica las ecuaciones (1.6) una tabla de coeficientes de cuatro filtros FIR ( $H_w$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) basta para determinar una función HRTF del oído izquierdo (y del oído derecho) para cualquier dirección de llegada especificada, y de este modo, los cuatro filtros FIR ( $H_w$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas.

Una representación armónica esférica de más alto grado proporcionará una exactitud añadida. A modo de ejemplo, una representación de segundo grado de un conjunto de funciones HRTF de base ( $H_w$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ,  $H_{x2}$ ,  $H_{y2}$ ,  $H_{z2}$ ,  $H_{xy}$ ,  $H_{yz}$ ) puede definirse de modo que cualquier función HRTF del oído izquierdo (o del oído derecho) para una dirección llegada específica  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , o cualquier dirección de llegada específica  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , en un margen que abarca a menos 60 grados) puede generarse como:

$$\begin{aligned} HRTF_L(x, y, z, n) &= H_w(n) + xH_x(n) + yH_y(n) + zH_z(n) + (x^2 - y^2)H_{x2}(n) \\ &\quad + 2xyH_{y2}(n) + 2xzH_{xz}(n) + 2yzH_{yz}(n) + (2z^2 - x^2 - y^2)H_{z2}(n) \\ HRTF_R(x, y, z, n) &= H_w(n) + xH_x(n) - yH_y(n) + zH_z(n) + (x^2 - y^2)H_{x2}(n) \\ &\quad - 2xyH_{y2}(n) + 2xzH_{xz}(n) - 2yzH_{yz}(n) + (2z^2 - x^2 - y^2)H_{z2}(n) \end{aligned} \quad (1.7)$$

en donde los nueve conjuntos de coeficientes de filtros FIR ( $H_w$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ,  $H_{x2}$ ,  $H_{y2}$ ,  $H_{xz}$ ,  $H_{yz}$ ,  $H_{z2}$ ) del conjunto de funciones HRTF de base se determinan para proporcionar un mejor ajuste de mínimos cuadrados para un conjunto de funciones HRTF acopladas. Poniendo en práctica las ecuaciones (1.7), una tabla de coeficientes de los nueve filtros FIR basta para determinar una función HRTF del oído izquierdo (o del oído derecho) para cualquier dirección de llegada especificada, y de este modo, los nueve filtros FIR determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas.

Ecuaciones simplificadas resultarán si los ángulos de llegada están limitados al plano horizontal (como pueda desearse normalmente). En este caso, todos los componentes  $z$  del conjunto armónico esférico puede desecharse, de modo que se simplifican las ecuaciones de 2º grado (ecuaciones 1.7) para convertirse en:

$$\begin{aligned} HRTF_L(x, y, z, n) &= H_w(n) + xH_x(n) + yH_y(n) + (x^2 - y^2)H_{x2}(n) + 2xyH_{y2}(n) \\ HRTF_R(x, y, z, n) &= H_w(n) + xH_x(n) - yH_y(n) + (x^2 - y^2)H_{x2}(n) - 2xyH_{y2}(n) \end{aligned} \quad (1.8)$$

Las ecuaciones 1.8 pueden expresarse, de forma alternativa, en términos del ángulo de Azimuth,  $Az$ , como sigue:

$$\begin{aligned} HRTF_L(Az, n) &= H_w(n) + \cos(Az)H_x(n) + \sin(Az)H_y(n) \\ &\quad + \cos(2Az)H_{x2}(n) + \sin(2Az)H_{y2}(n) \\ HRTF_R(Az, n) &= H_w(n) + \cos(Az)H_x(n) - \sin(Az)H_y(n) \\ &\quad + \cos(2Az)H_{x2}(n) - \sin(2Az)H_{y2}(n) \end{aligned} \quad (1.9)$$

En una forma de realización preferida, un mapeador de correspondencia de funciones HRTFs horizontal de tercer orden opera utilizando una representación de tercer grado de un conjunto base definido de modo que cualquier función HRTF del oído izquierdo (o del oído derecho) para cualquier dirección de llegada especificada se genera como:

$$\begin{aligned}
 HRTF_L(Az, n) &= H_w(n) + \cos(Az)H_x(n) + \sin(Az)H_y(n) \\
 &\quad + \cos(2Az)H_{x2}(n) + \sin(2Az)H_{y2}(n) \\
 &\quad + \cos(3Az)H_{x3}(n) + \sin(3Az)H_{y3}(n) \\
 HRTF_R(Az, n) &= H_w(n) + \cos(Az)H_x(n) - \sin(Az)H_y(n) \\
 &\quad + \cos(2Az)H_{x2}(n) - \sin(2Az)H_{y2}(n) \\
 &\quad + \cos(3Az)H_{x3}(n) - \sin(3Az)H_{y3}(n)
 \end{aligned} \tag{1.10}$$

en donde los siete conjuntos de coeficientes de filtros FIR ( $H_w$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_{x2}$ ,  $H_{y2}$ ,  $H_{x3}$ , y  $H_{y3}$ ) del conjunto de funciones HRTF de base se determinan para proporcionar un mejor ajuste de mínimos cuadrados para un conjunto de funciones HRTF acopladas. De este modo, los siete filtros FIR determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas. Un mapeador de funciones HRTF que emplea un conjunto de funciones HRTF de base definido de este modo es un forma de realización preferida de la presente invención, puesto que permite que un conjunto de funciones HRTF de base constituido por solamente 7 filtros ( $H_w(n)$ ,  $H_x(n)$ ,  $H_y(n)$ ,  $H_{x2}(n)$ ,  $H_{y2}(n)$ ,  $H_{x3}(n)$ , y  $H_{y3}(n)$ ) se utilice para generar un filtro de HRTF del oído izquierdo (y del oído derecho) para cualquier dirección de llegada en el plano horizontal, con un alto grado de exactitud de fase para frecuencias hasta la frecuencia de acoplamiento (p.ej., hasta una frecuencia de 1000 Hz o superior).

A continuación, se describe el uso de pequeños conjuntos de funciones HRTF de base (cada uno de los cuales determina un conjunto de funciones HRTF acopladas) para una mezcla de señales en conformidad con formas de realización de la presente invención.

Es posible poner en práctica un dispositivo mapeador de funciones HRTF como un aparato que emplea un pequeño conjunto de funciones HRTF de base (p.ej., del tipo definido con referencia a las ecuaciones 1.10) para determinar un conjunto de funciones HRTF acopladas, y para realizar una mezcla de señales utilizando dicho aparato en conformidad con las formas de realización de la presente invención.

El mapeador de funciones HRTF 10 de la Figura 10 es un ejemplo de dicho mapeador de funciones HRTF que emplea el pequeño conjunto de funciones HRTF de base definido con referencia a las ecuaciones 1.10, para determinar un conjunto de funciones HRTF acopladas. El aparato de la Figura 10 incluye también un procesador de audio 20 (que es un virtualizador) configurado para procesar una señal de audio monofónica ("Sig"), para generar canales de salida de audio izquierdo y derecho ( $Out_L$  y  $Out_R$ ) para presentación a través de auriculares, con el fin de proporcionar a un usuario en escucha una impresión de un sonido localizado en un ángulo de Azimuth especificado, Az.

En el sistema ilustrado en la Figura 10, un canal de entrada de audio único (Sig) se procesa por dos filtros FIR 21 y 22 (cada uno etiquetado con el operador de convolución,  $\otimes$ ), puesto en práctica por el procesador 20, para obtener las señales del oído izquierdo y del oído derecho,  $Out_L$  y  $Out_R$  respectivamente (para presentación a través de auriculares). Los coeficientes del filtro para el filtro de FIR del oído izquierdo 21 se determinan en el mapeador 10 a partir del conjunto de funciones HRTF de base ( $H_w$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_{x2}$ ,  $H_{y2}$ ,  $H_{x3}$ ,  $H_{y3}$  de las ecuaciones 1.10) ponderando cada uno de los coeficientes del conjunto de funciones HRTF de base con una correspondiente de entre las funciones trigonométricas de seno y coseno (mostradas en las ecuaciones 1.10) del ángulo de Azimuth, Az (esto es,  $H_w(n)$  no está ponderada,  $H_x(n)$  se multiplica por  $\cos(Az)$ ,  $H_y(n)$  se multiplica por  $\sin(Az)$ , y así sucesivamente) y sumando los siete coeficientes ponderados (incluyendo  $H_w(n)$ ), para cada valor de n, en la etapa de adición 13. Los coeficientes del filtro para el filtro de FIR del oído derecho 22 se determinan en el mapeador 10 a partir del conjunto de funciones HRTF de base ( $H_w$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_{x2}$ ,  $H_{y2}$ ,  $H_{x3}$ ,  $H_{y3}$  de las ecuaciones 1.10) ponderando cada uno de los coeficientes del conjunto de funciones HRTF de base con una correspondiente de entre las funciones de seno y coseno (ilustradas en las ecuaciones 1.10) del ángulo de Azimuth, Az (esto es,  $H_w(n)$  no está ponderada,  $H_x(n)$  se multiplica por  $\cos(Az)$ ,  $H_y(n)$  se multiplica por  $\sin(Az)$  y así sucesivamente), multiplicando cada una de las versiones ponderadas de los coeficientes  $H_y(n)$ ,  $H_{y2}(n)$ , y  $H_{y3}(n)$  por un elemento negativo (en elementos de multiplicación 11) y sumando los siete coeficientes ponderados resultantes en la etapa de adición 12.

