

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 923 897**

51 Int. Cl.:

<b>H01Q 3/02</b>	(2006.01) <b>H01Q 21/08</b>	(2006.01)
<b>H01Q 3/16</b>	(2006.01) <b>H01Q 15/00</b>	(2006.01)
<b>H01Q 15/14</b>	(2006.01)	
<b>H01Q 21/00</b>	(2006.01)	
<b>H01Q 21/28</b>	(2006.01)	
<b>H01Q 25/00</b>	(2006.01)	
<b>H01Q 5/45</b>	(2015.01)	
<b>H01Q 3/26</b>	(2006.01)	
<b>H01Q 3/04</b>	(2006.01)	
<b>H01Q 19/17</b>	(2006.01)	

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.04.2016 PCT/US2016/026697**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **13.10.2016 WO16164758**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.04.2016 E 16777378 (7)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.04.2022 EP 3281250**

54 Título: **Antena de matriz en fase 1D para radar y comunicaciones**

30 Prioridad:

**08.04.2015 US 201562144473 P**  
**28.05.2015 US 201562167641 P**  
**09.07.2015 US 201562190378 P**  
**12.10.2015 US 201562239993 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**03.10.2022**

73 Titular/es:

**SRI INTERNATIONAL (100.0%)**  
**333 Ravenswood Avenue**  
**Menlo Park, CA 94025, US**

72 Inventor/es:

**NICOLLS, MICHAEL, J.;**  
**PETERSON, RYAN, C.;**  
**CEPERLEY, DANIEL, P.;**  
**KLOFAS, BRYAN;**  
**WATTERS, DAVID;**  
**GREFFEN, MICHAEL;**  
**DURAK, THOMAS;**  
**MALONE, MOYRA y**  
**BUONOCORE, JOHN, J.**

74 Agente/Representante:

**SÁNCHEZ SILVA, Jesús Eladio**

ES 2 923 897 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

Antena de matriz en fase 1D para radar y comunicaciones

5 Solicitudes relacionadas

Antecedentes

10 Hay varias aplicaciones en las que serían deseables antenas de bajo coste, gran apertura, orientables y/o multihaz. Estas aplicaciones incluyen la detección de objetos espaciales residentes (RSO) con radar activo, sistemas de matriz en fase de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), comunicación simultánea entre estaciones terrestres y muchos satélites, recepción pasiva de transmisiones de múltiples satélites. Actualmente, gran parte de la tecnología para abordar estas necesidades puede incluir matrices 2D, que a menudo son prohibitivamente costosas debido a la gran cantidad de elementos necesarios para llenar la apertura. El documento EP 2637253 A1 describe un dispositivo universal para la concentración de energía, que contiene un reflector y una fuente de emisión o receptor, el reflector tiene la forma de al menos parte de una superficie de un sólido de revolución, y la fuente de emisión o receptor tiene la forma de un sistema distribuido de elementos activos o pasivos según corresponda, colocados a igual distancia del reflector, que constituye 0,3 - 0,5 del radio de curvatura del mismo. Además, el reflector puede tener la forma de una superficie cilíndrica o un segmento de la misma, o la forma de una superficie esférica o un segmento truncado de la misma, o la sección transversal del reflector puede tener la forma de un arco circular en un primer plano y curvas de segundo grado en planos perpendiculares a dicho primer plano, o una sección desplazada de una esfera o una parábola se puede utilizar en un plano vertical. Además, la superficie del reflector puede tener la forma de un sólido de revolución que, en sección transversal, comprende dos elipses unidas de manera que un foco de cada una de las elipses coincida con el eje del sólido de revolución, en el que el sistema distribuido de elementos activos o pasivos está montado en el otro foco de la elipse. El documento WO 02/31915 A2 describe una primera matriz de antenas en fase 2D que genera un primer campo de visión y un segundo campo de visión. Los motores primero y segundo están acoplados a la matriz de antenas en fase 2D para rotar los campos de visión primero y segundo alrededor de los ejes primero y segundo, respectivamente, para rastrear simultáneamente los vehículos espaciales primero y segundo. Un tercer motor hace girar la matriz de antenas en fase 2D alrededor de un tercer eje para igualar la magnitud recibida de las señales primera y segunda (VC1, VC2) que se propagan dentro del primer y segundo campos de visión. Y. Rahmat-Samii y otros: "Advanced precipitation Radar antenna: array-fed offset membrane cylindrical reflector antenna", IEEE TRANS. ANTENNAS PROPAG., vol. 53, núm. 8, págs. 2503-2515, 1 de agosto de 2005 describe un modelo prototipo de tamaño medio de una antena de barrido de banda ancha, de doble frecuencia y liviana para la próxima generación de radar de precipitación espacial satelital. Opera canales de radar tanto en 13,6 como en 35 GHz para mejorar la precisión de la recuperación de precipitaciones. La antena para el radar espacial de precipitación por satélite propuesto es un reflector cilíndrico parabólico desplazado alimentado por una matriz 2D, es decir, dos matrices lineales. Se adopta este diseño, en lugar de un reflector de desplazamiento de doble curvatura, porque proporciona el amplio ángulo de exploración requerido en el plano transversal desde el espacio en las frecuencias operativas de las bandas Ku y Ka. El documento US 6169522 B 1 describe un dispositivo de detección de energía reflejada que incluye un transmisor para transmitir una señal electromagnética y un receptor para recibir una señal electromagnética reflejada. Una antena puede estar conectada operativamente con el transmisor y el receptor para radiar la señal electromagnética y capturar la señal electromagnética reflejada y la antena puede ser móvil. Puede proporcionarse un controlador principal para controlar el funcionamiento del transmisor y el receptor y el movimiento de la antena y el dispositivo de detección de energía reflejada puede incluir además al menos una plataforma. La al menos una plataforma puede admitir un reflector remoto que está dimensionado y configurado para redirigir la señal electromagnética transmitida en una dirección deseada y un controlador de plataforma que está configurado para comunicarse con el controlador principal y mantener la alineación entre el reflector remoto y la antena. El documento US 2014/225796 A1 describe un sistema de antena dicroica Cassegrain desplazada multicanal de ancho de banda ultra ancho que sirve para la transmisión de señales bidireccionales entre un sistema basado en tierra y al menos un satélite. Al seleccionar correctamente la banda de frecuencia alta y baja, se proporcionan anchos de banda ultra amplios para señales de banda de frecuencia alta y baja. Los anchos de banda son alrededor del 15 %, incluso hasta el 50 %, de la frecuencia portadora. Especialmente, los anchos de banda para las señales de banda de frecuencia alta son mucho más amplios que los de las señales de banda de frecuencia baja. La banda de frecuencia baja puede ser de 10,7 hasta 12,75 GHz, mientras que la banda de frecuencia alta puede ser de 17 hasta 30 GHz. Además, para lograr un ancho de banda ultra amplio, una superficie de un subplato dicroico se divide en una pluralidad de áreas unitarias. Las disposiciones del elemento dicroico de metal de un área unitaria de son ligeramente diferentes de otra área unitaria f, mientras que los elementos metálicos en la misma área unitaria son idénticos. HERD J Y OTROS: "Advanced architecture for a low cost Multifunction Phased Array Radar", IEEE MTT-S INTERN. MICROW. SYMP. DIG., 23 de mayo de 2010, páginas 676-679, ISBN: 978-1-4244-6056-4, describe la tecnología de Radar de matriz en fase de múltiples funciones (MPAR) para el control del tráfico aéreo de próxima generación y los servicios de vigilancia meteorológica nacional utilizando matrices 2D.

65 Para aplicaciones de radar, no existe una solución de bajo costo que permita la detección de pequeños RSO, definidos como aquellos objetos que tienen diámetros en el intervalo de 1-2 cm. La detección de SO con alta precisión es deseable para la prevención de colisiones de satélites, el seguimiento de satélites, el soporte de lanzamiento de satélites, el soporte de anomalías de satélites y las operaciones generales de misiones de satélites. Cuando se

pronostica una colisión, los operadores de tierra pueden maniobrar el satélite para evitar la colisión. Esto prolonga la vida útil del satélite y mitiga el riesgo de eventos que generan desechos que pueden provocar futuras colisiones. Con los sistemas comúnmente disponibles en la actualidad, la detección y el seguimiento de rutina de objetos se limita a 10 cm o más. Los objetos de menos de 10 cm pueden pasar desapercibidos, pero aun así pueden representar un riesgo significativo para los satélites. El despliegue futuro anticipado de grandes constelaciones de satélites requiere el seguimiento de objetos de menor tamaño para evitar un problema de desechos en cascada. El número de objetos de desechos en el espacio aumenta exponencialmente con la disminución del tamaño. Existe la necesidad de detección de objetos de 2 cm o más grandes con un sistema rentable.

Para las aplicaciones de comunicaciones, el despliegue planificado de grandes constelaciones de órbita terrestre baja (LEO) que consisten en cientos a miles de satélites requiere comunicaciones de gran ancho de banda para permitir la transferencia de datos con muchos satélites simultáneamente. Estas constelaciones pueden consistir en cientos de satélites por plano orbital, de los cuales decenas de satélites podrían estar a la vista de una estación terrestre al mismo tiempo. Las soluciones tradicionales se enfocan en una gran cantidad de platos orientables para comunicaciones, lo cual tiene un costo prohibitivo e ineficiente. Existe la necesidad de una solución de matriz en fase de bajo costo que pueda comunicarse con decenas de satélites simultáneamente.

#### Resumen

En un primer aspecto, se proporciona un sistema de antena de matriz en fase que incluye al menos un reflector de canal, cada reflector de canal que tiene al menos una matriz en fase unidimensional (1D) ubicada en un punto de alimentación del reflector, la matriz en fase 1D comprende una matriz de elementos ubicados a lo largo de un eje largo del reflector con una separación igual a la mitad de una longitud de onda de transmisión central, un formador de haces multicanal conectado a al menos una porción de la matriz de elementos para producir un haz sumado, un digitalizador conectado al formador de haces, en el que el digitalizador digitaliza el haz sumado, donde el sistema de antenas de matriz en fase está configurado para generar haces simultáneos en diferentes direcciones controlando al menos una porción de la matriz de elementos. En un segundo aspecto, se proporciona un método de seguimiento usando el sistema del primer aspecto, donde el seguimiento incluye al menos uno de seguimiento de naves espaciales, seguimiento de satélites y seguimiento de desechos espaciales.

#### Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 muestra una realización de un sistema de antena de matriz en fase 1D con un sistema de matriz en fase 1D y un reflector de canal.

La Figura 2 muestra una realización de una sección de una matriz en fase 1D.

La Figura 3 muestra una realización de un elemento de una matriz en fase 1D.

Las Figuras 4 y 5 muestran una ilustración de un patrón de directividad de campo lejano de una matriz en fase 1D de exploración.

La Figura 6 muestra una ilustración de un campo de visión de imágenes

La Figura 7 muestra una realización de dos sistemas de antenas de matriz en fase 1D que apuntan en diferentes direcciones.

La Figura 8 muestra una realización de una proyección del campo de visión de imágenes en el cielo.

La Figura 9 muestra una realización de una configuración de tres sistemas de antenas de matriz en fase 1D.

La Figura 10 muestra una realización de una proyección del campo de visión de imágenes en el cielo.

La Figura 11 muestra un campo de visión de imágenes.

La Figura 12 ilustra la ganancia en función de la longitud y el diámetro del canal para una matriz en fase 1-D a 446 MHz.

La Figura 13 ilustra una realización de un reflector de canal y un sistema de matriz en fase 1D.

La Figura 14 ilustra una realización de una arquitectura formadora de haces digital.

La Figura 15 muestra una realización de una arquitectura formadora de haces analógica.

La Figura 16 muestra una realización de una arquitectura formadora de haces híbrida.

La Figura 17 muestra una realización del uso de una señal de transmisión para la decodificación.

Las Figuras 18 y 19 muestran realizaciones de reflectores desplazados.

La Figura 20 muestra múltiples haces.

La Figura 21 muestra una realización de un sistema de doble banda con desplazamiento horizontal.

La Figura 22 muestra una realización de un sistema de doble banda con desplazamiento vertical.

#### Descripción detallada de las realizaciones

Para abordar las necesidades de las aplicaciones de radar descritas anteriormente, el enfoque que se describe a continuación consiste en una antena de matriz en fase 1D de bajo costo que ilumina activamente los desechos y los satélites para la detección y medición del rango, Doppler y ángulo. Una matriz 1D de elementos está dispuesta en el punto de alimentación de un reflector alargado, tal como un canal parabólico. Este reflector concentra la potencia en una dirección y puede ser de malla metálica. El uso de una malla contribuye al bajo costo. También se pueden usar otros materiales adecuados. La concentración de potencia se produce principalmente por dos factores. En el plano de

exploración, la concentración resulta del enfoque de la matriz. En el plano de elevación, la concentración resulta de la forma de la apertura de elevación del canal.

El hardware de RF, digital y analógico está hecho de tecnología de radar de dispersión incoherente modular avanzada (AMISR), que fue diseñado para una alta confiabilidad y bajo costo. El bajo costo proviene de algunas metodologías de diseño diferentes. Una en particular proviene de la arquitectura híbrida analógica-digital del sistema de matriz en fase 1D. En esta arquitectura, la digitalización de las señales se produce después de la suma de haces, lo que elimina la necesidad de utilizar un digitalizador para cada elemento. Además, el uso de la estructura de canal reduce el número de elementos necesarios. Típicamente, el factor de reducción puede ser una raíz cuadrada (funcionalmente un factor de  $\sim 8$ ) en relación con una matriz 2D. Esto contribuye a una solución de costo significativamente más bajo. El canal permite que la antena se dirija electrónicamente en una dimensión para que se pueda detectar un gran campo de imágenes que contiene objetos como desechos o satélites, por ejemplo.

Para abordar la necesidad de comunicación, el enfoque se centra de manera similar en el uso de un reflector de canal parabólico con una matriz 1D de elementos en el punto de alimentación. Este enfoque puede aplicarse ventajosamente a la necesidad de comunicaciones de la constelación LEO. Estas constelaciones estarán compuestas por múltiples satélites concentrados en planos orbitales. La tecnología de escaneo 1D permite al operador utilizar múltiples haces de transmisión y/o recepción (comunicaciones MIMO) en el plano orbital. De esta forma, la matriz puede comunicarse simultáneamente con muchos satélites, reduciendo o eliminando la necesidad de un gran número de antenas parabólicas dirigibles mecánicamente o costosas matrices en fase 2-D. Para cubrir el plano orbital completo, las matrices deberán orientarse en acimut y/o elevación y un solo sitio puede requerir múltiples matrices.

El enfoque descrito anteriormente tiene muchos beneficios. El sistema de radar 1D que se describe a continuación se presta a un diseño rentable. Esto permite varias aplicaciones, tal como, pero sin limitarse a, el despliegue de varios de estos sistemas de radar para monitorear una gran área del espacio y lograr una alta tasa de revisita en LEO RSO. Los sistemas de mayor costo pueden lograr el monitoreo con tecnología convencional. De manera similar, en comunicaciones, cuando las constelaciones de satélites se despliegan con múltiples satélites, uno o múltiples sistemas de antena 1D pueden desplegarse para comunicarse simultáneamente con estos múltiples satélites. Estas son solo algunas de las ventajas del sistema que se describen a continuación.

Usando múltiples reflectores, cada uno de los cuales tiene una o más matrices en fase, el sistema puede medir ángulos usando radar o interferometría de radio. Además, el sistema, con uno o más reflectores, se puede utilizar para radar monoestático, radar biestático, radar multiestático, interferometría tanto pasiva como activa, y comunicaciones. El radar monoestático se refiere a un radar en el que el transmisor y el receptor están colocados. En el radar biestático, el transmisor y el receptor están separados. Un sistema de radar multiestático incluye múltiples radares monoestáticos o biestáticos y tiene un área de cobertura compartida.

