

MATRICES DE MICRÓFONOS

DESCRIPCIÓN

Esta invención se refiere a matrices de micrófonos, particularmente, aunque no exclusivamente, matrices de micrófonos circulares destinadas a capturar sonido desde un amplio intervalo de diferentes direcciones.

Las matrices de sensores se usan en una gran cantidad de aplicaciones tales como vigilancia/detección acústica, radar, sonar, ultrasonido, y comunicación por radio por nombrar algunas. Una de las características atractivas de las matrices de sensores es la capacidad de llevar a cabo el filtrado espacial sin ajuste mecánico, un proceso conocido como formación de haces. La capacidad de variar la dirección de la respuesta máxima de la matriz, conocida como dirección, se limita mediante la geometría de la matriz. Las matrices con colectores rotacionalmente simétricos (esféricos, cilíndricos y circulares) son altamente flexibles con respecto al diseño de patrones de haz. El procesamiento con matrices rotacionalmente simétricas se realiza comúnmente con una técnica llamada procesamiento en modo de fase como se ve en D.E.N Davies “A transformation between the phasing techniques required for linear and circular aerial arrays”, Proc. IEEE, volumen 112, número 11, páginas 2041 a la 2045, noviembre de 1965. La técnica explota la simetría de la matriz que transforma los datos desde el espacio de elementos a una base de funciones rotacionalmente simétricas (“modos de fase”). Es una práctica común transformar los datos de modo de fase aún más para permitir técnicas de procesamiento específicas para matrices lineales como se ve en Hafizovic y otros “Decorrelation for adaptive beamforming applied to arbitrarily sampled spherical microphones arrays”, IEEE Workshop on Applications of Signal Process to Audio and Acoustic, octubre de 2011, página. 233 a la 236. Para las matrices circulares, una tales transformadas de los datos de modo de fase consiste en aplicar una ponderación de manera que se cancele la dependencia de la frecuencia en el plano del vector colector de la matriz de modo de fase, una técnica conocida como Formación de haz de frecuencia-invariante (FIB) implementada por Chan y otros en “On the design of a digital broadband beamformer for uniform circular array mounted on spherically shared objects”, IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, 2002. Además, la directividad en el plano con esta ponderación es óptima como lo muestran Ju-lan y otros en “Beamforming of coherent signals for weighted two concentric ring arrays”, Int. Symp. on Intelligent Signal Process. and Communication Systems, noviembre de 2007, página. 850 a la 853.

Sin embargo, el incremento de la directividad acimutal tiene un costo, ya que se conoce que los formadores de haces en modo de fase tienen una ganancia de ruido blanco (WNG) generalmente pobre como se destaca en B. Rafaely “Phase-mode versus delay-and-sum spherical microphone array processing”, IEEE Signal Process. Lett., Volumen. 12, número 10, páginas 713 a la 716, octubre de 2005. Rahim y otros en “Effect of directional elements on the directional response of circular antenna arrays”, Proc. Inst. Elect. Inglés., Parte H: Microwaves, Optics, Antennas, volumen 129, número 1, páginas 18 a la 22, febrero de 1982, demuestra que las matrices circulares en particular tienen un control pobre de los lóbulos laterales en la dirección de elevación y dan como resultado una directividad 3D pobre. Rahim también sugiere usar elementos direccionales montados con su eje de respuesta principal en la dirección radial. Los elementos directivos se pueden simular reemplazando los elementos con aberturas lineales o pequeñas matrices lineales perpendiculares al plano de la matriz como se ve en Van Trees “Optimum array processing”, ser. Detection, estimation, and modulation theory, John Wiley & Sons, 2004, número. IV. Para las matrices acústicas, un enfoque diferente es montar los elementos en un deflector rígido como se ve en Meyer “Beamforming for a circular microphone array mounted on spherically shaped objects”, J. Acoust. Soc. Amer., Volumen 109, número 1, páginas 185 a la 193, enero de 2001. Sin embargo, se conoce que los micrófonos direccionales se emparejan mal y requieren una alineación exacta (ver Meyer y otros “Spherical harmonic modal beamforming for an augmented circular microphone array”, IEEE Int. Conf. on Acoust., Speech and Signal Process, marzo de 2008, páginas 5280 a la 5283), y mediante el uso de aberturas/matrices o deflectores perpendiculares agrega volumen y complejidad a la matriz. Meyer también investiga el concepto de usar matrices de anillos múltiples para la adquisición de señales de banda ancha.

Por lo tanto el campo de las matrices de micrófonos está bien desarrollado, pero todavía está sujeto a una serie de limitaciones básicas. Una de estas que el solicitante ha apreciado ahora es que las matrices de alto rendimiento se diseñan y optimizan para aplicaciones particulares lo cual puede hacer que su costo sea prohibitivo para algunos usos.

El solicitante ha realizado una serie de desarrollos con la intención de proporcionar mejoras en el rendimiento de las matrices de micrófonos y cuando se ve desde un primer aspecto la invención proporciona un método que comprende:

recibir sonido en una pluralidad de micrófonos discretos dispuesta en una matriz circular, al menos algunos de dichos micrófonos producen señales en respuesta a dicho sonido,

llevar a cabo un primer algoritmo de procesamiento de señales en el sonido que se origina desde uno o más de un primer conjunto de direcciones con relación a dicha matriz para aislar una primera fuente de sonido en el mismo; y

- 5 llevar a cabo un segundo algoritmo de procesamiento de señales en el sonido que se origina desde uno o más de un segundo conjunto de direcciones con relación a dicha matriz para aislar una segunda fuente de sonido en el mismo.

Este aspecto de la invención se extiende a un sistema de captura de sonido que comprende:

una pluralidad de micrófonos discretos dispuesta en una matriz circular,

- 10 un sistema de procesamiento dispuesto para llevar a cabo un primer algoritmo de procesamiento de señales en el sonido que se origina desde uno o más de un primer conjunto de direcciones con relación a dicha matriz para aislar una primera fuente de sonido en el mismo;

en donde dicho sistema de procesamiento se dispone para llevar a cabo un segundo algoritmo de procesamiento de señales en el sonido que se origina desde uno o más de un segundo conjunto de direcciones con relación a dicha matriz para aislar una segunda fuente de sonido en el mismo.

- 15 Por lo tanto los expertos en la técnica verán que de acuerdo con la invención, se emplean diferentes técnicas de procesamiento en dependencia de la dirección de origen del sonido entrante. El solicitante ha apreciado que al cambiar el procesamiento de señales aplicado a las señales recibidas desde una matriz de micrófonos dependiente de la orientación de la matriz con relación a una dirección de interés (por ejemplo, a una fuente de sonido particular o a uno de un intervalo de direcciones durante
20 un barrido), se puede lograr una mejor respuesta que si se usa un solo enfoque de procesamiento de señal única y que es posible usar una matriz de micrófonos para capturar el sonido con precisión en un amplio campo de sonido, por ejemplo, hasta un hemisferio de 180° o más allá.

En un conjunto de modalidades el primer algoritmo de procesamiento comprende una técnica de procesamiento de radiación transversal, por ejemplo, formación de haces de directividad constante.

- 25 El solicitante ha apreciado que el procesamiento de señales desde una matriz de micrófonos circulares que usa formación de haz de directividad constante dará típicamente buenos resultados para señales que emanan de direcciones hasta aproximadamente 60° desde una perpendicular al plano de la matriz. Por lo tanto en un conjunto de modalidades el primer conjunto de direcciones comprende direcciones hasta un ángulo de umbral desde una perpendicular al plano de la matriz. En
30 un conjunto de tales modalidades el ángulo de umbral está entre 50° y 70°. El solicitante ha apreciado además que más allá del ángulo de umbral, la respuesta lograda mediante el uso de técnicas de radiación transversal tales como formación de haz de directividad constante no se pueden aceptar.

Sin embargo de acuerdo con la invención los sonidos del segundo conjunto de direcciones, por ejemplo, más allá del ángulo de umbral, se pueden procesar mediante el uso de un algoritmo diferente.

5 El primer y segundo conjunto de direcciones pueden ser mutuamente excluyentes, pero esto no es esencial; se prevé que sea posible por ejemplo cierto grado de solapamiento. El sonido en tal región de solapamiento, por ejemplo, que emana tanto del primer como del segundo conjunto de direcciones se podrían procesar mediante ambos algoritmos con los resultados del mismo comparados mediante el uso de una métrica apropiada o combinados de una manera adecuada.

10 Se prevé además que se puede llevar a cabo un tercer algoritmo de procesamiento de señales en el sonido que se origina desde uno o más de un tercer conjunto de direcciones con relación a dicha matriz para aislar una tercera fuente de sonido en el mismo.

En un conjunto de modalidades el segundo algoritmo de procesamiento comprende la formación de haces superdirectiva. El solicitante ha apreciado que, cuando se combinan, los formadores de haces superdirectivos y las geometrías de matriz son adecuados para la adquisición remota del habla, la mejora del habla y la formación de imágenes acústicas ya que tienen el potencial de lograr una mayor directividad que los formadores de haces convencionales sin distorsionar el sonido procesado de la misma manera que lo hacen los formadores de haces adaptativos. Ya sea que el objetivo sea mejorar la inteligibilidad del habla, proporcionar una imagen acústica ‘más nítida’, o detectar y clasificar eventos de audio en un entorno desafiante, el solicitante ha apreciado que es importante no introducir
15 ningún artefacto en la salida del formador de haz mientras se elimina el ruido. Los formadores de haces superdirectivos deterministas (no adaptativos) tienen el potencial de discriminar el ruido (proporcionando de esta manera una mayor directividad) mejor de lo que se puede lograr con matrices del mismo tamaño las cuales usan formadores de haces convencionales. Para algunas geometrías de matrices, típicamente matrices sobremuestreadas, los algoritmos de radiación transversal se pueden convertir en superdirectivos mediante la optimización de ponderación W aplicados a las señales de los respectivos micrófonos en la matriz. Mientras que esto puede tener el costo de una disminución de la ganancia de ruido blanco ("WNG"), también puede reducir la distorsión armónica y otros artefactos que pueden representar un problema más desafiante que una relación señal/ruido (SNR) más baja.

20 En el mundo de la investigación de matrices, en los últimos años se ha redescubierto la teoría del formador de haz superdirectivo. La teoría se conoce desde hace décadas pero no se ha aplicado ampliamente a las matrices de micrófonos en la práctica, debido a las limitaciones prácticas de, por

ejemplo, la WNG. Para las matrices circulares la teoría, a menudo denominada Procesamiento en Modo de Fase Superdirectiva, tiene una cierta elegancia matemática. Proporciona una fórmula de forma cerrada para el procesamiento de las matrices con ciertos requisitos al tamaño de la matriz circular y su muestreo, dando una mejor respuesta que la dada por la teoría convencional. Sin embargo, el solicitante ha apreciado que esto solo es cierto para los sonidos que emanan cerca del plano de la matriz circular. Más lejos de este plano, una matriz diseñada mediante las reglas estándar puede tener un rendimiento bastante pobre, tanto en términos de directividad como de WNG.

