

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 930 193**

51 Int. Cl.:

H04B 7/185 (2006.01)

H01Q 1/00 (2006.01)

H01Q 25/00 (2006.01)

H01Q 3/26 (2006.01)

H01Q 19/17 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.02.2021** **E 21155917 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.08.2022** **EP 3863194**

54 Título: **Antena reflectora multihaz para aplicaciones por satélite**

30 Prioridad:

10.02.2020 IT 202000002563

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

07.12.2022

73 Titular/es:

TELESPAZIO S.P.A. (100.0%)
Via Tiburtina 965
00156 Roma, IT

72 Inventor/es:

SAITTO, ANTONIO y
BRANCATI, MARCO

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 930 193 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 reflectora multihaz para aplicaciones por satélite

5 Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

Esta solicitud de patente reivindica prioridad a la solicitud de patente italiana N.º 102020000002563 presentada el 10 de febrero de 2020.

10 Campo técnico de la invención

La presente invención se refiere, en general, a una antena reflectora multihaz para aplicaciones por satélite. Más específicamente, la presente invención se refiere a una red de alimentación innovadora para antenas reflectoras y a una antena reflectora que explota dicha red de alimentación innovadora.

15 Antecedentes de la técnica

Como se conoce, además de los satélites grandes tradicionales, los desarrollos tecnológicos recientes en el sector del espacio/satélites han conducido a la viabilidad de fabricación de satélites cada vez más pequeños, tales como los denominados microsátélites (a menudo fabricados en forma de CubeSat), nanosatélites, picosatélites, femtosatélites, etc., que son capaces de realizar un número cada vez mayor de funciones (por ejemplo, detección remota, experimentos científicos, prueba en órbita de componentes, etc.), al mismo tiempo que se reducen los tiempos y costes de fabricación. Esta clase de satélites proporciona una serie de ventajas técnicas y no técnicas (por ejemplo, económicas/comerciales) con respecto a satélites más grandes tradicionales y, por lo tanto, se está usando cada vez más para misiones espaciales, en particular para aquellas que tienen un presupuesto de la misión limitado, o para constelaciones de satélites grandes que requieren un enorme número de satélites. Adicionalmente, la viabilidad de fabricar satélites de bajo costo, de pequeña masa y tamaño, posibilita la abertura del mercado del espacio/satélites también a nuevos tipos de operadores de satélite, tales como países, instituciones (por ejemplo, universidades y centros de investigación), industrias y empresas, excluidos tradicionalmente del mismo (por ejemplo, por razones de coste).

En tiempos recientes, se han planeado lanzar varias grandes constelaciones de satélites pequeños con órbita terrestre baja (LEO) (o pequeños satélites) en un futuro cercano para proporcionar cobertura de internet global y acceso a internet de banda ancha de alta velocidad.

En particular, estos pequeños satélites LEO se ubicarán en aproximadamente 1.000/1.200 km de la superficie de la Tierra con una huella muy pequeña, tendrán menores costes de fabricación y lanzamiento que los satélites geoestacionarios (también denominados satélites de órbita ecuatorial geosíncrona (GEO)) y satélites de órbita terrestre media (MEO), se caracterizarán por tiempos de muy baja latencia (en particular, tiempos de latencia que serán menores que satélites geoestacionarios y MEO e incluso que fibra ópticas usadas en la actualidad para comunicaciones terrestres de larga distancia), y necesitarán muchos menos saltos (es decir, menos repetidores/encaminadores).

Sin embargo, esta clase de constelación requiere un gran número (es decir, cientos o incluso miles) de pequeños satélites para proporcionar una cobertura global y acceso a banda ancha de alta velocidad.

Ejemplos de arquitecturas de antena aprovechables para misiones LEO se proporcionan en M. Cooley "Phased Array-Fed Reflector (PAFR) Antenna Architectures for Space-Based Sensors", Conferencia Aeroespacial del IEEE 2015, 7-14 de marzo de 2015, que se refiere a diseños de antena híbrida usando Reflectores con Red de Alimentadores en Fase (PAFR) que proporcionan un equilibrio entre reflectores y Redes en Fase de Radiación Directa (DRA). De hecho, los PAFR proporcionan muchos de los beneficios de rendimiento de las DRA mientras utilizan redes de alimentación mucho más pequeñas y de menor coste. La limitación principal asociada con arquitecturas de PAFR híbridas es el rango de exploración electrónica; aproximadamente +/-5 a +/- 10 grados es típico, pero este rango depende de muchos factores. Para aplicaciones LEO, el campo de visión (FOV) terrestre es aproximadamente +/-55 grados, que está mucho más allá del rango de la exploración electrónica de los PAFR. Sin embargo, para algunas misiones LEO, la exploración limitada es suficiente, o el concepto de operaciones (CONOPS) y diseños de vehículos especiales pueden desarrollarse para incorporar una combinación de rotación mecánica y exploración electrónica.

Con referencia específica al segmento terrestre, las antenas convencionales usadas en la superficie de la Tierra para transmisión/recepción de datos a/desde satélites geoestacionarios son sensibles a la línea de visión (especialmente, en las bandas Ku y Ka); en concreto, dichas antenas pueden operar únicamente apuntando específicamente en la posición de espacio fija en la que se ubica un satélite geoestacionario.

En su lugar, un satélite LEO en movimiento requiere necesariamente terminales terrestres y estaciones terrestres equipadas con antenas orientables que tienen mecanismos de orientación de alto rendimiento.

Hoy en día, los segmentos terrestres se basan habitualmente en el uso de antenas reflectoras que emplean ópticas de un solo reflector o doble reflector junto con alimentadores individuales o redes de alimentación.

Desafortunadamente, las antenas reflectoras empleadas en la actualidad en los segmentos terrestres (en particular, los diseñados para satélites geoestacionarios) no son adecuadas para realizar el seguimiento de satélites LEO.

Un ejemplo de antena de satélite reflectora equipada con una red de alimentación se divulga en el documento US 4.586.051 A, que se refiere a un sistema de compensación de distorsión de reflector para antenas de satélite de múltiples haces.

En particular, el sistema de compensación de distorsión de reflector de acuerdo con el documento US 4.586.051 A comprende:

- un reflector y al menos una red de formación de haces que tiene una disposición simétrica de alimentadores periféricos alrededor de un alimentador central;
- medios para detectar distorsiones en dicho reflector, comprendiendo dichos medios de detección un transmisor remoto que proporciona una señal de transmisión a dichos alimentadores a través de dicho reflector y de tal forma que los rayos de dicha señal de transmisión están sustancialmente paralelos entre sí cuando llegan a dicho reflector, un circuito que tiene una entrada conectada a dicho alimentador central y otra entrada conmutable selectivamente entre al menos dos de dichos alimentadores periféricos para obtener señales de errores lineales y no lineales desde dicho circuito en respuesta a correspondientes distorsiones lineales y no lineales;
- medios para generar señales de corrección de distorsiones lineales y no lineales en respuesta a dichas señales de errores; y
- medios para corregir dichas distorsiones lineales y no lineales de dicho reflector corrigiendo una disposición de dicho reflector y características de dicha red de formación de haces según se requiera. El documento WO2018190794 divulga una antena de satélite que comprende una red de alimentación y que aplica formación de haces.

La materia objeto de la corrección de errores relacionada con la geometría de antena y con distorsiones de antena en antenas reflectoras grandes y antenas de alimentación grandes se analiza también en F. Centureli *et al.*, "Feed Array Metrology and Correction Layer for Large Antenna Systems in ASIC Mixed Signal Technology", Modelado, Ingeniería de Sistemas y Gestión de Proyectos para Astronomía VI, Actas de SPIE, Vol. 9150, 4 de agosto de 2014. En particular, este documento se ocupa de un uso posible de una red de alimentación presente en un sistema de antenas grande como una capa para medir el rendimiento de antena con un procedimiento de autocomprobación y una posible forma para corregir errores residuales de la geometría de antena y de las distorsiones de antena.

Objeto y sumario de la invención

Las constelaciones de pequeños satélites LEO requieren un cambio significativo de la arquitectura de segmento terrestre actual con el riesgo relacionado de perder, debido al segmento terrestre, las ventajas de coste y rendimiento creadas por el segmento espacial.

En esta conexión, cabe observar que, para comunicar en tiempo real y con tasas de bits extremadamente altas a través de satélites LEO, son necesarias cientos de estaciones centrales en tierra, que deberían estar conectadas a través de redes de retorno de fibra óptica a las redes troncales terrestres, y cuya distribución en la superficie de la Tierra, costes de instalación, mantenimiento periódico y protección en términos de seguridad y protección deberían optimizarse.

A partir de lo anterior, es evidente que la reutilización de centros espaciales actualmente disponibles en la superficie de la Tierra podría ser ventajoso, pero esto implicaría la disponibilidad de grandes áreas de instalación y el problema no secundario de autorizaciones/permisos de construcción para construir grandes infraestructuras terrestres (en particular, nuevas antenas grandes) en áreas ya masificadas.

Las antenas grandes (considerando dentro de esta categoría las antenas reflectoras con reflectores que tienen diámetros iguales a o mayores de cinco metros) instaladas en la actualidad en la superficie de la Tierra para la comunicación con satélites geoestacionarios de telecomunicaciones se apuntan sustancialmente siempre a una y la misma posición espacial en la que se ubica un satélite geoestacionario, en donde sus grandes reflectores se mueven habitualmente únicamente unas pocas centésimas de grado al día. Por ende, las antenas muy pesadas y grandes pueden realizar el seguimiento de satélites geoestacionarios de telecomunicaciones con alta precisión realizando únicamente pequeños movimientos alrededor de una posición nominal.

Como se conoce, la situación es completamente diferente para satélites LEO, que se mueven a una velocidad de aproximadamente 26.000 km/h. Esto requiere un rendimiento de apuntado extremadamente alto desde las antenas terrestres.

Adicionalmente, en caso de grandes constelaciones LEO, las antenas terrestres deberían apuntarse a muchos satélites en un tiempo muy pequeño, de modo que la posibilidad de garantizar un rendimiento de apuntado alto para antenas equipadas con mecanismos de apuntado mecánicos es casi impracticable.

5 Por lo tanto, un primer objeto de la presente invención es el de proporcionar una antena para estaciones terrestres de satélites LEO, cuya antena permite superar, al menos en parte, los inconvenientes técnicos anteriores. Más específicamente, el primer objeto de la presente invención es el de proporcionar un rendimiento de apuntado alto, solución de antena de bajo coste para estaciones centrales terrestres para constelaciones de satélites pequeños LEO.

10 Sin embargo, adicionalmente, un segundo objeto de la presente invención es el de proporcionar una solución de antena adecuada también para estaciones terrestres de satélites no LEO, tales como estaciones terrestres de satélites MEO y/o GEO.

Además, un tercer objeto de la presente invención es el de proporcionar una solución de antena eficiente aprovechable también a bordo de satélites (tales como satélites LEO y/o MEO y/o GEO).

Estos y otros objetos se consiguen mediante la presente invención en que se refiere a una red de alimentación y a una antena reflectora, como se define en las reivindicaciones adjuntas.