La Figura 1 muestra el sistema de antenas de matriz en fase 1D con un reflector de canal parabólico 10, con el reflector 20, la matriz de elementos 30, la base 50 y las estructuras de soporte 40 y 60. Las estructuras de soporte 40 y 60, aunque proporcionan soporte mecánico, también pueden proporcionar conductos para el cableado eléctrico para alimentar los elementos individuales de la matriz 1D. Se debe tener en cuenta que esta discusión puede referirse al sistema de antena de matriz en fase 1D con el reflector de canal como un 'sistema de matriz en fase 1D', el 'sistema 1D' o el 'sistema'.

Si bien la realización de la Figura 1 muestra un canal parabólico, el sistema puede usar otras formas apropiadas, tal como, pero sin limitarse a, cilíndrica, hiperbólica, toroidal y catenaria. El reflector de canal puede consistir en cualquier material adecuado, según la frecuencia, tal como, pero sin limitarse a, malla metálica, metal expandido, espuma metalizada y láminas metalizadas. En general, el tamaño de apertura de la malla, el tamaño de los agujeros dentro de la malla, puede ser significativamente menor que la longitud de onda operativa del radar.

La malla de apertura pequeña proporciona alta reflectividad y baja fuga. La fuga de señal a través de la malla aumenta el lóbulo posterior de la antena y la temperatura del sistema. El lóbulo posterior de la antena se refiere a la radiación de energía de la antena en la dirección opuesta a la dirección de radiación principal. El aumento del lóbulo posterior reduce la energía de la antena que se irradia en la dirección principal. La malla de gran apertura es de menor costo, más liviana y tiene una carga de viento reducida. El diseño de la abertura de la malla consideraría tales factores. Además, pintar la malla puede proteger el material de la intemperie. La pintura blanca refleja la luz solar de la superficie del canal, minimizando así las deformaciones térmicas de la estructura. Los materiales y los métodos utilizados para construir el reflector de canal pueden ayudar a reducir el costo del sistema de matriz en fase 1D.

Las dimensiones del reflector de canal se eligen apropiadamente para las aplicaciones. Una aplicación rastrearía objetos LEO de alrededor de 10 cm de diámetro con un canal UHF. Si los elementos tienen una potencia máxima de 500 Watts y un ciclo de trabajo del 10 %, una temperatura del sistema de 150 K y un tiempo de integración de aproximadamente 100 ms, un canal apropiado tendría una longitud de aproximadamente 45 metros. Esto corresponde a aproximadamente 128 elementos con un espaciado de media longitud de onda, con una apertura parabólica de 13 m.

Como se muestra en la Figura 1, una matriz de elementos 30 está ubicada en el punto de alimentación del reflector de canal. La Figura 2 ilustra una sección de esta matriz. La matriz puede constar de varios elementos, tal como 96, 128 u otro número adecuado. Un elemento de la matriz, tal como el 35, puede montarse con otros elementos en una estructura de soporte 37. El dibujo muestra los elementos como círculos solo por conveniencia. La forma y el factor de forma de los elementos están diseñados adecuadamente para la aplicación.

La Figura 3 muestra un elemento de ejemplo de la tecnología AMISR UHF, con una antena de dipolo cruzado 70. La electrónica de transmisión y recepción para este elemento de ejemplo puede residir en la carcasa 75. El patrón de la antena y la forma de la carcasa pueden diferir de los que se muestran en la figura, dependiendo de muchos factores, que incluyen la frecuencia y la aplicación, como ejemplos. Volviendo a la Figura 1, con la matriz de elementos que se muestra, se puede obtener la orientación del haz en la dimensión X o dirección acimutal.

La presencia de lóbulos enrejados puede limitar los ángulos de dirección. Los lóbulos de rejilla ocurren cuando el espaciado de los elementos individuales en una matriz es igual o mayor que la mitad de la longitud de onda. De manera similar, la ubicación de los lóbulos de rejilla depende del espacio entre elementos y la frecuencia de la señal. Para maximizar el ángulo de dirección, los elementos se pueden espaciar cerca de la mitad de la longitud de onda. Con esta configuración, una sola matriz de elementos puede escanear el plano X-Z. La diversidad de ángulos de elevación se puede lograr de múltiples maneras y se describirá más adelante.

Si bien no se muestra en la figura, la base de toda la estructura del reflector puede ser móvil. La necesidad de una base móvil podría surgir, por ejemplo, en un sistema de comunicaciones debido a la necesidad de rastrear un solo plano orbital a medida que atraviesa el cielo de revolución en revolución. Luego, una base móvil permite que los satélites en el plano orbital dado permanezcan en el plano de exploración del sistema de matriz en fase 1D. Un sistema de motores y mecanismos de accionamiento bajo el control de un sistema de control puede proporcionar el movimiento de la base. Con este sistema de control, la cantidad y el tipo de movimiento pueden calcularse en función de una serie de situaciones tales como, pero sin limitarse a, la trayectoria proyectada de un satélite o de otros objetos. La trayectoria proyectada se puede calcular en función de las mediciones u otros datos y mediante el uso de un modelo de órbita.

El sistema puede impartir muchos tipos diferentes de movimiento. Estos pueden incluir, pero no se limitan a, acimut, elevación e inclinación. Como se describió anteriormente, la antena de canal 1D tiene un reflector 20. Este reflector puede consistir en varios materiales, que incluyen aluminio, acero, una malla metálica o una almohadilla de espuma metalizada, como ejemplos. Estos materiales se pueden elegir en función de una serie de factores que incluyen el costo de los materiales, el costo de fabricación y para qué aplicaciones específicas está diseñada la antena de canal, como ejemplos. Como un ejemplo, si la antena reside en una base móvil, se puede elegir un material más ligero. Los materiales más ligeros pueden incluir aluminio, magnesio fundido o la malla metálica, como ejemplos. Esto puede reducir los requisitos sobre el tamaño y la capacidad de los actuadores que mueven la base.

Las Figuras 4 y 5 ilustran ejemplos de patrones de radiación y directividad de un sistema de canal parabólico 1D. Esta realización consta de 9 elementos de transmisión que funcionan a 446 MHz con una separación entre elementos de 0,37 metros, que iluminan un canal de 16 metros de largo con una apertura parabólica de 13 metros. La Figura 4 ilustra el plano de directividad de campo lejano del plano XZ. Las diversas curvas ilustran el patrón de directividad para diferentes ángulos de dirección del haz. Por ejemplo, la curva 100 ilustra el patrón de directividad para un haz dirigido a 0° mientras que la curva 110 ilustra el haz a 57,3°. La Figura 5 ilustra la misma información en un gráfico polar, excepto que este gráfico ilustra la dirección del haz. Estas dos figuras ilustran que con el conjunto de parámetros elegidos para este ejemplo, el haz puede dirigirse +/- alrededor de 60°. La Figura 6 ilustra cómo se puede utilizar esta dirección para cubrir el campo de formación de imágenes. En esta figura, una sección de la tierra se muestra como 120. El campo de formación de imágenes del sistema 1D se muestra como 130. El sistema 1D puede barrer esta área en operación de transmisión y recepción ajustando las fases para cada elemento.

Se pueden desplegar múltiples sistemas 1D para escanear múltiples secciones del cielo, con múltiples posibilidades de configuración. En una configuración, dos sistemas 1D pueden ubicarse y orientarse de tal manera que apunten a diferentes direcciones en el cielo. Como un ejemplo, dos sistemas 1D podrían residir en la misma ubicación terrestre, con un sistema apuntando hacia el norte y el otro apuntando hacia el sur con la dirección de exploración en el plano este-oeste. La Figura 7 ilustra la orientación de dicho sistema combinado.

En esta figura, 10A y 10B son sistemas 1D orientados en dirección hacia el norte y sur respectivamente. Las flechas 12A y 12B indican el plano de exploración con el plano yendo perpendicularmente al plano del papel. La Figura 8 muestra el gráfico angular del cielo mirando hacia arriba y las curvas 130A y 130B indican la extensión angular del campo de formación de imágenes correspondiente a los sistemas de matriz en fase 1D 10A y 10B respectivamente, proyectados en el gráfico angular.

La Figura 9 ilustra otra configuración. En esta realización, se despliegan tres sistemas 1D con uno apuntando al norte 10C, otro apuntando al sureste 10D y un tercero apuntando al suroeste 10E. La Figura 10 ilustra un gráfico con la extensión angular de los escaneos como las curvas 130C, 130D y 130E. Como nota, las líneas 130A-130E se curvan debido a la proyección de la línea recta sobre el gráfico angular. Uno puede imaginar estos gráficos como esferas y las curvas muestran dónde se cruzan los planos de exploración con la esfera.

Con estos ejemplos, ahora se puede entender cómo crear una 'valla espacial'. En otras palabras, los sistemas 1D están dispuestos de tal manera que detectan cualquier objeto por encima de cierto tamaño, volando en ciertas órbitas en el espacio sobre los sistemas. La configuración de las Figuras 7 y 8 puede detectar objetos que vuelan en órbitas norte sur. Sin embargo, con esta configuración, los objetos que vuelan de este a oeste o de oeste a este pueden pasar desapercibidos, y otras inclinaciones pueden resultar en la detección de solo uno de los sistemas.

La configuración de las Figuras 9 y 10 mitiga estos problemas ya que se pueden detectar objetos que vuelan en cualquier órbita. Además, la configuración puede proporcionar al menos dos observaciones del objeto. Esto permite una elección adecuada en función de los requisitos de detección. Cabe señalar que son posibles otros ángulos y configuraciones. Además, estos sistemas no necesitan estar colocados en un solo lugar. Los sistemas podrían colocarse muy separados, por ejemplo, uno en cada polo y otro en el ecuador. Sin embargo, dado que la antena solo puede detectar naves espaciales dentro de la línea de visión y dentro de sus límites de sensibilidad, los satélites o los desechos en órbitas de baja inclinación no serían detectables desde una estación polar. Por lo tanto, se recomiendan múltiples sitios ecuatoriales para que un satélite de baja inclinación pueda observarse varias veces por revolución.

También se pueden usar múltiples sistemas 1D para lograr diversidad de ángulos de elevación. Esto se puede lograr disponiendo los sistemas 10G y 10F formando un ángulo entre sí y con el plano XY. El plano de exploración entonces apuntaría a diferentes ángulos de elevación con diferentes campos de visión 130G y 130F como se muestra en la Figura 11.

Una base móvil permite cambios en la posición del sistema 1D como se describió anteriormente. En un concepto adicional, el sistema 1D puede incluir mecanismos que permitan el ajuste de la orientación. Con referencia a la Figura 1, la base 50 puede moverse mediante un sistema de engranajes, motores u otros tipos de actuadores, que no se muestran en la figura. Como un ejemplo, los mecanismos pueden permitir la rotación de todo el sistema alrededor del eje Z. Otros mecanismos pueden permitir cambiar la orientación de la antena de canal. Uno puede visualizar la orientación examinando uno de los sistemas en la Figura 7.

La flecha 12A o 12B señalaría en un ángulo diferente cuando cambia la orientación. En este caso, los mecanismos de accionamiento harían que el canal apuntara en una dirección diferente. La capacidad de ajustar o modificar la posición y la orientación puede tener ventajas en muchas situaciones. En un ejemplo, las modificaciones de la forma del área vallada pueden permitir una mejor detección de un objetivo. Con referencia a la Figura 8, si un objeto volaba por el cielo en una dirección mayoritariamente este-oeste con un pequeño ángulo de sureste a noroeste de modo que el objeto y el campo de visión del sistema 1D se cruzaran muy brevemente o durante un breve período de tiempo, uno o ambos sistemas 1D que se muestran en la Figura 7 pueden girar alrededor de sus ejes Z. La próxima vez que el objeto dé la vuelta, si está dando vueltas alrededor de la tierra, los sistemas rotados pueden obtener una mejor señal.

La longitud y el diámetro del canal representan solo algunos de los muchos parámetros de diseño para el sistema de antena de matriz en fase 1D. La ganancia de la antena es un factor que se tiene en cuenta al elegir la longitud y el diámetro del diseño. La Figura 12 muestra un cálculo de la ganancia de la antena en función del diámetro y la longitud del canal para un sistema UHF. También muestra que si se desea una ganancia particular, el diámetro y la longitud se pueden variar según se adapte mejor al entorno en el que se desplegará el sistema 1D. La ganancia de la antena viene dada por:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{ef}$$

Ecuación 1

donde  $\lambda$  es la longitud de onda del radar y  $A_{efecto}$  es la apertura efectiva, dada por:

$$A_{ef} = \epsilon D_{largo} D_{ancho}$$

Ecuación 2

donde  $D_{ancho}$  y  $D_{largo}$  son el ancho y largo del reflector y  $\epsilon$  es la eficiencia de apertura.

El tamaño del canal requerido para una aplicación de radar está determinado por una serie de factores, que incluyen la detectabilidad del objetivo. La potencia recibida viene dada por:

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} G_{tx} G_{rx} \sigma_{rcs} \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{tx}^2 R_{rx}^2 L}$$

Ecuación 3

donde  $P_{tx}$  es la potencia de transmisión,  $G_{tx}$  es la ganancia de transmisión,  $G_{rx}$  es la ganancia de recepción,  $\sigma_{rcs}$  es la sección transversal de dispersión del radar,  $\lambda$  es la longitud de onda del radar,  $R_{tx}$  es el rango de transmisión al objetivo,  $R_{rx}$  es el rango de recepción al objetivo y  $L$  es un factor de pérdida. El tiempo de integración requerido para lograr una relación señal-ruido (SNR) dada es:

$$T_{int} = \frac{F_{seguridad} k_B T_{sis}}{F_{útil} P_{rx}}$$

5

Ecuación 4

donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $T_{sis}$  es la temperatura del sistema,  $F_{útil}$  es el ciclo de trabajo del sistema y  $F_{seguridad}$  es un margen de seguridad de detectabilidad.

10 Por el contrario, el RCS mínimo detectable para un radar viene dado por:

$$\sigma_{RCS} = \frac{(4\pi)^3 R_{tx}^2 R_{rx}^2 L}{P_{tx} G_{tx} G_{rx} \lambda^2} \frac{F_{seguridad} k_B T_{sis}}{F_{útil} T_{int}}$$

15

Ecuación 5

La asignación del RCS al tamaño de un objeto físico depende de las propiedades de dispersión del objeto, el material y muchos otros factores. Para una esfera conductora esférica, se puede asumir la dispersión de Rayleigh si la circunferencia del objeto,  $C_{obj} = 2\pi R_{obj}$ , es menor que aproximadamente  $0,1 \lambda$ . En este régimen, la relación RCS con el tamaño del objeto para una esfera conductora esférica está dada por:

20

$$\sigma_{RCS} = \frac{64}{9} A_{obj} \left(\frac{C_{obj}}{\lambda}\right)^4$$

25

Ecuación 6

donde  $A_{obj}$  es el área transversal del objetivo. Para una circunferencia de objeto superior a  $0,1 \lambda$ , el RCS se puede tratar mediante la dispersión de Mie y el RCS es más difícil de predecir. Para objetos muy grandes, el RCS se aproxima a la sección transversal óptica ( $A_{obj}$ ). Dada una sección transversal detectable mínima deseada en el rango deseado, así como el tiempo de integración deseado, se pueden calcular los parámetros del sistema.

30

La Figura 13 ilustra un ejemplo de una geometría de canal. Se ve que el canal 20, que se muestra como una línea continua, es parte de un arco parabólico 25, que se muestra como una línea discontinua. Se indica el punto de alimentación. Aquí es donde se pueden ubicar los elementos de la matriz 1D, entrando en el plano del papel. En este ejemplo particular, el punto de alimentación está ubicado a 5,63 m por encima del punto más bajo de la parábola. El ángulo desde el punto de alimentación hasta el borde del canal es de  $60^\circ$ . La profundidad del plato en este caso es de 1,88 m. Estos números dependen del patrón de haz del elemento.

35

Un subreflector puede ofrecer ventajas adicionales al diseño del canal. Este es un reflector adicional que se puede ubicar entre la alimentación y el canal principal. Puede usarse para redirigir, enfocar o difundir la energía de radiofrecuencia que viaja entre la alimentación y el canal principal. El uso de la ganancia de la antena del subreflector y los niveles de los lóbulos laterales pueden optimizarse aún más. También puede reducir el costo de mantenimiento de la alimentación porque el punto de alimentación se puede ubicar más cerca del nivel del suelo. Además, la orientación del equipo de la antena de alimentación se puede ajustar para facilitar la instalación y el servicio, y para que los orificios de drenaje de humedad alimentados por gravedad no interfieran con la electrónica o los planos de tierra.