La investigación del solicitante ha concluido además que para implementar los modos de funcionamiento de radiación transversal y de radiación longitudinal con más éxito en la misma matriz circular, la matriz se debe diseñar y optimizar con respecto a la directividad 3D general. Mientras que una matriz esférica (la cual se puede considerar una serie de matrices circulares concéntricas que tienen planos paralelos separados) proporciona una directividad 3D mejorada en comparación con una o más matrices circulares coplanares, la última se prefiere por razones prácticas tales como el transporte y la falta de intrusión de la estructura. La matriz circular óptima es una estructura de anillos concéntricos coplanarios con diferentes tamaños. El radio óptimo de cada anillo, el número de micrófonos en cada anillo y la separación entre anillos consecutivos es una función del intervalo de operación y la frecuencia deseada.

En un conjunto de modalidades el aparato comprende además un sensor de orientación.

Como se entenderá a partir de la discusión anterior, de acuerdo con la invención la matriz puede detectar todo el sonido incidente, y los haces individuales procesados por el algoritmo óptimo (por ejemplo, de radiación transversal o de radiación longitudinal) en dependencia de la orientación del haz con relación a la matriz. Para tomar un ejemplo extremo un haz orientado sustancialmente de manera radial con respecto a la matriz circular se puede procesar mediante el uso de técnicas de procesamiento de radiación longitudinal, mientras que un haz orientado sustancialmente paralelo al eje de la matriz circular se puede procesar mediante el uso de técnicas de procesamiento de radiación transversal. El sensor de orientación se puede usar para clasificar o detectar una fuente de sonido. El sensor de orientación también se puede usar para proporcionar un mapeo de las señales de audio en el espacio.

Sin embargo el solicitante ha ideado un enfoque adicional que se puede usar en algunas situaciones, especialmente cuando se conoce la ubicación aproximada de la fuente de sonido. En consecuencia en un conjunto de modalidades la invención comprende usar el sensor de orientación para determinar una orientación de la matriz y usar dicha orientación para determinar la primera y segunda porciones

- de sonido. Por ejemplo el sensor de orientación se podría usar para determinar si un dispositivo está sobre una mesa o en una pared, permitiendo de esta manera una estimación razonable de la dirección de incidencia del sonido que surge del habla de las personas sentadas en la habitación. Esto puede tener varias implicaciones prácticas que incluyen: ahorrar recursos de procesamiento al procesar únicamente el sonido de las direcciones que es factible que se pueda colocar una fuente de sonido; determinar si una matriz debe funcionar como una matriz de radiación transversal o longitudinal, o una combinación de ambas; estimar la posición angular de la matriz para correferenciar el área operativa de la matriz con un mapa, una cámara, o para combinar con otra matriz; determinar si un conjunto de micrófonos se encuentran en la cara frontal o posterior de la matriz.
- 5 Tales disposiciones son novedosas e inventivas por derecho propio y por lo tanto cuando se ve desde un segundo aspecto la invención proporciona un dispositivo para capturar sonido que comprende: una estructura de soporte;
- 10 una pluralidad de micrófonos discretos dispuesta en la estructura de soporte en una matriz circular; y
- 15 un sensor de orientación dispuesto para determinar una orientación de la estructura de soporte. Las señales desde la pluralidad de micrófonos se podrían transmitir para su procesamiento de manera remota; sin embargo en un conjunto de modalidades el procesamiento se lleva a cabo en el lugar y por lo tanto el segundo aspecto de la invención se extiende a un sistema para capturar sonido que comprende:
- 20 una estructura de soporte;
- una pluralidad de micrófonos discretos dispuesta en la estructura de soporte en una matriz circular y dispuesta para proporcionar una pluralidad respectiva de señales de micrófono;
- un sensor de orientación dispuesto para proporcionar una señal de orientación indicativa de una orientación de la estructura de soporte; y
- 25 un subsistema de procesamiento dispuesto para recibir dichas señales de micrófono y dicha señal de orientación y para usar dichas señales de micrófono y dicha señal de orientación para determinar una dirección de un sonido entrante con relación a dicha orientación.
- En un conjunto de modalidades el subsistema de procesamiento se dispone para llevar a cabo un primer algoritmo de procesamiento de señales para aislar una primera fuente de sonido si dicha
- 30 dirección está en uno de un primer conjunto de direcciones y para realizar un segundo algoritmo de procesamiento de señales para aislar una segunda fuente de sonido si dicha dirección está en uno de un segundo conjunto de direcciones.

Las características opcionales y preferidas del primer aspecto de la invención son características opcionales y preferidas de este conjunto de modalidades mencionadas anteriormente.

En un conjunto de modalidades el subsistema de procesamiento se dispone para aplicar factores de ponderación diferenciales a dichas señales de micrófono para membranas de micrófono vecinas las

5 cuales se pueden orientar opcionalmente en diferentes direcciones. Esto permite que múltiples membranas de micrófono se agrupen juntas para formar un micrófono direccional cuya directividad se puede variar. Esto también permite por ejemplo que las señales de micrófonos los cuales tienen vectores normales a sus respectivas membranas con una alineación más cercana a la dirección determinada reciban una ponderación de contribución que las señales desde los micrófonos las cuales se alinean menos. En un ejemplo de esto, a los micrófonos mejor alineados se les podría asignar una
10 ponderación de contribución y a los menos alineados se les podría usar como señales de referencia de ruido. Esto puede mejorar la relación señal/interferencia de la matriz.

En un conjunto de modalidades el subsistema de procesamiento se dispone para filtrar el ruido espacial de acuerdo con los algoritmos respectivos designados para cada una de una pluralidad de
15 direcciones de ruido.

De acuerdo con cualquier aspecto de la invención se podría proporcionar una única matriz circular, pero en un conjunto de modalidades el dispositivo comprende una pluralidad de matrices circulares concéntricas de micrófonos. En la investigación del solicitante se ha encontrado que ciertos diseños de matrices de micrófonos circulares (más detalles de los cuales se proporcionan a continuación)

20 pueden mejorar la respuesta aún más, posiblemente en un espacio tridimensional completo, mientras que mantienen e incluso mejoran la ganancia de ruido blanco en la salida de la matriz. Se ha encontrado que esto es válido al menos para matrices circulares que operan en el modo de radiación longitudinal es decir que usan la captura de sonido aproximadamente en el plano de la matriz circular. Se pueden proporcionar diseños de matriz que representen una matriz circular de radiación
25 longitudinal de banda ancha óptima. Cuando se optimiza para aplicaciones de banda ancha, dicha matriz puede comprender una matriz de múltiples anillos concéntricos que también se pueden usar como una matriz de banda ancha.

En un subconjunto de las modalidades detalladas anteriormente la estructura de soporte comprende una pluralidad correspondiente de anillos discretos. El número de anillos, el número de micrófonos
30 N, y el tamaño de la matriz se pueden decidir por la directividad general deseada y la ganancia de ruido blanco de la matriz. En la teoría de la matriz circular, la directividad se puede conectar al llamado orden de excitación de las funciones de Bessel que describen las señales del micrófono

cuando los micrófonos se disponen en una matriz circular muestreada uniformemente. La separación de los micrófonos, y el radio del anillo se eligen preferentemente de manera que las funciones de Bessel, y los modos de fase que describen, se muestrean correctamente en el espacio, por ejemplo sin solapamiento. Esto es beneficioso para garantizar que los modos de fase tengan una resistencia apreciable y no requieran tanta amplificación en el procesamiento. La amplificación, o una mayor ponderación de los modos de fase débil da como resultado la amplificación del ruido en la salida, y disminuye efectivamente la ganancia de ruido blanco. Cuanto mayor sea el orden de los modos de fase que se pueden representar con una resistencia apreciable, mayor directividad se logra con la matriz.

En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención el radio de cada matriz circular concéntrica se calcula como referencia al orden de modo de fase máximo, M , el número de matrices concéntricas circulares, P y el número de micrófonos en cada matriz circular concéntrica, N , que equipara la forma estándar de la ganancia de ruido blanco ponderada en frecuencia a una forma dependiente de las variables antes mencionadas dadas por:

$$(2M + 1)^2 \left[\sum_{m=-M}^{m=M} \frac{1}{\sum_{p=0}^P N_p |J_m(kR_p)|^2} \right]^{-1}$$

En un subconjunto de tales modalidades esto se maximiza con respecto a las variables mencionadas anteriormente que usan un algoritmo de evolución diferencial.

En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención la abertura límite de la matriz circular concéntrica es igual a $2\pi/k_1$, donde k_1 es el número de onda más pequeño que la matriz está diseñada para detectar.

En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención el diámetro de la estructura general está en el intervalo de 5 cm a 50 cm.

En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención el número de matrices de anillos circulares está en el intervalo de 1 a 20, por ejemplo, de 4 a 16, por ejemplo, de 8 a 12, por ejemplo, 10.

En un conjunto de modalidades se proporciona un elemento central en el centro de la(s) matriz(es) circular(es). Se podría proporcionar un único elemento o se podría proporcionar una pluralidad de elementos esencialmente colocalizados.

En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención el orden máximo del modo de fase excitada para el cual se optimiza el diseño está en el intervalo de 1 a 15, por ejemplo, de 4 a 10, por ejemplo, de 6 a 8, por ejemplo, 7.

5 En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención el número de elementos en cada anillo está en el intervalo de 1 a 40, por ejemplo, de 1 a 30, por ejemplo, de 1 a 21.

En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención, el anillo con el menor número de elementos tiene entre 1 y 21 elementos, por ejemplo, entre 5 y 5, por ejemplo, 11.

10 En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención el anillo con el mayor número de elementos es de 10 y 100 elementos, por ejemplo, entre 30 y 70, por ejemplo, entre 42 y 58, por ejemplo, 50.

En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención la distancia mínima de separación de elementos está en el intervalo de 2 a 15 mm, por ejemplo, de 5 a 10 mm, por ejemplo, 7.5 mm.

15 En un conjunto de modalidades de cualquier aspecto de la invención la separación entre elementos es menor o igual a la mitad de la longitud de onda de la señal de frecuencia más alta que la matriz está diseñada para muestrear.

En una modalidad ilustrativa específica la estructura de soporte comprende 5 anillos, que tienen 11, 11, 11, 11, 83 elementos respectivamente y un elemento en el centro.