De este modo, el sistema de la Figura 10 descompone el procesamiento en dos componentes principales. En primer lugar, el mapeador de HRTF 10 se utiliza para calcular los coeficientes de filtros FIR,  $HRTF_L(Az, n)$  y  $HRTF_R(Az, n)$ , que se aplican por los filtros 21 y 22. En segundo lugar, los filtros FIR 21 y 22 (del procesador 20) se configuran con los coeficientes de filtros FIR que se calcularon por el mapeador de HRTF, y los filtros configurados 21 y 22 procesan luego la entrada de audio para obtener las señales de salida de auriculares.

Un sistema de mezcla puede configurarse en una forma muy diferente (según se ilustra en la Figura 11) para obtener el mismo resultado (producido por el sistema de la Figura 10) en respuesta a la misma señal de audio de entrada y dirección de llegada especificada (ángulo de Azimuth). El aparato ilustrado en la Figura 11 (que pone en práctica un virtualizador) está configurado para procesar una señal de audio monofónica ("InSig") para generar canales de salida de audio izquierdo y derecho (binaural) ( $Out_L$  y  $Out_R$ ), que pueden presentarse a través de auriculares con el fin de proporcionar a un usuario en escucha una impresión de un sonido localizado en una

dirección de llegada especificada (ángulo de Azimuth, Az).

En la Figura 11, la etapa de movimiento panorámico de la señal (*panoramizador*) 30 genera un conjunto de siete señales intermedias en respuesta a la señal de entrada ("InSig"), según las ecuaciones siguientes:

5

$$\begin{aligned}
 W &= InSig \\
 X &= InSig \times \cos(Az) \\
 Y &= InSig \times \sin(Az) \\
 X2 &= InSig \times \cos(2Az) \\
 Y2 &= InSig \times \sin(2Az) \\
 X3 &= InSig \times \cos(3Az) \\
 Y3 &= InSig \times \sin(3Az)
 \end{aligned} \quad (1.11)$$

, en donde Az es el ángulo de Azimuth especificado.

10

15

20

Cada una de las siete señales intermedias se filtra luego en la etapa de filtro de funciones HRTF 40, mediante su convolución (en la etapa 44) con los coeficientes de filtros FIR de un filtro FIR correspondiente de un conjunto de funciones HRTF de base (es decir, InSig es convolucionado con coeficientes  $H_W$ ,  $InSig \cdot \cos(Az)$  es convolucionado con coeficientes  $H_X$  de las ecuaciones 1.10,  $InSig \cdot \sin(Az)$  está convolucionado con coeficientes  $H_Y$  de las ecuaciones 1.10,  $InSig \cdot \cos(2Az)$  está convolucionado con coeficientes  $H_{X2}$  de las ecuaciones 1.10, e  $InSig \cdot \sin(2Az)$  está convolucionado con coeficientes  $H_{Y2}$  de las ecuaciones 1.10,  $InSig \cdot \cos(3Az)$  está convolucionado con coeficientes  $H_{X3}$  de las ecuaciones 1.10, e  $InSig \cdot \sin(3Az)$  está convolucionado con coeficientes  $H_{Y3}$  de las ecuaciones 1.10). Las salidas de la etapa de convolución 44, se añaden luego (en una etapa de adición 41) para generar la señal de salida de canal izquierdo,  $Out_L$ . Algunas de las salidas de etapa de convolución 44 se multiplican por un elemento negativo en elementos de multiplicación 42 (esto es, cada uno de  $\sin(Az)$  convolucionado con coeficientes  $H_Y$ ,  $InSig \cdot \sin(2Az)$  convolucionado con coeficientes  $H_{Y2}$ , y  $InSig \cdot \sin(3Az)$  convolucionado con coeficientes  $H_{Y3}$  se multiplica por un elemento negativo en el elemento 42), y las salidas de los elementos de multiplicación 42 se añaden a las otras salidas de la etapa de convolución (en la etapa de adición 43) para generar la señal de salida de canal derecho,  $Out_R$ . Los coeficientes de filtros aplicados en la etapa de convolución 44 son los del conjunto de funciones HRTF de base denominados  $H_W$ ,  $H_X$ ,  $H_Y$ ,  $H_{X2}$ ,  $H_{Y2}$ ,  $H_{X3}$ ,  $H_{Y3}$  de las ecuaciones 1.10.

25

Si un conjunto de M señales de entrada,  $InSig_m$ , ha de procesarse para una reproducción binaural, un conjunto único de señales intermedias puede obtenerse en el panoramizador 30, con todas las M señales de entrada presentes:

$$\begin{aligned}
 W &= \sum_{m=1}^M InSig_m \\
 X &= \sum_{m=1}^M InSig_m \times \cos(Az_m) \\
 Y &= \sum_{m=1}^M InSig_m \times \sin(Az_m) \\
 X2 &= \sum_{m=1}^M InSig_m \times \cos(2Az_m) \\
 Y2 &= \sum_{m=1}^M InSig_m \times \sin(2Az_m) \\
 X3 &= \sum_{m=1}^M InSig_m \times \cos(3Az_m) \\
 Y3 &= \sum_{m=1}^M InSig_m \times \sin(3Az_m)
 \end{aligned} \quad (1.12)$$

30

Una vez que se han generado estas señales intermedias, son filtradas en la etapa de convolución 44 como sigue:

$$\begin{aligned}
 W_{filtered} &= W \otimes H_W \\
 X_{filtered} &= X \otimes H_X \\
 Y_{filtered} &= Y \otimes H_Y \\
 X2_{filtered} &= X2 \otimes H_{X2} \\
 Y2_{filtered} &= Y2 \otimes H_{Y2} \\
 X3_{filtered} &= X3 \otimes H_{X3} \\
 Y3_{filtered} &= Y3 \otimes H_{Y3}
 \end{aligned} \quad (1.13)$$



y las señales de salida del oído izquierdo y del oído derecho se derivan como sigue:

$$\begin{aligned} Out_L &= W_{filtered} + X_{filtered} + Y_{filtered} + X2_{filtered} + Y2_{filtered} + X3_{filtered} + Y3_{filtered} \\ Out_R &= W_{filtered} + X_{filtered} - Y_{filtered} + X2_{filtered} - Y2_{filtered} + X3_{filtered} - Y3_{filtered} \end{aligned} \quad (1.14).$$

5 Por consiguiente, las operaciones combinadas mostradas en las ecuaciones (1.12), (1.13), y (1.14) permiten un conjunto de M señales de entrada, {InSig<sub>m</sub>: 1≤m≤M} (cada una con un ángulo de Azimuth correspondiente, Az<sub>m</sub>) a presentarse de forma binaural, utilizando solamente 7 filtros FIR. Puede existir un ángulo de Azimuth diferente Az<sub>m</sub>, para cada una de las señales de entrada. Esto significa que el pequeño número de conjuntos de filtros FIR en el conjunto de funciones HRTF de base habilita un método eficiente para la presentación binaural de grandes números de señales de entrada, aplicando el proceso puesto en práctica por el sistema de la Figura 11 para múltiples señales de entrada según se ilustra en la Figura 12.

10 En la Figura 12, cada uno de los bloques 30<sub>i</sub> representa un panoramizador 30 de la Figura 11 durante el procesamiento de la "i"-ésima señal de entrada (en donde el índice i varía desde 1 a M inclusive) y una etapa de adición 31 está acoplada y configurada para sumar las salidas generadas en los bloques 30<sub>1</sub>-30<sub>M</sub> para generar las siete señales intermedias establecidas en las ecuaciones 1.12.

15 Otra forma de realización del sistema inventivo y del método para procesar un conjunto de M señales de entrada, InSig<sub>m</sub>, se describirá haciendo referencia a la Figura 13. En esta forma de realización, M señales de entrada se procesan para una reproducción binaural, utilizando el hecho de que los formatos de señales intermedias pueden modificarse también mediante una mezcla ascendente. Dentro de este contexto, el término "mezcla ascendente" se refiere a un proceso en el que una señal intermedia de más baja resolución (constituida por un menor número de canales) se procesa para crear una señal intermedia de más alta resolución (constituida por un mayor número de señales intermedias). Numerosos métodos son conocidos en esta técnica para la mezcla ascendente de dichas señales intermedias, a modo de ejemplo, incluyendo las descritas en la patente de los Estados Unidos 8,103,006, para el inventor actual (y asignarse al beneficiario de cesión de la presente invención). El proceso de mezcla ascendente permite la utilización de una señal intermedia de más baja resolución, con la mezcla ascendente realizada antes del filtrado de funciones HRTF, según se ilustra en la Figura 13.

20 En la Figura 13, cada uno de los bloques 130<sub>i</sub> representa el mismo panoramizador (a referirse como el panoramizador de la Figura 13) durante el procesamiento de la "i"-ésima señal de entrada, InSig<sub>i</sub> (en donde el índice i varía desde 1 a M inclusive), y la etapa de adición 131 está acoplada y configurada para sumar las salidas generadas en los bloques 130<sub>1</sub>-130<sub>M</sub> para generar señales intermedias que son objeto de mezcla ascendente en la etapa de mezcla ascendente 132. La etapa 40 (que es idéntica a la etapa 40 de la Figura 11) filtra la salida de la etapa 132.

25 El panoramizador de la Figura 13 pasa a través de la señal de entrada actual ("InSig<sub>i</sub>") a la etapa 131. El panoramizador de la Figura 13 incluye las etapas 34 y 35, que generan los valores cos(Az<sub>i</sub>) y sin(Az<sub>i</sub>), respectivamente, en respuesta al ángulo de Azimuth Az<sub>i</sub> actual. El panoramizador de la Figura 13 incluye también las etapas de multiplicación 36 y 37, que generan los valores InSig<sub>i</sub> · cos(Az<sub>i</sub>) e InSig<sub>i</sub> · sin(Az<sub>i</sub>), respectivamente, en respuesta a la señal de entrada actual InSig<sub>i</sub> y las salidas de las etapas 34 y 35.