20 Breve descripción de los dibujos

Para una mejor comprensión de la presente invención, se describirán ahora con referencia a los dibujos adjuntos (no a escala) realizaciones preferidas, que se conciben puramente como ejemplos no limitantes, en los que:

- 25 • La Figura 1 ilustra esquemáticamente la capacidad de una antena de acuerdo con una realización de la presente invención para realizar seguimiento en elevación de varios satélites en diferentes LEO;
- La Figura 2 muestra esquemáticamente una antena de doble reflector basándose en geometría gregoriana;
- La Figura 3 ilustra esquemáticamente una propiedad de antenas reflectoras relacionadas con distribución de campo incidente en el plano focal;
- 30 • La Figura 4 muestra esquemáticamente una antena de doble reflector con una configuración de red de alimentación descentrada;
- La Figura 5 ilustra esquemáticamente una arquitectura funcional de una red de alimentación de acuerdo con una realización preferida de la presente invención;
- Las Figuras 6 y 7 muestran dos geometrías diferentes para una red radiante de la red de alimentación de la Figura 5;
- 35 • Las Figuras 8 y 9 ilustran esquemáticamente dos ejemplos de antena de doble reflector de acuerdo con dos realizaciones ilustrativas de la presente invención;
- Las Figuras 10 y 11 muestran una relación entre distribución de campo lejano y campo eléctrico en el plano focal de una antena reflectora;
- 40 • La Figura 12 ilustra esquemáticamente un procedimiento para calcular una matriz de corrección de errores que hay que usar en la recepción de acuerdo con una realización de la presente invención;
- La Figura 13 muestra un comportamiento de pérdida de ganancia usando una red de alimentación y alimentador convencional para errores de desfocalización;
- La Figura 14 muestra un comportamiento de pérdida de ganancia para errores aleatorios;
- 45 • La Figura 15 muestra una variación de relación señal a ruido debido al número de anillos de Airy incluidos en la operación de una red de alimentación;
- La Figura 16 ilustra esquemáticamente un procedimiento para calcular una matriz relacionada con errores de reflector que hay que usar en la transmisión de acuerdo con una realización de la presente invención;
- La Figura 17 muestra un ejemplo de arquitectura para verificar una antena de acuerdo con una realización ilustrativa de la presente invención;
- 50 • La Figura 18 ilustra esquemáticamente un pequeño satélite LEO equipado con una antena reflectora de acuerdo con una realización ilustrativa de la presente invención;
- La Figura 19 ilustra esquemáticamente una antena de un solo reflector de un satélite radar de apertura sintética (SAR) de acuerdo con una realización ilustrativa de la presente invención; y
- 55 • La Figura 20 muestra patrones de antena de la antena de un solo reflector de la Figura 19 con y sin compensación/corrección de errores.

Descripción detallada de realizaciones preferidas de la invención

60 El siguiente análisis se presenta para habilitar que un experto en la materia realice y use la invención. Serán fácilmente evidentes para los expertos en la materia diversas modificaciones a las realizaciones, sin alejarse del alcance de la presente invención según se reivindica. Por ende, la presente invención no pretende limitarse a las realizaciones mostradas y descritas, sino que se le otorgará el alcance más amplio consistente con los principios y características divulgados en el presente documento y definidos en las reivindicaciones adjuntas.

65

La presente invención se deriva de la idea inteligente del Solicitante de reutilizar las infraestructuras de antenas terrestres existentes (tales como las diseñadas para operar en las bandas C, X o Ku que a menudo tienen poca carga o no se usan más) para crear antenas terrestres de alto rendimiento de apuntado multihaz para satélites LEO, habilitando de este modo una provisión de estaciones centrales terrestres de bajo coste para constelaciones de satélites pequeños LEO. De esta manera, el Solicitante ha concebido una solución de antena innovadora cuyo aprovechamiento es particularmente ventajoso para estaciones terrestres de satélites LEO. Sin embargo, el Solicitante se ha dado cuenta de que, además de dicha aplicación específica (es decir, estaciones terrestres de satélites LEO), dicha solución de antena innovadora puede aprovecharse ventajosamente también:

- para estaciones terrestres de satélites no LEO (tales como estaciones terrestres de satélites MEO y/o GEO); y
- satélites LEO y/o MEO y/o GEO a bordo (por ejemplo, para aplicaciones de telecomunicaciones y/o de radar de apertura sintética (SAR)).

Con respecto a infraestructuras de antenas terrestres existentes, la presente invención implican un número relativamente pequeño de modificaciones únicamente en la sección de alimentador de las antenas, sin ninguna necesidad de rediseñar la óptica y mecánica de reflector de las antenas reflectoras grandes existentes.

La sección de alimentador innovador de acuerdo con la presente invención tiene las siguientes tres características:

- disponibilidad de múltiples haces tanto para la transmisión como la recepción a los que apuntar, y seguir más satélites simultáneamente;
- capacidad para corregir errores relacionados con la óptica de reflector; y
- posibilidad de comprobar el rendimiento de antena de una sola vez habilitando de este modo un mantenimiento predictivo.

En particular, un primer aspecto de la presente invención se refiere una red de alimentación para antenas reflectoras, cuya red de alimentación se diseña para instalarse en una antena reflectora provista con una óptica de un solo reflector o doble reflector, e incluye:

- una red radiante dispuesta en una región focal de la óptica de un solo reflector/doble reflector y operable para transmitir y recibir señales de radiofrecuencia (RF) (preferentemente, señales de microondas);
- medios de formación de haces digitales;
- medios de conversión de recepción (RX) conectados entre la red radiante y los medios de formación de haces digitales y diseñados para
 - aplicar una conversión descendente de frecuencia y una conversión de analógico a digital (y, convenientemente, también una amplificación de ruido bajo) a señales de RF entrantes recibidas por la red radiante obteniendo de este modo señales digitales entrantes, y
 - proporcionar a los medios de formación de haces digitales las señales digitales entrantes; y
- medios de conversión de transmisión (TX) conectados entre la red radiante y los medios de formación de haces digitales y diseñados para
 - aplicar una conversión digital a analógico y una conversión ascendente de frecuencia (y, convenientemente, también una amplificación de potencia alta) a señales digitales salientes generadas mediante los medios de formación de haces digitales obteniendo de este modo señales de RF salientes, y
 - proporcionar a la red radiante las señales de RF salientes que hay que transmitir mediante dicha red radiante.

Los medios de formación de haces digitales están configurados para:

- procesar las señales digitales entrantes usando una matriz de recepción definida basándose en
 - una primera matriz para apuntado de haz en la recepción y
 - una segunda matriz para compensar errores en la recepción debido a la óptica de un solo reflector/doble reflector; y
- generar las señales digitales salientes usando una matriz de transmisión definida basándose en
 - una tercera matriz para apuntado de haz en la transmisión y
 - una cuarta matriz relacionada con errores en la transmisión debido a la óptica de un solo reflector/doble reflector.

En particular, dicha segunda y cuarta matrices se calculan basándose en valores de campo eléctrico medidos mediante la red radiante en la región focal.

Preferentemente, la segunda matriz se calcula para compensar errores en la recepción debido a la óptica de un solo reflector/doble reflector y también para aplicar una primera función de estrechamiento de borde que hay que usar en la recepción. De manera similar, la cuarta matriz se diseña preferentemente para tener en cuenta errores en la transmisión debido a la óptica de un solo reflector/doble reflector y también para aplicar una segunda función de estrechamiento de borde que hay que usar en la transmisión.

Convenientemente, la red de alimentación está configurada para calcular la segunda matriz:

- midiendo valores complejos de campo eléctrico en la región focal por medio de la red radiante;
- calculando fases de campo conjugado complejo basándose en los valores complejos medidos del campo eléctrico en la región focal; y
- calculando la segunda matriz basándose en las fases de campo conjugado complejo calculadas.

De nuevo convenientemente, la red de alimentación está configurada para calcular la cuarta matriz:

- estimando desplazamientos de fase relacionados con distorsiones de la óptica de un solo reflector/doble reflector sobre la base de los valores complejos medidos del campo eléctrico en la región focal; y
- calculando la cuarta matriz basándose en los desplazamientos de fase estimados.

Más convenientemente, la red radiante incluye una pluralidad de elementos radiantes operables tanto en la recepción como la transmisión; en donde para cada elemento radiante:

- la primera matriz incluye un correspondiente coeficiente de apuntado de haz de recepción que hay que aplicar a una señal digital entrante procedente de dicho elemento radiante;
- la segunda matriz incluye un correspondiente coeficiente de corrección de errores de reflector que hay que aplicar a la señal digital entrante procedente de dicho elemento radiante;
- la matriz de recepción incluye un correspondiente coeficiente de ponderación de recepción que hay que aplicar a la señal digital entrante procedente de dicho elemento radiante, en donde dicho correspondiente coeficiente de ponderación de recepción se define basándose en dichos correspondientes coeficientes de apuntado de haz de recepción y de corrección de errores de reflector;
- los medios de formación de haces digitales están configurados para procesar la señal digital entrante procedente de dicho elemento radiante aplicando el correspondiente coeficiente de ponderación de recepción a la misma;
- la tercera matriz incluye un correspondiente coeficiente de apuntado de haz de transmisión que hay que aplicar a una señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho elemento radiante;
- la cuarta matriz incluye un correspondiente coeficiente relacionado con errores de reflector que hay que aplicar a la señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho elemento radiante;
- la matriz de transmisión incluye un correspondiente coeficiente de ponderación de transmisión que hay que aplicar a la señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho elemento radiante, en donde dicho correspondiente coeficiente de ponderación de transmisión se define basándose en dichos correspondientes coeficientes de apuntado de haz de transmisión y relacionados con errores de reflector; y
- los medios de formación de haces digitales están configurados para generar la señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho elemento radiante aplicando el correspondiente coeficiente de ponderación de transmisión.

Además, un segundo aspecto de la presente invención se refiere una antena reflectora, que está configurada para instalarse en una estación terrestre para satélites (por ejemplo, satélites LEO y/o MEO y/o GEO) o a bordo de un satélite (por ejemplo, un satélite LEO/MEO/GEO para aplicaciones de telecomunicaciones o SAR), cuya antena reflectora está:

- provista con una óptica de un solo reflector o doble reflector; y
- equipada con la red de alimentación de acuerdo con el primer aspecto de la presente invención.

Para una mejor comprensión de la presente invención, varios aspectos y realizaciones preferidas de la misma se describirán en detalle en los siguientes párrafos. En esta conexión, cabe observar que, únicamente en aras de la simplicidad de descripción y, por lo tanto, sin pérdida de generalidad, a continuación en el presente documento la presente invención se describirá en detalle con referencia específica a estaciones terrestres para satélites LEO, quedando claro que la presente invención puede aprovecharse ventajosamente, con las modificaciones pertinentes (más específicamente, sin ninguna modificación sustancial), también para estaciones terrestres de satélites MEO y/o GEO y a bordo de satélites LEO/MEO/GEO (por ejemplo, para aplicaciones de telecomunicaciones o SAR).