20 En una modalidad ilustrativa específica la estructura de soporte comprende 9 anillos, que tienen 11, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 139 elementos respectivamente y un elemento en el centro.

Los micrófonos de la(s) matriz(ces) circular(es) se podrían disponer con una distribución angular específica alrededor del círculo o los círculos respectivos para adaptarse a una aplicación o entomo específico, pero en un conjunto preferido de modalidades los micrófonos se disponen a separaciones angulares iguales alrededor de la(s) matriz(ces) circular(es).

25 La estructura de soporte de la matriz, es decir, el(los) anillo(s) se podría(n) fabricar a partir de aluminio, por ejemplo, una lámina delgada o aluminio extruido, o a partir de fibra de carbono. En otro conjunto de modalidades, los anillos se fabrican a partir de una placa de circuito flexible. En cualquier caso se podría enrollar una lámina plana para formar un tubo alargado el cual entonces se dobla redondo para formar un círculo o parte del mismo (se puede formar un círculo completo a partir de una pluralidad de círculos parciales).

30 Los micrófonos podrían tener cualquier orientación dada con relación a un plano de la estructura de soporte o de la matriz circular. A pesar de la capacidad de acuerdo con algunos aspectos de la

invención para detectar sonidos con precisión desde un amplio intervalo de direcciones mediante el uso de diferentes algoritmos de procesamiento, los micrófonos se podrían, por ejemplo, disponer de manera que tengan vectores normales a sus respectivas membranas orientados sustancialmente de manera radial con respecto a la matriz circular, por ejemplo, para optimizarse para una disposición de ‘radiación transversal’. De manera similar los micrófonos se podrían disponer de manera que tengan vectores normales a sus respectivas membranas orientados sustancialmente paralelos a un eje de la matriz circular, por ejemplo, para optimizarse para una disposición de ‘radiación longitudinal’. Cuando, como se prefiere, se proporcionan múltiples matrices circulares montadas en uno o varios anillos, los micrófonos de las respectivas matrices podrían tener las mismas orientaciones entre sí con relación al eje. Alternativamente podrían diferir. Por ejemplo las matrices alternativas se podrían orientar axial y radialmente respectivamente.

En un conjunto de modalidades la pluralidad de micrófonos discretos comprende una primera matriz y dicha pluralidad de señales de micrófono comprende una pluralidad de primeras señales de micrófono, dicho sistema o dispositivo que comprende además una segunda pluralidad de micrófonos discretos dispuesta en la estructura de soporte en una segunda matriz circular, concéntrica con la primera matriz circular y dispuesta para proporcionar una pluralidad respectiva de segundas señales de micrófono, en donde la primera pluralidad de micrófonos se monta de manera que tengan vectores normales a sus respectivas membranas orientados sustancialmente de manera radial con respecto a la primera matriz circular y la segunda pluralidad de micrófonos se monta de manera que tengan vectores normales a su respectiva membrana orientados sustancialmente paralelos a un eje de la segunda matriz circular.

Tal disposición se considera novedosa e inventiva por derecho propio y por lo tanto cuando se ve desde un tercer aspecto la invención proporciona un dispositivo para capturar sonido que comprende: una estructura de soporte;

una primera pluralidad de micrófonos discretos que tiene las respectivas membranas y se dispone en la estructura de soporte en una primera matriz circular;

una segunda pluralidad de micrófonos discretos que tiene las respectivas membranas y se dispone en la estructura de soporte en una segunda matriz circular concéntrica con la primera matriz circular, en donde la primera pluralidad de micrófonos se monta de manera que tengan vectores normales a sus respectivas membranas orientados sustancialmente de manera radial con respecto a la primera matriz circular y la segunda pluralidad de micrófonos se monta de manera que tengan vectores

normales a sus respectivas membranas orientados sustancialmente paralelos a un eje de la segunda matriz circular.

En un conjunto de modalidades la primera pluralidad de micrófonos discretos y la segunda pluralidad de micrófonos se montan en el mismo anillo.

- 5 En un conjunto de modalidades la segunda pluralidad de micrófonos está en las mismas posiciones angulares en la matriz circular que la primera pluralidad de micrófonos. Mientras que un par dado de micrófonos de cada una de las pluralidades primera y segunda pueden tener directividades diferentes, en modalidades típicas, la separación espacial de los micrófonos en la misma posición circunferencial es muy pequeña con relación a la longitud de onda del sonido que se captura de manera que se pueden considerar que tiene la misma posición espacial. Las señales de estos micrófonos se pueden combinar, decrementando el ruido propio.

- 10 En un conjunto preferido de modalidades del tercer aspecto de la invención, el dispositivo comprende un sensor de orientación dispuesto para determinar una orientación de la estructura de soporte. Este sensor puede proporcionar datos que ayuden a ahorrar recursos de procesamiento, etc. cómo se describe de acuerdo con el primer aspecto de la invención.

De acuerdo con cualquier aspecto de la invención donde se proporciona, el sensor de orientación, cuando se proporciona se puede seleccionar del grupo que comprende un magnetómetro, un giroscopio y un acelerómetro.

- 20 Se debe apreciar que cuando el término “sustancialmente” se usa en este documento para referirse a una orientación, no es esencial que se requiera una alineación estricta con la dirección especificada. Por ejemplo se pretende que un ángulo de hasta +/- 20 grados en una dirección todavía se considere sustancialmente paralelo a esa dirección.

- El solicitante ha previsto un conjunto de modalidades en las que los métodos y disposiciones descritas anteriormente se implementan en dispositivos para aplicaciones tales como vigilancia encubierta, videoconferencia y detección y seguimiento de vehículos aéreos no tripulados (drones). Ahora se describirán ciertas modalidades de la presente invención, únicamente a manera de ejemplo, con referencia al dibujo acompañante en el cual:

La Figura 1 es una vista en planta esquemática de una modalidad de la invención con una estructura de soporte de anillos concéntricos múltiples;

- 30 La Figura 2 es una vista en perspectiva de un solo anillo que muestra una posible disposición de la primera y segunda pluralidad de micrófonos;

La Figura 3 muestra una sección transversal de un anillo con múltiples micrófonos en una posición circunferencial dada;

La Figura 4 muestra esquemáticamente una modalidad de la invención que incluye una placa de montaje;

- 5 La Figura 5 muestra un gráfico de directividad y WNG en función del orden del modo de excitación para una matriz optimizada;

La Figura 6a muestra un gráfico polar ilustrativo de la sección transversal de elevación del patrón de potencia para una matriz de anillos singular;

- 10 La Figura 6b muestra un gráfico polar ilustrativo de la sección transversal en acimut del patrón de potencia para una matriz de anillos singular.

La Figura 7 muestra el esquema mediante el cual se procesan los haces correspondientes al modo de operación de radiación transversal.

La Figura 8 se muestra el esquema mediante el cual se procesan los haces correspondientes al modo de operación de radiación longitudinal.

- 15 La Figura 9 muestra una matriz optimizada ilustrativa con un anillo más exterior de 10 cm de diámetro.

La Figura 10 muestra el patrón de potencia producido por la matriz ilustrativa de la Figura 9 que usa procesamiento de radiación transversal con ponderación uniforme del elemento.

- 20 La Figura 11 muestra los patrones de potencia producidos por la matriz ilustrativa de la Figura 9 a través de un intervalo completo de ángulos de acimut.

La Figura 12 muestra los patrones de potencia producidos por la matriz ilustrativa de la Figura 9 a través de un intervalo completo de ángulos de elevación.

La Figura 13 muestra una matriz optimizada ilustrativa con un anillo más exterior de 20 cm de diámetro.

- 25 La Figura 14 muestra el patrón de potencia producido por la matriz ilustrativa de la Figura 13 que usa procesamiento de radiación transversal con ponderación uniforme del elemento.

La Figura 15 muestra los patrones de potencia producidos por la matriz ilustrativa de la Figura 13 a través de un intervalo completo de ángulos de acimut.

- 30 La Figura 16 muestra los patrones de potencia producidos por la matriz ilustrativa de la Figura 13 a través de un intervalo completo de ángulos de elevación.

La Figura 1 es una vista en planta esquemática de una matriz de micrófonos que incorpora la invención con una estructura de soporte que comprende múltiples anillos concéntricos 102, 104, 106,

108 en los cuales se incrustan a una pluralidad correspondiente de micrófonos 112, 114, 116, 118. Un elemento central 100 se sitúa en el centro de la estructura de anillos concéntricos múltiples. En esta Figura se representan cuatro anillos, sin embargo la invención no se limita a tener cuatro anillos y se podría proporcionar cualquier número. El solicitante ha ideado conjuntos específicos de valores
5 convenientes de tales parámetros los cuales producen resultados inesperadamente buenos los cuales se describen en más detalle a continuación. El número y las dimensiones de los anillos y el número de micrófonos incrustados pueden variar en dependencia de la aplicación y la respuesta de radiación transversal deseada. Cuantos más anillos se utilicen mayor será el grado de sobre muestreo para aplicaciones de radiación transversal. El sobre muestreo se utiliza para la optimización de
10 ponderación superdirectiva.

Los micrófonos pueden ser micrófonos MEMS en miniatura que tienen un bajo ruido propio, lo cual permite mejorar la fase y la coincidencia de amplitud. Como se muestra en las Figuras 2 y 3, se pueden implementar varios micrófonos en una ubicación angular dada alrededor del anillo para reducir aún más el ruido propio por debajo del valor típico para un único micrófono MEMS en
15 miniatura de 30 dB, que mejora la precisión de los datos procesados.

Los anillos concéntricos se pueden formar a partir de tubos de aluminio. El radio de la estructura general puede ser por ejemplo de 30 cm.

La Figura 2 muestra con más detalle un anillo 200 el cual se podría usar en la modalidad descrita con referencia a la Figura 1. Dispuestos en el anillo 200 hay una primera pluralidad de micrófonos
20 202 que tiene orientaciones de manera que los vectores normales a sus respectivas membranas son sustancialmente radiales con respecto al anillo y una segunda pluralidad de micrófonos 204 tiene respectivos vectores normales de membrana orientados sustancialmente paralelos al eje central del anillo 200.

La Figura 3 ilustra con más detalle una sección del anillo tubular 200 que forma parte de la estructura
25 de soporte. Esto muestra el micrófono 202 orientado radialmente y el micrófono 204 orientado axialmente en esta ubicación circunferencial. De hecho también se muestran los micrófonos 206, 208 tercero y cuarto que se orientan en direcciones respectivas opuestas al primer y segundo micrófonos 202, 204. Se proporcionan conjuntos similares de cuatro micrófonos a separaciones regulares alrededor del anillo 200 como se muestra en la Figura 2.