30 La etapa de adición 131 está acoplada y configurada para sumar las salidas generadas en los bloques 130<sub>1</sub>-130<sub>M</sub> para generar tres señales intermedias como sigue: la etapa 131 suma las M salidas "InSig<sub>i</sub>" para generar una señal intermedia; la etapa 131 suma los M valores InSig<sub>i</sub> · cos(Az<sub>i</sub>) para generar una segunda señal intermedia y la etapa 131 suma los M valores InSig<sub>i</sub> · sin(Az<sub>i</sub>) para generar una tercera señal intermedia. Cada una de las tres señales intermedias corresponde a un canal diferente. La etapa de mezcla ascendente 132 realiza una mezcla ascendente de las tres señales intermedias desde la etapa 131 (p.ej., en una manera convencional) para generar siete señales intermedias de mezcla ascendente, cada una de las cuales corresponde a uno diferente de entre siete canales. La etapa 40 filtra estas siete señales de mezcla ascendente en la misma manera que la etapa 40 de Figura 11 filtra las siete señales asignadas por la etapa 30 de Figura 11.

35 La forma particular de las señales intermedias anteriormente descritas (con referencia a las Figuras 11, 12, y 13) puede modificarse para formar conjuntos alternativos de base para la descomposición del conjunto de funciones HRTF de base, composición se apreciará por un experto en esta técnica. En todas dichas formas de realización de la invención, el uso de un conjunto de funciones HRTF de base para simplificar el procesamiento de audio (p.ej., como en el sistema de la Figura 12 o la Figura 13) solamente es posible si el conjunto de funciones HRTF de base ha sido establecido de modo que permita la creación de filtros de HRTF mediante una mezcla lineal (p.ej., mediante los elementos 34, 35, 36, 37, 131, y 132 de la Figura 13, o mediante los elementos de la etapa 10 que se ilustra en la Figura 10). Si el conjunto de base determina un conjunto de los filtros de HRTF acoplados según la invención, permitirá la creación de los filtros de HRTF por los que han sido modificados para "acoplarse" son más adecuados la mezcla lineal.

Formas de realización típicas de la presente invención generan (o determinan y utilizan) un conjunto de funciones HRTF acopladas que satisface los tres criterios siguientes (a veces referidos aquí por conveniente como la "Regla Dorada"):

- 5 1. La respuesta de fase inter-aural de cada par de filtros HRTF (es decir, cada filtro HRTF del oído izquierdo y filtro HRTF del oído derecho creados para una dirección de llegada especificada) que se crean a partir del conjunto de funciones HRTF acopladas (mediante un proceso de mezcla lineal) se adaptan a las respuestas de fase inter-aural de un par correspondiente de funciones HRTF normales del oído izquierdo y del oído derecho con un error de fase inferior al 20 % (o más preferentemente, con un error de fase inferior al 5 %) para todas las frecuencias inferiores a la frecuencia de acoplamiento. Dicho de otro modo, el valor absoluto de la diferencia entre la fase de la función HRTF del oído izquierdo creada a partir del conjunto y la fase de la función HRTF del oído derecho correspondiente creada a partir del conjunto difieren en menos del 20 % (o más preferentemente, en menos del 5 %) con respecto al valor absoluto de la diferencia entre la fase de la función HRTF normal del oído izquierdo correspondiente y la fase de la función HRTF normal del oído derecho correspondiente, en cada frecuencia inferior a la frecuencia de acoplamiento. La frecuencia de acoplamiento es superior a 700 Hz y suele ser inferior a 4 kHz. A frecuencias superiores a la frecuencia de acoplamiento, las respuestas de fase de los filtros de HRTF que se crean a partir del conjunto (mediante un proceso de mezcla lineal) se desvían del comportamiento operativo de las funciones HRTF normales, de modo que el retardo del grupo inter-aural (a dichas altas frecuencias) es notablemente reducido en comparación con las funciones HRTF normales;
- 10 2. La respuesta de magnitud de cada filtro HRTF creado a partir del conjunto (mediante un proceso de mezcla lineal) para una dirección de llegada está dentro del margen previsto para las funciones HRTF normales para la dirección de llegada (p.ej., en el sentido de que no presentan ninguna distorsión de filtrado en peine importante en relación con la respuesta de magnitud de un filtro de HRTF normal típico para la dirección de llegada); y
- 15 3. El margen de los ángulos de llegada que pueden que pueden abarcarse por el proceso de mezcla (para generar un par de funciones HRTF para cada ángulo de llegada en el margen mediante un proceso de mezcla lineal de las funciones HRTF acopladas en el conjunto) es al menos de 60 grados (y preferentemente es de 360 grados).

20 En las formas de realización en las que el método inventivo incluye la determinación de un conjunto de funciones HRTF de base que, a su vez, determina un conjunto de funciones HRTF acopladas (p.ej., realizando un ajuste de mínimos cuadrados u otro proceso de ajuste para determinar los coeficientes del conjunto de funciones HRTF de base de modo que el conjunto de funciones HRTF de base determine el conjunto de funciones HRTF acopladas para dentro de una exactitud adecuada) o utiliza dicho conjunto de funciones HRTF de base para determinar un par de funciones HRTF en respuesta a una dirección de llegada, el conjunto de funciones HRTF acopladas satisface preferentemente la denominada Regla Dorada.

25 En condiciones normales, un conjunto de funciones HRTF acopladas que satisface dicha Regla Dorada comprende valores de datos que determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas del oído izquierdo y un conjunto de funciones HRTF acopladas del oído derecho para los ángulos de llegada que abarcan un margen de ángulos de llegada, una función HRTF del oído izquierdo determinada (mediante una mezcla lineal en conformidad con una forma de realización de la invención) para cualquier ángulo de llegada en el margen y una función HRTF del oído derecho determinada (mediante una mezcla lineal en conformidad con una forma de realización de la presente invención) para dicho ángulo de llegada tienen una respuesta de fase inter-aural que adapta la respuesta de fase inter-aural de una función HRTF normal del oído izquierdo típica para dicho ángulo de llegada en relación con una función HRTF normal del oído derecho típica para dicho ángulo de llegada con un error de fase inferior al 20 % (y preferentemente, inferior al 5 %) para todas las frecuencias inferiores a la frecuencia de acoplamiento (en donde la frecuencia de acoplamiento es mayor que 700 Hz y normalmente inferior a 4 kHz), y

30 la función HRTF del oído izquierdo determinada (mediante una mezcla lineal en conformidad con una forma de realización de la invención) para cualquier ángulo de llegada en el margen tiene una respuesta de magnitud que no presenta ninguna distorsión del filtrado tipo peine importante en relación con la respuesta de magnitud de la función HRTF normal del oído izquierdo típica para dicho ángulo de llegada, y la función HRTF del oído derecho determinada (mediante una mezcla lineal en conformidad con la forma de realización de la invención) para cualquier ángulo de llegada en el margen tiene una respuesta de magnitud que no presenta ninguna distorsión de filtrado tipo peine importante en relación con la respuesta de magnitud de la función HRTF normal del oído izquierdo típica para dicho ángulo de llegada,

35 en donde dicho margen de ángulos de llegada es al menos de 60 grados (preferentemente, dicho margen de ángulos de llegada es de 360 grados).

40 Se ha propuesto para simplificar las bibliotecas informáticas de HRTF mediante conjuntos armónicos esféricos de base (p.ej., según se describe en la patente de Estados Unidos 6,021,206 para el inventor actual), pero todos dichos intentos previos para simplificar las funciones HRTF mediante el uso de una base armónica esférica han sufrido problemas de filtrado en peine importantes del tipo aquí descrito. Por consiguiente, las bibliotecas de funciones

HRTF armónicas esféricas determinadas no satisfacen el segundo criterio de la Regla Dorada anteriormente establecida.

Además, algunos intentos iniciales para crear filtros de binauralización con elementos de circuitos analógicos dieron lugar a filtros de HRTF que satisfacían el segundo criterio de la Regla de Oro como un efecto secundario accidental de las limitaciones de las técnicas de circuitos analógicos. A modo de ejemplo, dicho filtro de HRTF se describe en el informe de Bauer, titulado "Auriculares estereofónicos y altavoces binaurales" en Journal of the Audio Engineering Society, abril 1961, Volumen 9, N° 2. Sin embargo, dichas funciones HRTF no satisficieron el primer criterio de la Regla Dorada.

Formas de realización típicas de la presente invención son métodos de generación de un conjunto de funciones HRTF acopladas que representan ángulos de llegada que abarcan un espacio dado (p.ej., un plano horizontal) y son objeto de cuantización para un resultado angular particular (p.ej., un conjunto de funciones HRTF acopladas que representan ángulos de llegada con una resolución angular de 30 grados alrededor de un círculo de 360 grados - 0, 30, 60, ..., 300, y 330 grados). Las funciones HRTF acopladas en el conjunto están construidas de modo que difieran de las funciones HRTF verdaderas (esto es, medidas) para los ángulos de llegada en el conjunto (excepto para el Azimuth de 0 y 180 grados, puesto que estos ángulos de HRTF suelen tener una fase inter-aural cero y por lo tanto, no requieren ningún procesamiento especial para hacerlos respetar la Regla Dorada). Más concretamente, difieren en que la respuesta de fase de las funciones HRTF se modifica intencionadamente por encima de una frecuencia de acoplamiento específica. Más concretamente, las fases se modifican de modo que la respuesta de fase de las funciones HRTF en el conjunto estén acopadas (es decir, sean las mismas o casi las mismas) por encima de la frecuencia de acoplamiento. En condiciones normales, la frecuencia de acoplamiento por encima de la cual la respuesta de fase se acopla se elige dependiendo de la resolución angular de las funciones HRTF incluidas en el conjunto. Preferentemente, la frecuencia de corte se elige de modo que la resolución angular del conjunto aumente (esto es, más funciones HRTF acopladas se añaden al conjunto), con lo que también aumenta la frecuencia de acoplamiento.