1. Seguimiento de satélites LEO mediante antenas grandes

Como se ha explicado anteriormente, el seguimiento en tierra de satélites LEO es una tarea muy compleja debido a la dinámica de tales satélites que requiere seguimiento de una alta demanda de los mecanismos de apuntado de antena (en particular, un rendimiento de apuntado de más alta demanda que los satélites geoestacionarios, con velocidades de rotación de antena incluso mil veces mayor que las del caso geoestacionario).

En esta conexión, el Solicitante ha tenido la idea de usar una antena reflectora equipada con una red de alimentación equipada con una o más redes de formación de haces digitales para aprovechar velocidad de apuntado rápido de haces orientados electrónicamente, mientras aún se usa también un mecanismo de apuntado mecánico lento.

5 En particular, la idea del Solicitante es la de usar un apuntado lento y aproximado (convenientemente, en elevación) basándose en un mecanismo mecánico junto con un apuntado preciso y extremadamente rápido (convenientemente, en acimut y elevación) basándose en un mecanismo electrónico.

10 Más específicamente, la antena puede apuntarse convenientemente a posiciones intermedias mediante el mecanismo mecánico, y puede realizar seguimiento convenientemente a varios satélites orientando electrónicamente varios haces alrededor de estas posiciones intermedias (dejando de este modo al mecanismo electrónico un cono angular de orientación reducido compatible con rangos de exploración electrónica típicos, por ejemplo, +/- 10 grados en elevación). De esta manera, una única antena es capaz de apuntar a varios satélites LEO de la misma constelación
15 usando diferentes haces obtenidos por medio de una o más redes de formación de haces digitales.

En esta conexión, la Figura 1 ilustra esquemáticamente la capacidad de una antena de acuerdo con una realización de la presente invención para realizar seguimiento en elevación de varios satélites en diferentes LEO usando un apuntado mecánico lento (es decir, una clase de "desviación de apuntado" obtenida mecánicamente) junto con un apuntado
20 multihaz electrónico realizado alrededor de direcciones de apuntado "intermedias" obtenidas a través de dicho apuntado mecánico lento.

En cuanto al apuntado en acimut, cabe observar que no existe dificultad en cambiar electrónicamente el ángulo de apuntado de acimut incluso en 180 grados alrededor del eje de apuntado.

25 Como se ha explicado anteriormente, la presente invención proporciona el uso de una antena reflectora equipada con una red de alimentación, mientras que el uso de una DRA (es decir, una red en fase de radiación directa) representa una solución muy poco práctica (o, al menos, una solución extremadamente problemática) por diversas razones, tales como la necesidad de un número extremadamente alto de elementos radiantes (junto con los costes asociados) y las
30 dificultades de apuntar mecánicamente estructuras planas grandes y pesadas y de comprobar periódicamente el rendimiento de la configuración.

2. Red de alimentación

35 Habitualmente, una antena grande está provista de una óptica de doble reflector basándose en geometría de Cassegrain o gregoriana.

Ambas de estas geometrías permiten disponer el sistema de alimentación cerca del vértice paraboloide o cerca del centro del pedestal mecánico de antena, para reducir pérdidas eléctricas y simplificar el diseño mecánico y el
40 mantenimiento de antena.

En esta conexión, la Figura 2 muestra esquemáticamente una antena grande 1 típica para la comunicación con satélites geoestacionarios, que está equipada con una óptica de doble reflector gregoriana que incluye un reflector principal 11 y un subreflector 12, y con una red de alimentación 13 dispuesta en la región focal de la óptica de doble
45 reflector gregoriana.

Las ópticas de reflector grandes se comportan, con una buena aproximación, como un operador lineal, que realiza una transformada de Fourier inversa bidimensional de la distribución de densidad de campo eléctrico generada en la abertura por el alimentador o por la red de alimentación. De manera similar, los reflectores se comportan también como
50 un operador lineal que transforma la distribución de intensidad de campo eléctrico incidente producida por una onda plana incidente en un patrón de interferencia en el plano focal, cuyo patrón de interferencia es, en una primera aproximación, la transformada de Fourier bidimensional de la distribución de campo eléctrico, representando de este modo una imagen en el plano focal del patrón de radiación de campo lejano. Esta propiedad se representa esquemáticamente en la Figura 3 con referencia a la antena grande 1.

55 La propiedad del reflector de producir, en el plano focal, una imagen del campo eléctrico radiado de campo lejano se descubrió originalmente, en la óptica, por George Airy en el siglo diecinueve y se denomina patrón de difracción.

En vista de lo anterior, una red de alimentación dispuesta en el plano focal puede considerarse ventajosamente como
60 una forma de muestrear espacialmente el patrón de difracción.

Por ende, en cuanto a una operación de TX, una red de alimentación puede considerarse ventajosamente como un generador de un campo eléctrico muestreado en el plano focal para obtener la distribución de densidad de campo en la
65 abertura; en su lugar, en cuanto a una operación de RX, una red de alimentación puede considerarse ventajosamente como un muestreador de la densidad de campo eléctrico producida en el plano focal por una onda plana.

Más en detalle, en la recepción, una red de alimentación opera como un muestreador espacial del patrón de difracción en el plano focal es decir, con buena aproximación, una transformada de Fourier del campo eléctrico producido por la onda plana en la abertura. La densidad de campo eléctrico en el plano focal incluye aberraciones del proceso de integración: las que producen el campo difractado (equivalente a aberración de difracción de una lente) y las que dependen de errores relacionados con el reflector (principal) (es decir, errores debido a su montaje y posicionamiento).

Como se ha explicado anteriormente, la solución de antena adoptada por la presente invención se denomina antena híbrida de Reflectores con Red de Alimentadores en Fase (PAFR), y la limitación principal asociada con dicha arquitectura es rango de exploración electrónica, aproximadamente ± 10 grados. Por lo tanto, usando antenas híbridas PAFR para aplicaciones LEO, la solución de seguimiento también es híbrida, realizando un seguimiento rápido basado en electrónica junto con un seguimiento más lento basándose en rotaciones mecánicas. Esta solución es aplicable para constelaciones LEO para las que la antena tiene un ángulo de búsqueda muy limitado, conociéndose todos los parámetros de constelación espaciales.

Por ejemplo, si la separación angular entre dos puntos adyacentes es de aproximadamente diez grados a lo largo de la misma órbita, variando veinte o menos de cinco grados entre puntos de dos órbitas adyacentes, esta corresponde a ángulos de elevación para la estación terrestre que varían aproximadamente treinta grados e implica que una única estación terrestre puede realizar seguimiento de cinco a diez satélites simultáneamente, controlando de forma adecuada el apuntado mecánico lento y el apuntado electrónico rápido.

La red de alimentación opera basándose en desplazamiento electrónico del punto de enfoque y, por lo tanto, en operación selectiva de únicamente un subconjunto de elementos radiantes entre todo el conjunto disponible. En particular, un cambio en el ángulo de incidencia de la onda plana resulta en un desplazamiento del punto de enfoque y, por lo tanto, en un desplazamiento del disco de Airy en el plano focal.

De nuevo con referencia a la antena grande 1, la red de alimentación 13 colocada en el plano focal muestrea la distribución de campo en el plano focal. Si la onda plana se dirige a lo largo del eje focal, la distribución de fase es cercana a cero, como consecuencia el único alimentador tradicional funciona de la misma manera que la red 13, pero cuando la onda plana llega desde una dirección diferente, mientras que la red 13 es capaz de interceptar la cresta de la densidad de potencia, el alimentador tradicional no es capaz, y sería necesaria una rotación mecánica de la antena 1 (o bien al menos del reflector principal 11 o bien del subreflector 12).

La transformada de Fourier generada en la abertura depende débilmente de la distancia focal excepto para un factor de escala que depende de la relación F/D (es decir, longitud focal a diámetro) equivalente (incluyendo el factor de magnificación del subreflector). Esto implica que, para conseguir el mismo ángulo con una relación F/D equivalente mayor, se necesita un mayor desplazamiento, esto es una ventaja para la precisión de haz, incluyendo un número mayor de elementos de red, pero presenta la desventaja de implicar una red mayor para conseguir el mismo desplazamiento angular absoluto.

Una red de alimentación funciona de una forma complementaria con respecto a una DRA; de hecho, mientras una red de alimentación funciona redistribuyendo la potencia en la abertura (dejando a la geometría de reflector la tarea de orientar el haz), una DRA presenta una distribución de potencia uniforme, cambiando únicamente el patrón de fase de los elementos.

Idealmente, para capturar toda la potencia interceptada por el reflector, sería necesario tener un alimentador principal que genera un haz en abanico, que corresponde al patrón de interferencia presente en el plano focal. Prácticamente, un alimentador intercepta únicamente el patrón de lóbulo principal, ponderando el mismo de acuerdo con su propio patrón en la abertura de alimentación.

La red de alimentación presenta una situación mucho mejor, debido a la posibilidad de mejorar la captura de patrón de interferencia, limitando las pérdidas de desbordamiento.

De hecho, todos los elementos de red participan en la generación de la distribución de campo en la abertura y pueden generar, usando diferentes redes de formación de haces, un gran número de diferentes haces, teniendo en consideración la limitación de las dimensiones físicas de la red.

Optimizando la dirección angular del eje de elipse asociado con el subreflector, es posible disponer la red de alimentación descentrada del eje de reflector principal como se muestra en la Figura 4 que ilustra esquemáticamente una antena de doble reflector 2 con configuración de red de alimentación descentrada que incluye un reflector principal 21, un subreflector 22 y una red de alimentación descentrada 23 (en la Figura 4 siendo el eje de elipse indicado mediante d). De esta forma se evitan problemas de desajustes potenciales debido a reflexión doble del subreflector 22 en la red de alimentación 23.

La ventaja de usar una arquitectura de red de alimentación ha crecido considerablemente con la innovación de la tecnología, que ha permitido la introducción de la Radio Definida por Software (SDR) en el diseño de circuitería eléctrica.

Lo que únicamente hace veinte años era difícil de pensar, debido a la complejidad de red de formación de haces de RF, se ha vuelto una realidad debido a la simplicidad de definición de redes de formación de haces en frecuencia intermedia (IF) y/o en banda base (BB) usando o bien tecnología de Matriz de Puertas Programable en Campo (FPGA) o de Circuito Integrado Específico de Aplicación (ASIC).

5 La tecnología basada en FPGA o ASIC permite el diseño y creación de funciones que controlan de forma muy precisa la forma del haz y su comportamiento.

10 La ventaja adicional son las dimensiones extremadamente pequeñas de cada red de formación de haces, que permite generar con la misma red radiante muchos haces controlados independientemente.

El impulso para este dramático avance en rendimiento ha sido la introducción de las antenas inteligentes en las redes celulares 3G y 4G, que introducen la tecnología de múltiple entrada y múltiple salida (MIMO) para mejorar el rendimiento de las nuevas redes móviles, pero sus campos de aplicación están ahora muy por debajo del uso para el que se han desarrollado y la comunicación por satélite es uno de ellos.

15 La gran ventaja de la red de alimentación de acuerdo con la presente invención es la posibilidad de diseñar la red de formación de haces a una frecuencia muy baja, tomando toda la ventaja del enfoque SDR.