30 Combinando las señales de varios micrófonos en cada ubicación alrededor de la circunferencia del tubo 200, el ruido propio introducido por los micrófonos individuales se puede reducir de manera eficaz. Además, proporciona un intervalo más amplio de ángulos sobre los cuales se puede lograr

una alta sensibilidad lo cual facilita el uso del aparato en general para aislar el sonido que emana de un campo amplio con relación al aparato. Adicionalmente, los subconjuntos de pares de estos cuatro pueden simular un elemento directivo en el plano de la sección transversal.

La Figura 4 ilustra esquemáticamente una modalidad en forma de un dispositivo de captura de sonido en el cual la estructura de soporte de anillos múltiples 102, 104, 106, 108 de la Figura 1 se monta en un tablero 402. Este se podría fabricar a partir de plástico o aluminio por ejemplo. Un elemento central 100 se sitúa en el centro de la estructura de anillos concéntricos múltiples. Un sensor de orientación 406 y una unidad de procesamiento 408 también se fijan, o incorporan dentro del tablero 402. El sensor 406 podría ser, por ejemplo, un magnetómetro, giroscopio y/o acelerómetro o de hecho cualquier combinación de estos en cualquier número. Se pueden usar múltiples sensores los cuales se pueden distribuir a través de la estructura de la matriz.

El dispositivo también puede comprender una cámara (no se muestra). Esto se puede usar para ayudar a determinar la orientación (por ejemplo, con relación a una imagen conocida de su entorno). También puede permitir la visualización del entorno en un dispositivo remoto, por ejemplo, una tableta, una computadora portátil. Esto es muy conveniente para propósitos de videoconferencia y vigilancia. Además puede permitir el control remoto, por ejemplo, de la selección de la dirección del sonido el cual se va a aislar. Esto se puede usar para dirigir el haz de recepción como se conoce *en sí* y, junto con el sensor de orientación, para determinar qué algoritmo de procesamiento aplicar a las señales de los micrófonos (como se explica a continuación).

Algunas modalidades del dispositivo pueden requerir una comunicación de datos bidireccional, por lo tanto se puede proporcionar un receptor así como también el transmisor.

La unidad de procesamiento 408 puede llevar a cabo todo el procesamiento necesario de las señales de los micrófonos pero más típicamente controla la transmisión de datos desde estas señales a un dispositivo remoto que permite el almacenamiento y un procesamiento más potente.

En ciertas modalidades, la combinación de sensores y micrófonos permite la formación de haces mediante el uso de un solo grupo de micrófonos en la matriz a la vez, es decir, el grupo con la mejor orientación. Por ejemplo, algunas modalidades podrían usar combinaciones ponderadas de grupos de micrófonos, o micrófonos orientados “hacia atrás” para eliminar el ruido de fondo de los micrófonos orientados hacia adelante.

Para propósitos de imágenes acústicas, la posición del dispositivo se mide mediante el uso de una serie de sensores (que incluye el sensor de orientación 406) que permiten mapear todas las señales

de sonido en posiciones espaciales, las cuales se pueden entonces mostrar en una pantalla remota que permite la visualización. Esta técnica es particularmente ventajosa en la detección de drones.

Para propósitos de vigilancia, el dispositivo se podría realizar como un dispositivo compacto camuflado o disfrazado. Una conexión inalámbrica entre el dispositivo y un receptor/transmisor remoto permite al usuario señalar la dirección de interés o acceder a la visualización obtenida de la matriz. En las modalidades donde no se usan cámaras ni sensores, el usuario puede predeterminar y/o especificar la orientación de la matriz para permitir la adopción de la técnica de procesamiento correcta.

Durante el uso del dispositivo, las señales de los micrófonos 112, 114, 116, 118; 202, 204, 206, 208 se procesan mediante el uso de un algoritmo apropiado. El algoritmo se selecciona basado en la dirección de la cual proviene el sonido que se desea aislar. Como se mencionó previamente esto se podría establecer mediante el uso de cualquiera o una combinación de: una interfaz visual para seleccionar la dirección de una imagen mapeada de la escena; el(los) sensor(es) de orientación; o direcciones preprogramadas que representan las posiciones físicas de las fuentes de interés.

La selección del algoritmo se basa en la dirección en cuestión con relación al eje central de la matriz de micrófonos. Ésta es la línea que pasa a través del centro o centros comunes de los anillos 102, 104, 106, 108; 200 y normal a los planos de los anillos (o al plano del tablero 402). Si la dirección del sonido está dentro de un cono proyectado hacia adelante 60 grados centrado en el eje central de la matriz, se usa el procesamiento de radiación transversal. Si está fuera de este intervalo, se usa el procesamiento de radiación longitudinal.

Para el modo de procesamiento de radiación longitudinal el concepto del modo de fase excitada máxima se puede entender de la siguiente manera. Las señales recibidas en un conjunto de N micrófonos omnidireccionales separados uniformemente en un círculo de radio R en un campo de ondas que consiste en una sola onda plana (dada por $x(\vec{r}, t) = Ae^{-i(\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t)}$) se puede expresar, mediante el uso de la expansión de Jacobi-Anger de exponenciales complejas de funciones trigonométricas, como

$$\begin{aligned}
\mathbf{X} &= \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e^{ikR \sin \theta \cos(\varphi - \frac{2\pi}{N} \cdot 0)} \\ e^{ikR \sin \theta \cos(\varphi - \frac{2\pi}{N} \cdot 1)} \\ \vdots \\ e^{ikR \sin \theta \cos(\varphi - \frac{2\pi}{N} \cdot (N-1))} \end{bmatrix} e^{-i\omega t} \\
&= A \begin{bmatrix} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m(kR \sin \theta) e^{im(\varphi - \frac{2\pi}{N} \cdot 0)} \\ \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m(kR \sin \theta) e^{im(\varphi - \frac{2\pi}{N} \cdot 1)} \\ \vdots \\ \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m(kR \sin \theta) e^{im(\varphi - \frac{2\pi}{N} \cdot (N-1))} \end{bmatrix} e^{-i\omega t} \\
&\approx A \begin{bmatrix} \sum_{m=-M}^M i^m J_m(kR \sin \theta) e^{im(\varphi - \frac{2\pi}{N} \cdot 0)} \\ \sum_{m=-M}^M i^m J_m(kR \sin \theta) e^{im(\varphi - \frac{2\pi}{N} \cdot 1)} \\ \vdots \\ \sum_{m=-M}^M i^m J_m(kR \sin \theta) e^{im(\varphi - \frac{2\pi}{N} \cdot (N-1))} \end{bmatrix} e^{-i\omega t},
\end{aligned}$$

Donde J_m es el de orden m de la función de Bessel del primer tipo, y $k = \omega/c$ es el número de onda del campo de ondas con frecuencia ω y velocidad de propagación c . El vector de onda viene dado por $\vec{k} = -k(\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$, con el signo menos introducido para posterior conveniencia. N es el número de micrófonos en la matriz. El orden de funciones de Bessel M en el que se trunca la expansión de Jacobi-Anger se conoce como el orden máximo del modo de fase excitada en el contexto de la teoría de matriz circular.

El procesamiento de la matriz (tanto en los modos de procesamiento de radiación transversal como radiación longitudinal) se realiza de tal manera que se aplica una Transformada Rápida de Fourier

$$\mathbf{Y}(\omega) = \mathbf{W}(\omega)^H \mathbf{X}(\omega). \quad (1)$$

(FFT) a los datos de todos los micrófonos de la matriz. Los haces correspondientes al modo operativo de radiación transversal se procesan de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 7, mientras que los haces de radiación longitudinal se procesan como en la Figura 8. En ambos casos la formación de haces en el dominio de frecuencia se ejecuta de acuerdo con:

- 5 Donde $W(\omega)$ es el vector de ponderación correspondiente a la frecuencia ω , $X(\omega)$ es el vector en el dominio de frecuencia correspondiente a la frecuencia ω y $Y(\omega)$ es el dominio de frecuencia ponderado correspondiente a ω . Este proceso se realiza una vez por dirección, correspondiente a un haz. La expresión anterior se proporciona para casos de banda estrecha. Se puede generalizar para cualquier ancho de banda repitiendo los procesos para cada intervalo de frecuencia y sumando las
- 10 contribuciones. Si la señal en el dominio del tiempo es la salida preferible, se aplica la transformada de Fourier inversa.

- Para los haces de radiación transversal, las ponderaciones $\mathbf{W}$ se aplican al vector de datos de frecuencia $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_N]^T$ de dimensión $N \times 1$. El vector de ponderación $\mathbf{W}(\omega) = [w_1(\omega), w_2(\omega), \dots, w_N(\omega)]^T$ también es $N \times 1$, donde el índice n denota un micrófono en particular,
- 15 w_n se aplica la ponderación al micrófono n , y $X_n(\omega)$ son los datos del dominio de frecuencia del micrófono n . El vector de ponderación se puede cambiar de acuerdo con la aplicación y la respuesta deseada de la matriz. En una modalidad preferible $W(\omega)$ se estimará mediante el uso de la optimización de ponderación de mínimos cuadrados. Las limitaciones para la optimización dependerán de la respuesta deseada, y se eligen por ejemplo para producir una respuesta
- 20 superdireccional, nivel mínimo de lóbulos laterales, o directividad constante. Lo que se puede lograr a través de la optimización se decide mediante la geometría de la matriz. Por ejemplo, la superdirectividad a una frecuencia ω solo es posible si los anillos de la matriz y los micrófonos en los anillos se separan a menos de media longitud de onda. La salida Y es un valor escalar de dimensión 1×1 .