40

45

La Tabla 1 a continuación ilustra configuraciones de ejemplo de un sistema 1D como se describió anteriormente.

50

55

60

65

Unidades	Sistema UHF con 500 Watt/10 % elementos de trabajo, para detectar objetos de 10 cm a 1500 km de rango	Sistema UHF con 500 Watt/20 % elementos de trabajo, para detectar objetos de 10 cm a 1500 km de rango	Sistema de banda L con 500 Watt/20 % elementos de trabajo, para detectar objetos de 1 cm a 1500 km de rango	Sistema de banda S con 100 Watt/20 % elementos de trabajo, para detectar objetos de 2 cm a 1500 km de rango	Sistema de banda L con 500 Watt/20 % elementos de trabajo, para detectar objetos de 10 cm a 1500 km de rango	Sistema de banda S con 100 Watt/20 % elementos de trabajo, para detectar objetos de 1 cm a 1500 km de rango
<b>Características del objeto</b>						
Diámetro del objeto	0,1000	0,1000	0,0200	0,0200	0,0100	0,0100
Circunferencia del objeto	0,3142	0,3142	0,0628	0,0628	0,0314	0,0314
Área de sección transversal del objeto	0,0079	0,0079	0,0003	0,0003	0,0001	0,0001
Rango al objetivo	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06	2,E+06
Máx. tiempo de integración	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000
<b>Características generales</b>						
Frecuencia	5,E+08	5,E+08	1,E+09	3,E+09	1,E+09	3,E+09
Longitud de onda	0,67	0,67	0,23	0,1	0,23	0,1
RCS del objeto	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
RCS del objeto	-21,05	-21,05	-35,03	-35,03	-41,05	-41,05
Potencia del elemento	500,00	1000,00	500,00	100,00	500,00	100,00
Ciclo de trabajo del elemento	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Separación entre elementos	,033	0,33	0,12	0,05	0,12	0,05
Eficiencia de apertura	,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Tsis	150,00	150,00	100,0	100,00	100,00	100,00
Margen de seguridad de detectabilidad	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
<b>Sistema de matriz en fase 1-D</b>						
Ancho (canal)	13,0000	13,0000	13,0000	13,0000	13,0000	13,0000
Número de elementos requeridos	147	93	298	510	473	809
Potencia pico	73,50	92,60	149,01	50,96	236,54	80,89
Longitud del canal	49,00	30,87	34,39	25,48	54,59	40,45
<b>Matriz 2D</b>						
Número de elementos requeridos	1690	1065	6952	20 759	11 036	32 953
Potencia pico	845,24	1064,94	3475,97	2075,94	5517,75	3295,35
Dimensión lineal de la matriz	13,71	10,88	9,62	7,20	12,12	9,08

Para las mismas características del objeto y para las mismas características generales tal como la frecuencia, para un producto potencia-apertura dado. El producto de apertura-potencia mide el rendimiento de los radares. La tabla compara una matriz de canal y una matriz 2D. En esta tabla, se puede ver que para un sistema UHF de 500 Watt, para un objeto con un diámetro de 10 cm, dado el mismo producto de apertura-potencia, el sistema 1D tiene una longitud de canal de 49 m y un ancho de 13 m en comparación con una dimensión lineal de 13,71 m para la matriz

2D. Sin embargo, la cantidad de elementos requeridos en el sistema 1D es 147 en comparación con 1690 para la matriz 2D. Esto ilustra la ventaja económica del sistema 1D.

Las Figuras 14-16 muestran algunos ejemplos de arquitecturas formadoras de haces de receptores. Las arquitecturas formadoras de haces son bien conocidas y entendidas. La Figura 14 es la configuración más general, donde las señales de N elementos se amplifican y digitalizan, y se alimentan a un formador de haces de N canales que consiste funcionalmente en un retardo digital y una suma. Si bien es atractiva, esta solución puede tener un costo prohibitivo para aplicaciones comerciales porque los requisitos del formador de haces pueden ser excesivos, por ejemplo, requieren un ancho de banda de 2 GHz en 1000 canales.

La Figura 15 muestra una solución alternativa de un enfoque de formación de haz analógico. En esta realización, cada señal se amplifica y luego se envía a un banco desfasador y se suma, produciendo un flujo analógico de N canales. A continuación, la señal se digitaliza. Esta configuración requiere menos digitalizadores. La Figura 16 ilustra un enfoque híbrido donde se suman grupos de canales, 1 a M en el ejemplo. Luego, las sumas parciales se digitalizan para formar una suma total. Cada configuración tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de costo, uso de energía y precisión del formador de haz. Estos son bien conocidos en la literatura y no se describirán aquí. Además, aunque las figuras describen la trayectoria de la señal de recepción, la trayectoria de la señal de transmisión es similar y no se repetirá aquí.

El procesamiento coherente es una técnica para mejorar la relación señal/ruido (SNR) que aumenta la detectabilidad para las aplicaciones de radar. El ancho de banda de la forma de onda transmitida determina la resolución de rango de un radar. Para formas de onda codificadas en fase, donde un pulso está codificado en fase con un número  $N_{baudio}$  de "baudios" espaciados cada  $T_{baudio}$  segundos, donde la longitud total del pulso es  $T_{pulso} = N_{baudio}T_{baudio}$ , la resolución de rango está dada por  $cT_{baudio}/2$  donde c es la velocidad de la luz. Si bien esta es la resolución fundamental sobre la cual el radar puede resolver, la interpolación se puede utilizar para mejorar la precisión de la medición del rango estadístico a más de 10 veces este valor, en el caso de retornos SNR altos.

Si bien las mediciones de rango de pulsos individuales pueden promediarse "incoherentemente", o ajustarse con un modelo orbital, para mejorar las estadísticas de mediciones como  $\sqrt{N_{int}}$  donde  $N_{int}$  es el número de integraciones incoherentes, se puede aplicar un procesamiento coherente que aumenta las estadísticas de mediciones como  $N_{int}$ . Para lograr esto, se pueden combinar múltiples pulsos de forma coherente suponiendo que la amplitud del objetivo es estacionaria durante el tiempo de integración. La suma coherente se refiere a la suma que se realiza en el dominio complejo donde se conservan las fases, a diferencia de la suma incoherente donde la suma se realiza después de la detección de la magnitud.

En una primera secuencia donde los transmisores transmiten 'Pulso 1', 'Pulso 2', 'Pulso 3' y así sucesivamente. Después de transmitir el Pulso 1, la señal reflejada, Señal 1, se recibe en un objetivo. De manera similar, una señal, Señal 2, regresa después de que se transmite el Pulso 2. La señal de recepción puede ser bastante débil y estar cerca del ruido de fondo. En este caso, la Señal 1 y la Señal 2 pueden sumarse coherentemente para mejorar la SNR.

Para explicar matemáticamente este concepto, si la forma de onda transmitida viene dada por:

$$e(t) = \epsilon(t)e^{i\omega_0 t}$$

Ecuación 7

donde  $e(t)$  es la envolvente compleja variable en el tiempo lento de la transmisión y  $\omega_0$  es la frecuencia portadora en radianes. La señal recibida está modelada por:

$$z(t) = b x\left(t - \frac{2R}{c}\right) e^{i\omega_D t}$$

Ecuación 8

correspondiente a una versión escalada ( $b$ ) de tiempo retardado ( $t-2R/c$ ), con desplazamiento Doppler ( $\omega_D$ ) de la señal recibida, como se explica en "Real-Time Space Debris Monitoring with EISCAT", Advances in Space Research, vol. 35, núm. 7, pp. 1197-1209, 2005. Se pueden agregar niveles adicionales de complejidad a este modelo. Por ejemplo, si el desplazamiento Doppler en sí varía con el tiempo, esto se puede modelar como se muestra en la referencia.

La estimación de la señal recibida se puede lograr simplemente convolucionando la señal recibida,  $z(t)$ , con un tiempo de retardo, representación desplazada Doppler de la forma de onda de transmisión. Por lo tanto:

$$\hat{s}(t) = \int_0^T z(t)x\left(t - \frac{2R}{c}\right) e^{i\omega_D t} dt$$

Ecuación 9

donde  $\hat{s}(t)$  es la señal de recepción estimada. Si bien la mayoría de las aplicaciones tratan a  $T$  como la longitud del pulso ( $T_{pulsos}$ ), también pueden ser varios pulsos siempre que se mantenga la coherencia. En este sentido, se pueden decodificar de forma coherente varios pulsos, teniendo en cuenta el desplazamiento Doppler de las formas de onda recibidas. La ecuación 9 se puede discretizar y escribir como una transformada de Fourier discreta. La señal estimada se puede calcular sobre todas las frecuencias resolubles utilizando un algoritmo de transformada rápida de Fourier. De esta forma, se pueden discernir múltiples objetivos en el campo de visión pero con diferentes desplazamientos Doppler.

Los tiempos de integración coherentes largos tienen la ventaja de aumentar la resolución Doppler. La resolución Doppler está determinada por  $1/T$  en la ecuación anterior. El procesamiento coherente aumenta la SNR y mejora significativamente la resolución Doppler.

En otra consideración, la integración coherente produce una gran ventaja sobre los intervalos de tiempo limitados siempre que las señales de los objetivos permanezcan coherentes. Los cambios en el ángulo de visión del sistema, la orientación del satélite (rotación) o el estado de la ionosfera hacen que los retornos pierdan coherencia. Esta coherencia reducida reduce la eficacia de los algoritmos de integración coherentes. Un esquema que combina intervalos de integración coherentes cortos con intervalos de integración incoherentes más largos a menudo produce un rendimiento óptimo del sistema. Se pueden realizar varios tipos de integración incoherente de operaciones. Como ejemplo, la suma se puede realizar después de la detección o se puede sumar la potencia de cada canal.

Como se mencionó anteriormente, la resolución del radar está determinada por el ancho de banda de transmisión. En los sistemas de radar convencionales, a menudo se utilizan chirridos de frecuencia para proporcionar esta ampliación del ancho de banda. Sin embargo, el rendimiento de estos sistemas está limitado por la presencia de desorden e interferencias, y los chirridos de frecuencia tienen una ambigüedad de rango Doppler inherente. La aleatorización de los parámetros del pulso de transmisión proporciona una técnica ventajosa para superar algunos de estos problemas, especialmente si se rastrean múltiples objetivos en un amplio rango de altitudes. La duración del pulso ( $T_{pulsos}$ ) el tiempo entre pulsos ( $T_{ipp}$ ) se puede aleatorizar, ocasionalmente llamado codificación aperiódica. Además, la longitud de baudios ( $T_{baudios}$ ) descrita anteriormente también se puede aleatorizar.

Para explicar esto un poco más, una propiedad estadística de las secuencias pseudoaleatorias es que son ortogonales. Para dos secuencias pseudoaleatorias esto se puede escribir matemáticamente como:

$$\langle S_1(t) | S_2(t) \rangle = 0$$

Las secuencias de pulsos aleatorias hacen uso de esta propiedad estadística para reducir o eliminar el desorden propio ambiguo de los rangos no deseados. En un ejemplo, pueden usarse secuencias de pulso aleatorias para detectar objetos a diferentes altitudes. En una serie de pulsos que se han aleatorizado, se puede usar un pulso para la detección de objetos en órbita terrestre baja, mientras que la combinación de muchos pulsos se puede tratar como una secuencia de pulsos más larga para la detección de objetos en órbita ecuatorial geosincrónica (GEO) (que se encuentran a mayor altura).

En otro ejemplo, cada pulso puede tener una secuencia aleatoria única, de modo que cuando se decodifican las señales de recepción de un pulso de transmisión, las señales de otros pulsos no desordenan las señales del primer pulso y, esencialmente, se aleatorizan en ruido. Cuando varios objetivos están presentes en el campo de visión al mismo tiempo, es posible que un radar convencional no discrimine entre los dos. Sin embargo, al usar la aleatorización del pulso con secuencias únicas, es posible identificar de dónde se originaron las señales recibidas.

En otro ejemplo, la aleatorización del  $T_{ipp}$  utilizando secuencias aperiódicas sería ventajosa para objetivos a grandes alturas. Esto se debe a que la detección de objetivos que se encuentran a grandes alturas (por ejemplo, GEO) suele tardar cientos de milisegundos, durante los cuales se transmiten varios pulsos. Al aleatorizar el IPP, uno está esencialmente aleatorizando el pulso de transmisión utilizando "0", tiempos de inactividad del transmisor, limitados por el período entre pulsos del transmisor (IPP), transmitiendo esencialmente un pulso excepcionalmente largo con buenas propiedades de coherencia. Estos "0", si se repiten periódicamente, proporcionan ambigüedad Doppler determinada por la transmisión de Fourier de la forma de onda de transmisión. La aleatorización de  $T_{ipp}$  reduce estas ambigüedades y, por lo tanto, reduce la probabilidad de detecciones falsas o sesgadas del ruido. Además, se podrían aleatorizar las formas de onda del radar.

La combinación de una matriz en fase escaneada electrónicamente y un procesamiento coherente conduce a la capacidad de rastrear múltiples objetos simultáneamente con un buen rango y resolución Doppler. Por ejemplo, se pueden rastrear 10 objetos simultáneamente con un sistema UHF con un tiempo de coherencia de objeto estimado de 100 ms, con una resolución Doppler de 10 Hz (3,35 m/s en UHF). El objeto permanecería en el haz durante 5 s y el tiempo empleado por objeto sería de 500 ms. El número de rango coherente y estimaciones Doppler sería 5 mientras el objeto está en el haz.

Como se mencionó anteriormente, los pulsos de transmisión a veces se pueden codificar para mejorar parámetros tales como la relación señal/ruido. Estas señales codificadas deben decodificarse cuando se reciben en el sistema

1D. Normalmente, durante el proceso de decodificación, se utiliza una copia de la forma de onda de transmisión deseada. Sin embargo, el uso de la copia de la forma de onda de transmisión deseada puede generar niveles insatisfactorios de artefactos debido a una decodificación incorrecta. Esto se debe a que la forma de onda de transmisión real que emana de los elementos individuales puede ser diferente de la forma de onda deseada debido a las distorsiones en fase, amplitud y tiempo. Es ventajoso utilizar la forma de onda de transmisión real para el proceso de decodificación.

La Figura 17 ilustra este concepto. Esta figura muestra algunos de los bloques de procesamiento funcional del sistema de transmisión/recepción. Un ejemplo de una señal de transmisión deseada 620 se muestra en la salida del generador de señal 610. A medida que esta señal se propaga a través de la antena 630 y se transmite, sufrirá más cambios de fase y magnitud. Después de la transmisión, la señal viaja al objetivo y se refleja de regreso a la antena. La electrónica del receptor, que puede incluir un procesador que ejecuta instrucciones, procesa esta señal. Como se muestra, la señal en la salida del formador de haz de recepción 670 puede ser diferente en magnitud y fase en comparación con la señal de transmisión deseada 620.

El uso de la forma de onda deseada para decodificar la señal de recepción puede provocar artefactos. Para evitar estos artefactos, se utiliza una señal que se propaga a través de los bloques funcionales de transmisión y recepción, pero que no se propaga al espacio libre. Esta señal es el resultado de fugas causadas por el circulador o el interruptor de transmisión/recepción 640 diseñado con algún acoplamiento. Durante la operación de transmisión, cierta cantidad de señal se acopla desde el lado de transmisión al lado de recepción. Esta señal acoplada luego se digitaliza y almacena y se usa para decodificar las señales recibidas del objetivo.