20 De esta manera, es posible gestionar diferentes haces con una y la misma capa de RF, para explorar a gran velocidad un sector angular de aproximadamente diez anchos de haz. Por lo tanto, la antena es muy versátil y ofrece la posibilidad de tener muchas antenas virtuales con únicamente una infraestructura.

25 En este aspecto, la Figura 5 ilustra esquemáticamente (en particular, por medio de un diagrama de bloques) una arquitectura funcional de una red de alimentación (indicado en su conjunto mediante 3) de acuerdo con una realización preferida de la presente invención.

En particular, como se muestra en la Figura 5, la red de alimentación 3 incluye:

- 30 • una red radiante 30 que incluye elementos radiantes 31 operables para transmitir y recibir señales de RF (convenientemente, señales de microondas);
- una red de formación de haces digital de RX 32 (preferentemente, basándose en tecnología/s de FPGA y/o ASIC);
- una red de formación de haces digital de TX 33 (preferentemente, basándose en tecnología/s de FPGA y/o ASIC);
- 35 • para cada elemento radiante 31,
 - una respectiva unidad de conversión de RX 34, que se conecta entre dicho elemento radiante 31 y la red de formación de haces digital de RX 32 y se diseña para aplicar una conversión descendente de frecuencia y una conversión de analógico a digital a señales de RF entrantes recibidas por dicho elemento radiante 31, obteniendo de este modo correspondientes señales digitales entrantes proporcionadas por dicha unidad de conversión de RX 34 a la red de formación de haces digital de RX 32, y
 - 40 - una respectiva unidad de conversión de TX 35, que se conecta entre dicho elemento radiante 31 y la red de formación de haces digital de TX 33 y se diseña para aplicar una conversión digital a analógico y una conversión ascendente de frecuencia a señales digitales salientes generadas mediante la red de formación de haces digital de TX 33, obteniendo de este modo correspondientes señales de RF salientes proporcionadas mediante dicha unidad de conversión de TX 35 a dicho elemento radiante 31 que hay que transmitir de este modo; y
- 45 • una unidad de control 36 configurada para controlar la operación de las redes de formación de haces digitales de RX y TX 32 y 33; en particular, configurada para provocar que dichas redes de formación de haces digitales de RX y TX 32 y 33 generen haces predefinidos en la recepción y la transmisión, respectivamente.
- 50

Preferentemente, cada unidad de conversión de RX 34 se diseña para realizar también una amplificación de ruido bajo de las señales de RF entrantes antes de aplicar la conversión descendente de frecuencia y la conversión de analógico a digital. Convenientemente, la conversión descendente de frecuencia puede incluir conversiones descendentes sucesivas a diferentes IF, llevando de este modo la frecuencia desde RF hasta BB.

De manera similar, cada unidad de conversión de TX 34 se diseña preferentemente para realizar también una amplificación de potencia alta de las señales de RF salientes después de la conversión digital a analógico y la conversión ascendente de frecuencia. Convenientemente, la conversión ascendente de frecuencia puede incluir conversiones ascendentes sucesivas a diferentes IF, llevando de este modo la frecuencia desde BB hasta RF.

60 Convenientemente, la red radiante 30 puede incluir dos conjuntos distintos de elementos radiantes 31 (por ejemplo, antenas de parche), uno primero operable en la transmisión y un segundo operable en la recepción; como alternativa, la red radiante 30 puede incluir un único conjunto de elementos radiantes 31 operable tanto para la transmisión como la recepción.

Preferentemente, la red de formación de haces digital de RX 32 se incorpora por medio de una o más unidades de FPGA y/o una o más unidades de ASIC.

Convenientemente, la red de alimentación 3 puede incluir una pluralidad de redes de formación de haces digitales de RX 32, cada una incorporada por medio de una respectiva unidad de FPGA o ASIC y conectadas a todos los elementos radiantes 31 (es decir, los de recepción) o a un respectivo subconjunto de los mismos.

De manera similar, también la red de formación de haces digital de TX 33 se incorpora preferentemente por medio de una o más unidades de FPGA y/o una o más unidades de ASIC.

Convenientemente, la red de alimentación 3 puede incluir también una pluralidad de TX redes de formación de haces digitales 33, cada una incorporada por medio de una respectiva unidad de FPGA o ASIC y conectadas a todos los elementos radiantes 31 (es decir, los de transmisión) o a un respectivo subconjunto de los mismos.

Preferentemente, el apuntado electrónico de una antena reflectora equipada con la red de alimentación 3 se implementa a través de las redes de formación de haces digitales de RX y TX 32 y 33, se controla mediante la unidad de control 36 y se coordina con el apuntado mecánico de la antena. Por ejemplo, la unidad de control 36 puede interconectarse convenientemente a una unidad de control principal o central (no mostrada en la Figura 5) de la antena reflectora, en donde dicha unidad de control principal/central está a cargo de controlar tanto el apuntado electrónico como el mecánico y, por lo tanto, está configurada para controlar la operación de:

- la unidad de control 36 de la red de alimentación 3; y
- un sistema de apuntado mecánico (no mostrado en la Figura 5) de la antena reflectora (en particular, una unidad de control de dicho sistema de apuntado mecánico).

Como alternativa, la unidad de control 36 puede operar convenientemente como la unidad de control principal/central y, por lo tanto, puede interconectarse directamente a la unidad de control del sistema de apuntado mecánico de la antena reflectora para controlar la operación de la misma.

Operaciones realizadas por la red de alimentación 3 y, más específicamente, funciones efectuadas mediante las redes de formación de haces digitales de RX y TX 32 y 33 y mediante la unidad de control 36 se describirán en detalle a continuación en el presente documento.

En particular, en los siguientes párrafos se describirá un enfoque completamente nuevo, que permite impulsar el uso de la red de alimentación y la tecnología de antena reflectora muy por encima de las capacidades actuales.

3. Aplicación innovadora de la red de alimentación

Como se ha explicado anteriormente, la red de alimentación 3 es mucho más que una forma de apuntar el haz; de hecho, puede considerarse como una forma de muestrear el plano focal, con un número de grados de libertad dependiendo del número de elementos radiantes 31. En esta conexión, puede hacerse referencia a las Figuras 6 y 7 que muestran dos geometrías diferentes para la red radiante 30, en particular una red sustancialmente plana circular con rejilla triangular y una red rectangular uniforme (URA).

La red de alimentación 3 puede usarse ventajosamente para proporcionar apuntado de antena y también para compensar las distorsiones de superficie del reflector principal.

En particular, la red de alimentación 3 representa una solución para reutilizar antenas reflectoras existentes (también las diseñadas para operar en frecuencias menores o, de cualquier manera, diferentes (por ejemplo, en banda Ku y/o C) que las usadas por los satélites LEO), que compensan los errores de superficie de los reflectores de dichas antenas reflectoras existentes usando los grados de libertad disponibles de dicha red de alimentación 3.

Por ende, también una antena muy grande que hoy en día representa una solución obsoleta puede recuperarse totalmente para obtener hasta cuarenta diferentes haces, compensando todos los errores de superficie del reflector antiguo.

En esta conexión, puede hacerse referencia a las Figuras 8 y 9 que ilustran esquemáticamente dos ejemplos de antena de doble reflector de acuerdo con dos realizaciones ilustrativas de la presente invención.

En particular, las Figuras 8 y 9 muestran una antena 4 y una antena 5, respectivamente, que podrían ser antenas grandes existentes equipadas con una óptica de doble reflector y originalmente diseñadas para operar en la banda Ku o C.

En detalle, cada una de dichas antenas 4 y 5 comprende:

- un respectivo reflector principal 41/51 (es decir, el reflector principal original de la óptica de doble reflector original);

- dos respectivos subreflectores 42, 43/52, 53 (proporcionados en lugar del subreflector original de la óptica de doble reflector original y basándose convenientemente en una configuración descentrada gregoriana múltiple); y
- dos respectivas redes de alimentación 44, 45/54, 55 (preferentemente, diseñadas como la red de alimentación 3 mostrada en la Figura 5 y descrito anteriormente).

Más específicamente, para cada antena 4/5, los dos respectivos subreflectores 42, 43/52, 53 pueden crearse como diferentes porciones de una única estructura de subreflector o como dos estructuras distintas, y comprenden un respectivo primer subreflector 42/52 y un respectivo segundo subreflector 43/53. Además, para cada antena 4/5, los dos respectivas redes de alimentación 44, 45/54, 55 incluyen, a su vez, una respectiva primera red de alimentación 44/54 y una respectiva segunda red de alimentación 45/55, en donde:

- el primer subreflector 42/52 y la primera red de alimentación 44/54 se disponen entre sí para formar, junto con una correspondiente primera porción del reflector principal 41/51, un primer subsistema de antena de doble reflector 46/56; y
- el segundo subreflector 43/53 y la segunda red de alimentación 45/55 se disponen entre sí para formar, junto con una correspondiente segunda porción del reflector principal 41/51 (siendo dicha segunda porción del reflector principal 41/51 distinta de dicha primera porción), un segundo subsistema de antena de doble reflector distinto del primer subsistema de antena de doble reflector 47/57.

Por lo tanto, para obtener las antenas 4 y 5 y, por lo tanto, los dos respectivos distintos subsistemas de antena de doble reflector 46, 47 y 56, 57, es posible reutilizar una antena grande existente, en particular su reflector principal, su estructura de soporte (por ejemplo, el pedestal) y su sistema de orientación mecánico, mientras dos (o incluso más) pares de nuevo subreflector/red de alimentación se instalan para crear dos (o incluso más) subsistemas de antena de doble reflector, cada uno diseñado para operar:

- en una respectiva banda de RF (en particular, una respectiva banda de microondas) que puede ser diferente que la banda de operación de la antena grande original; y
- en un respectivo rango de dirección.

En particular, en cuanto al apuntado de antena, el sistema de orientación mecánico original de la antena grande existente puede usarse para realizar el apuntado lento y aproximado mencionado anteriormente basándose en la orientación mecánica de las antenas 4 y 5. Además, para cada subsistema de antena de doble reflector 46, 47, 56, 57, puede realizarse un respectivo apuntado preciso específico controlando electrónicamente la operación de (es decir, orientando electrónicamente) la respectiva red de alimentación 44, 45, 54, 56.

De esta manera, es posible crear, a través de una única antena grande existente, una pluralidad de subsistemas de antena de doble reflector de múltiples haces operables en RF diferentes de para los que la antena grande existente se diseñó originalmente.

En esta conexión, cabe observar que, para obtener diferentes subsistemas de antena de doble reflector a partir de una única antena de doble reflector, es posible aprovechar dos o más redes de alimentación junto con porciones distintas o incluso parcialmente solapantes del reflector principal y/o del subreflector.