En el modo de operación de radiación longitudinal, se usa el procesamiento en modo de fase, como se muestra en la Figura 8 para un solo anillo de N elementos. Después de la transformada de Fourier que trae la señal de cada micrófono al dominio de frecuencia, las señales de cada micrófono se transforman al dominio del modo de fase a través de una transformada de Fourier discreta espacial

5 de acuerdo con la ecuación

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{X}} &= \begin{bmatrix} \tilde{X}_{-M}(\omega) \\ \tilde{X}_{-M+1}(\omega) \\ \vdots \\ \tilde{X}_M(\omega) \end{bmatrix} = \mathbf{D}\mathbf{X} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} e^{i\frac{2\pi}{N}\cdot(-M)\cdot 1} & e^{i\frac{2\pi}{N}\cdot(-M)\cdot 2} & \dots & e^{i\frac{2\pi}{N}\cdot(-M)\cdot N} \\ e^{i\frac{2\pi}{N}\cdot(-M+1)\cdot 1} & e^{i\frac{2\pi}{N}\cdot(-M+1)\cdot 2} & \dots & e^{i\frac{2\pi}{N}\cdot(-M+1)\cdot N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{i\frac{2\pi}{N}\cdot M\cdot 1} & e^{i\frac{2\pi}{N}\cdot M\cdot 2} & \dots & e^{i\frac{2\pi}{N}\cdot M\cdot N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \\ \vdots \\ X_N(\omega) \end{bmatrix},\end{aligned}$$

donde $\tilde{\mathbf{X}}$ denota las señales del dominio de fase. Las señales del modo de fase individual entonces se ponderan y se suman para producir una señal de salida $\tilde{\mathbf{Y}}$, análogamente a la Ecuación. (1): $\tilde{\mathbf{Y}} = \tilde{\mathbf{W}}^H \tilde{\mathbf{X}}$. Este esquema de procesamiento se muestra en la Figura 8. Las ponderaciones del modo de fase usadas son de la forma estándar invariante en frecuencia, dada por

$$\tilde{\mathbf{W}} = [\tilde{w}_{-M}(\omega), \tilde{w}_{-M+1}(\omega), \dots, \tilde{w}_M(\omega)]^T$$

$$\tilde{w}_m(\omega) = \frac{h_m}{\sqrt{N}J_m(kR \sin \theta')e^{im\phi'}}, \quad (2)$$

cuando la matriz se dirige en la dirección (θ', ϕ') . Las ponderaciones del modo de fase auxiliar h_m se pueden usar para dar forma al diagrama de haz. Cuando se usan anillos múltiples, las señales de cada micrófono se transforman en el dominio del modo de fase en cada anillo de forma individual.

25 Las señales resultantes entonces se ponderan y se suman en ambos modos de anillo y fase:

$$\mathbf{Y} = \sum_{m=-M}^M \sum_{p=0}^P \tilde{w}_{m,p} \tilde{X}_{m,p},$$

30 donde las ponderaciones del modo de fase son dadas por

$$\tilde{w}_{m,p} = \frac{h_m v_{m,p}}{\sqrt{N_p}J_m(kR_p \sin \theta')e^{im\phi'}}, \quad (3)$$

$$v_{m,p} = \begin{cases} \frac{N_p |J_m(kR_p)|^2}{\sum_{q=0}^{P_m} N_q |J_m(kR_q)|^2} & \text{if } 1 \leq p \leq P_m, \end{cases} \quad (4)$$

P_m denota el índice del anillo más grande (equivalente al número de anillos) incluido en el muestreo de un modo de fase dado m a una frecuencia dada y viene dada por

$$P_m = |\{R_q | 1 \leq q \leq P, kR_q < m + 1\}|.$$

Se ha encontrado que esta forma particular de las ponderaciones produce WNG casi óptima para un conjunto dado de radios (totalmente óptimo cuando $P_m = P \forall m$), mientras que al mismo tiempo es flexible en términos de permitir un amplio intervalo de radios sin violar los supuestos que subyacen al procesamiento en modo de fase. La WNG que usa este esquema de procesamiento viene dada por

$$\text{WNG} = \left[\sum_{m=-M}^M \frac{h_m}{\sum_{p=0}^{P_m} N_p |J_m(kR_p)|^2} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Los radios de los anillos se derivan de maximizar la WNG, con las limitaciones de M , el número de estructuras de soporte de anillo discretas, P , y el número de micrófonos en cada estructura de soporte de anillo discreta, N_p .

Por lo tanto se puede optimizar el número de micrófonos en cada anillo, la abertura límite y el radio de cada anillo discreto.

Para señales de banda ancha, por ejemplo, el habla, la entrada de la matriz se descompone a través de la FFT y cada componente del intervalo de frecuencia se procesa como una señal de banda estrecha como se describió anteriormente. Cuando se diseña una matriz para la adquisición de frecuencias de banda ancha es conveniente ponderar la WNG a diferentes frecuencias entre sí. La optimización de una WNG promedio ponderada sobre las bandas de frecuencia de interés puede resultar en una matriz con WNG particularmente baja a bajas frecuencias. Por lo tanto en este ejemplo se usa una WNG promedio logarítmica ponderada, tal como lo indica:

$$\text{WNG} = \sum_{i=1}^I g(f_i) \log \left[\sum_{m=-M}^M \frac{h_m}{\sum_{p=0}^{P_{i,m}} N_p |J_m(k_i R_p)|^2} \right]^{-1}. \quad (6)$$

5 donde $g(f)$ representa una función de ponderación de frecuencia, por ejemplo, para la adquisición del habla las bandas de frecuencia se ponderan por su importancia relativa para la inteligibilidad, como lo indica el índice de inteligibilidad del habla (SII). El uso de la ponderación SII como criterio produce la frecuencia superior $f_I = 8$ kHz.

Uno de los parámetros principales del diseño de la matriz es el radio del anillo más grande R_p . Desde
10 una perspectiva de procesamiento de señales, es conveniente una abertura lo más grande posible, por lo tanto el radio más grande se limita por consideraciones prácticas del tamaño físico de la matriz de micrófonos y la estructura de soporte. Por ejemplo dejar que las restricciones físicas determinen que $R_p = 0.20$ m. El radio más pequeño distinto de cero se restringe por $R_1 < \frac{c}{\pi f_{\max}} = 2.7$ cm para garantizar que se pueda muestrear al menos un modo de fase sin solapamiento modal para la
15 frecuencia más alta para la cual se ha diseñado la matriz $f_{\max}$, donde la velocidad del sonido se denota por c . El orden máximo del modo de fase excitada, M , es un parámetro que se puede variar en el procesamiento, pero dado que los radios de los anillos se determinan maximizando la Ecuación. (6), un valor particular M_d se elige para el cual se optimiza el diseño.

El número de anillos, P , se determina indirectamente por el procedimiento de optimización, aunque
20 se puede establecer un límite superior basado en el número deseado de elementos en la matriz, y el orden del modo de fase de diseño, M_d . Por ejemplo, $M_d = 7$ el número requerido de elementos por anillo es 15, y con un límite de 256 elementos en total (debido a restricciones de procesamiento, por ejemplo) esto produce un máximo de 17 anillos. Una matriz optimizada de acuerdo con la Ecuación. (6) tiende a tener menos anillos y más elementos en el anillo más grande.

25 Los efectos de variar M en el procesamiento se demuestran en la Figura 5. La directividad (DI) y la WNG se grafican como una función de la excitación del modo de fase para una estructura de soporte de anillo múltiple, diseñada para $M_d=P= 7$, que usa la optimización discutida previamente. La excitación de la matriz con modos de fase de orden superior muestra un incremento constante en la DI y una disminución de manera desigual de la WNG. Para muestrear un modo de fase M dado con
30 solapamiento modal insignificante en una matriz de anillo dada se requieren al menos $2M+1$

elementos. Por lo tanto es útil diseñar la matriz para el orden de fase más alto que se usará en el procesamiento.

Se puede entonces usar un orden de fase máximo más bajo en el procesamiento para impulsar la WNG a expensas de la DI. Sin embargo, las restricciones prácticas sobre la separación mínima entre
5 elementos pueden dificultar la toma de muestras de los modos de fase más altos desde las matrices de anillos más interiores.

En una modalidad específica donde $R_p = 0.10$ cm, $N = 128$ y $M_d = 5$ la distancia mínima del elemento es de 7.5 mm lo que da un límite superior de $P=11$ anillos. Maximizar la Ecuación 6 que usa la ponderación de frecuencia SII produce una matriz como se ve en la Figura 9. Esta optimización en
10 particular produce una matriz donde los tres anillos con los radios más grandes tienen todos diámetros iguales a la abertura máxima, por lo tanto P es efectivamente igual a 5 debido a la fusión de estos anillos. Además, para compensar la WNG pobre a bajas frecuencias, se agregan elementos adicionales al anillo más exterior, lo que eleva el número total de elementos a 128. Esta matriz tiene un elemento central singular, 11 elementos en los anillos del 1 al 4 y 83 elementos en el anillo 5.

15 Las Figuras 6a y 6b ilustran el patrón de potencia a través de un intervalo completo de ángulos de acimut y elevación respectivamente para una matriz de anillos concéntricos que tienen los parámetros mencionados anteriormente y dirigidos a $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, y para una selección de frecuencias centrales de la banda SII.

Las diferentes frecuencias se representan en diferentes estilos de línea. El estrechamiento del haz
20 incrementa la directividad y por lo tanto la resolución espacial de la matriz.

La Figura 9 muestra el diseño de la disposición de anillos y elementos para una matriz optimizada de acuerdo con la invención con una abertura máxima de 10 cm. El orden máximo del modo de fase excitada para el cual se optimiza el diseño es $M_d = 5$. La matriz incluye un elemento central singular 902, y cinco anillos 904, 906, 908, 910, 912. El radio del anillo más interior 904 es de 1.4 cm, el
25 segundo anillo 906 es de 3.2 cm, el tercer anillo 908 es de 5.2 cm, el cuarto anillo 910 es de 6.5 cm y el anillo más exterior 912 es de 10 cm. El número total de elementos en la matriz es 128.

La Figura 10 demuestra el patrón de potencia producido que usa el procesamiento de radiación transversal con la matriz que se muestra en la Figura 9.

Las Figuras 11 y 12 ilustran los patrones de potencia a través de un intervalo completo de ángulos
30 de acimut y elevación respectivamente para una matriz como se describe en la Figura 9. El patrón de potencia asociado con diferentes frecuencias se muestra en diferentes estilos de línea.

En la Figura 11 el estilo de línea corresponde a una frecuencia específica procesada con el formador de haz convencional. La línea negra sólida representa la ponderación invariante en frecuencia lo cual da como resultado patrones de potencia idénticos para todas las frecuencias.

5 En la Figura 12 cada estilo de línea corresponde a una frecuencia específica procesada con el algoritmo de modo de fase óptimo (estilos de línea más gruesa) y el formador de haz convencional (estilos de línea más delgada).

La Figura 13 muestra el diseño de la disposición de anillos y elementos para una matriz optimizada de acuerdo con la invención con una abertura máxima de 20 cm. El orden máximo del modo de fase excitada para el cual se optimiza el diseño es $M_d = 7$. La matriz incluye un elemento central singular
10 1302, y nueve anillos 1304, 1306, 1308, 1310, 1312, 1314, 1316, 1318, 1320. El radio del anillo más interior 1304 es de 1.4 cm, el segundo anillo 1306 es de 3.2 cm, el tercer anillo 1308 es de 5.2 cm, el cuarto anillo 1310 es de 6.4 cm, el quinto anillo 1312 es de 8.1 cm, el sexto anillo 1314 es de 10.3 cm, el séptimo anillo 1316 es de 12.9 cm, el octavo anillo 1318 es de 16.1 cm y el anillo más exterior 1320 es de 20 cm. El número total de elementos en la matriz es 256.

15 La Figura 14 demuestra el patrón de potencia producido mediante el uso del procesamiento de radiación transversal con la matriz que se muestra en la Figura 13.