El radar de apertura sintética inversa (ISAR) es una técnica para obtener imágenes de un objeto, como una pieza de desechos o una nave espacial, con múltiples sistemas de radar. Estas imágenes pueden identificar el objeto, especialmente si es grande, y mejorar la capacidad de vincular las mediciones tomadas por un radar con las mediciones tomadas en otro radar. La calidad de la imagen formada con la técnica ISAR depende del movimiento del satélite y del ancho de banda de la señal. Las imágenes formadas usando esta técnica son bidimensionales, con un eje apuntando a lo largo del eje del canal y el otro eje apuntando en la dirección del rango lejos del canal. La mejor resolución de imagen se logra cuando el radar puede ver el objeto de horizonte a horizonte y cuando el radar tiene un ancho de banda muy amplio. El uso del sistema 1D con espaciado entre elementos menor o igual a  $\lambda/2$  es ventajoso en este caso ya que permite el uso de haces dirigidos; esto mejora el tiempo que un objetivo es visible para el sistema 1D, lo que permite la formación de imágenes ISAR.

La Figura 18 ilustra un ejemplo de geometría de canal. El punto de alimentación se ve aproximadamente a 5 m directamente sobre el punto más bajo del canal y aproximadamente a 6 m del borde del plato. Puede ser difícil tener acceso físico a los puntos de alimentación sin equipo especial. Además del problema del acceso, tener el punto de alimentación directamente encima del canal aumenta el bloqueo de las señales en la parte principal del haz. En la Figura 18, se muestra otra configuración que supera estos problemas. Aquí, el punto de alimentación está ubicado al costado de la antena y no directamente encima de ella, pero aún en el punto focal de la parábola. En este ejemplo, los elementos de alimentación se giran  $60^\circ$ , mirando hacia el canal. Esto da como resultado una apertura de 13 m para el canal, sin embargo, como se puede ver en la figura, los puntos de alimentación están solo a unos 3,7 m sobre el fondo del canal.

La Figura 19 muestra otra configuración en la que los puntos de alimentación giran  $55^\circ$ . Aquí los puntos de alimentación están a unos 3 m por encima y a unos 2 m del borde del plato. También son posibles otras configuraciones de desplazamiento. Estas configuraciones reducen los puntos de alimentación y los hacen más accesibles. Estas configuraciones también minimizan el bloqueo causado por los puntos de alimentación.

Dado el tamaño físico del sistema 1D, puede haber variaciones en la posición de los elementos. Estas variaciones pueden causar variaciones en la magnitud y fase de las señales de recepción y transmisión. Las variaciones en las señales también pueden deberse a otros factores no relacionados con el tamaño del sistema 1D, como las características del cable, la electrónica, el acoplamiento cruzado de señales que emanan de elementos vecinos. En última instancia, estas variaciones pueden causar la degradación de los haces al afectar el patrón del haz y la sensibilidad del haz. Puede ser ventajoso medir las variaciones y luego adaptarse a las variaciones.

El proceso de calibración puede constar generalmente de al menos dos pasos. En el primer paso, se puede generar un modelo electromagnético del sistema, que incluye la geometría de los elementos y el canal 1D, basado en la medición de la posición de los elementos desde un punto de referencia. Estas mediciones se pueden realizar, por ejemplo, con un dispositivo láser o a partir de múltiples fotografías aéreas desde múltiples ángulos a partir de las cuales se construye un modelo 3D del sistema. Un segundo paso requiere una antena de calibración ubicada en una posición conocida. Cada elemento envía y recibe señales desde la antena de calibración una a una. Ahora la fase medida de las señales recibidas se compara con la fase predicha del modelo para cada elemento. Cabe señalar que el modelo electromagnético también puede contener la ubicación de la antena de calibración.

Estas desviaciones en una base elemento por elemento proporcionan la distorsión o modificación de fase que se produce debido a la electrónica y otros factores. Estos valores de desviación, llamados valores de calibración, se

obtienen para la operación de transmisión y recepción por separado. Para obtener los valores de calibración de transmisión, se realiza la operación inversa a la anterior; en otras palabras, las señales se transmiten desde cada elemento en una base elemento por elemento y se reciben en la antena de calibración. Los valores de transmisión o recepción apropiados se aplican entonces cuando el sistema vuelve a estar en funcionamiento, en una base elemento por elemento.

A los efectos del seguimiento de satélites, naves espaciales y desechos espaciales, es ventajoso medir la densidad de electrones en función de la profundidad ionosférica. Las ondas electromagnéticas que viajan a través de la ionosfera pueden sufrir retrasos en la banda UHF. Esto puede conducir a bases variables en el tiempo en las mediciones de rango. En primer orden, el retardo de fase en el que incurren las ondas electromagnéticas a través de la ionosfera es de  $40,3 \text{ TEC}/f$ , donde  $\text{TEC}$  es el contenido total de electrones (unidades de electrones por  $\text{m}^2$ ) y  $f$  es la frecuencia de operación en Hz. Los retardos en el rango bidireccional podrían oscilar entre 10 y 100 metros y ser muy variables debido a la variabilidad de las condiciones ionosféricas. Esto es especialmente cierto en las latitudes medias y bajas, donde la ionosfera es más variable.

La forma convencional de abordar este problema incluye modelar la ionosfera y usar el modelo para corregir las mediciones de rango. Sin embargo, las características ionosféricas cambian en función de la ubicación y el tiempo, lo que reduce el valor de usar el modelo para la corrección de errores. En el método que se describe a continuación, se recibe y analiza la dispersión incoherente resultante de la transmisión de pulsos de medición. Al utilizar el pulso y la amplitud de las señales recibidas, se genera un modelo en tiempo real de la ionosfera. El uso de este modelo puede resultar en estimaciones de rango más precisas.

Para explicar esto en términos matemáticos, la dispersión incoherente (IS) es la retrodispersión térmica de los electrones ionosféricos, como se explica por J. V. Evans en "Theory and Practice of Ionosphere Study by Thomson Scatter Radar", Actas del IEEE, vol. 57, núm. 4, págs. 496-530, 1060. La sección transversal de retrodispersión de dispersión incoherente se da en ese documento como:

$$\sigma = \frac{\sigma_e}{(1 + \alpha^2)(1 + T_e / T_i + \alpha^2)}$$

Ecuación 11

donde  $\sigma_e$  es la sección transversal de radar de un electrón,  $T_e$  y  $T_i$  son las temperaturas de los electrones y los iones, y  $\alpha$  es un término de longitud de Debye del plasma dependiente de la longitud de onda. La potencia total recibida es entonces proporcional al número total de electrones dentro del volumen iluminado y, por tanto, a la densidad del número de electrones  $N_e$ , así como al producto de apertura de potencia. La potencia recibida decrece como:

$$P_S \propto P_t A_{ef} \frac{N_e \sigma}{R^2}$$

Ecuación 12

Al analizar la potencia recibida, los ISR pueden perfilar de manera efectiva la densidad del número de electrones, así como otras propiedades del medio a través de la interpretación del espectro IS Doppler.

En la práctica, los pulsos de sondeo ionosférico se pueden intercalar con los pulsos de seguimiento de satélites para medir perfiles de densidad de electrones con resolución de rango. El contenido total de electrones (TEC) ionosférico entre el transmisor y el satélite se puede calcular integrando la densidad de electrones medida a lo largo de la trayectoria desde el transmisor hasta el satélite. El retardo de rango se puede calcular a través de la ecuación de retardo de fase anterior.

Como se indicó anteriormente, para aplicaciones de comunicaciones, el despliegue anticipado de constelaciones de órbita terrestre baja (LEO) que consisten en múltiples satélites requiere comunicaciones de gran ancho de banda para permitir la comunicación simultánea con los satélites. Estas constelaciones pueden consistir en cientos de satélites por plano orbital, de los cuales decenas de satélites podrían estar a la vista de una estación terrestre al mismo tiempo. El enfoque descrito aquí utiliza múltiples haces de recepción para comunicarse con los múltiples satélites simultáneamente.

La Figura 20 ilustra una configuración en la que se generan múltiples haces. Esta es una configuración ventajosa para un sistema de comunicaciones con el requisito de enlace ascendente y/o enlace descendente con múltiples satélites simultáneamente. En este ejemplo, se ilustran tres sistemas 1D, aunque los haces múltiples se pueden generar con un solo sistema. El campo de visión de imágenes de cada sistema 1D se ilustra mediante 310, 320 y 330. Al disponer los sistemas en un plano, se puede crear un campo de visión compuesto en el plano X-Z y se pueden abordar múltiples satélites en el mismo plano orbital.

En algunas aplicaciones, como las comunicaciones, puede resultar ventajoso utilizar diferentes bandas de frecuencia. Por ejemplo, la banda S (2-4 GHz) se puede usar para el enlace ascendente y la banda X (8-12 GHz) se puede usar para el enlace descendente. Como referencia, el enlace ascendente se refiere a la comunicación entre las estaciones terrestres y los satélites y el enlace descendente se refiere a la comunicación del satélite a las estaciones terrestres. Algunos protocolos para descargar datos de satélites requieren que se establezca y mantenga un enlace ascendente durante la descarga. Esto se hace para obtener información sobre la calidad del enlace y para determinar la velocidad de datos que se utilizará para el enlace descendente. El enlace ascendente requiere solo una velocidad de datos baja, por ejemplo, a menudo un haz de ancho de banda estrecho (alrededor de 1-2 MHz) es suficiente para el enlace ascendente. Para el enlace descendente, a menudo se necesita un ancho de banda más amplio. Por ejemplo, un ancho de banda apropiado puede estar alrededor de 100 MHz.

Son posibles otras frecuencias y anchos de banda para el enlace ascendente y el enlace descendente. Por ejemplo, la banda Ku (12-18 GHz) puede usarse para el enlace ascendente y la banda Ka (26,5-40 GHz) puede usarse para el enlace descendente. Hay varias formas de configurar las antenas para las dos bandas diferentes en el contexto de un sistema 1D. En una configuración, las dos matrices en fase 1D están dispuestas de modo que estén desplazadas horizontalmente. Esto se ilustra en la Figura 9A.

En la Figura 21, la ubicación indicada por 500 puede ser la ubicación de la alimentación de enlace descendente de banda X, mientras que la ubicación indicada por la flecha 510 puede ser la ubicación de la alimentación de enlace ascendente de banda S. La flecha 520 indica la distancia en la que se desplaza la banda S. En este caso, la alimentación de la banda X se coloca en el punto de enfoque del canal y la banda S se desplaza horizontalmente. Se pueden usar varias reglas para calcular la cantidad de desplazamiento horizontal que se muestra en 520. Sin embargo, una configuración preferida es colocar la antena de frecuencia más alta en el foco y desplazar la antena de frecuencia más baja y hacer que este desplazamiento sea igual a  $\frac{1}{4}$  (longitud de onda de banda X + longitud de onda de banda S), lo que efectivamente coloca las alimentaciones una al lado de la otra. Las alimentaciones suelen tener la mitad de una longitud de onda de ancho.

Mover la alimentación lejos del foco degrada el rendimiento del sistema; sin embargo, el rendimiento del sistema se degrada más lentamente a frecuencias más bajas. Entonces, la alimentación de alta frecuencia se coloca en la ubicación óptima y la alimentación de baja frecuencia se coloca cerca. Esta configuración garantiza que las señales de frecuencia más alta se vean mínimamente afectadas o no se vean afectadas, pero las señales de baja frecuencia pueden ser más bajas en el objetivo debido a la desalineación de la antena con respecto a la alimentación. Una regla de diseño de ingeniería estándar es aceptar un máximo de 3 dB de degradación, pero es preferible una degradación menor.

Si la frecuencia del enlace descendente se elige como 8,1 GHz, con una longitud de onda de 3,7 cm, en la banda X, y la frecuencia del enlace ascendente se elige como 2056 GHz, con una longitud de onda de 15 cm, en la banda S, entonces el desplazamiento máximo que causa 3 dB de degradación al sistema de enlace ascendente es de 4,6 cm. Además de degradar el rendimiento del sistema, el desplazamiento de la alimentación cambia la dirección de orientación del haz principal. Si los cambios son lo suficientemente grandes, entonces la antena no apuntará al satélite sino al cielo en blanco cercano. Por ejemplo, dado el desplazamiento de 4,6 cm arriba y un ancho de canal de 2 metros, la Tabla 2 a continuación muestra el cambio en la dirección de orientación del haz de la banda S en grados ( $\theta$ ) para varias alturas focales que se muestran como 530. La tabla también muestra cuál es el ángulo de alimentación de la banda X en grados ( $\alpha$ ) para estas alturas focales.

El ángulo de alimentación es el ancho del canal, medido como un ángulo, visto desde la ubicación de la alimentación. El sistema funcionará mejor cuando el ancho del haz de la alimentación sea igual al ángulo de alimentación del canal; de lo contrario, el canal está sobreiluminado y desperdicia energía o subiluminado, lo que no utiliza al máximo el canal. Un ancho de haz de 90° es común para alimentaciones disponibles comercialmente. Cambiar la curvatura del canal, del ejemplo de banda X discutido anteriormente, de modo que el ángulo de alimentación sea de 90° da como resultado una altura focal óptima de 1,2 m.

Tabla 2

Altura focal (m) 530	Desplazamiento del haz de la banda S (grados) $\theta$	Ángulo de alimentación de la banda X (grados) $\alpha$
1	2,62	106
1,2	2,18	90
1,25	2,09	87
2	1,31	56
2,5	1,05	45
3	0,87	38

En una configuración alternativa, la antena de banda S se puede desplazar verticalmente de la antena de banda X, que se colocaría en el foco del reflector. La Figura 22 ilustra esta situación. La antena de banda S se coloca en la ubicación 540, mientras que la antena de banda X se coloca en la ubicación 500. El desplazamiento vertical se indica con la flecha 550 y, como antes, la altura focal se indica con 530. Se pueden usar varias reglas para calcular la cantidad de desplazamiento vertical 550. Sin embargo, en una configuración preferida, el desplazamiento vertical se elige de manera que la diferencia de longitud de trayectoria entre el rayo del borde y el rayo del vértice, longitud de trayectoria entre 540 y 550 y de regreso a 560, sea de 90°. Esta condición asegura que el rayo reflejado procedente del borde del reflector y de la posición 560 no interfiera ni constructivamente ni destructivamente. Los rayos que emanan de todos los demás puntos interfieren cada vez más constructivamente.

En otra configuración alternativa más, el sistema 1D se puede hacer en secciones y cada sección puede tener solo un tipo de antena de alimentación. Este es el caso del sistema de comunicaciones 1D que tiene tres secciones, la sección central puede ser la banda X y las dos secciones externas pueden ser la banda S.

En otra configuración, se coloca un subreflector dicróico entre el canal y el foco principal 500 en la Figura 22 a lo largo del segmento de línea que conecta 500 y 550 en la Figura 9B. Una alimentación puede colocarse en el foco principal y la otra alimentación puede colocarse al costado del canal, detrás del canal o entre el canal y el reflector dicróico. Si la segunda alimentación está detrás del canal, entonces se debe formar un orificio en el canal para permitir que la energía de radiofrecuencia pase entre el subreflector y la alimentación. El subreflector dicróico puede estar diseñado para ser transparente a la frecuencia de la primera alimentación, de modo que la primera alimentación vea el canal como si el subreflector no estuviera presente. Además, el subreflector dicróico puede diseñarse para que sea muy reflectante a la frecuencia de la segunda alimentación. El subreflector redirige la energía para enfocarla en un nuevo punto en una ubicación diferente al foco principal del canal. Esto crea dos puntos de enfoque para el sistema, cada uno con una frecuencia y una ubicación distintas, de modo que el rendimiento de ambas alimentaciones pueda optimizarse y no sea necesario ubicar las alimentaciones cerca una de la otra.

Ahora se puede ver que existen varias técnicas que permiten la colocación de diferentes tipos de antena en el mismo reflector. La configuración preferida es usar dos secciones, una sección dedicada al enlace ascendente y la otra sección dedicada al enlace descendente, con todas las alimentaciones ubicadas en las ubicaciones óptimas, los puntos de enfoque. Esto se hace porque el uso de alimentaciones desplazadas puede ser un desafío de diseño muy costoso. La colocación de alimentaciones una al lado de la otra o una detrás de la otra puede provocar un acoplamiento electromagnético y una interferencia de radiofrecuencia, por lo que las señales del sistema de transmisión (enlace ascendente) corrompen el sistema de recepción (enlace descendente). El costo de diseño adicional para las alimentaciones desplazadas suele ser mayor que simplemente construir varios canales.