4. Red de alimentación usada para compensar el error de superficie del reflector

La red de alimentación puede interceptar en el plano focal la distribución de campo eléctrico provocada por los errores de superficie y compensar los mismos usando una función de filtrado que reproduce la distribución conjugada compleja del campo eléctrico interceptado en el plano focal mediante la red de alimentación. El campo entrante en el reflector es, en una primera aproximación, una onda plana caracterizada por un frente de fase que depende de la dirección de llegada. El reflector "realiza" una transformada de Fourier bidimensional entre la distribución de campo eléctrico en la abertura y el patrón de campo lejano y, de manera similar, el reflector "realiza" una transformada de Fourier similar entre la abertura y el plano focal. Esta es la forma en la que la red de alimentación tiene en cuenta la dirección de la onda plana, en concreto creando una cresta (disco de Airy) en el plano focal colocado de acuerdo con la dirección de llegada. En esta conexión, puede hacerse referencia a las Figuras 10 y 11 que muestran una relación entre distribución de campo lejano y campo eléctrico en el plano focal (en particular, que muestran que la posición de cresta del patrón (de difracción) de Airy en el plano focal se refiere a la dirección de llegada de la onda plana - en las Figuras 10 y 11, números 6 y 7 respectivamente que indican centros de redes de alimentación dispuestas en el plano focal).

El reflector introduce errores dependiendo de las tolerancias de fabricación y montaje y estos errores presentan una desviación en la abertura del comportamiento de onda plana, tal como errores de fase polinomiales, errores de oscilación, errores aleatorios.

La red de alimentación puede tomar la tarea no únicamente de igualar la dirección entrante de la onda plana en la ventana angular diseñada, sino también de corregir, hasta un mínimo, los efectos de distorsión debido a las tolerancias de fabricación y montaje del reflector hasta el límite dependiendo de los grados de libertad de la propia red de

alimentación.

En otras palabras, la idea del Solicitante es la del uso de la distribución de campo en el plano focal para compensar los errores de tolerancia usando una red de alimentación. Esto es particularmente ventajoso para objetivos de dinámica alta, tales como satélites LEO.

Lo siguiente es una lista no exhaustiva de razones por las que la presente invención es nueva e innovadora con respecto al documento US 4.586.051 A y el documento de F. Centureli *et al.* titulado "Feed Array Metrology and Correction Layer for Large Antenna Systems in ASIC Mixed Signal Technology":

- la presente invención habilita la reutilización de antenas existentes (usadas anteriormente en frecuencias más bajas) con la posibilidad innovadora de usar el mismo reflector principal para crear más antenas;
- la presente invención proporciona una combinación de orientación electrónica y mecánica de los diversos haces del nuevo sistema de antenas para seguir los satélites LEO de dinámica alta sin estresar la mecánica de antena existente;
- la presente invención permite determinar y optimizar los coeficientes de la red de alimentación tanto en la transmisión como en la recepción para conseguir en tiempo real, de acuerdo con el movimiento de satélite, la evaluación y la compensación de las tolerancias de reflector;
- la presente invención proporciona un procedimiento totalmente automático para verificar el rendimiento de sistema de antenas durante su ciclo de vida para optimizar costes y tiempo de mantenimiento preventivo.

Considérese el campo en el plano focal, es en una primera aproximación la transformada de Fourier inversa de la abertura:

$$E_{\text{Plano focal}}(\xi, \eta) \approx \int_{\text{Abertura}} A(x, y) e^{j2\pi\left(\frac{\xi}{F\lambda}x + \frac{\eta}{F\lambda}y\right)} dx dy,$$

donde x, y indican las coordenadas de dominio en la abertura, ξ, η indican las coordenadas de codominio en el plano focal y F indica la longitud focal.

El campo puede muestrearse en el plano de abertura con un paso entre 0,7 y 1 λ (longitud de onda). Este muestreo corresponde a las posiciones geométricas de los elementos de red de alimentación.

La ecuación anterior puede procesarse de la siguiente forma:

$$E_{\text{Plano focal}}(k, j) \approx \int_{\text{Abertura}} A(x, y) e^{j2\pi\left(\alpha k a \frac{1}{F}x + \alpha j a \frac{1}{F}y\right)} dx dy,$$

donde k, j indican índices de las coordenadas de codominio en el plano focal, α indica la relación entre la separación de elemento y A .

5. Matriz de RX de la red de alimentación

La red de alimentación puede operar basándose en una matriz de RX usada en la recepción y una matriz de TX usada en la transmisión, en donde dichas matrices de RX y TX representan los factores de ponderación de las muestras de campo eléctrico en el plano focal para la recepción y la transmisión, respectivamente.

En general, un reflector distorsionado no puede focalizar, en general, la potencia en un área pequeña alrededor del foco, por lo tanto el reflector necesita un diseño adaptado de las ponderaciones en la trayectoria de RX para recopilar la potencia con la fase correcta, mientras que en la trayectoria de TX la distribución de campo en el plano focal tendrá en cuenta los efectos de las distorsiones de reflector. Adicionalmente, mientras que en la recepción el campo puede corregirse sin hipótesis adicionales sobre los errores de reflector, en la transmisión el campo se generará en el plano focal, suponiendo una estimación de las distorsiones de reflector que hay que compensar.

La matriz de RX y la matriz de TX se definen, por ende, para obtener el resultado de una compensación total (dentro de los límites de las dimensiones de red) tanto para la sección de TX como de RX independientemente.

En particular, la matriz de RX se define convenientemente sobre la base de dos matrices, una primera para apuntado de haz en la recepción y una segunda para corrección de errores en la recepción, en particular para corregir errores debido al reflector.

Lo mismo se aplica a la matriz de TX que puede definirse convenientemente sobre la base de dos respectivas matrices, una primera para apuntado de haz en la transmisión y una segunda para tener en cuenta errores relacionados con el reflector en la transmisión.

En cuanto a la operación en la recepción, la Figura 12 ilustra esquemáticamente etapas realizadas por la red de alimentación para calcular una matriz de corrección de errores y, a continuación, para compensar para errores del reflector.

5 En particular, como se muestra en la Figura 12, el procedimiento (indicado en su conjunto mediante 8) implementado por la red de alimentación incluye:

- medir valores complejos del campo eléctrico en el plano focal (bloque 81);
- calcular fases de campo conjugado complejo (bloque 82);
- 10 • calcular una matriz de corrección de errores sobre la base de las fases de campo conjugado complejo (bloque 83); y
- calcular el campo optimizado (bloque 84).

15 En detalle, en cuanto al bloque 81 en la Figura 12, el campo eléctrico generado en el plano focal puede muestrearse:

$$E_{\text{Abertura}}(x, y) \xrightarrow{\text{Desde el campo en la apertura la matriz de los elementos muestreados}} [(E_{FP}(k, j))].$$

En cuanto al bloque 82 en la Figura 12, una matriz de ponderación puede definirse como:

$$20 [V_{k,j}] = [e^{-j\phi_{k,j}}]; \text{ donde } \phi_{k,j} = \tan^{-1} \left(\frac{-\text{Im}(E_{FP}(k, j))}{\text{Re}(E_{FP}(k, j))} \right)$$

A continuación, la matriz de corrección de errores se define como (bloque 83 en la Figura 12):

$$25 [W_{k,j}] = [[V_{k,j}]]^T.$$

La matriz de corrección de errores $[W_{k,j}]$ puede determinarse convenientemente suponiendo un valor arbitrario para la fase de un elemento supuesto como una referencia (por ejemplo, el central de la red de alimentación).

30 A continuación, considérese la matriz que resulta del producto:

$$[A_{k,j}] = [E_{FP}(k, j)][W_{k,j}].$$

Considérese la primera columna de la matriz $[A_{k,j}]$

$$35 A_{k,1} = \sum E_{FP}(k, 1)W_{k,1},$$

y considérese el campo optimizado A definido como (bloque 84 en la Figura 12):

$$40 A = \sum A_{k,1} = \sum \sum E_{FP}(k, 1)W_{k,1}.$$

6. Dimensiones y grados de libertad de la red de alimentación

45 Los elementos de sistema implicados en la técnica de compensación no son, en términos prácticos, todos. Los elementos activos se deberían colocarse alrededor de los elementos nominales implicados en el apuntado rápido, suponiendo la superficie de reflector sin errores, de acuerdo con la posición del disco de Airy nominal.

Introduciendo la tolerancia de reflector y errores de montaje, el número de elementos crece principalmente de acuerdo con los productos de correlación de los errores en la superficie y, a continuación, con la suma residual de cuadrados (RSS) de los errores.

50 En caso de la desfocalización de reflector, que corresponde a un error cuadrático sistemático en la abertura, el número de elementos que hay que considerar se refiere a la inclusión de la posición del primer lóbulo lateral del patrón de interferencia en el plano focal, casi independientemente de la focalización que hay que recuperar.

55 Usando un número de elementos que incluyen el lóbulo secundario de primera difracción en el plano focal, la compensación puede considerarse sin depender de las dimensiones de la red de alimentación. El primer lóbulo secundario intercepta, de hecho, la mayoría de la potencia de dispersión.

En esta conexión, las Figuras 13 muestran un comportamiento de pérdida de ganancia usando una red de alimentación y un alimentador convencional para errores de desfocalización.

La situación es bastante diferente para errores aleatorios. En este caso, se introduce una longitud de correlación, para considerar que la superficie del reflector muestra, en general, una correlación fuerte entre puntos cercanos, debido a la fabricación y características estructurales de la superficie del reflector y su montaje en la infraestructura mecánica.

El grado de libertad del reflector de antena depende del error aleatorio y, en particular, del parámetro de correlación.

La potencia dispersada en el plano focal es sensible principalmente al parámetro de correlación y, a continuación, al valor de RSS.

La Figura 14 muestra síntesis de rendimiento. En particular, a partir de la Figura 14 es evidente que usando veinticinco puntos de muestreo para cada dimensión en el plano focal (que corresponde a 600 grados de libertad en la definición de los errores de reflector), los resultados son muy buenos y la compensación es muy fuerte. Esto implica la capacidad de la red de alimentación para operar con reflectores de antena fuertemente distorsionados en términos de RSS.

Por lo tanto, el diseño práctico tiene en cuenta convenientemente el estado del reflector de antena que hay que usar y, a continuación, el área activa de cada posición de la red de alimentación puede determinarse para implementar el diseño de FPGA.

7. Ruido térmico de la antena con red de alimentación

La presencia de la red de alimentación, usando la tecnología de FPGA/ASIC, implica convenientemente la presencia de un amplificador de ruido bajo (LNA), o un convertidor de ruido bajo (LNC), para cada elemento radiante de la red de alimentación. Es importante indicar el impacto en la relación señal a ruido (S/N) general de la antena en una configuración de este tipo. La contribución de ruido aumenta ligeramente con el número de anillos de Airy incluidos en la operación de la red de alimentación, mientras que la contribución optimizada del campo mejora para los primeros anillos y, a continuación, disminuye lentamente, como se muestra en la Figura 15. El impacto del ruido varía muy poco introduciendo la red de alimentación, con una pequeña ventaja usando pocos elementos y con una pérdida general menor de 0,5 dB introduciendo hasta 13 elementos para cada semi eje (con un total de más de 700 elementos).

8. Matriz de TX de la red de alimentación

En la recepción, la red de alimentación no necesita ninguna información externa para optimizar los coeficientes de ponderación de plano focal. La razón de esta característica es una consecuencia del conocimiento de la onda plana entrante que se recupera sin errores de fase. En una primera aproximación, en el plano focal, el patrón de difracción es el resultado de la transformada de Fourier inversa bidimensional del campo de abertura que se conoce, siendo una onda plana con un ángulo de incidencia conocido. Por lo tanto, en la recepción, los coeficientes de la matriz de ponderación (es decir, la matriz de corrección de errores anteriormente mencionada) se evalúan para reconstruir el frontal de fase de onda de plano entrante, compensando los errores de fase debido a la tolerancia de reflector y errores de montaje.