Las Figuras 15 y 16 ilustran los patrones de potencia a través de un intervalo completo de ángulos de acimut y elevación respectivamente para una matriz como se describe en la Figura 13. El patrón de potencia asociado con diferentes frecuencias se muestra en diferentes estilos de línea.

20 En la Figura 15 cada color corresponde a una frecuencia específica procesada con el formador de haz convencional (estilos de línea discontinua). La línea negra sólida representa la ponderación invariante en frecuencia lo cual da como resultado patrones de potencia idénticos para todas las frecuencias.

En la Figura 16 cada estilo de línea corresponde a una frecuencia específica procesada con el
25 algoritmo de modo de fase óptimo (estilos de línea más gruesa) y el formador de haz convencional (estilos de línea más delgada).

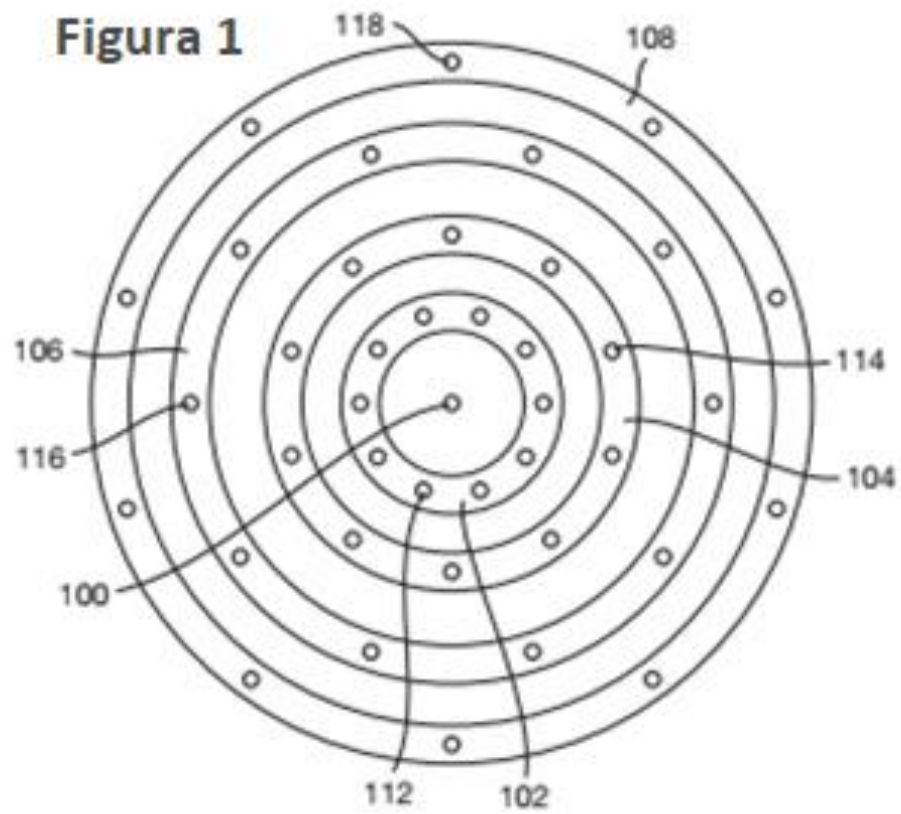
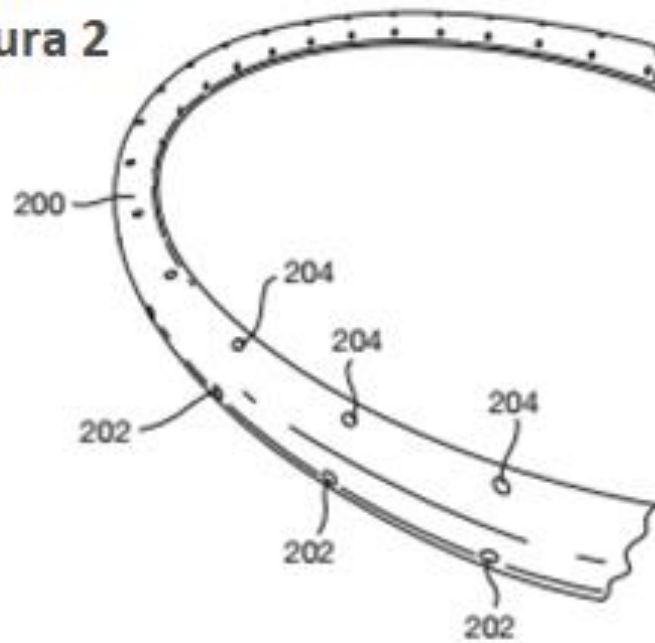
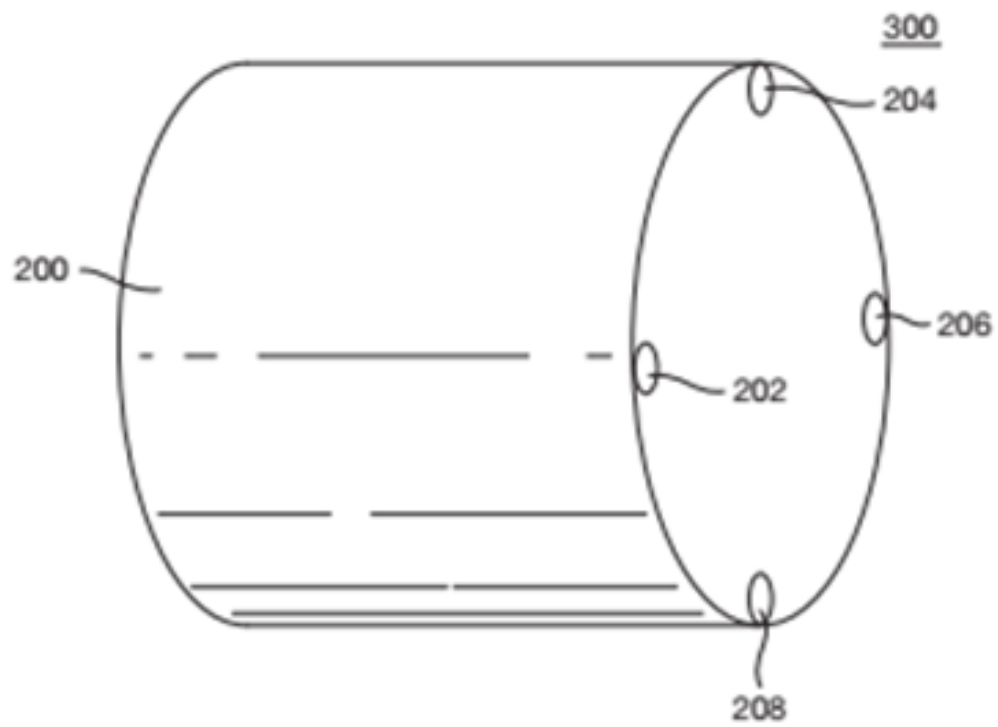
Figura 1**Figura 2**