Dado un conjunto de requisitos para la integridad de la señal para un satélite o un grupo de satélites, se puede adoptar un enfoque consistente para diseñar la longitud y el ancho de la antena de canal. Como ejemplo, dados los requisitos de la calidad del enlace, se puede determinar el área de recolección total del canal. De manera similar, el plano orbital de los satélites puede usarse para determinar el ancho de la antena ya que el ancho determina el ancho del haz de elevación. La elección del ancho y el tamaño del haz de elevación puede ser de manera que el satélite permanezca siempre con el plano de exploración del sistema 1D. Con el ancho y el área de recolección calculados como se describió anteriormente, se puede determinar la longitud del canal.

Los sistemas 1D descritos anteriormente pueden configurarse como parte de un sistema de control de satélites. En una aplicación de este sistema de control, el sistema puede usarse para enviar alertas cuando no se detectan los objetivos esperados. Esto puede suceder, por ejemplo, cuando los satélites se desvían de sus órbitas. En particular, los satélites de baja altitud son más propensos a la deriva debido a la resistencia atmosférica. Cuando se espera un satélite pero no se detecta, se pueden enviar alertas a los operadores. Además, el patrón de exploración del sistema 1D puede modificarse para intentar y encontrar el satélite. Por ejemplo, el campo de visión puede ampliarse a un ángulo mayor para cubrir más área. Además, si el sistema se montó en una plataforma móvil, particularmente si el sistema estaba operando en la banda S, la banda K o la banda X cuando el tamaño del canal sería del orden de unos pocos metros, entonces el 1D el sistema se puede reposicionar de varias maneras para tratar y encontrar el satélite. Además, se debe tener en cuenta que, si bien la discusión anterior se ha dirigido a las matrices en fase 1D, la discusión también se aplica a las matrices en fase 2D.

Se apreciará que las variantes de las características y funciones descritas anteriormente y otras, o alternativas de las mismas, pueden combinarse en muchos otros sistemas o aplicaciones diferentes. Los expertos en la técnica pueden realizar posteriormente diversas alternativas, modificaciones, variaciones o mejoras no previstas o no anticipadas en la actualidad, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

## REIVINDICACIONES

1. Un sistema de antena de matriz en fase, que comprende:  
al menos un reflector de canal (10), cada reflector de canal que tiene:  
5  
al menos una matriz en fase unidimensional 1D ubicada en un punto de alimentación del reflector, la matriz en fase 1D que comprende una matriz de elementos (30) ubicados a lo largo de un eje largo del reflector con una separación igual a la mitad de la longitud de onda de transmisión central;  
un formador de haces multicanal (650) conectado a al menos una porción de la matriz de elementos en  
10 donde el formador de haces multicanal está configurado para producir un haz sumado; y  
caracterizado porque el sistema de antenas de matriz en fase comprende además un digitalizador conectado al formador de haces, en donde el digitalizador está configurado para digitalizar el haz sumado; en donde el sistema de antenas de matriz en fase está configurado para generar haces simultáneos en diferentes direcciones controlando al menos una porción de la matriz de elementos.  
15
2. El sistema de la reivindicación 1, en donde el reflector (10) está hecho de uno o más seleccionados de malla metálica, aluminio, magnesio fundido, espuma metalizada, metal expandido y láminas metalizadas.
3. El sistema de una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, que comprende además una base móvil sobre la que se monta el reflector de canal.  
20
4. El sistema de la reivindicación 3, en donde la base móvil (50) está configurada para proporcionar movimiento al reflector (10) basándose en entradas preprogramadas, calculadas, manuales o de otro tipo.
5. El sistema de la reivindicación 4, en donde el movimiento comprende uno de posición y orientación en el plano XY, rotación sobre el eje Z, inclinación, y rotación del canal sobre el eje X, en donde el reflector del canal está dispuesto en el plano XY con su eje largo a lo largo del eje X.  
25
6. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde al menos un reflector de canal (10) comprende al menos dos reflectores de canal (10), cada uno con al menos una matriz en fase 1D, los reflectores colocados para permitir que los reflectores coordinen la cobertura del cielo  
30
7. El sistema de la reivindicación 6, en donde los reflectores (10) están colocados juntos o en áreas geográficamente separadas.  
35
8. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en donde el sistema incluye al menos un procesador, el procesador configurado para ejecutar código para permitir que el procesador realice un procesamiento coherente en el que los pulsos se combinan en un dominio complejo donde las fases se conservan y aleatorizar los parámetros de transmisión para los pulsos.  
40
9. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde al menos una matriz en fase 1D está configurada para recibir desde y transmitir a múltiples satélites simultáneamente.
10. El sistema de la reivindicación 9, en donde al menos una matriz en fase 1D comprende dos matrices en fase 1D, una primera matriz en fase 1D configurada para transmitir (620) a satélites y una segunda matriz en fase 1D configurada para recibir (670) desde satélites.  
45
11. Los sistemas de la reivindicación 10, en donde la primera y segunda matrices en fase 1D están configuradas para comunicarse con uno de un mismo satélite, dos satélites diferentes o el mismo satélite y satélites diferentes.  
50
12. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en donde al menos una matriz en fase 1D comprende al menos dos matrices en fase 1D que residen en un reflector de canal (10), cada matriz en fase 1D que opera a una frecuencia diferente.  
55
13. El sistema de la reivindicación 12, en donde una matriz en fase 1D opera a una primera frecuencia y está ubicada a una altura focal (530) del reflector (10), y una segunda matriz en fase 1D opera a una segunda frecuencia y está ubicada en un desplazamiento desde la altura focal, en donde la primera frecuencia es más alta que la segunda frecuencia.  
60
14. El sistema de la reivindicación 13, en donde el desplazamiento es uno de un desplazamiento horizontal (520) a aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de la suma de las longitudes de onda correspondientes a la primera frecuencia, y una segunda longitud de onda correspondiente a la segunda frecuencia, y un desplazamiento vertical (550) de manera que las longitudes de trayectoria de un rayo del borde y un rayo del vértice difieren en aproximadamente 90 grados.  
65

15. El sistema de la reivindicación 12, que comprende además un subreflector dicróico colocado entre el reflector de canal (10) y un foco principal (500) del reflector.
- 5 16. El sistema de la reivindicación 15, en donde una matriz en fase 1D se coloca en el foco principal (500) y otra matriz en fase 1D se coloca en un lugar diferente que comprende uno de, el lado del canal, detrás del canal, y entre el canal y el reflector dicróico.
- 10 17. Un método de seguimiento que utiliza el sistema de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, en donde el seguimiento comprende al menos uno de seguimiento de naves espaciales, seguimiento de satélites y seguimiento de desechos espacial.

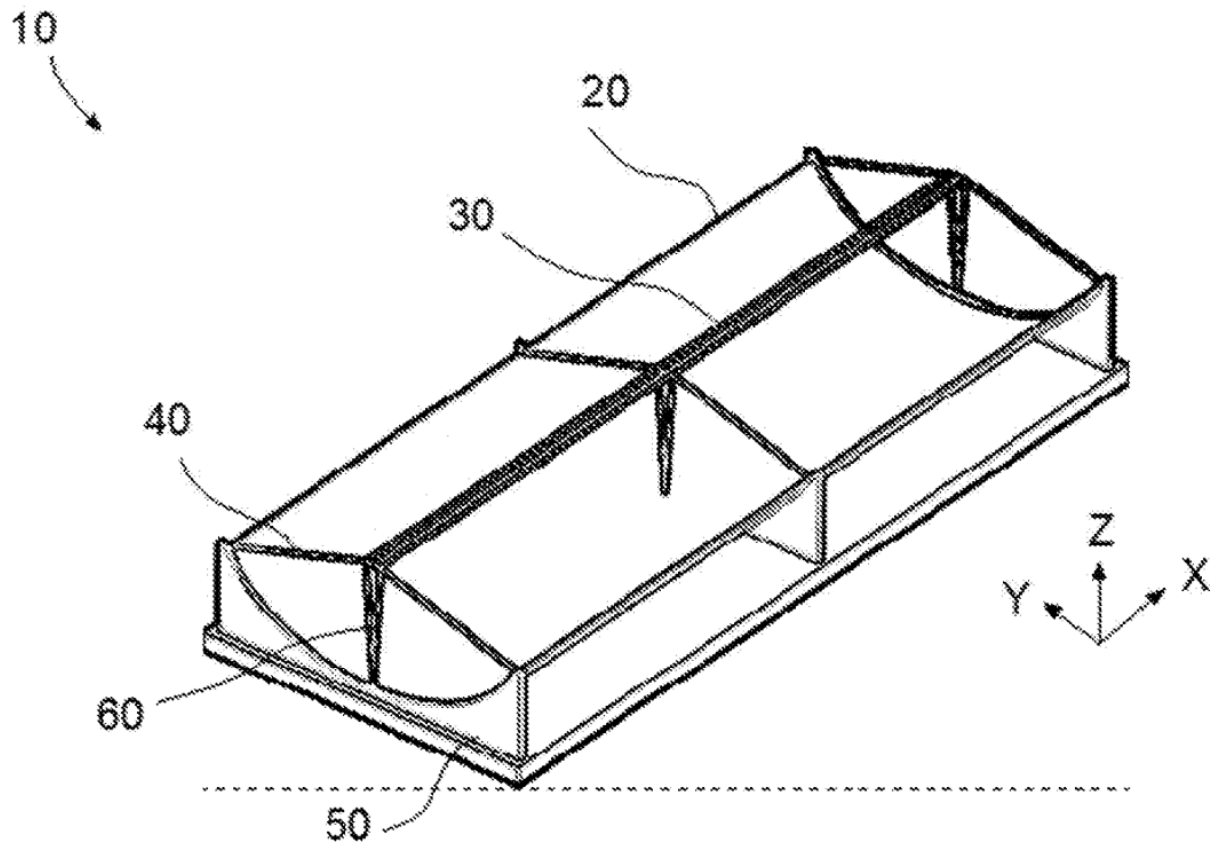


Figura 1

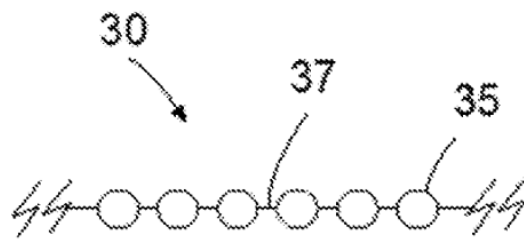


Figura 2

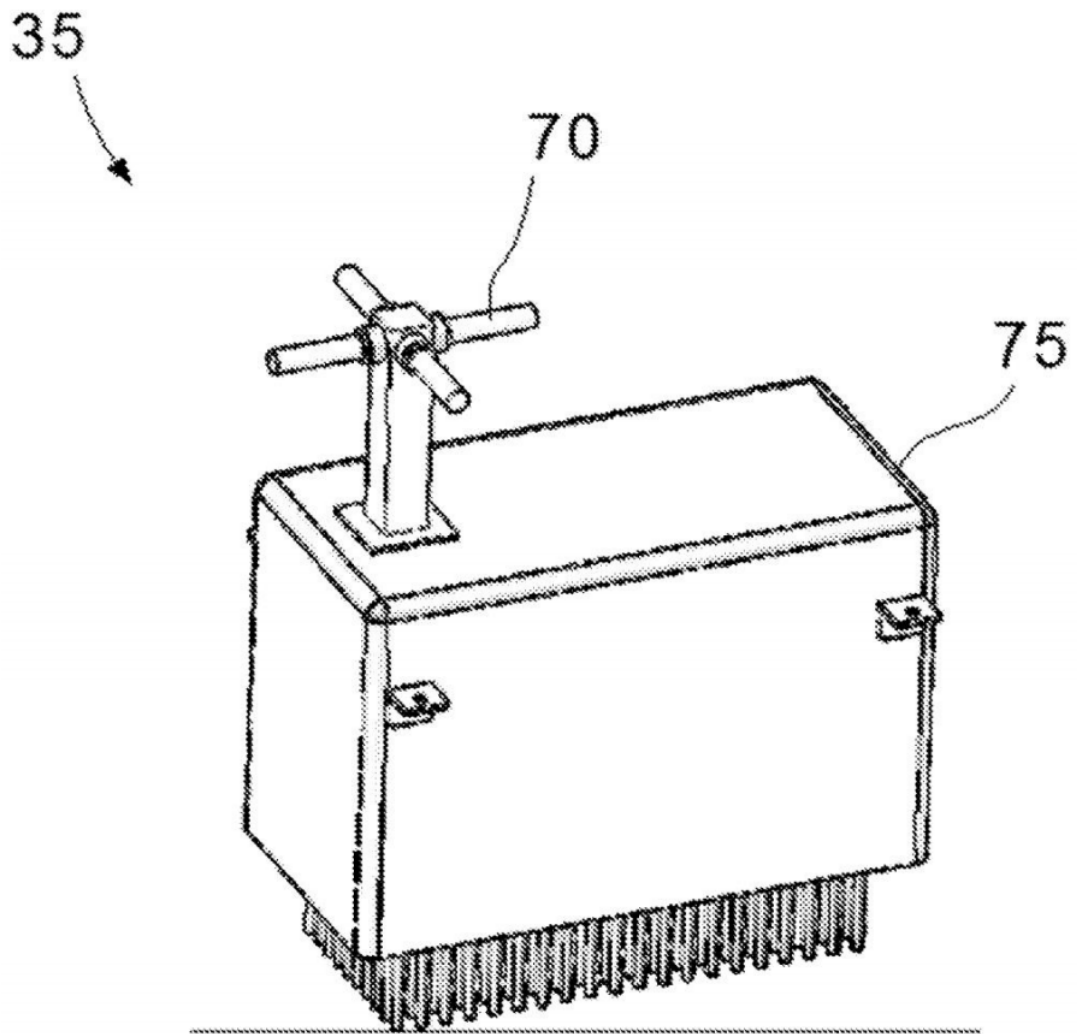


Figura 3

Patrones de radiación de campo lejano del plano XZ LHCP frente al ángulo de dirección (canal de 16 m de ancho, dipolos rectos)