En formas de realización alternativas, cada función HRTF acoplada (o cada una de un subconjunto de las funciones HRTF aplicadas) se aplica en conformidad con la invención según se define y aplica en el dominio de la frecuencia (p.ej., cada señal a transformarse en conformidad con dicha función HRTF se somete a una transformación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se aplica luego la función HRTF a los componentes de frecuencia resultantes y las componentes transformadas se someten luego a una transformación del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo).

En algunas formas de realización, el sistema inventivo es o incluye un procesador de uso general acoplado para recibir o para generar datos de entrada indicativos de al menos un canal de entrada de audio y programado con software (o firmware) y/o de cualquier otro modo configurado (p.ej., en respuesta a los datos de control) para realizar cualquiera de una diversidad de operaciones sobre los datos de entrada, incluyendo una forma de realización del método inventivo. Dicho procesador de uso general se acoplaría normalmente a un dispositivo de entrada (p.ej., un ratón y/o un teclado), una memoria y un dispositivo de presentación visual. A modo de ejemplo, el sistema de las Figuras 9, 10, 11, 12, o 13 podría ponerse en práctica como un procesador de uso general, programado y/o de cualquier otro modo configurado para realizar cualquiera de una diversidad de operaciones sobre los datos de entrada incluyendo una forma de realización del método inventivo para generar datos de salida de audio. Un convertidor digital a analógico (DAC) convencional podría operar sobre los datos de salida de audio para generar versiones analógicas de las señales de audio de salida para su reproducción por altavoces físicos.

La Figura 9 es un diagrama de bloques de un sistema (que puede ponerse en práctica como un DSP de audio programable) que ha sido configurado para realizar una forma de realización del método inventivo. El sistema incluye una etapa de filtro de HRTF 9, acoplada para recibir una señal de entrada de audio (p.ej., datos de audio del dominio de la frecuencia indicativos del sonido, o datos de audio del dominio del tiempo indicativos del sonido) y el mapeador de HRTF 7. El mapeador de HRTF 7 incluye una memoria 8 que memoriza los datos que determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas (p.ej., datos que determinan un conjunto de funciones HRTF de base que, a su vez, determina un conjunto de funciones HRTF acopladas) y se acopla para recibir datos ("Dirección de llegada") indicativos de una dirección de llegada (p.ej., especificada como un ángulo o como un vector unitario) que corresponde a un conjunto de datos de audio de entrada asignados a la etapa 9. En las puestas en práctica típicas, el mapeador 7 pone en práctica una tabla de consulta configurada para la recuperación desde la memoria 8, en respuesta a los datos de la Dirección de Llegada, datos suficientes para realizar una mezcla lineal para determinar un par de funciones HRTF (una función HRTF del oído izquierdo y una función HRTF del oído derecho) para la dirección de llegada.

El mapeador 7 está acoplado de forma opcional a un soporte legible por ordenador externo 8a que memoriza datos que determinan el conjunto de funciones HRTF acopladas (y de modo opcional, también un código para la programación del mapeador 7 y/o de la etapa 9 para realizar una forma de realización del método inventivo) y el mapeador 7 está configurado para acceder (desde el soporte 8a) a datos indicativos del conjunto de funciones HRTF acopladas (p.ej., datos indicativos de funciones nadas de las funciones HRTF acopladas del conjunto). El mapeador 7 no incluye opcionalmente una memoria 8 cuando el mapeador 7 está así configurado para acceder al soporte

externo 8a. Los datos que determinan el conjunto de funciones HRTF acopladas (memorizados en la memoria 8 o accedidas por el mapeador 7 desde un soporte externo) pueden ser coeficientes de un conjunto de funciones HRTF de base que determinan el conjunto de funciones HRTF acopladas.

5 El mapeador 7 está configurado para determinar un par de respuestas de impulsos de HRTF (una respuesta del oído izquierdo y una respuesta del oído derecho) en respuesta a una dirección de llegada especificada (p.ej., una  
 10 dirección de llegada, especificada como un ángulo o como un vector unitario, correspondiente a un conjunto de datos de audio de entrada). El mapeador 7 está configurado para determinar cada función HRTF para la dirección especificada realizando una interpolación lineal sobre las funciones HRTF acopladas en el conjunto (realizando una  
 15 mezcla lineal sobre valores que determinan las funciones HRTF acopladas). En condiciones normales, la interpolación está entre funciones HRTF acopladas en el conjunto que tienen direcciones de llegada correspondientes próximas a la dirección especificada. Como alternativa, el mapeador 7 está configurado para acceder a los coeficientes de un conjunto de funciones HRTF de base (que determina el conjunto de funciones HRTF acopladas) y para realizar una mezcla lineal sobre los coeficientes para determinar cada función HRTF para la dirección especificada.

La etapa 9 (que es un virtualizador) está configurada para procesar datos indicativos de señales de audio de entrada monofónicas ("Audio de entrada"), incluyendo la aplicación del par de funciones HRTF (determinado por el mapeador 7) para generar señales de audio de salida de canal izquierdo y de canal derecho ( $Output_L$  y  $Output_R$ ). A  
 20 modo de ejemplo, las señales de audio de salida pueden ser adecuadas para la presentación a través de auriculares, con el fin de proporcionar al usuario en escucha una impresión de sonido emitido desde una fuente en la dirección de llegada especificada. Si los datos indicativos de una secuencia de direcciones de llegada (para un conjunto de datos de audio de entrada) se asignan al sistema de la Figura 9, la etapa 9 puede realizar un filtrado de funciones HRTF (utilizando una secuencia de pares de funciones HRTF determinado por el mapeador 7 en  
 25 respuesta a los datos de la dirección de llegada) para generar una secuencia de señales de audio de salida del canal izquierdo y del canal derecho que pueden presentarse para proporcionar a un usuario en escucha una impresión de sonido emitido desde una fuente panoramizadora a través de la secuencia de direcciones de llegada.

En funcionamiento, un DSP de audio que ha sido configurado para realizar una virtualización del sonido envolvente en conformidad con la invención (p.ej., el sistema de virtualizador de la Figura 9, o el sistema de cualquiera de las Figuras 10, 11, 12, o 13) está acoplado para recibir al menos la señal de entrada de audio y el DSP realiza normalmente una diversidad de operaciones sobre el audio de entrada además (así como) un filtrado por una función HRTF. En conformidad con varias formas de realización de la invención, un DSP de audio es utilizable para  
 35 efectuar una forma de realización del método inventivo después de configurarse (p.ej., programarse) para emplear un conjunto de funciones HRTF acopladas (p.ej., un conjunto de funciones HRTF de base que determina un conjunto de funciones HRTF acopladas) para generar al menos una señal de audio de salida en respuesta a cada señal de audio de entrada realizando el método sobre las señales de audio de entrada.

Otros aspectos de la invención son un soporte legible por ordenador (p.ej., un disco) que memoriza (en forma tangible) un código para la programación de un procesador u otro sistema para realizar cualquier forma de realización del método inventivo y un soporte legible por ordenador (p.ej., un disco) que memoriza datos (en forma tangible) que determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas, en donde el conjunto de funciones HRTF acopladas ha sido determinado en conformidad con una forma de realización de la invención (p.ej., para satisfacer la Regla Dorada aquí descrita). Un ejemplo de dicho soporte es un soporte legible por ordenador 8a ilustrado en la  
 45 Figura 9.

Aunque formas de realización específicas de la presente invención y aplicaciones de la invención han sido aquí descritas, será evidente para los expertos en esta técnica que son posibles numerosas variaciones sobre las formas de realización y aplicaciones aquí descritas sin desviarse por ello del alcance de protección de la invención aquí descrito y reivindicado. Debe entenderse que aunque algunas formas de realización de la invención han sido  
 50 ilustradas y descritas, la invención no ha de estar limitada a las formas de realización específicas aquí descritas e ilustradas o los métodos específicos descritos.

55

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para determinar una función de transferencia relacionada con la cabeza (HRTF), incluyendo dicho método la etapa de:

5 (a) realizar, en respuesta a una señal indicativa de una dirección de llegada, una mezcla lineal utilizando datos de un conjunto de funciones HRTF acopladas para determinar una función HRTF para la dirección de llegada, en donde el conjunto de funciones HRTF acopladas comprende valores de datos que determinan un conjunto de funciones HRTFs acopladas, comprendiendo el conjunto de funciones HRTFs acopladas un conjunto de funciones HRTFs acopladas del oído izquierdo y un conjunto de funciones HRTFs acopladas del oído derecho para la dirección de llegada, en donde las funciones HRTFs acopladas se determinan a partir de funciones de HRTFs normales para las mismas direcciones de llegada modificando la respuesta de fase de cada función HRTF normal por encima de una frecuencia de acoplamiento de tal modo que la diferencia entre la fase de una función HRTF acoplada del oído izquierdo y una función HRTF acoplada del oído derecho para la misma dirección de llegada sea al menos prácticamente constante como una función de la frecuencia, para todas las frecuencias prácticamente por encima de la frecuencia de acoplamiento.