Figura 3

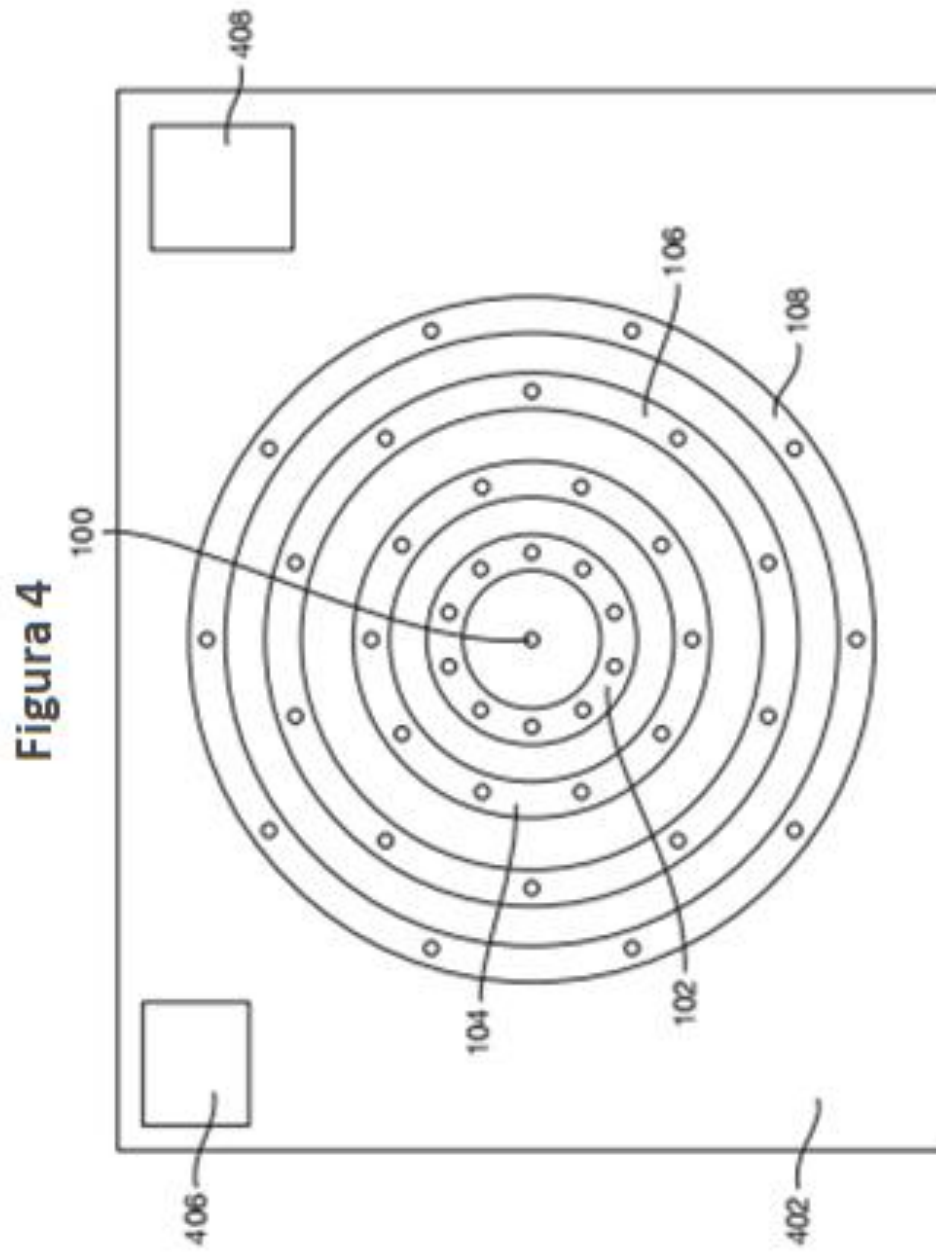


Figura 5

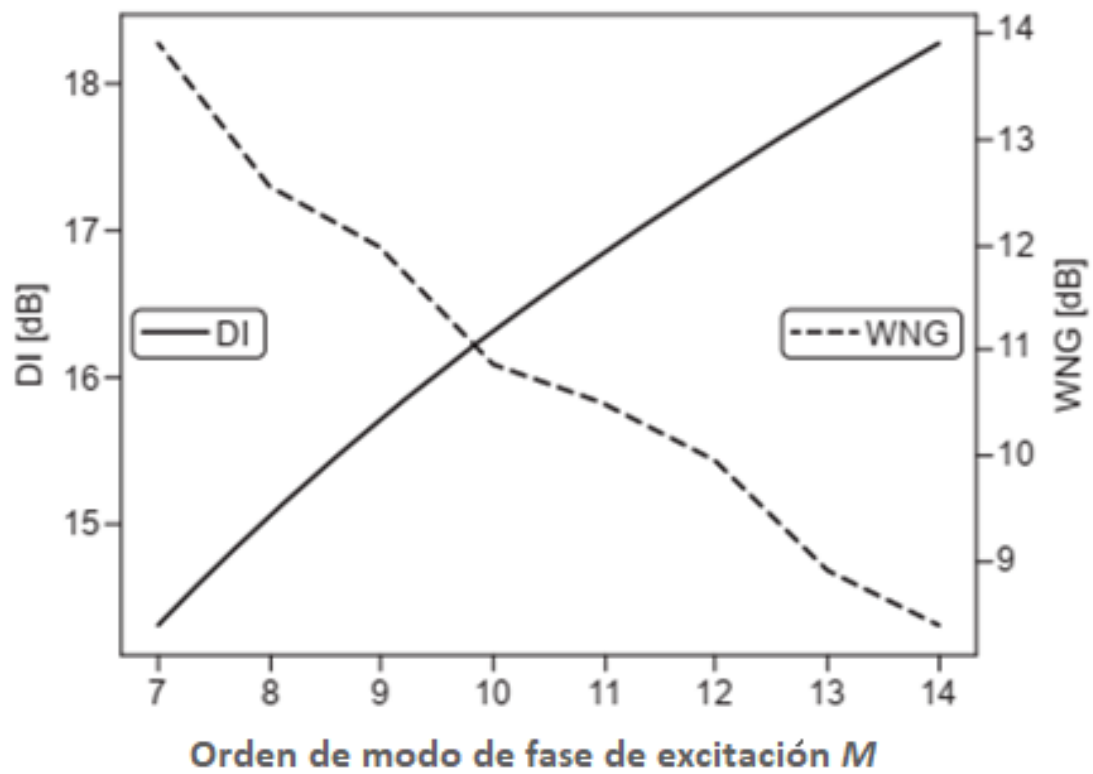


Figura 6a

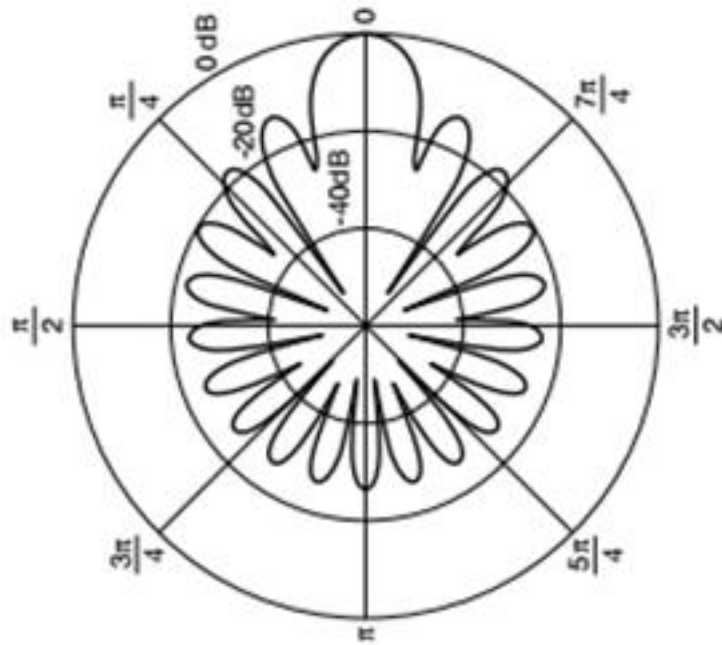


Figura 6b

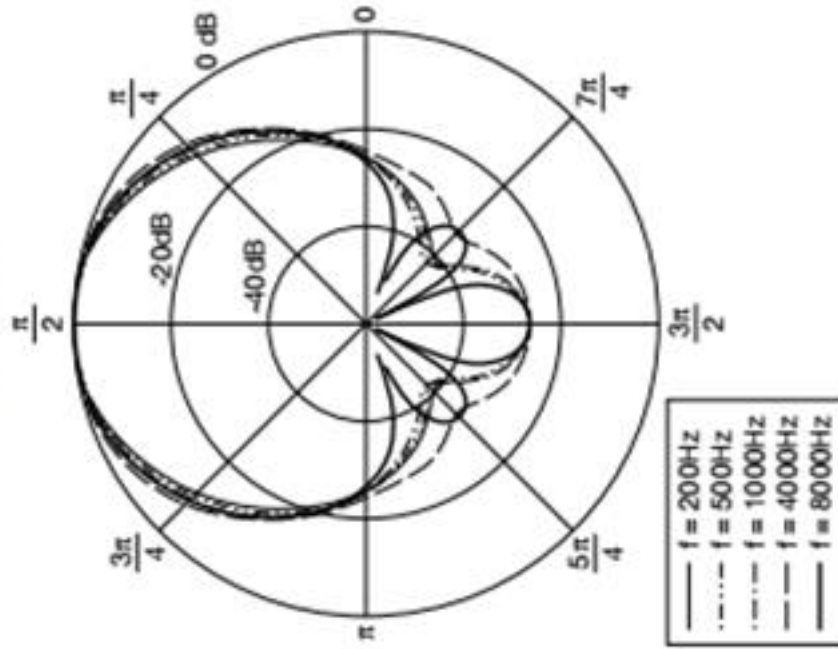


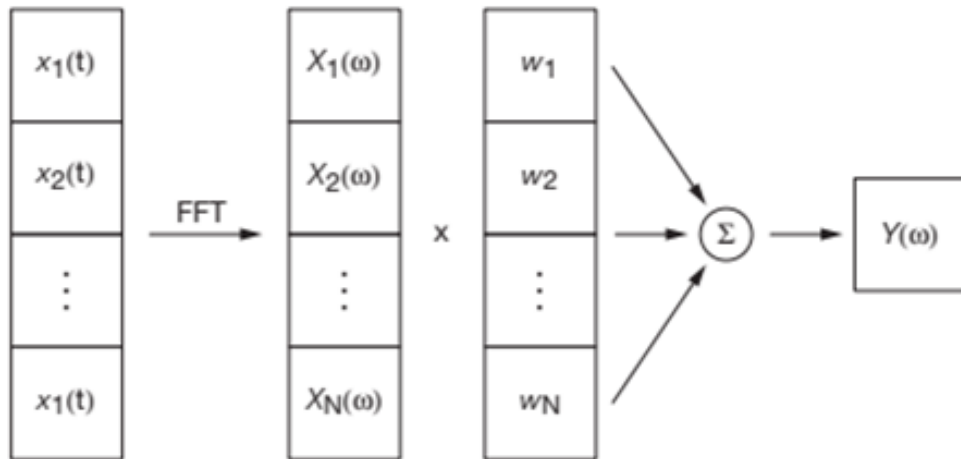
Figura 7**Retardo y suma de banda estrecha**