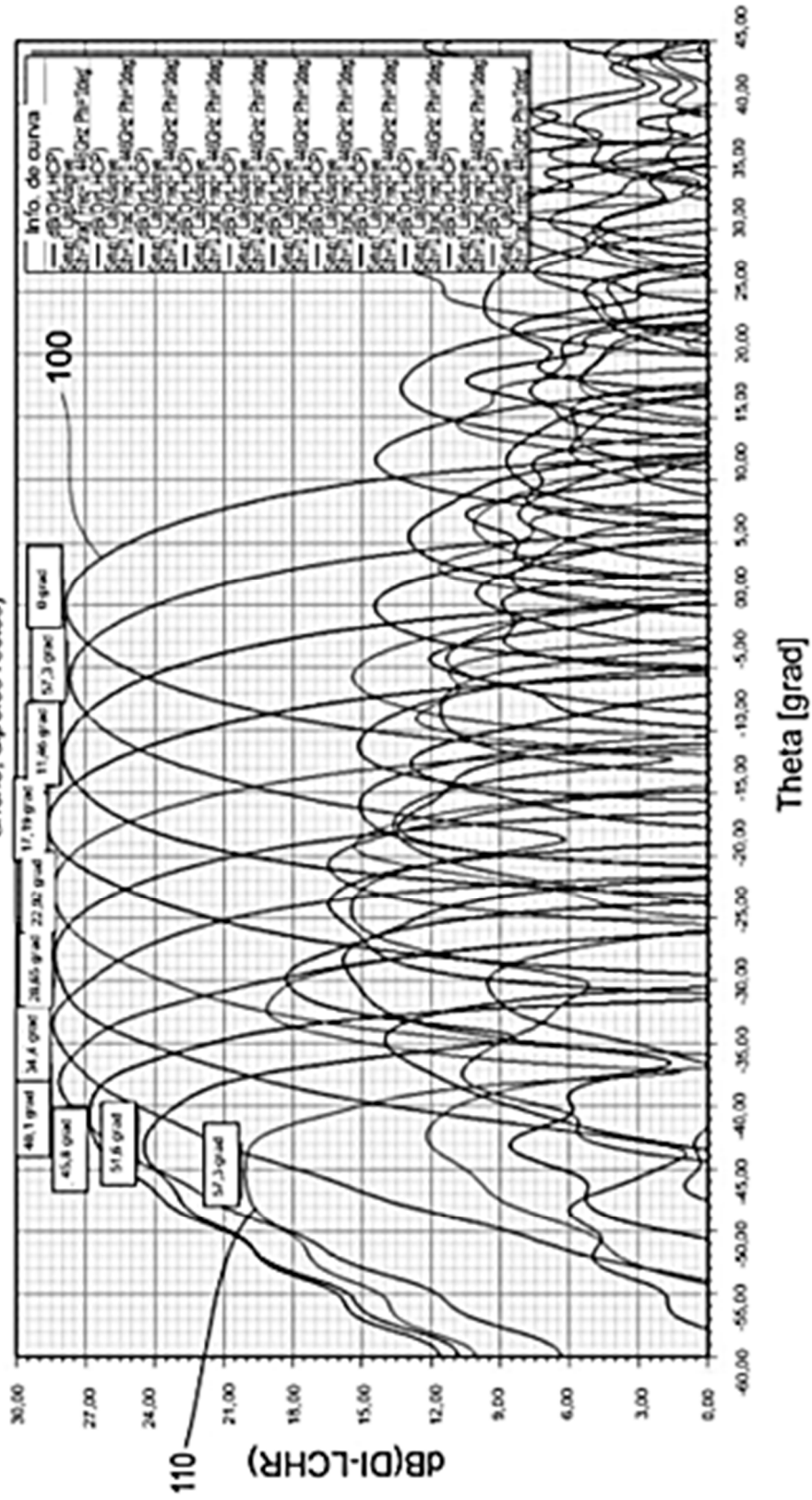


Figura 4

Patrones de radiación de campo lejano del plano XZ LHCP frente al ángulo de dirección (canal de 16 m de ancho, dipolos rectos)