2. El método según la reivindicación 1, que incluye, además, la etapa de:

20 (b) realizar un filtrado de funciones HRTF en una señal de entrada de audio (p.ej., datos de audio del dominio frecuencial indicativos de uno o varios canales de audio, o datos de audio del dominio del tiempo indicativos de uno o más canales de audio) utilizando la función HRTF determinada en la etapa (a) para la dirección de llegada.

25 3. El método según la reivindicación 1, en donde el conjunto de funciones HRTF acopladas es un conjunto de funciones HRTF de base que comprende coeficientes que determinan el conjunto de funciones HRTF acopladas, y la etapa (a) incluye la etapa de realización de una mezcla lineal utilizando coeficientes del conjunto de funciones HRTF de base para determinar la función HRTF para la dirección de llegada.

30 4. El método según la reivindicación 1, en donde la etapa (a) incluye la etapa de realización de una mezcla lineal sobre los datos indicativos de funciones HRTF acopladas determinadas por el conjunto de funciones HRTF acopladas y datos indicativos de la dirección de llegada, y en donde la función HRTF determinada para la dirección de llegada es una versión interpolada de las funciones HRTF acopladas que tienen una respuesta de magnitud que no presenta distorsión de filtrado en peine importante.

35 5. El método según la reivindicación 1, en donde la etapa (a) incluye la etapa de realizar una mezcla lineal sobre los datos del conjunto de funciones HRTF acopladas con el fin de determinar una función HRTF del oído izquierdo para la dirección de llegada y una función HRTF del oído derecho para la dirección de llegada y preferentemente, en donde el conjunto de funciones HRTFs acopladas comprende valores de datos que determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas del oído izquierdo y un conjunto de funciones HRTF acopladas del oído derecho para los ángulos de llegada que cubren un margen de ángulos de llegada, la función HRTF del oído izquierdo determinada en la etapa (a) para cualquier ángulo de llegada en el margen y la función HRTF del oído derecho determinada en la etapa (a) para dicho ángulo de llegada tienen una respuesta de fase inter-aural que coincide con la respuesta de fase inter-aural de una función HRTF normal del oído izquierdo típica para dicho ángulo de llegada y una función HRTF normal del oído derecho típica para dicho ángulo de llegada con un error de fase inferior al 20 % para todas las frecuencias inferiores a una frecuencia de acoplamiento, en donde la frecuencia de acoplamiento es mayor que 700 Hz, y

50 la función HRTF del oído izquierdo determinada en la etapa (a) para cualquier ángulo de llegada en el margen tiene una respuesta de magnitud que no presenta ninguna distorsión de filtrado en peine importante en relación con la respuesta de magnitud de la función HRTF normal del oído izquierdo típica para dicho ángulo de llegada y la función HRTF del oído derecho determinada en la etapa (a) para cualquier ángulo de llegada en el margen tiene una respuesta de magnitud que no presenta distorsión de filtrado en peine importante en relación con la respuesta de magnitud de la función HRTF normal del oído derecho típica para dicho ángulo de llegada,

55 en donde dicho margen de los ángulos de llegada es al menos de 60 grados.

60 6. Un sistema para determinar una función de transferencia relacionada con la cabeza (HRTF) interpolada, acoplada para recibir una señal indicativa de una dirección de llegada, y configurado para realizar una mezcla lineal de valores que determinan funciones HRTF acopladas de un conjunto de funciones HRTF acopladas para generar datos que determinan una función HRTF interpolada para la dirección de llegada, en donde el conjunto de funciones HRTF acopladas comprende valores de datos que determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas del oído izquierdo y un conjunto de funciones HRTF acopladas del oído derecho para direcciones de llegada que cubren un margen de direcciones de llegada, y la dirección de llegada es cualquiera de las direcciones de llegada dentro del margen, en donde las funciones HRTF acopladas se determinan a partir de funciones HRTF normales para las mismas direcciones de llegada modificando la respuesta de fase de cada función HRTF normal por encima de una frecuencia de acoplamiento de tal modo que la diferencia entre la fase de una función HRTF acoplada del oído

izquierdo y una función HRTF acoplada del oído derecho para la misma dirección de llegada sea al menos prácticamente constante como una función de la frecuencia, para todas las frecuencias prácticamente superiores a la frecuencia de acoplamiento.

5 7. El sistema según la reivindicación 6, que incluye, además, un subsistema de filtro de función HRTF acoplado para recibir datos indicativos de la función HRTF interpolada, en donde el subsistema de filtro de función HRTF está acoplado para recibir una señal de entrada de audio y configurado para filtrar dicha señal de entrada de audio en respuesta a los datos indicativos de la función HRTF interpolada, aplicando dicha función HRTF interpolada a la  
10 señal de entrada de audio y preferentemente, en donde la señal de entrada de audio son datos de audio monofónicos y el subsistema de filtro de función HRTF pone en práctica un virtualizador configurado para generar señales de audio de salida de canales izquierdo y derecho en respuesta a los datos de audio monofónicos, incluyendo mediante aplicación de dicha función HRTF interpolada a dicha señal de audio de entrada monofónica.

15 8. El sistema según la reivindicación 6, en donde dichos valores son coeficientes de un conjunto de funciones HRTF de base y el conjunto de funciones HRTF de base determina el conjunto de funciones HRTF acopladas.

9. El sistema según la reivindicación 6, en donde la función HRTF interpolada tiene una respuesta de magnitud que no presenta distorsión de filtrado en peine importante.

20 10. El sistema según la reivindicación 6, en donde las direcciones de llegada dentro del margen cubren al menos un ángulo de 60 grados en un plano y preferentemente, en donde las direcciones de llegada en el margen cubren un margen total de 360 grados en un plano.

25 11. El sistema según la reivindicación 6, en donde dicho sistema está configurado para realizar una mezcla lineal de los valores que determinan las funciones HRTF acopladas de un conjunto de funciones HRTF acopladas para generar datos que determinan una función HRTF del oído izquierdo para la dirección de llegada y una función HRTF del oído derecho para la dirección de llegada, y preferentemente, en donde el conjunto de funciones HRTF acopladas comprende valores de datos que determinan un conjunto de funciones HRTF acopladas del oído izquierdo y un conjunto de funciones HRTF acopladas del oído derecho para los ángulos de llegada que abarcan un  
30 margen de ángulos de llegada, estando el sistema configurado para generar datos que determinan la función HRTF del oído izquierdo para cualquier ángulo de llegada en el margen y datos que determinan la función HRTF del oído derecho para dicho ángulo de llegada, de modo que dicha función HRTF del oído izquierdo y dicha función HRTF del oído derecho para dicho ángulo de llegada tengan una respuesta de fase inter-aural que coincide con la respuesta de fase inter-aural de una función HRTF normal del oído izquierdo típica para dicho ángulo de llegada y una función  
35 HRTF normal del oído derecho típica para dicho ángulo de llegada con un error de fase inferior al 20 % para todas las frecuencias inferiores a una frecuencia de acoplamiento, en donde la frecuencia de acoplamiento es mayor que 700 Hz, y

40 el sistema está configurado para generar los datos que determinan la función HRTF del oído izquierdo para cualquier ángulo de llegada en el margen y los datos que determinan la función HRTF del oído derecho para dicho ángulo de llegada, de modo que dicha función HRTF del oído izquierdo para el ángulo de llegada tenga una respuesta de magnitud que no presente una distorsión de filtrado tipo peine importante en relación con la respuesta de magnitud de la función HRTF normal del oído izquierdo típica para dicho ángulo de llegada y de modo que dicha  
45 función HRTF del oído derecho para el ángulo de llegada tenga una respuesta de magnitud que no presente una distorsión de filtrado tipo peine importante en relación con la respuesta de magnitud de la función HRTF normal del oído derecho para dicho ángulo de llegada,

en donde dicho margen de ángulos de llegada es al menos de 60 grados.

50 12. El sistema según la reivindicación 6, en donde las funciones HRTF acopladas se determinan a partir de las funciones HRTF normales para las mismas direcciones de llegada modificando la respuesta de fase de cada función HRTF normal por encima de una frecuencia de acoplamiento de modo que la respuesta de fase de cada función HRTF acoplada sea prácticamente constante con una función de la frecuencia para todas las frecuencias prácticamente superiores a la frecuencia de acoplamiento.

55 13. Un método para determinar un conjunto de funciones de transferencia relacionadas con la cabeza acopladas (HRTFs), para un conjunto de ángulos de llegada que abarcan un margen de ángulos de llegada, en donde las funciones HRTF acopladas incluyen una función HRTF acoplada del oído izquierdo y una función HRTF acoplada del oído derecho para cada uno de los ángulos de llegada en el conjunto, incluyendo dicho método la etapa de:

60 procesar datos indicativos de un conjunto de funciones HRTF del oído izquierdo y un conjunto de funciones HRTF del oído derecho normales para cada uno de los ángulos de llegada en el conjunto de ángulos de llegada, para generar datos de HRTF acoplados, en donde los datos de HRTF acoplados son indicativos de una función HRTF acoplada del oído izquierdo y una función HRTF acoplada del oído derecho para cada uno de los ángulos de llegada  
65 en el conjunto, de modo que la mezcla lineal de valores de los datos de HRTF acoplados, en respuesta a los datos indicativos de cualquier ángulo de llegada en el margen, determina una función HRTF interpolada para dicho

cualquier ángulo de llegada en el margen, teniendo dicha función HRTF interpolada una respuesta de magnitud que no presenta ninguna distorsión de filtrado tipo peine importante en donde el procesamiento incluye la modificación de la respuesta de fase de cada función HRTF normal por encima de una frecuencia de acoplamiento, de modo que la diferencia entre la fase de cada función HRTF acoplada del oído izquierdo y cada función HRTF acoplada del oído derecho correspondiente sea al menos prácticamente constante como una función de la frecuencia, para todas las frecuencias prácticamente superiores a la frecuencia de acoplamiento.