Para generar los mejores coeficientes para la matriz de TX (en particular, para la matriz relacionada con errores de reflector que hay que usar en la transmisión), es necesario evaluar las distorsiones geométricas de la superficie del reflector y, por lo tanto, es útil para realizar una estimación que comienza desde el conocimiento de los coeficientes de RX.

El campo eléctrico de RX de plano focal viene dado por:

$$E_{FP\,RX}(k, f) \approx \int_{Abertura} A(x, y) e^{j\phi(x, y)} e^{j2\pi\left(akd\frac{1}{F}x + a\frac{1}{F}y\right)} dx dy.$$

En la abertura, el campo puede muestrearse para conseguir el mismo número de muestras usadas en el plano focal:

$$E_{FP\,RX}(k, f) \approx \sum_n \sum_m A\left(m\frac{a}{\lambda}, n\frac{a}{\lambda}\right) e^{j\phi_{m,n}} e^{j2\pi\left(akd\frac{a}{F}m + a\frac{a}{F}n\right)},$$

$$A\left(m\frac{a}{\lambda}, n\frac{a}{\lambda}\right) e^{j\phi_{m,n}} = \sum_k \sum_j E_{FP\,RX}(k, f) e^{-j2\pi\left(akd\frac{a}{F}m + a\frac{a}{F}n\right)}.$$

A continuación, suponiendo $A\left(m\frac{a}{\lambda}, n\frac{a}{\lambda}\right) = \text{constante}$ (onda plana), resulta:

$$e^{j\phi_{m,n}} = \sum_k \sum_j E_{FP\,TX}(k,j) e^{-j2\pi\left(akd\frac{a}{F}m + ajd\frac{a}{F}n\right)}.$$

La matriz $[e^{j\phi_{m,n}}]$ representa la distribución de errores en el plano de abertura en la frecuencia de RX.

- 5 A continuación, considerando la relación entre las frecuencias de RX y TX $\beta = \frac{\lambda_{TX}}{\lambda_{RX}}$, es posible conseguir la función de distorsión de abertura para la frecuencia de TX:

$$[e^{j\beta\phi_{m,n}}].$$

- 10 A partir de la matriz de distribución de distorsión es posible derivar la función de iluminación del plano focal para la red de alimentación:

$$E_{FP\,TX}(k,j) \approx \sum_n \sum_m A\left(m\frac{a}{\lambda_{TX}}, n\frac{a}{\lambda_{TX}}\right) e^{j\beta\phi_{m,n}} e^{j2\pi\left(ak\beta d\frac{a}{F}m + aj\beta d\frac{a}{F}n\right)}$$

- 15 y, finalmente, la matriz relacionada con errores de reflector de TX completa en el plano focal

$$[E_{FP\,TX}(k,j)].$$

- 20 Para resumir, las etapas realizadas por la red de alimentación para calcular la matriz relacionada con errores de reflector de TX (es decir, la matriz que tiene en cuenta errores relacionados con el reflector en la transmisión y que, como se ha explicado anteriormente en el párrafo 5, define la matriz de TX en general junto con una matriz de apuntado de haz relacionada con el apuntado de haz en la transmisión), puede hacerse referencia a la Figura 16 que ilustra esquemáticamente el procedimiento que se acaba de describir.

- 25 En particular, como se muestra en la Figura 16, el procedimiento (indicado en su conjunto mediante 9) implementado por la red de alimentación incluye:

- procesar valores complejos del campo eléctrico en el plano focal medidos en la recepción (convenientemente, realizando una transformada de Fourier inversa) - bloque 91;
- 30 • estimar las distorsiones del reflector (en particular, desplazamientos de fase relacionados con el reflector) - bloque 92; y
- calcular valores de campo eléctrico en el plano focal en la transmisión sobre la base de los desplazamientos de fase relacionados con el reflector estimados - bloque 93.

35 **9. Verificación del rendimiento de la antena**

- En vista de lo anterior, la antena reflectora de acuerdo con la presente invención es capaz de compensar las distorsiones de reflector y permite reutilizar infraestructuras de antena existentes (diseñadas originalmente para otras bandas de frecuencia). Adicionalmente, la antena reflectora de acuerdo con la presente invención ofrece también la
- 40 posibilidad de una verificación rápida de su condición, evitando una campaña de medición pesada y costosa para propósitos de mantenimiento.

- De hecho, la sección de RX de la antena reflectora puede usarse ventajosamente para medir, de una sola vez, el patrón de antena en el plano focal por medio de la red de alimentación. Si las correcciones memorizadas (es decir, patrón de referencia) no corresponden a las distorsiones medidas (es decir, patrón medido), la sección de RX es capaz de esquematizar las diferencias de patrones. Para realizar la medición de patrón completa es necesario únicamente
- 45 apuntar la antena a una baliza ubicada en una posición conocida. En este aspecto, puede hacerse referencia a la Figura 17 que muestra una antena reflectora 100 de acuerdo con la presente invención que recibe señales de RF desde una baliza 101. Además, la Figura 17 muestra también un procesador 102 conectado tanto a la antena reflectora
- 50 100 como a la baliza 101 para controlar la medición y para comprobar cualquier diferencia entre el patrón de referencia asociado con la antena reflectora 100 y el patrón medido mediante dicha antena reflectora 100.

10. Dimensionamiento de red de alimentación

- 55 Como se ha explicado anteriormente, el campo eléctrico en el plano focal o bien se genera (sección de TX) o bien se intercepta (sección de RX) mediante una red de aberturas de alimentación.

Es interesante observar cómo las dimensiones de alimentación impactan en la iluminación de reflector y cómo están relacionadas con la capacidad de recuperación de errores de reflector.

Un elemento de alimentación integra la contribución de campo en su abertura con dos efectos principales: el primero es un descenso de los grados de libertad disponibles, el segundo es la aparición de lóbulos reticulares a partir del patrón de red de alimentación general cuando las dimensiones de alimentación crecen en términos de longitud de onda.

El muestreo en el plano focal puede considerarse como una secuencia de funciones de etapa que representan los elementos de alimentación. En realidad, la función no debería ser una etapa, sino una clase de una función de coseno de medio periodo, pero esto no es importante para los efectos de la cuantificación de campo de plano focal y el impacto en los grados de libertad de la estructura de red de alimentación.

La presencia de lóbulos reticulares puede empeorarse en el caso de orientación de haces, debido a la mayor contribución de fase para apuntar al haz, por lo tanto los límites para el tamaño de elemento de red de alimentación debería ser, en general, menor que λ .

Cabe observar que el tamaño del elemento de alimentación introduce (como se conoce) un estrechador adicional de la amplitud de alimentación en el borde de reflector; este efecto disminuye ligeramente la eficiencia de abertura, pero no provoca distorsiones adicionales, mientras que, cuando el tamaño supera λ , los efectos de los lóbulos reticulares comienzan a ser evidentes.

Si el tamaño de elemento de alimentación aumenta, comienza a ser evidente la disminución de grados de libertad, debido al hecho de que únicamente uno o dos elementos de alimentación están activos, y el patrón es muy sensible al tipo de distorsiones que hay que recuperar.

11. Grados de libertad frente a dimensionamiento de red de alimentación

La distribución de campo en el plano focal depende de la relación F/D y los lóbulos reticulares dependen del muestreo en términos de longitud de onda λ . Por lo tanto, los grados de libertad dependen de las dimensiones de la red de alimentación como:

$$\text{grados de libertad} \leq 2k(2k + 1)\lambda^2 / \left(\frac{Fd}{D\lambda}\right)^2,$$

donde $(2k + 1)\lambda$ es el tamaño de la red de alimentación, F/D es la relación de longitud focal a diámetro y d es el diámetro de alimentación.

En su lugar, la presencia de lóbulos reticulares depende de d/λ .

El aumento de la relación F/D tiene un efecto positivo en la forma de campo en el reflector si la potencia de desbordamiento generada por la red de alimentación es aceptable, debido a la posible presencia de lóbulos reticulares, cuando el elemento de alimentación es mayor que $1,25 \lambda$. Por el contrario, la situación se vuelve crítica cuando la relación F/D es menor que uno.

Para alcanzar un buen compromiso entre la complejidad de la red de alimentación, la presencia de lóbulos reticulares y la posibilidad de usar de una forma simple los mismos elementos tanto para las secciones de transmisión como de recepción, puede usarse ventajosamente una relación F/D entre 1,5 y 2.

Para una aplicación típica con una antena de aproximadamente 11 m de diámetro, es posible considerar cuatro antenas de aproximadamente 5 m de diámetro con una relación F/D equivalente de aproximadamente 2, correspondiendo a una relación F/D de aproximadamente 1 para el reflector de tamaño completo.

12. Estrechamiento de borde

En un sistema de reflector convencional, el uso de un único alimentador implica una compensación entre "desbordamiento", eficiencia y nivel de lóbulo lateral. El tamaño de alimentador es, por ende, el elemento clave (en conexión con la relación F/D) para gestionar estos tres parámetros conflictivos.

Con una red de alimentación la situación es bastante diferente. La red de alimentación actúa como un filtro especial, que es responsable no únicamente para corregir el errores de reflector, pero puede usarse también para definir una función de ponderación adicional para optimizar el nivel de lóbulo lateral de la antena reflectora. Es importante observar que esta función no cambia las pérdidas de desbordamiento, que dependen de las dimensiones de elemento de alimentación y en el sistema de compensación de la propia red de alimentación.

Un sistema de alimentación de reflector convencional que incluye un único alimentador no es capaz de compensar ningún error de reflector; esto es debido al hecho de que no existe ningún grado de libertad adicional; de hecho, todos los valores de campo interceptados por la abertura de alimentador se suman juntos; por lo tanto, no existe ninguna

posibilidad de compensación considerando los mismos de forma separada. La única libertad disponible es optimizar la eficiencia de reflector, la pérdida de desbordamiento y el nivel de lóbulo lateral que eligen un tamaño de alimentador apropiado.

En su lugar, el uso de una red de alimentación cambia la forma de considerar el diseño de un estrechador de borde de reflector dado, debido al hecho de que la red de alimentación intercepta un área amplia de los discos de interferencia de Airy: o bien el elemento de red de alimentación tiene el tamaño para generar el estrechador de borde deseado o la red completa contribuye para generar el estrechador de borde deseado, manteniendo el tamaño de alimentador mínimo posible con un sistema de antena que funciona en dos bandas de frecuencia para la transmisión y la recepción.

El primer sistema podría ser más intuitivo, pero tiene el inconveniente importante de tener lóbulos reticulares más grandes y capacidad reducida de compensación de errores, debido a la integración de elemento de alimentación en la abertura de alimentación (mayor de $0,5 \lambda$). Esta integración en la abertura tiene el efecto de promediar errores y, en consecuencia, reducir la capacidad de red de alimentación para compensar errores de reflector.