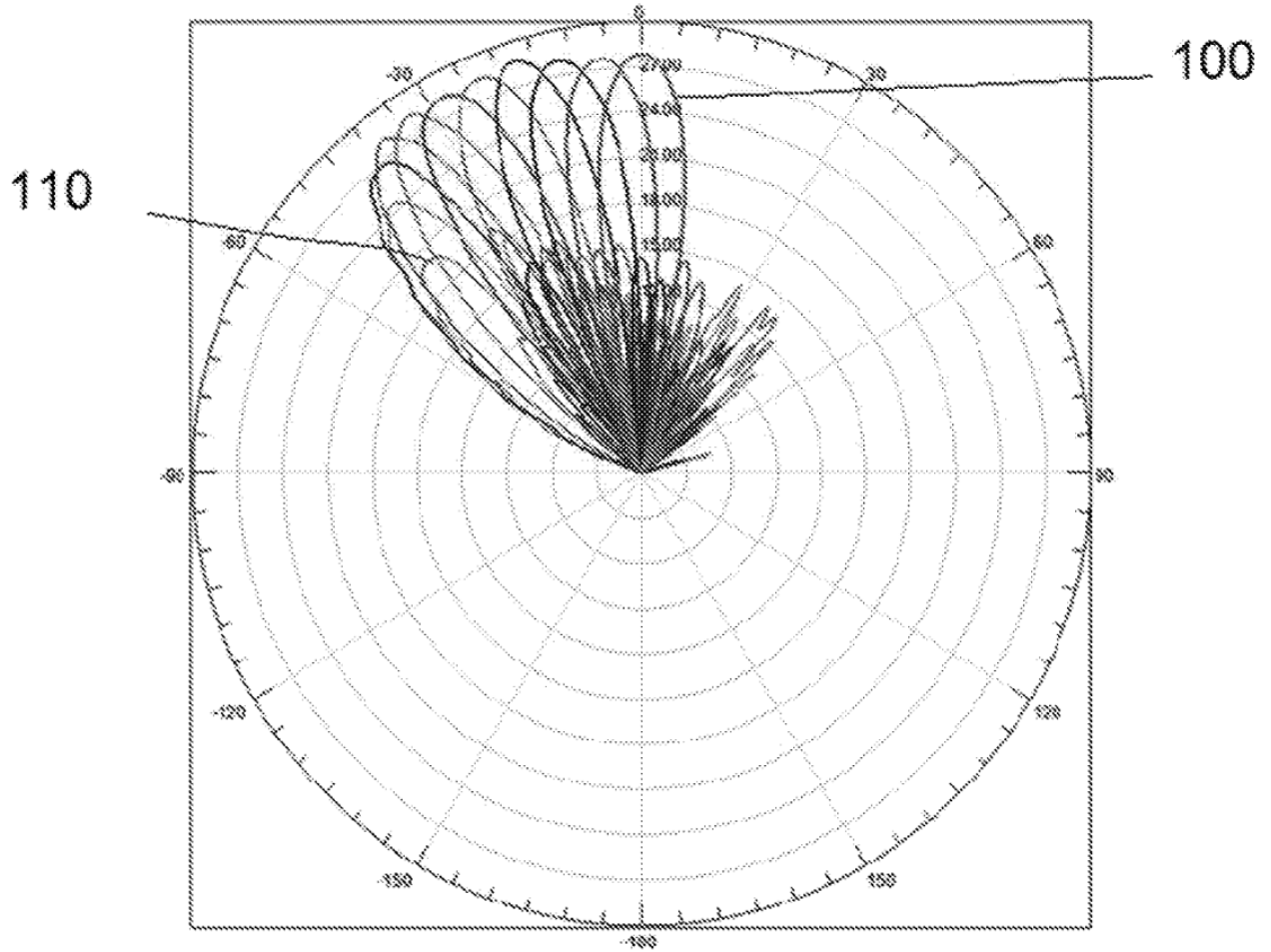


Figura 5

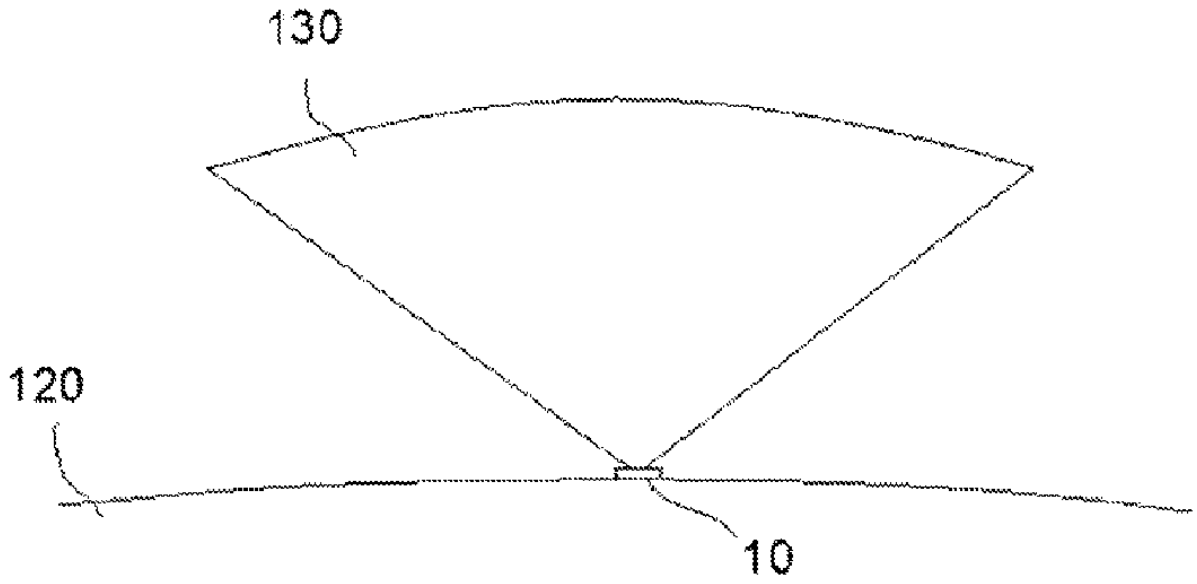


Figura 6

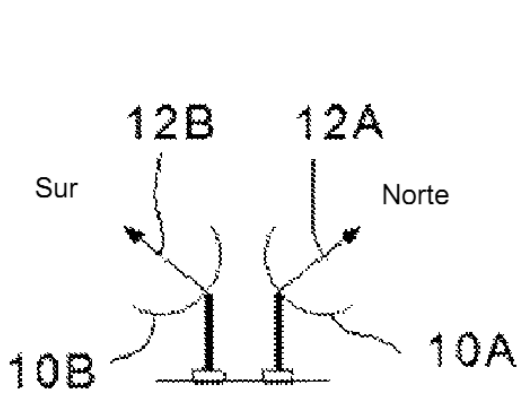


Figura 7

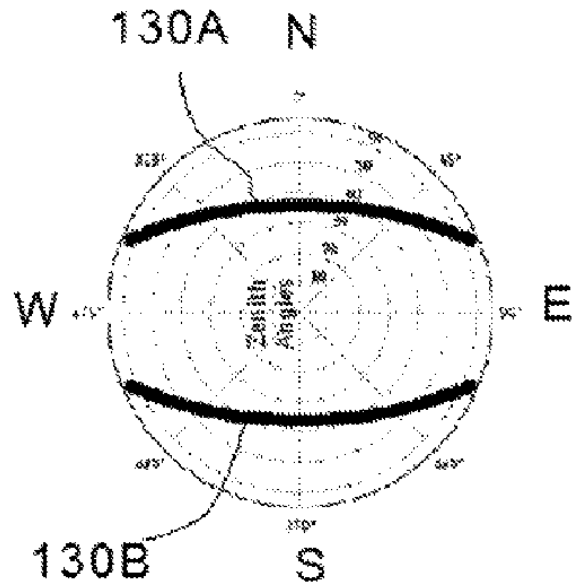


Figura 8

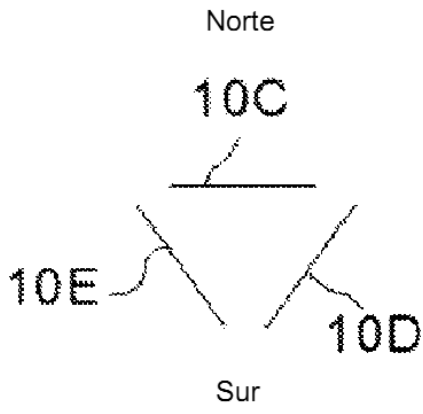


Figura 9

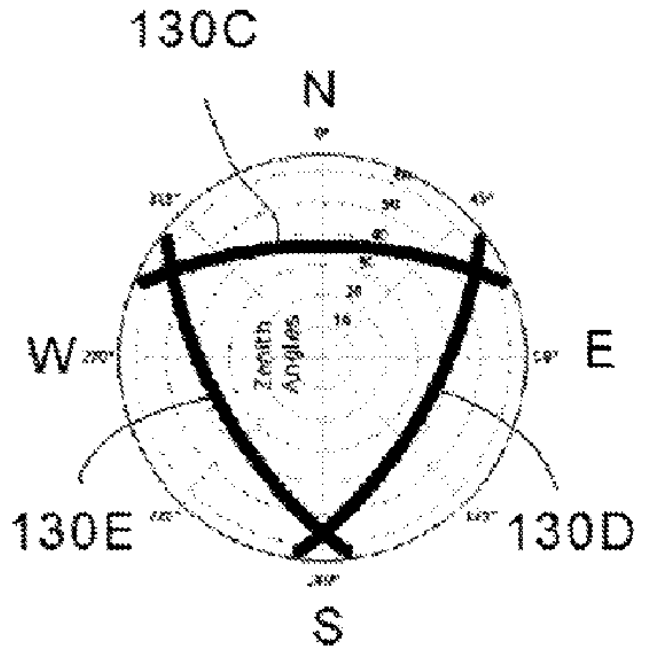


Figura 10

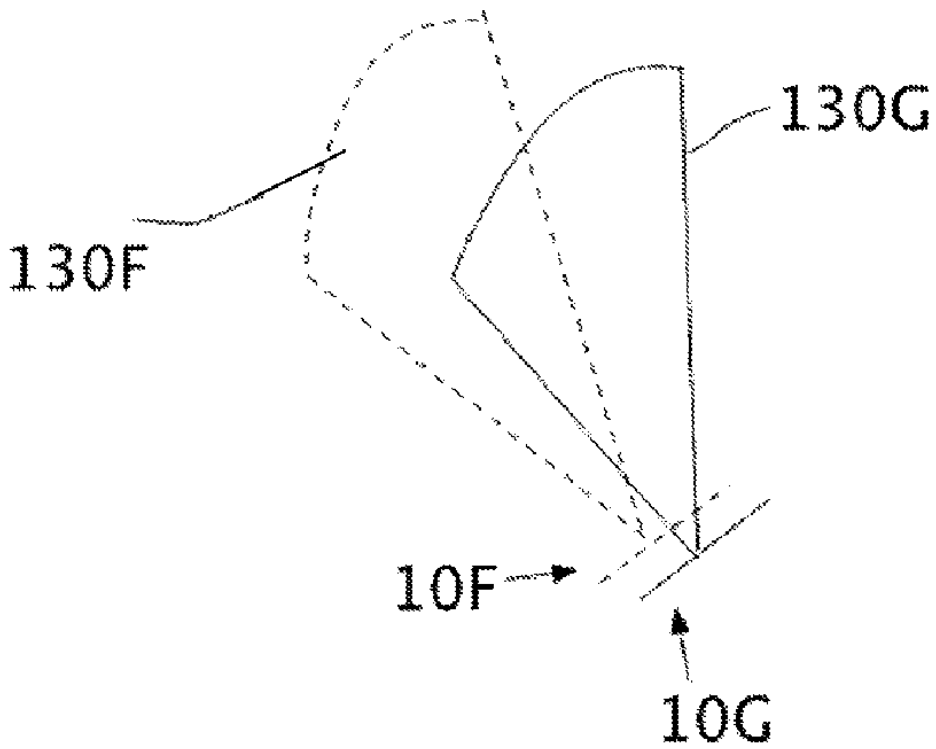


Figura 11

Ganancia en función del diámetro y la longitud del canal

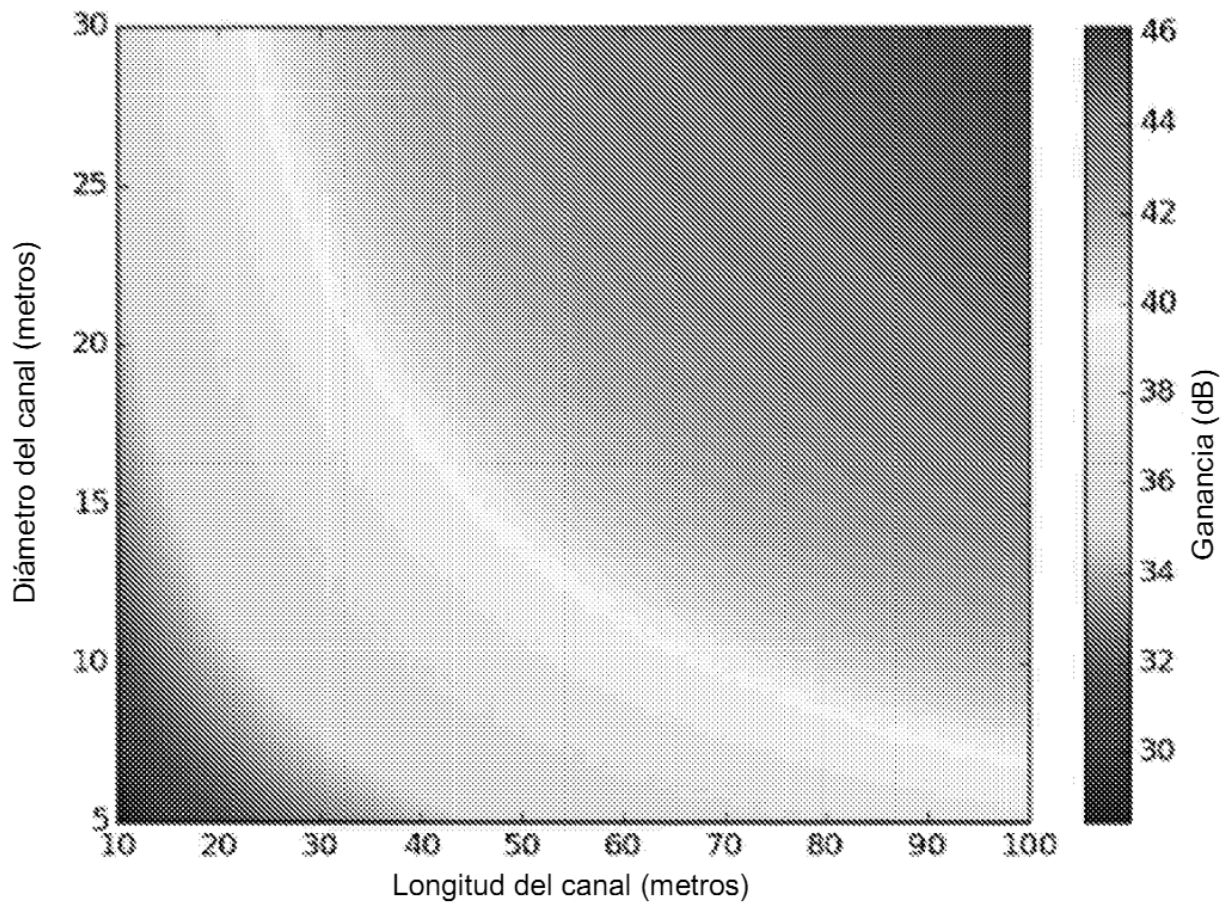


Figura 12