5

**14.** El método según la reivindicación 13, en donde los datos de HRTF acoplados se generan de modo que una mezcla lineal de valores de los datos de HRTF acoplados, en respuesta a datos indicativos de cualquier ángulo de llegada en el margen, determina una función HRTF del oído izquierdo para el ángulo de llegada y una función HRTF del oído derecho para dicho ángulo de llegada, y en donde dicha función HRTF del oído izquierdo y dicha función HRTF del oído derecho para dicho ángulo de llegada tengan una respuesta de fase inter-aural que coincide con la respuesta de fase inter-aural de una función HRTF normal del oído izquierdo típica para dicho ángulo de llegada y una función HRTF normal del oído derecho típica para dicho ángulo de llegada con un error de fase menor que el 20 % para todas las frecuencias inferiores a una frecuencia de acoplamiento, en donde la frecuencia de acoplamiento es mayor que 700 Hz, y

10

15

dicha función HRTF del oído izquierdo para el ángulo de llegada tiene una respuesta de magnitud que no presenta distorsión de filtrado tipo peine importante en relación con la respuesta de magnitud de la función HRTF normal del oído izquierdo típica para dicho ángulo de llegada, y dicha función HRTF del oído derecho para el ángulo de llegada tiene una respuesta de magnitud que no presenta una distorsión de filtrado de tipo peine importante en relación con la respuesta de magnitud de la función HRTF normal del oído derecho típica para dicho ángulo de llegada,

20

en donde dicha gama de ángulo de llegada es al menos de 60 grados.

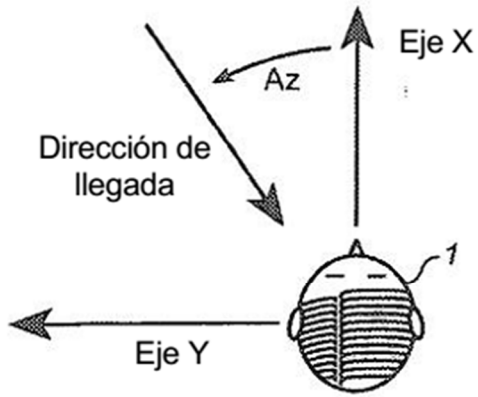
25

**15.** El método según la reivindicación 13, que incluye también una etapa de:

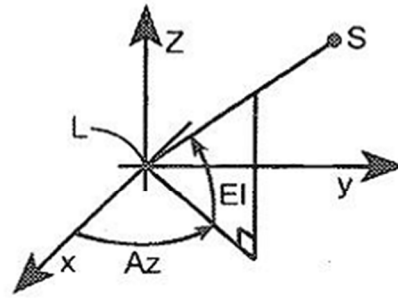
procesar los datos de HRTF acoplados para generar un conjunto de funciones HRTF de base, que incluye la realización de un proceso de ajuste para determinar valores del conjunto de funciones HRTF de base, de modo que el conjunto de funciones HRTF de base determine el conjunto de funciones HRTF acopladas dentro de una exactitud predeterminada.