Figura 8
Formación de haces en el dominio de fase

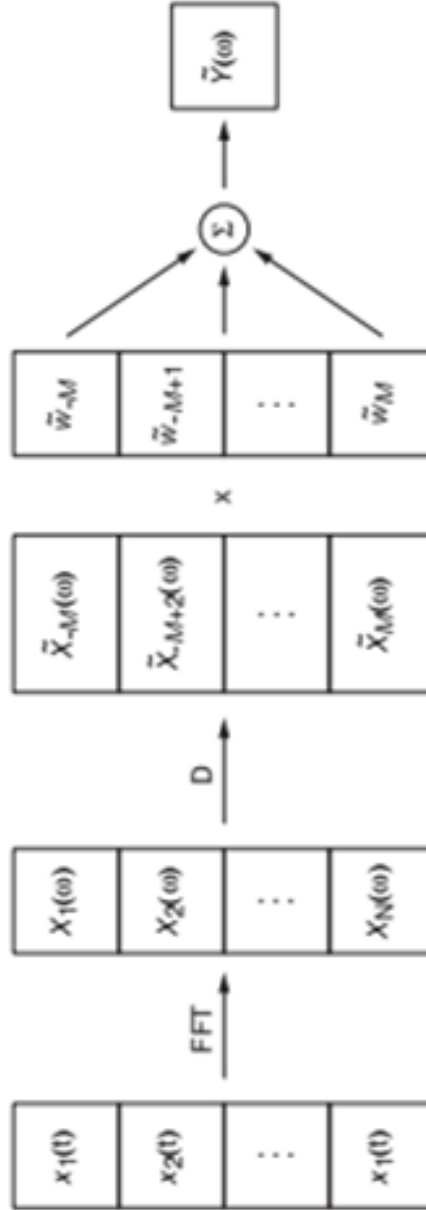


Figura 9

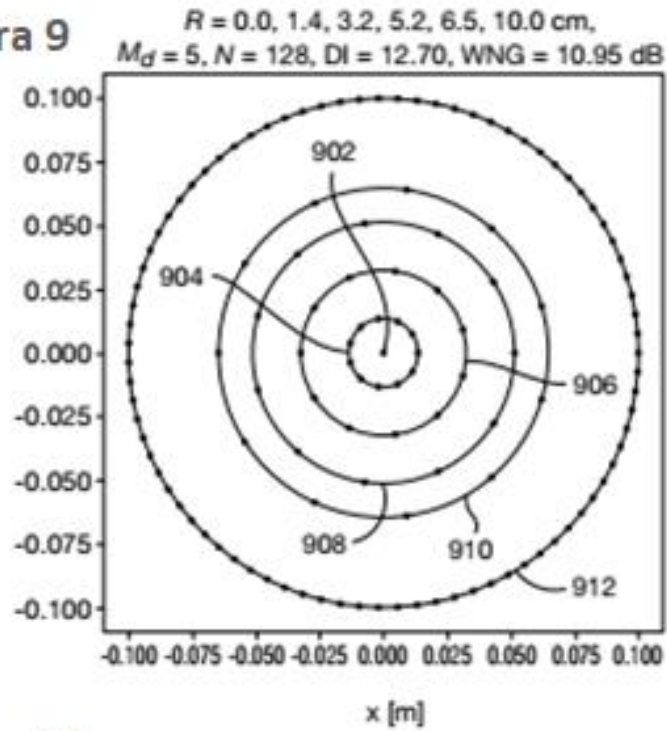


Figura 10

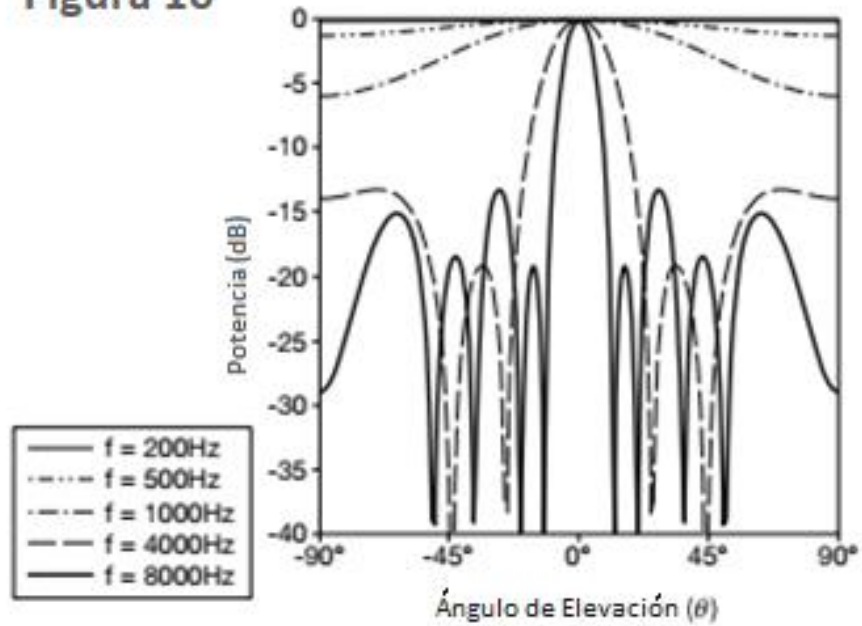
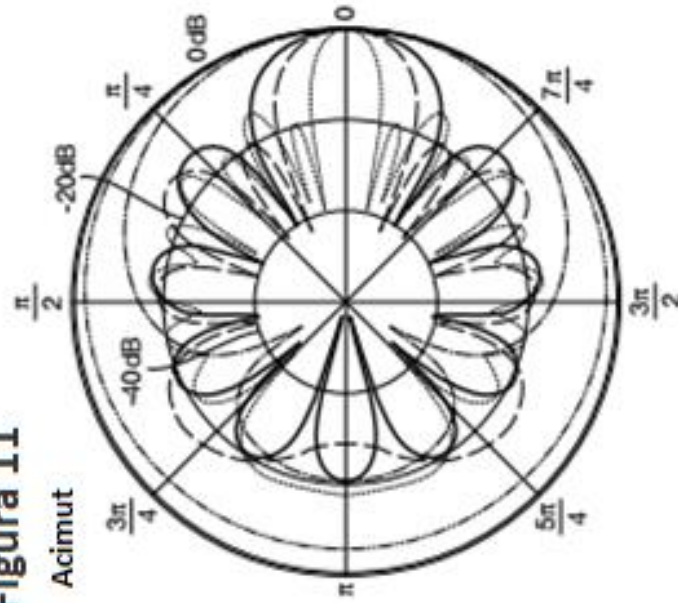


Figura 11

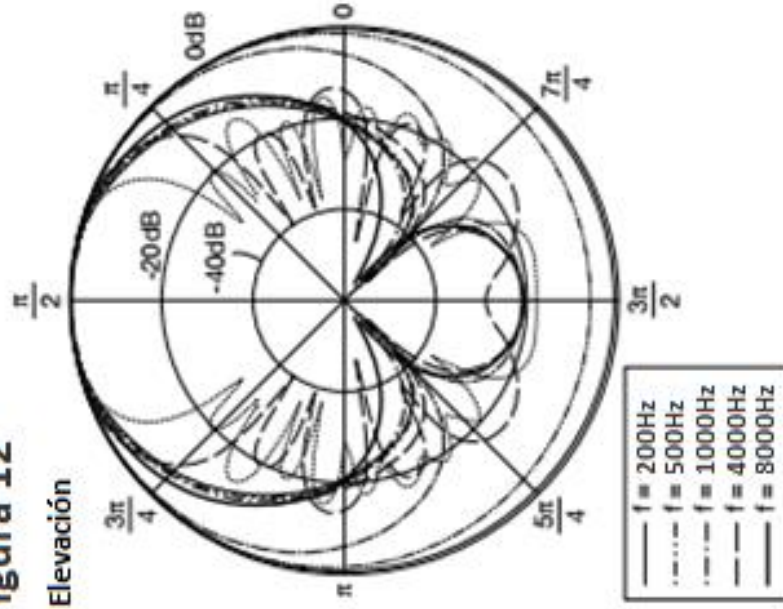
Acimut



- Ponderación FI. todas las frecuencias
- - - f = 200Hz
- . . . f = 500Hz
- . - f = 1000Hz
- - - f = 4000Hz
- - - f = 8000Hz

Figura 12

Elevación



- f = 200Hz
- - - f = 500Hz
- . . . f = 1000Hz
- - - f = 4000Hz
- - - f = 8000Hz

Figura 13 $R = 0.0, 1.4, 3.2, 5.2, 6.4, 8.1, 10.3, 12.9, 16.1, 20.0\text{cm},$
 $M_d = 7, N = 256, \text{DI} = 14.33, \text{WNG} = 13.90\text{dB}$

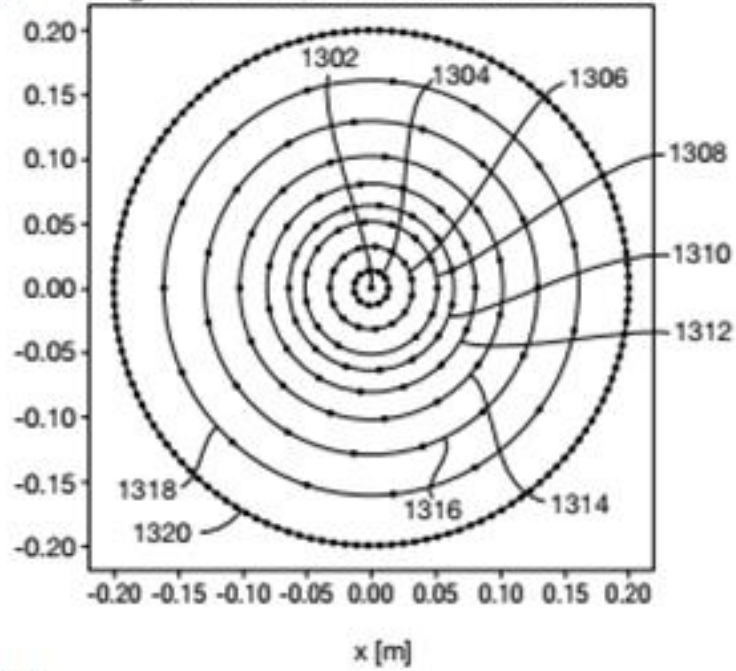


Figura 14

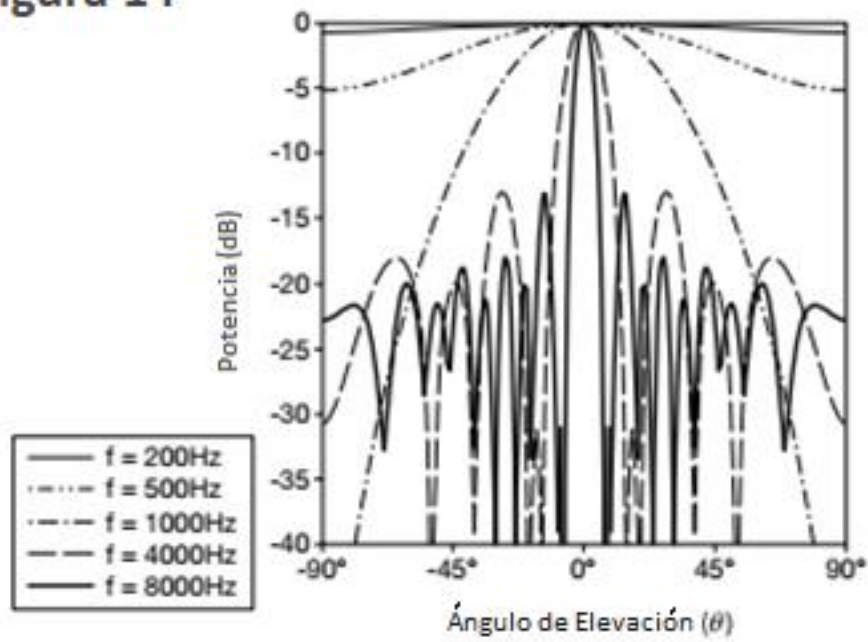


Figura 15

Acimut

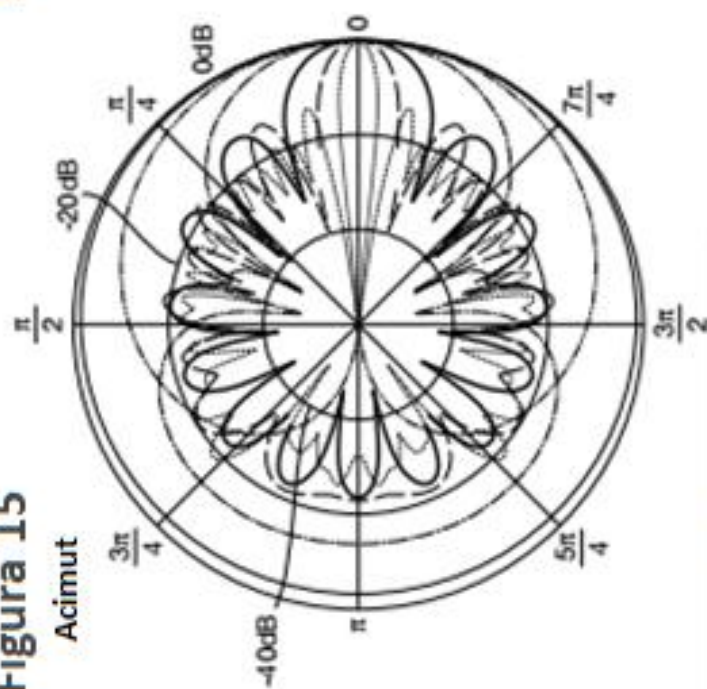


Figura 16

Elevación