El segundo sistema se basa en el uso de la red de alimentación completa para generar la función de ponderación de reflector, sin ninguna clase de requisito en el tamaño de elemento de alimentación además del usual para las redes.

En particular, se proporciona la relación entre la red de alimentación, la distribución de campo de plano focal y la iluminación de reflector, en una primera aproximación, mediante la transformada de Fourier del producto de la función de ponderación de reflector y la función de corrección generada por la red de alimentación en el propio reflector.

En vista de lo anterior, un aspecto de la presente invención proporciona una optimización de la matriz de corrección de errores usada en la recepción sobre la base de una función de estrechamiento de borde de RX predefinida y una optimización de la matriz relacionada con errores de reflector usada en la transmisión sobre la base de una función de estrechamiento de borde de TX predefinida, en donde dicha función de estrechamiento de borde de RX y TX puede ser una y la misma función de estrechamiento de borde o diferente (por ejemplo, una optimizada para la recepción y una para la transmisión).

Por ejemplo, la ecuación para calcular valores de campo eléctrico en el plano focal en la transmisión puede modificarse convenientemente para tener en cuenta un estrechador de borde deseado:

$$E_{FP\,tx}(k, f) \approx \sum_n \sum_m F(m, n) A\left(m \frac{a}{\lambda_{tx}}, n \frac{a}{\lambda_{tx}}\right) e^{j\beta\phi_{m,n}} e^{j2\pi\left(\alpha k \beta a_F \frac{a}{F} m + \alpha j \beta a_F \frac{a}{F} n\right)},$$

donde el término adicional $F(m, n)$ es la función de estrechamiento del campo eléctrico en la abertura de antena.

La introducción de la función o funciones de estrechamiento de borde no tienen ningún impacto en la capacidad de corrección de errores de reflector.

13. Uso de la invención a bordo de satélites

La antena reflectora de acuerdo con la presente invención puede usarse ventajosamente también a bordo de satélites (en particular satélites LEO, pero también satélites MEO y GEO). De hecho, la antena reflectora de acuerdo con la presente invención permite obtener una cobertura orientable y optimizada, longitudes focales equivalentes largas y la capacidad de compensar electrónicamente las distorsiones mecánicas del reflector, cuyas características prestan la solución de antena de acuerdo con la presente invención extremadamente adecuada para satélites LEO, MEO y GEO.

Además, la configuración de doble reflector permite tener arquitecturas de antena compactas y limitar los efectos de distorsión de una relación F/D baja de la antena.

Adicionalmente, incluso con un número limitado de elementos radiantes de la red de alimentación, aún es posible tener un número suficiente de grados de libertad para generar haces en direcciones deseadas y para minimizar las interferencias.

En vista de lo anterior, es inmediatamente evidente el uso ventajoso de la presente invención también a bordo de satélites LEO, MEO y GEO.

En esta conexión, puede hacerse referencia a la Figura 18 que ilustra esquemáticamente un pequeño satélite LEO (convenientemente, un CubeSat) 110 equipado con una antena reflectora de acuerdo con la presente invención que incluye un reflector principal 111, un subreflector 112 y una red de alimentación 113.

14. Uso de la invención para aplicaciones SAR

Cabe observar que la presente invención puede aprovecharse ventajosamente a bordo de satélites, en particular para antenas reflectoras a bordo de cabidas útiles de comunicaciones o de radares de abertura sintética (SAR), donde una solución de red de alimentación de acuerdo con la presente invención habilitaría el uso de una superficie de reflector que hay que desplegar con múltiples haces. De hecho, la red de alimentación de acuerdo con la presente invención, además de generar una configuración de múltiples haces, puede operar también para compensar errores de superficie relacionados con el despliegue de antenas muy grandes.

En particular, un aprovechamiento muy interesante de la presente invención para antenas a bordo se representa mediante la aplicación SAR. De hecho, como se ha explicado anteriormente, la red de alimentación de acuerdo con la presente invención puede no generar únicamente una configuración de múltiples haces tanto en la transmisión como en la recepción, sino que también puede compensar errores de superficie que normalmente afectan a estructuras de antenas muy grandes, tales como antenas reflectoras desplegables.

Sin embargo, en este aspecto, cabe observar que, en el caso de uso de la presente invención para antenas SAR por satélite, la compensación de errores no puede seguir exactamente el mismo procedimiento como en el caso de antenas de comunicación, dado que el área irradiada en la superficie terrestre es muy grande (habitualmente unos pocos kilómetros) y, por lo tanto, el patrón de radiación en la antena de recepción (es decir, la antena SAR) está sustancialmente en el campo cercano del área de superficie de la Tierra iluminada. Por lo tanto, se requiere una calibración periódica de la antena reflectora del SAR mediante el uso de un reflector diédrico activo dispuesto en la superficie terrestre. De hecho, de esta manera, el reflector diédrico activo puede usarse para producir una onda plana en la dirección de la antena SAR que permite su calibración como en el caso de las antenas de comunicación.

En esta conexión, la Figura 19 ilustra esquemáticamente una antena de un solo reflector 200 de acuerdo con la presente invención de un SAR instalado a bordo de un satélite (no mostrado para la simplicidad de la ilustración), en donde dicha antena de un solo reflector 200 incluye un reflector desplegable 201 y una red de alimentación 202. Adicionalmente, la Figura 20 muestra patrones de antena de la antena de un solo reflector 200 con y sin compensación/corrección de errores.

15. Observaciones finales

A partir de lo anterior, las características innovadoras y las ventajas técnicas de la presente invención quedan claras inmediatamente para los expertos en la materia.

En particular, cabe señalar las siguientes características innovadoras de la presente invención:

- aplicación de la arquitectura de red de alimentación a infraestructuras de antenas terrestres existentes sin modificaciones mecánicas sustanciales;
- aprovechamiento ventajoso de la presente invención también a bordo de satélites (en particular satélite LEO, pero también satélites MEO y GEO) tanto para aplicaciones de telecomunicaciones como SAR;
- una metodología para definir la amplitud y fase para cada elemento radiante y para cada coeficiente de ponderación;
- capacidad de seguimiento rápido obtenida usando una orientación de haz electrónica rápida de la red de alimentación junto con el apuntado mecánico lento, prestando posiblemente el uso de antenas diseñadas para satélites geoestacionarios para satélites LEO sin modificaciones mecánicas fuertes;
- capacidad para compensar distorsiones de antena debido a tolerancias de fabricación y errores de montaje para conseguir siempre el rendimiento máximo, usando una técnica de estimación original de los coeficientes de ponderación de la sección de RX;
- extensión de dicha técnica también a la sección de TX (donde no se recibe ninguna onda plana) extrapolando mediciones de RX y estimando las distorsiones de abertura para la frecuencia de TX;
- adicionalmente, dicha técnica se mejora mediante la aplicación de funciones de estrechamiento de borde de reflector, sin efectos negativos en la capacidad de corrección de errores del reflector;
- una nueva técnica de mantenimiento predictivo para verificar la antena en el tiempo, sin explorar la antena, sino recibiendo únicamente una onda plana desde una fuente conocida.

En conclusión, es evidente que pueden realizarse numerosas modificaciones y variantes a la presente invención, perteneciendo todas al alcance de la invención, como se define en las reivindicaciones adjuntas.

En esta conexión, es importante subrayar de nuevo el punto de que la presente invención puede usarse ventajosamente tanto con óptica de doble reflector como de un solo reflector, en la superficie terrestre y a bordo de satélites, para telecomunicaciones y también para aplicaciones SAR.

En particular, con referencia específica a una óptica de un solo reflector, cabe observar que el uso combinado de un apuntado de haz electrónico preciso y rápido y un apuntado de antena mecánico aproximado y lento, la capacidad de

la red de alimentación para compensar las distorsiones de reflector y para aplicar funciones de estrechamiento de borde predefinidas, y el uso de múltiples redes de alimentación para formar diferentes subsistemas de antena son características que pueden aprovecharse ventajosamente con una óptica de un solo reflector, tanto en una estación terrestre para satélites LEO/MEO/GEO como a bordo de satélite de telecomunicaciones/SAR.

5

Además, cabe observar también que la presente invención puede aprovecharse ventajosamente también para terminales terrestres genéricos para telecomunicaciones por satélite (por ejemplo, terminales de comunicación por satélite instalados en trenes).

REIVINDICACIONES

1. Red de alimentación (3, 44, 45, 54, 55, 113, 202) para antenas reflectoras (4, 5, 100, 200), en donde dicha red de alimentación (3, 44, 45, 54, 55, 113, 202) se diseña para instalarse en una antena reflectora (4, 5, 100, 200) provista con una óptica de un solo reflector o doble reflector e incluye:

- una red radiante (30) dispuesta en una región focal de la óptica de un solo reflector/doble reflector y operable para transmitir y recibir señales de radiofrecuencia;
- medios de formación de haces digitales (32, 33);
- medios de conversión de recepción (34) conectados entre la red radiante (30) y los medios de formación de haces digitales (32) y diseñados para

- aplicar una conversión descendente de frecuencia y una conversión de analógico a digital a señales de radiofrecuencia entrantes recibidas por la red radiante (30), obteniendo de este modo señales digitales entrantes, y
- proporcionar a los medios de formación de haces digitales (32) las señales digitales entrantes; y

- medios de conversión de transmisión (35) conectados entre la red radiante (30) y los medios de formación de haces digitales (33) y diseñados para

- aplicar una conversión digital a analógico y una conversión ascendente de frecuencia a señales digitales salientes generadas mediante los medios de formación de haces digitales (33), obteniendo de este modo señales de radiofrecuencia salientes, y
- proporcionar a la red radiante (30) las señales de radiofrecuencia salientes que hay que transmitir mediante dicha red radiante (30);

caracterizada por que los medios de formación de haces digitales (32, 33) están configurados para:

- procesar las señales digitales entrantes usando una matriz de recepción definida basándose en
 - una primera matriz para apuntado de haz en la recepción y
 - una segunda matriz para compensar errores en la recepción debido a la óptica de un solo reflector/doble reflector; y
- generar las señales digitales salientes usando una matriz de transmisión definida basándose en
 - una tercera matriz para apuntado de haz en la transmisión y
 - una cuarta matriz relacionada con errores en la transmisión debido a la óptica de un solo reflector/doble reflector;

en donde dicha segunda y cuarta matrices se calculan basándose en valores de campo eléctrico medidos mediante la red radiante (30) en la región focal.

2. La red de alimentación de la reivindicación 1, en donde:

- la segunda matriz se calcula para compensar errores en la recepción debido a la óptica de un solo reflector/doble reflector y también para aplicar una primera función de estrechamiento de borde que hay que usar en la recepción; y
- la cuarta matriz se diseña para tener en cuenta errores en la transmisión debido a la óptica de un solo reflector/doble reflector y también para aplicar una segunda función de estrechamiento de borde que hay que usar en la transmisión.

3. La red de alimentación de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, configurada para calcular la segunda matriz:

- midiendo valores complejos de campo eléctrico en la región focal por medio de la red radiante (30);
- calculando fases de campo conjugado complejo basándose en los valores complejos medidos del campo eléctrico en la región focal; y
- calculando la segunda matriz basándose en las fases de campo conjugado complejo calculadas;

estando dicha red de alimentación (3, 44, 45, 54, 55, 113, 202) configurada para calcular la cuarta matriz:

- estimando desplazamientos de fase relacionados con distorsiones de la óptica de un solo reflector/doble reflector sobre la base de los valores complejos medidos del campo eléctrico en la región focal; y
- calculando la cuarta matriz basándose en los desplazamientos de fase estimados.