30

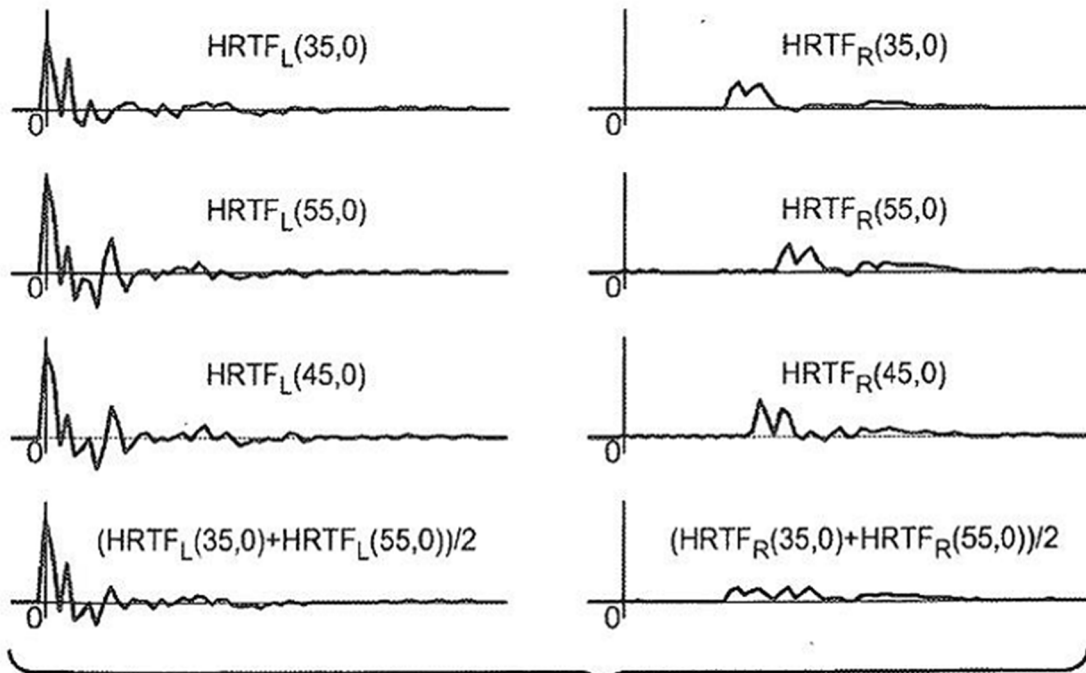
35



**FIG. 1**

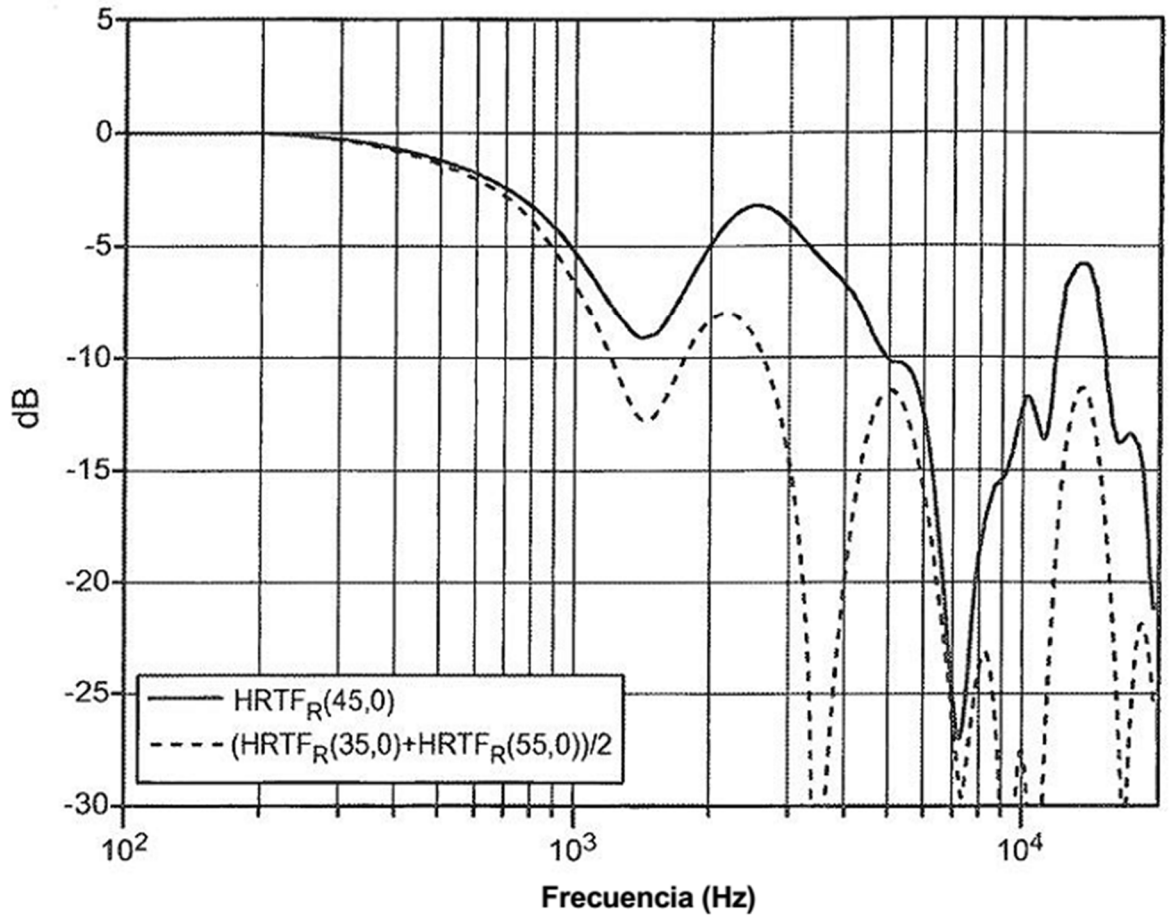


**FIG. 2**

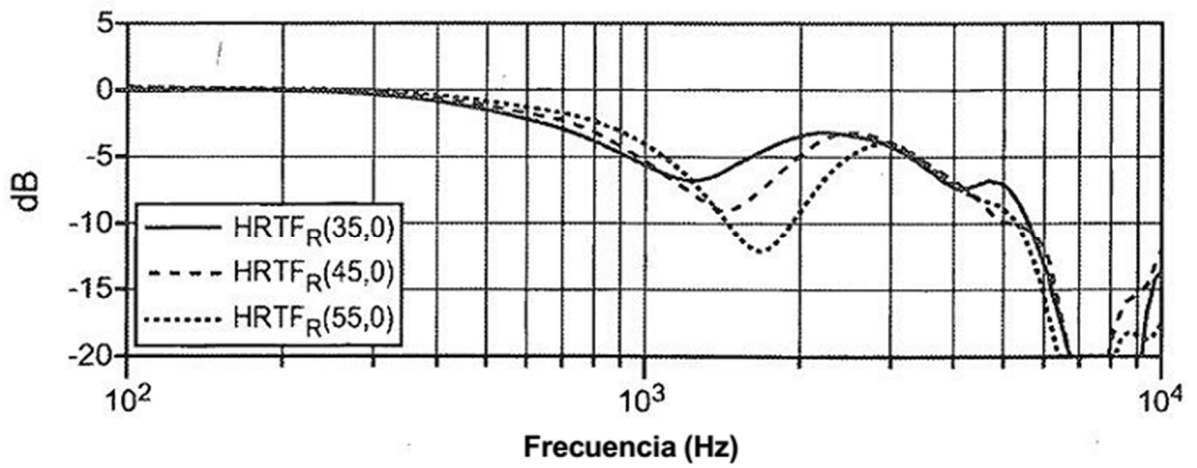


**FIG. 3**

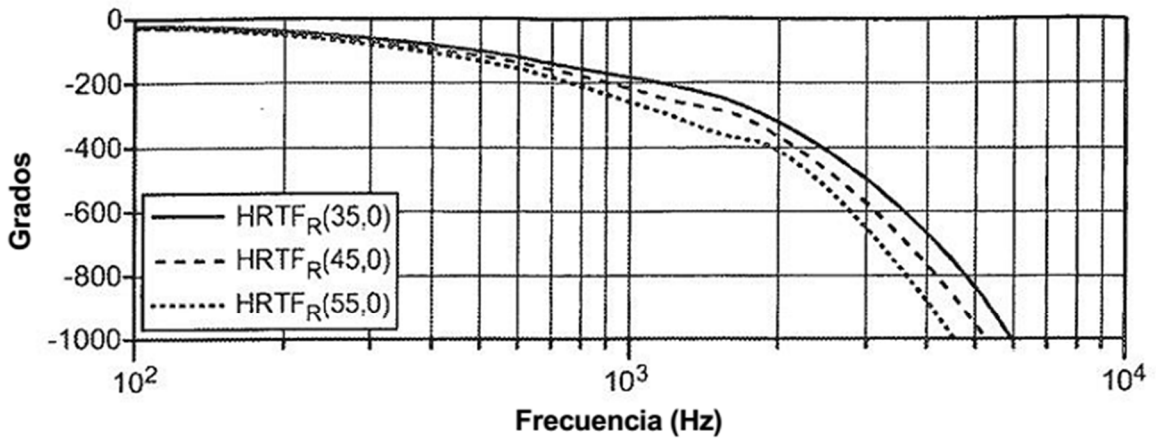




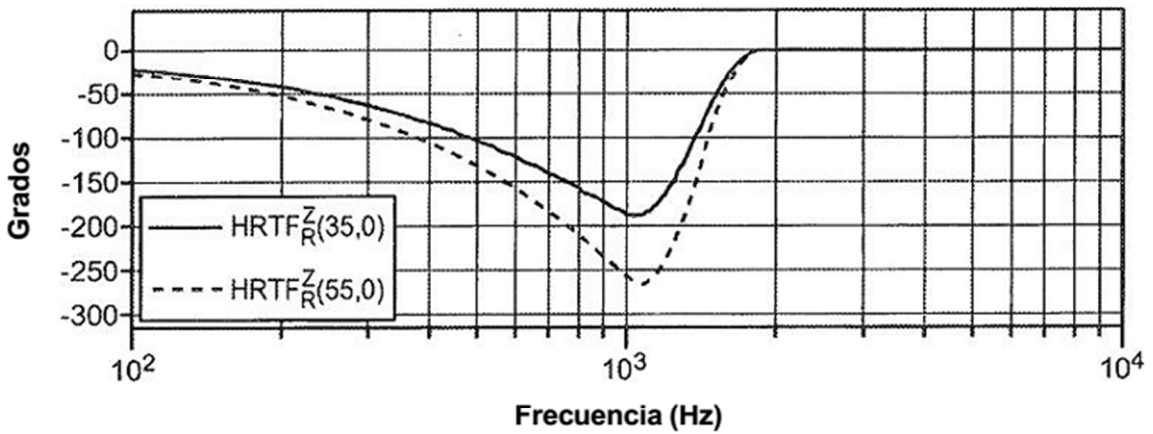
**FIG. 4**



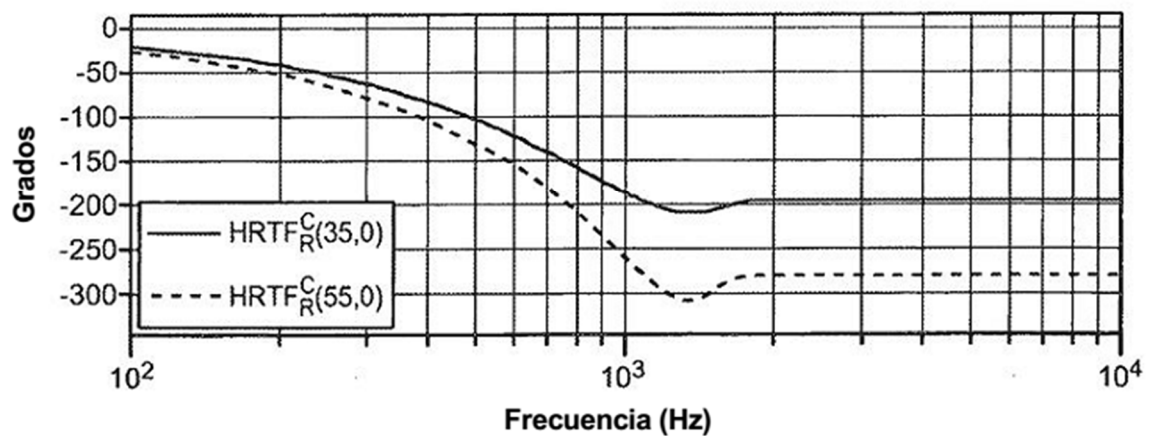