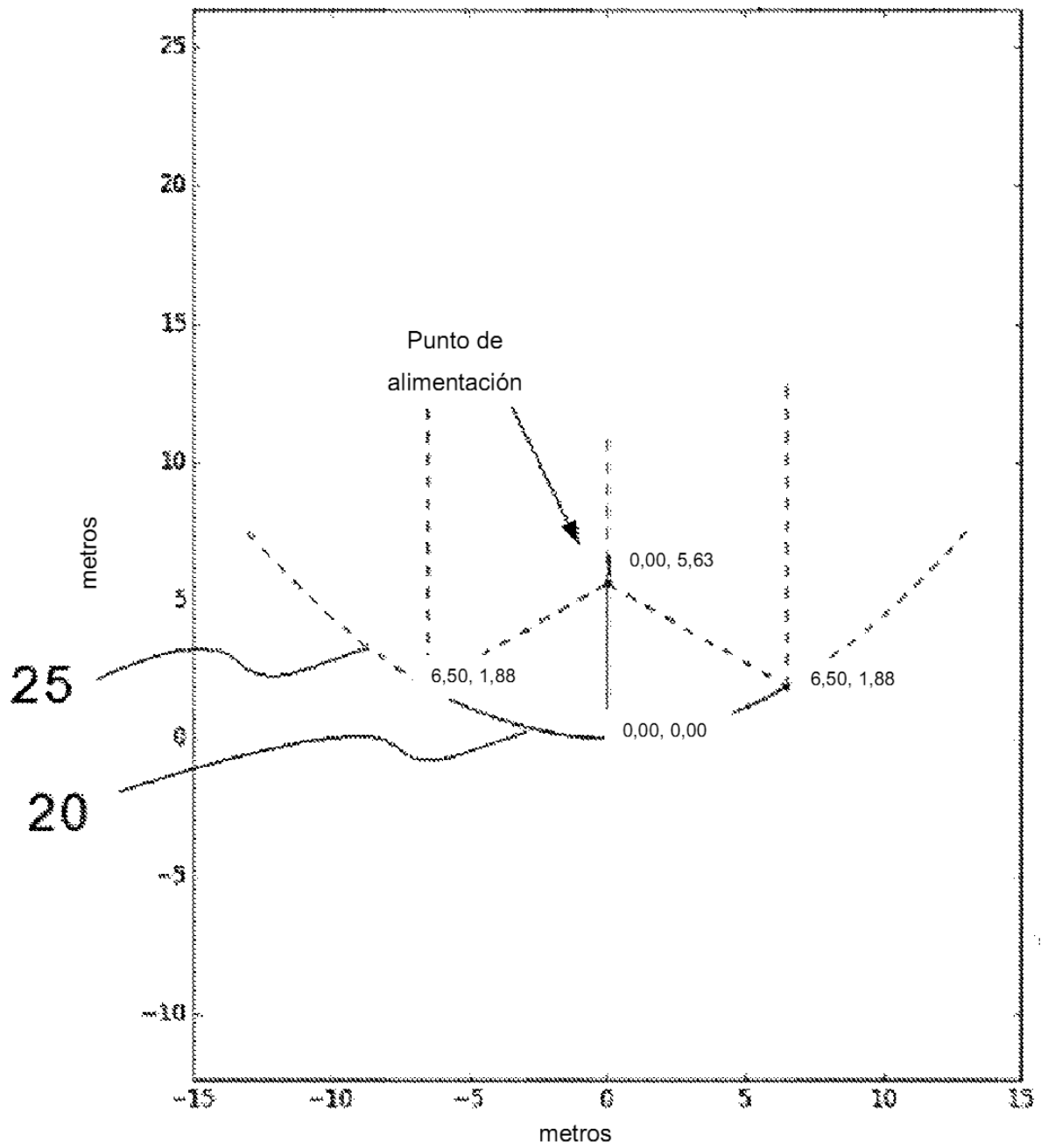


Figura 13

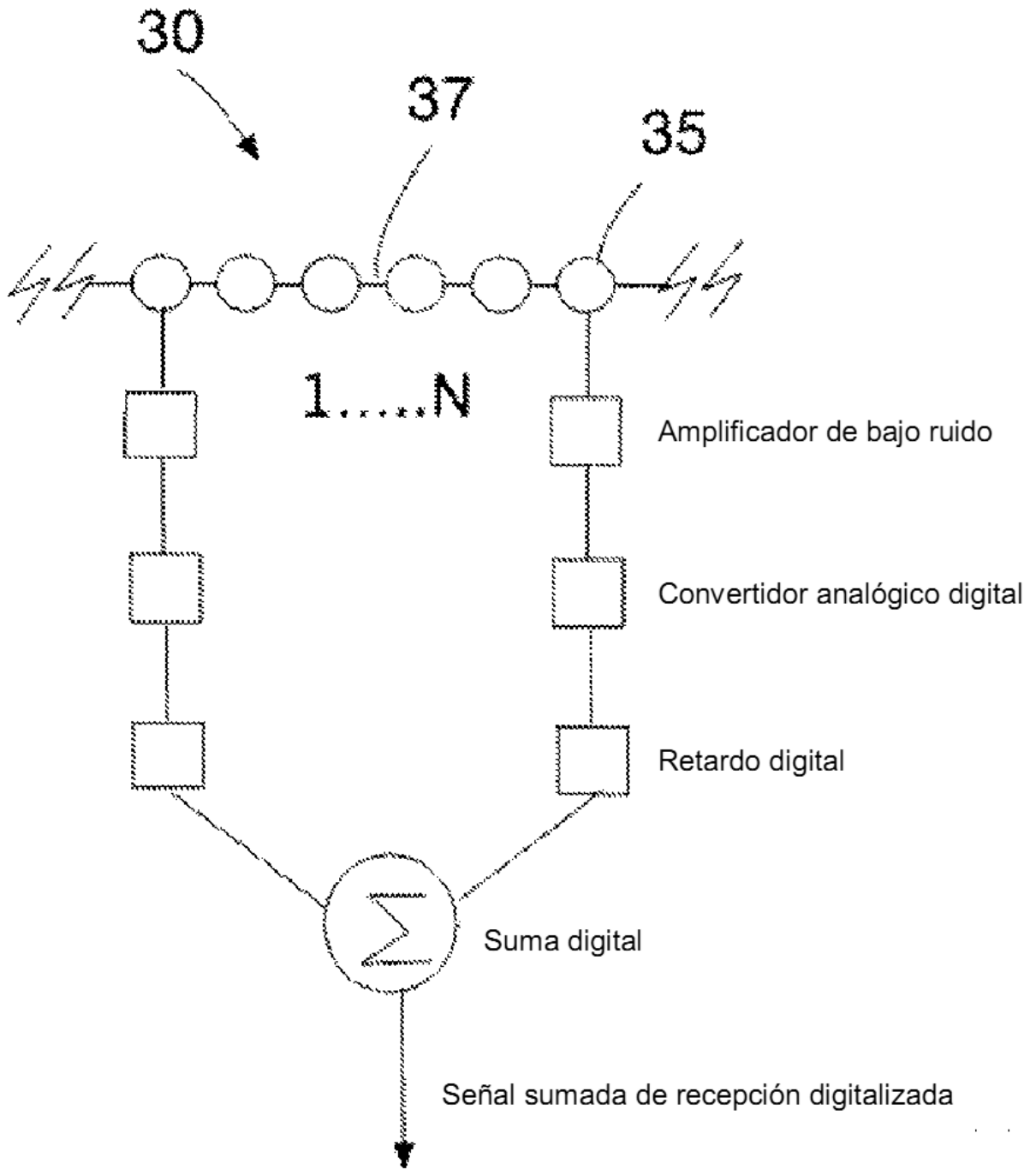


Figura 14

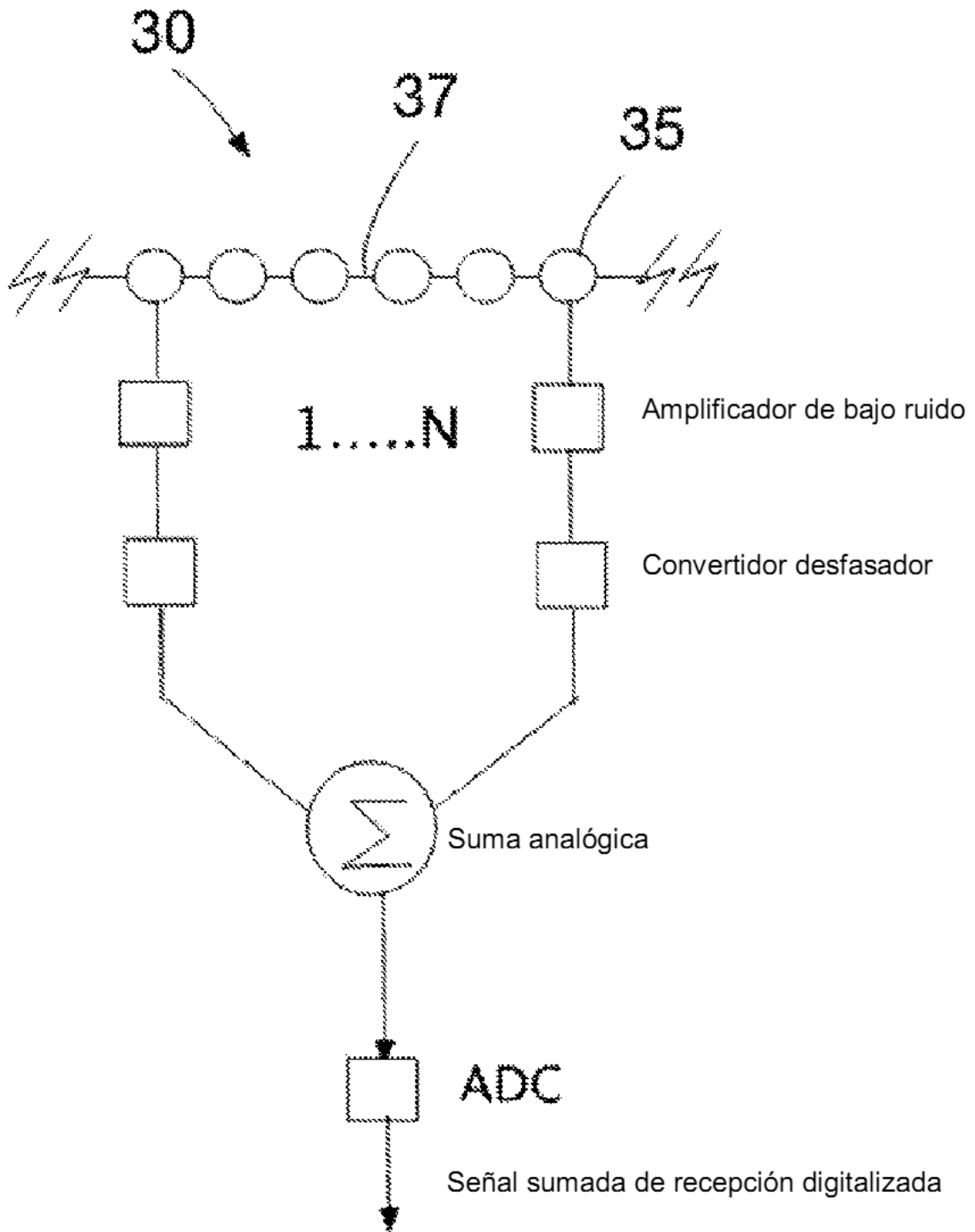


Figura 15

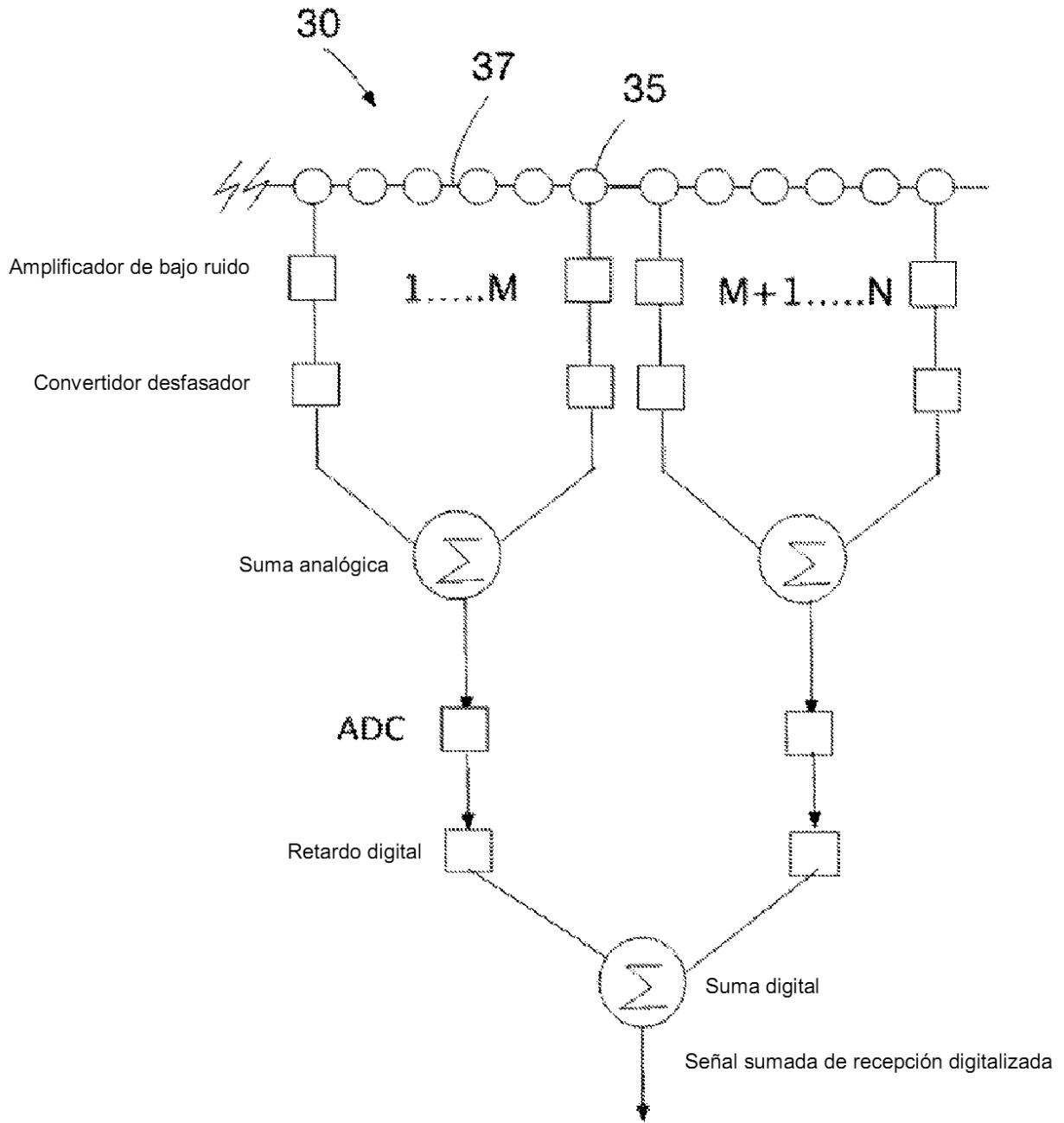


Figura 16

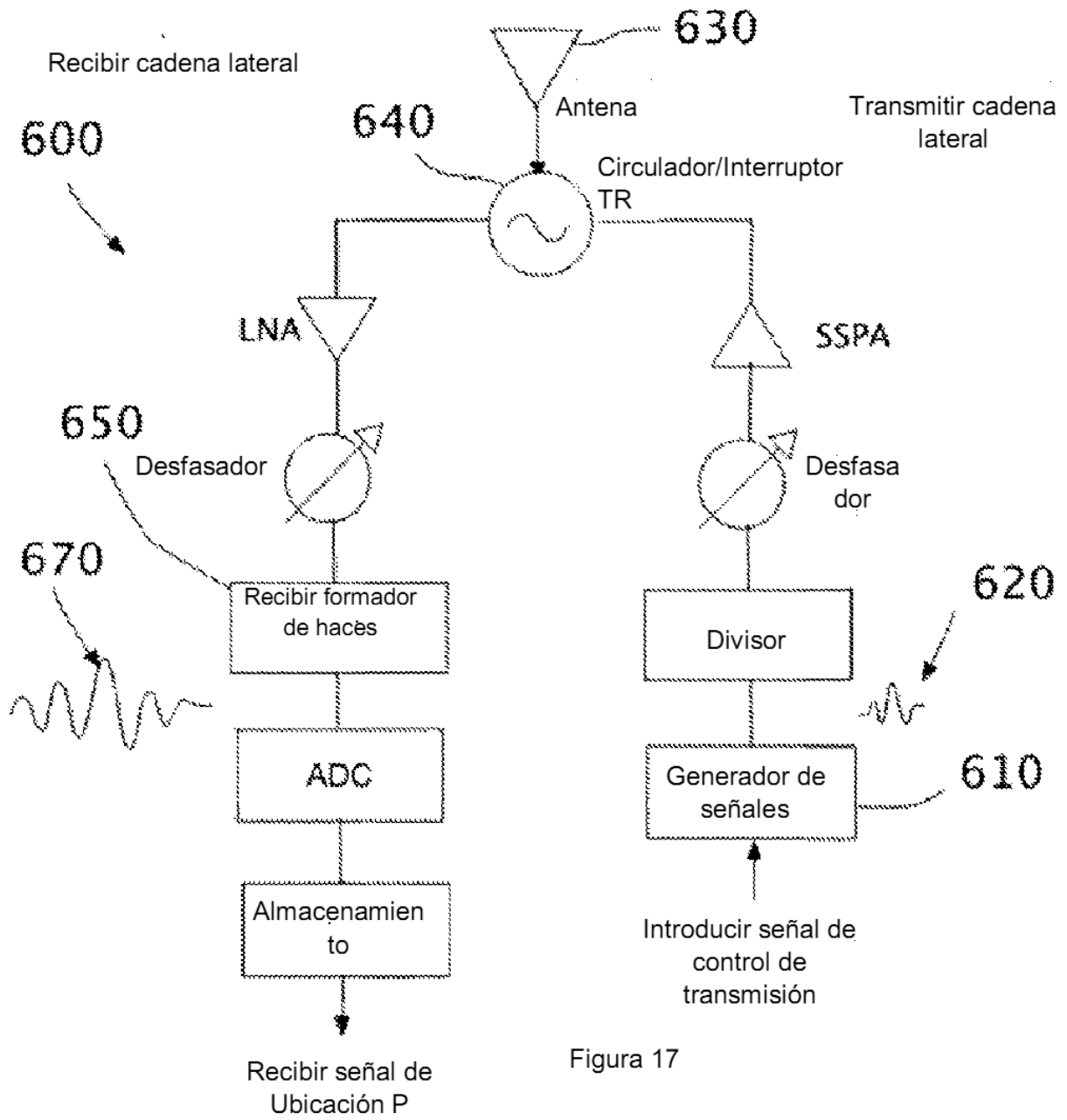


Figura 17



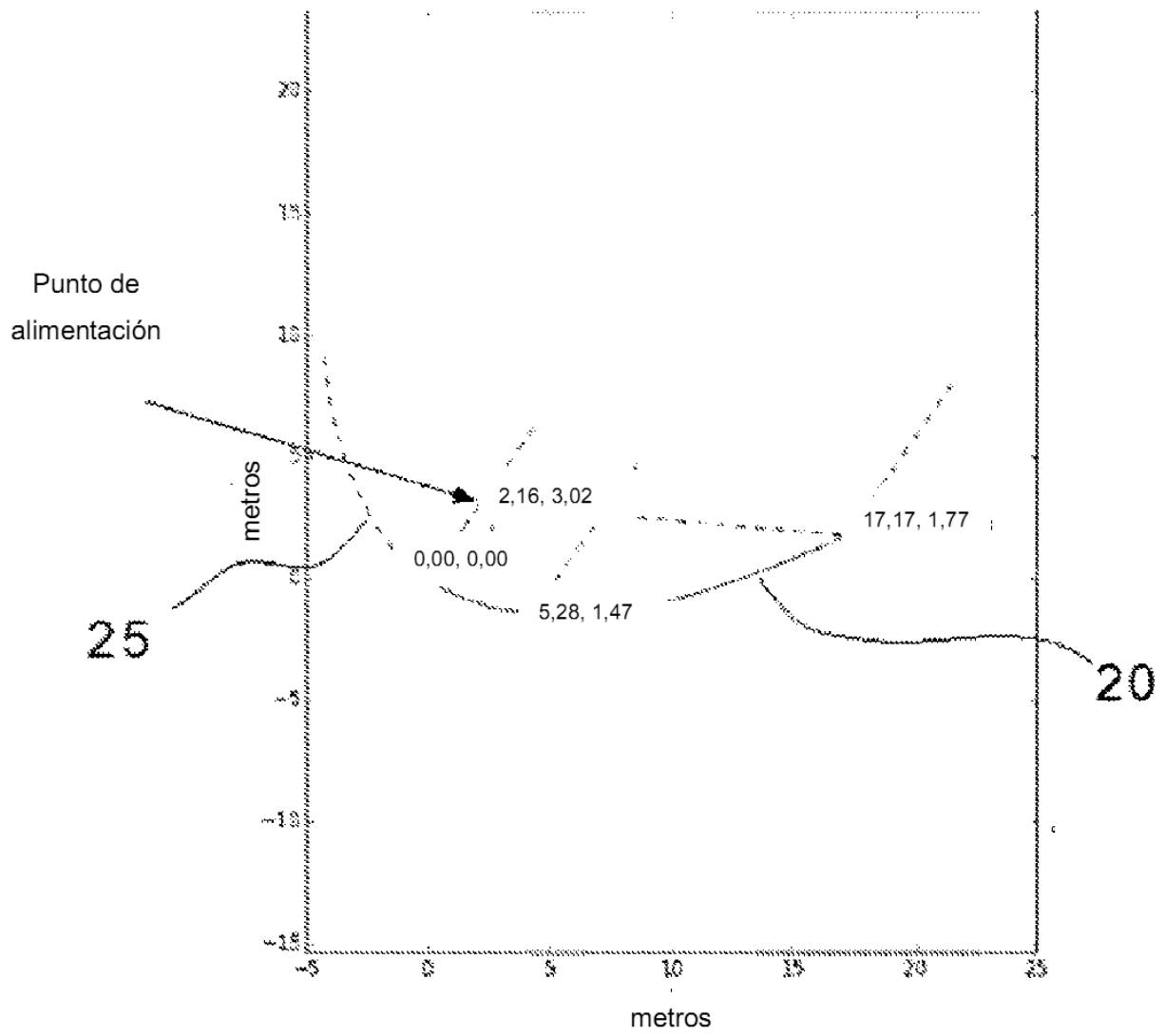


Figura 19

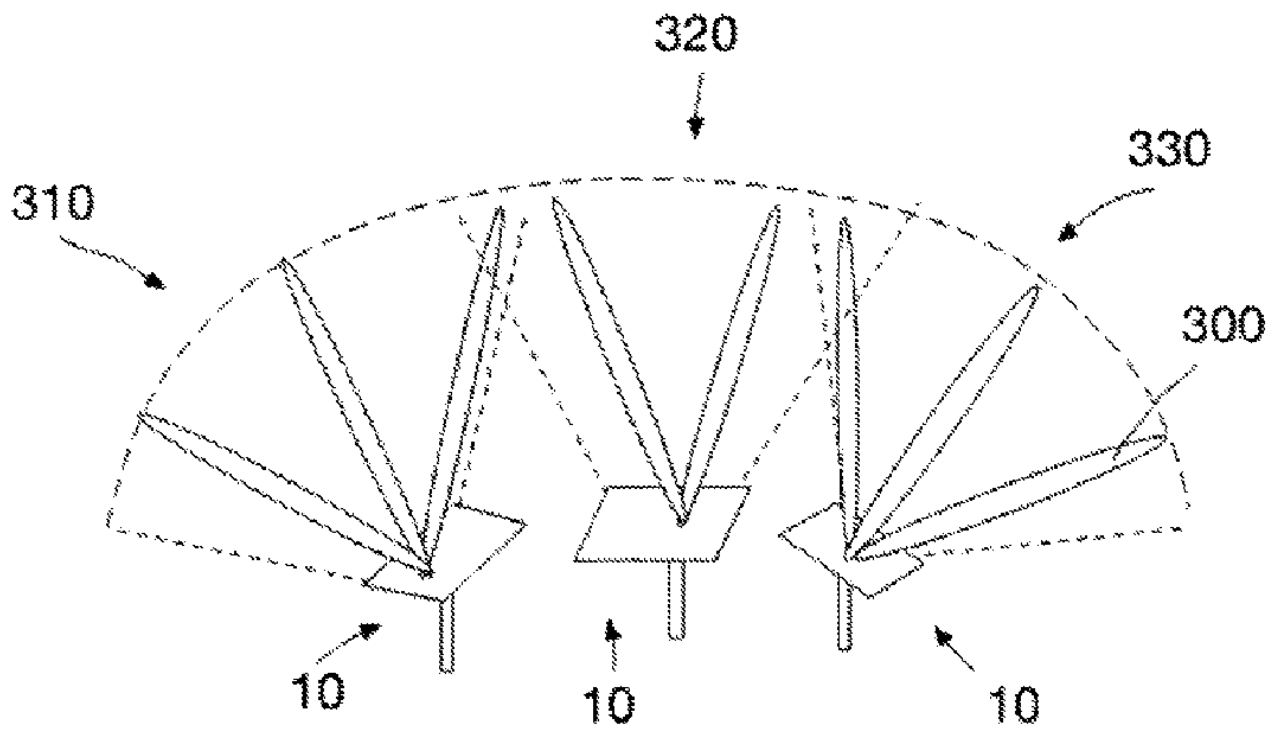


Figura 20

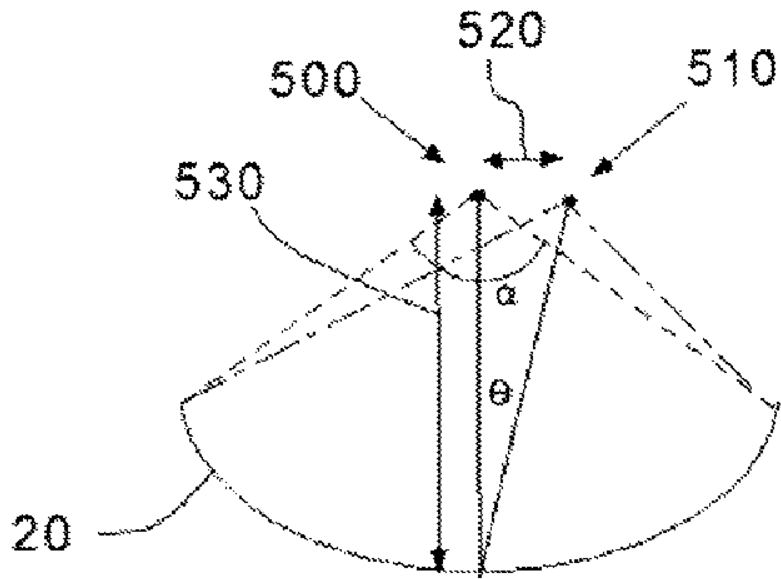


Figura 21

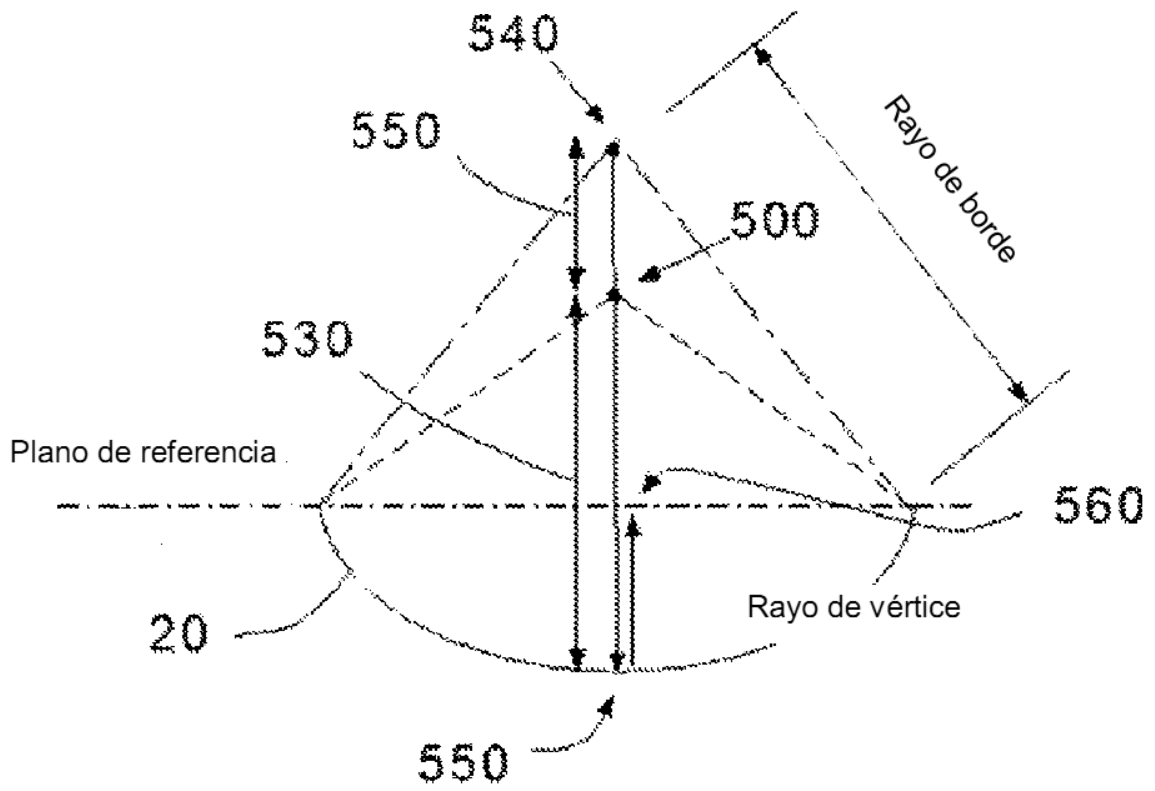


Figura 22