**FIG. 5A**



**FIG. 5B**



**FIG. 6A**



**FIG. 6B**

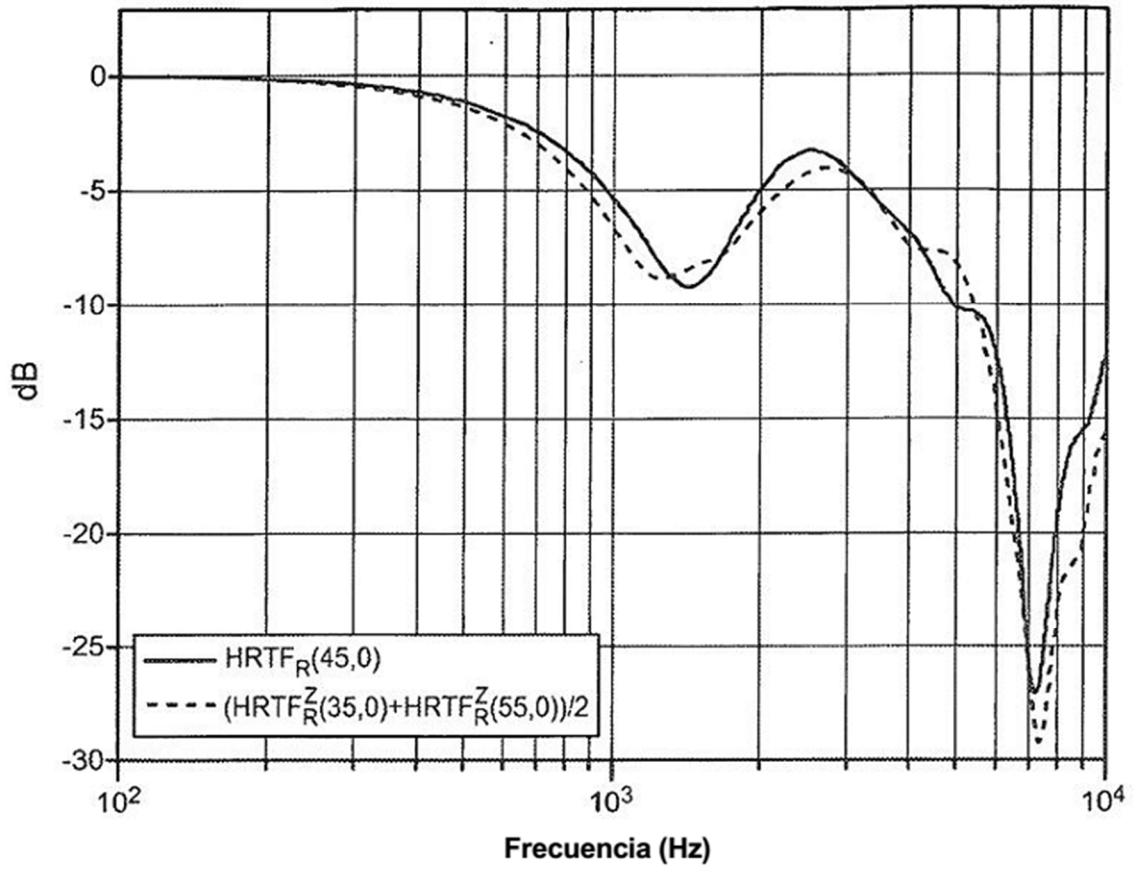


FIG. 7

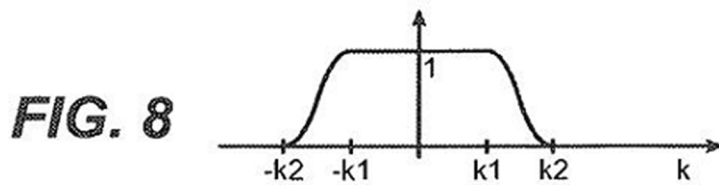


FIG. 8

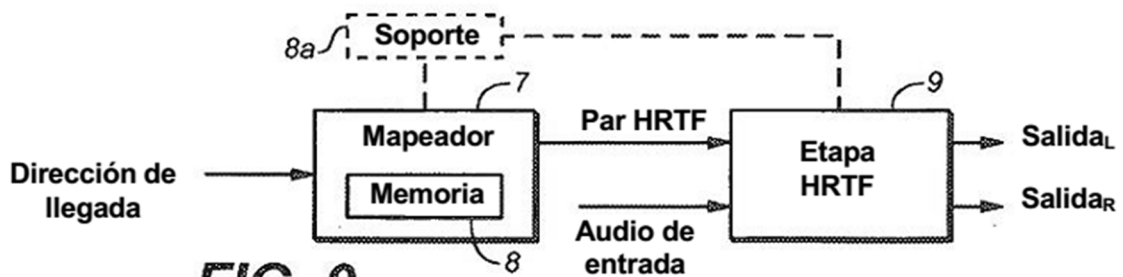


FIG. 9

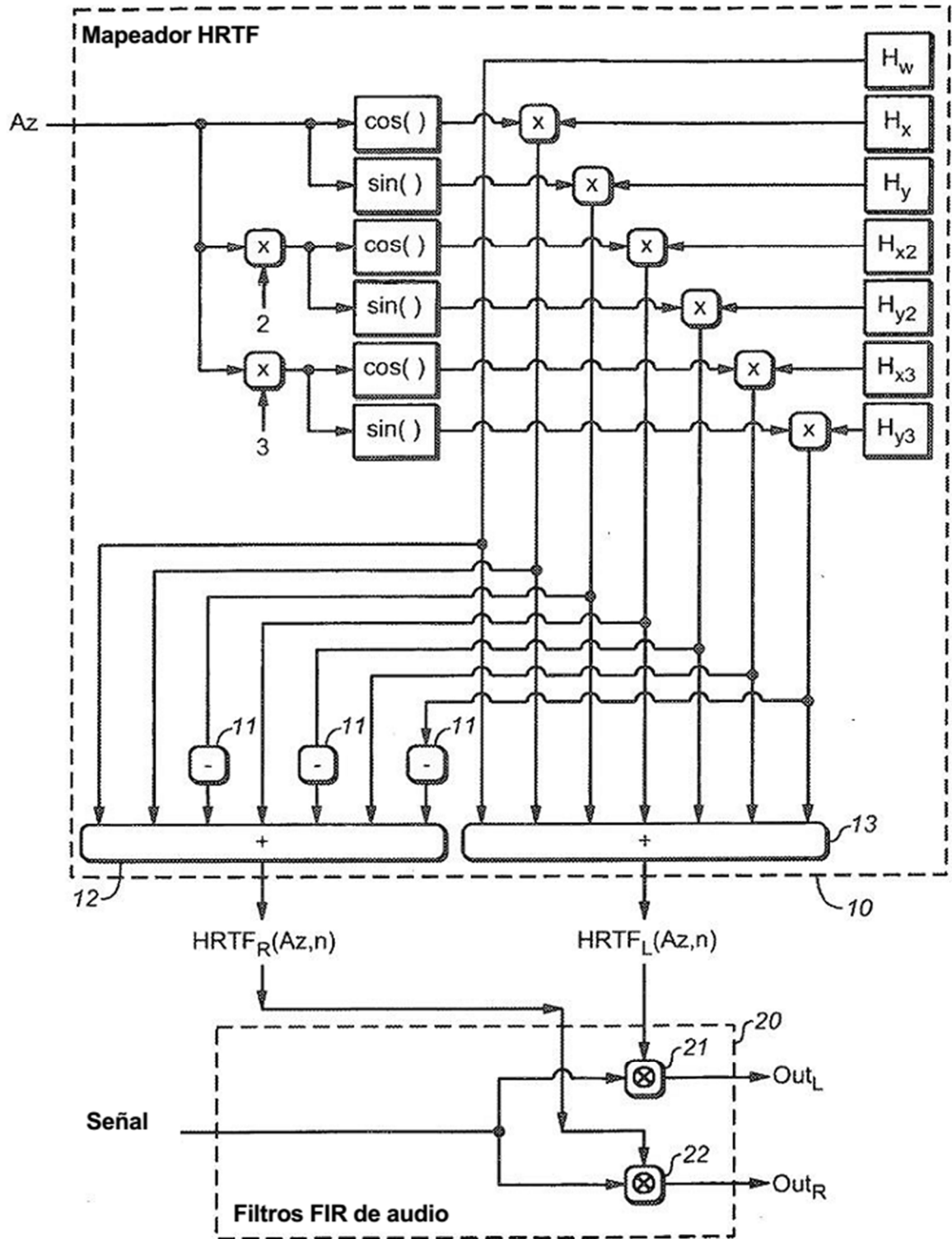


FIG. 10

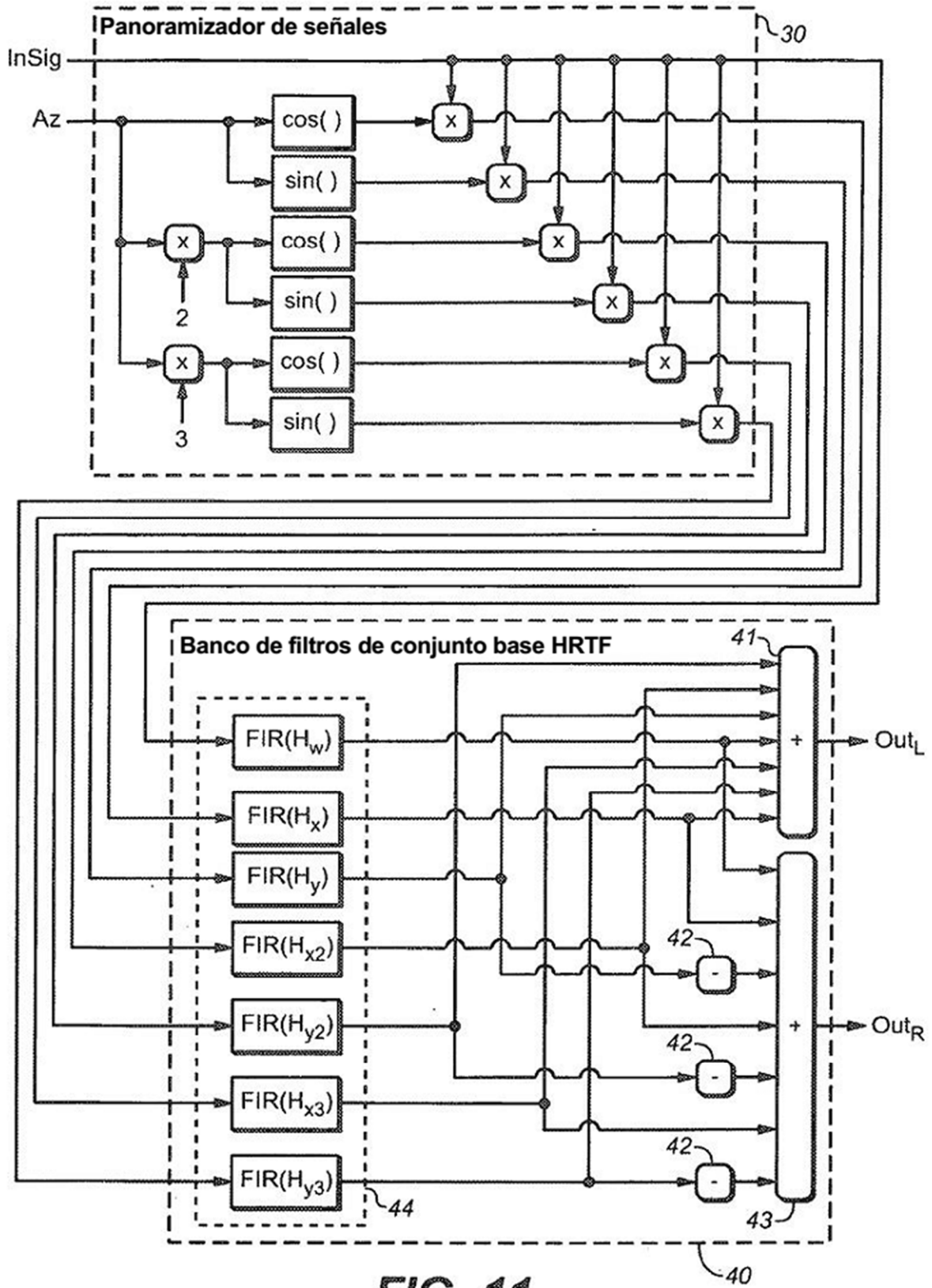


FIG. 11