4. La red de alimentación de acuerdo con cualquier reivindicación 1-3, en donde la red radiante (30) incluye una pluralidad de elementos radiantes (31) operables tanto en la recepción como la transmisión, y en donde para cada

elemento radiante (31):

- la primera matriz incluye un correspondiente coeficiente de apuntado de haz de recepción que hay que aplicar a una señal digital entrante procedente de dicho elemento radiante (31);
- la segunda matriz incluye un correspondiente coeficiente de corrección de errores de reflector que hay que aplicar a la señal digital entrante procedente de dicho elemento radiante (31);
- la matriz de recepción incluye un correspondiente coeficiente de ponderación de recepción que hay que aplicar a la señal digital entrante procedente de dicho elemento radiante (31), en donde dicho correspondiente coeficiente de ponderación de recepción se define basándose en dichos correspondientes coeficientes de apuntado de haz de recepción y de corrección de errores de reflector;
- los medios de formación de haces digitales (32) están configurados para procesar la señal digital entrante procedente de dicho elemento radiante (31) aplicando el correspondiente coeficiente de ponderación de recepción a la misma;
- la tercera matriz incluye un correspondiente coeficiente de apuntado de haz de transmisión que hay que aplicar a una señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho elemento radiante (31);
- la cuarta matriz incluye un correspondiente coeficiente relacionado con errores de reflector que hay que aplicar a la señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho elemento radiante (31);
- la matriz de transmisión incluye un correspondiente coeficiente de ponderación de transmisión que hay que aplicar a la señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho elemento radiante (31), en donde dicho correspondiente coeficiente de ponderación de transmisión se define basándose en dichos correspondientes coeficientes de apuntado de haz de transmisión y relacionados con errores de reflector; y
- los medios de formación de haces digitales (33) están configurados para generar la señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho elemento radiante (31) aplicando el correspondiente coeficiente de ponderación de transmisión.

5. La red de alimentación de la reivindicación 4, que incluye para cada elemento radiante (31):

- una respectiva unidad de conversión de recepción (34) conectada entre dicho elemento radiante (31) y los medios de formación de haces digitales (32) y diseñada para
 - aplicar una amplificación de ruido bajo, una conversión descendente de frecuencia y una conversión de analógico a digital a una señal de radiofrecuencia entrante recibida por dicho elemento radiante (31), obteniendo de este modo una correspondiente señal digital entrante, y
 - proporcionar a los medios de formación de haces digitales (32) dicha correspondiente señal digital entrante; y
- una respectiva unidad de conversión de transmisión (35) conectada entre dicho elemento radiante (31) y los medios de formación de haces digitales (33) y diseñada para
 - aplicar una conversión digital a analógico, una conversión ascendente de frecuencia y una amplificación de potencia alta a una señal digital saliente generada por los medios de formación de haces digitales (33), obteniendo de este modo una correspondiente señal de radiofrecuencia saliente, y
 - proporcionar a dicho elemento radiante (31) dicha correspondiente señal de radiofrecuencia saliente que hay que transmitir de este modo.

6. La red de alimentación de la reivindicación 4, en donde los medios de formación de haces digitales incluyen medios de formación de haces digitales de recepción (32) y medios de formación de haces digitales de transmisión (33), y en donde la red de alimentación (3, 44, 45, 54, 55, 113, 202) incluye para cada elemento radiante (31):

- una respectiva unidad de conversión de recepción (34) conectada entre dicho elemento radiante (31) y los medios de formación de haces digitales de recepción (32) y diseñada para
 - aplicar una amplificación de ruido bajo, una conversión descendente de frecuencia y una conversión de analógico a digital a una señal de radiofrecuencia entrante recibida por dicho elemento radiante (31), obteniendo de este modo una correspondiente señal digital entrante, y
 - proporcionar a los medios de formación de haces digitales de recepción (32) dicha correspondiente señal digital entrante; y
- una respectiva unidad de conversión de transmisión (35) conectada entre dicho elemento radiante (31) y los medios de formación de haces digitales de transmisión (33) y diseñada para
 - aplicar una conversión digital a analógico, una conversión ascendente de frecuencia y una amplificación de potencia alta a una señal digital saliente generada por los medios de formación de haces digitales de transmisión (33), obteniendo de este modo una correspondiente señal de radiofrecuencia saliente, y
 - proporcionar a dicho elemento radiante (31) dicha correspondiente señal de radiofrecuencia saliente que hay que transmitir de este modo.

7. La red de alimentación de acuerdo con cualquier reivindicación 1-3, en donde la red radiante (30) incluye una pluralidad de primeros elementos radiantes operables en la recepción y una pluralidad de segundos elementos radiantes operables en la transmisión;
en donde para cada primer elemento radiante:

- 5 • la primera matriz incluye un correspondiente coeficiente de apuntado de haz de recepción que hay que aplicar a una señal digital entrante procedente de dicho primer elemento radiante;
- la segunda matriz incluye un correspondiente coeficiente de corrección de errores de reflector que hay que aplicar a la señal digital entrante procedente de dicho primer elemento radiante;
- 10 • la matriz de recepción incluye un correspondiente coeficiente de ponderación de recepción que hay que aplicar a la señal digital entrante procedente de dicho primer elemento radiante, en donde dicho correspondiente coeficiente de ponderación de recepción se define basándose en dichos correspondientes coeficientes de apuntado de haz de recepción y de corrección de errores de reflector; y
- 15 • los medios de formación de haces digitales (32) están configurados para procesar la señal digital entrante procedente de dicho primer elemento radiante aplicando el correspondiente coeficiente de ponderación de recepción a la misma;

y en donde para cada segundo elemento radiante:

- 20 • la tercera matriz incluye un correspondiente coeficiente de apuntado de haz de transmisión que hay que aplicar a una señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho segundo elemento radiante;
- la cuarta matriz incluye un correspondiente coeficiente relacionado con errores de reflector que hay que aplicar a la señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho segundo elemento radiante;
- 25 • la matriz de transmisión incluye un correspondiente coeficiente de ponderación de transmisión que hay que aplicar a la señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho segundo elemento radiante, en donde dicho correspondiente coeficiente de ponderación de transmisión se define basándose en dichos correspondientes coeficientes de apuntado de haz de transmisión y relacionados con errores de reflector; y
- los medios de formación de haces digitales (33) están configurados para generar la señal digital saliente prevista para transmitirse mediante dicho segundo elemento radiante aplicando el correspondiente coeficiente de ponderación de transmisión.
- 30

8. La red de alimentación de la reivindicación 7, que incluye:

- 35 • para cada primer elemento radiante, una respectiva unidad de conversión de recepción (34) conectada entre dicho primer elemento radiante y los medios de formación de haces digitales (32) y diseñada para
 - aplicar una amplificación de ruido bajo, una conversión descendente de frecuencia y una conversión de analógico a digital a una señal de radiofrecuencia entrante recibida por dicho primer elemento radiante obteniendo de este modo una correspondiente señal digital entrante, y
 - 40 - proporcionar a los medios de formación de haces digitales (32) dicha correspondiente señal digital entrante; y,
- para cada segundo elemento radiante, una respectiva unidad de conversión de transmisión (35) conectada entre dicho segundo elemento radiante y los medios de formación de haces digitales (33) y diseñada para
 - 45 - aplicar una conversión digital a analógico, una conversión ascendente de frecuencia y una amplificación de potencia alta a una señal digital saliente generada por los medios de formación de haces digitales (33), obteniendo de este modo una correspondiente señal de radiofrecuencia saliente, y
 - proporcionar a dicho segundo elemento radiante dicha correspondiente señal de radiofrecuencia saliente que hay que transmitir de este modo.
 - 50

9. La red de alimentación de la reivindicación 7, en donde los medios de formación de haces digitales incluyen medios de formación de haces digitales de recepción (32) y medios de formación de haces digitales de transmisión (33), y en donde la red de alimentación (3, 44, 45, 54, 55, 113, 202) incluye:

- 55 • para cada primer elemento radiante, una respectiva unidad de conversión de recepción (34) conectada entre dicho primer elemento radiante y los medios de formación de haces digitales de recepción (32) y diseñada para
 - aplicar una amplificación de ruido bajo, una conversión descendente de frecuencia y una conversión de analógico a digital a una señal de radiofrecuencia entrante recibida por dicho primer elemento radiante obteniendo de este modo una correspondiente señal digital entrante, y
 - 60 - proporcionar a los medios de formación de haces digitales de recepción (32) dicha correspondiente señal digital entrante; y,
- para cada segundo elemento radiante, una respectiva unidad de conversión de transmisión (35) conectada entre dicho segundo elemento radiante y los medios de formación de haces digitales de transmisión (33) y diseñada para
- 65

- aplicar una conversión digital a analógico, una conversión ascendente de frecuencia y una amplificación de potencia alta a una señal digital saliente generada por los medios de formación de haces digitales de transmisión (33), obteniendo de este modo una correspondiente señal de radiofrecuencia saliente, y
- proporcionar a dicho segundo elemento radiante dicha correspondiente señal de radiofrecuencia saliente que hay que transmitir de este modo.

10. La red de alimentación de acuerdo con cualquier reivindicación 1-5 o 7-8, en donde los medios de formación de haces digitales (32, 33) comprenden una o más redes de formación de haces basándose en tecnología/s de Matriz de Puertas Programable en Campo y/o de Circuito Integrado Específico de Aplicación.

11. La red de alimentación de acuerdo con la reivindicación 6 o 9, en donde los medios de formación de haces digitales de recepción (32) comprenden una o más primeras redes de formación de haces basándose en tecnología/s de Matriz de Puertas Programable en Campo y/o de Circuito Integrado Específico de Aplicación; y en donde los medios de formación de haces digitales de transmisión (33) comprenden una o más segundas redes de formación de haces basándose en tecnología/s de Matriz de Puertas Programable en Campo y/o de Circuito Integrado Específico de Aplicación.

12. Antena reflectora (4, 5, 100, 200) diseñada para instalarse en una estación terrestre para satélites o a bordo de un satélite, provista con una óptica de un solo reflector o doble reflector, y equipada con la red de alimentación (3, 44, 45, 54, 55, 113, 202) de acuerdo con cualquier reivindicación anterior.

13. La antena reflectora de la reivindicación 12, que comprende un sistema de apuntado mecánico operable para realizar un apuntado mecánico de la antena reflectora (4, 5, 100, 200); en donde la red de alimentación (3, 44, 45, 54, 55, 113, 202) está configurada para realizar, mediante los medios de formación de haces digitales (32, 33), un apuntado de haz electrónico coordinado con el apuntado mecánico.

14. La antena reflectora de la reivindicación 13, en donde el sistema de apuntado mecánico es operable para realizar un apuntado mecánico lento y aproximado en elevación de la antena reflectora (4, 5, 100, 200); y en donde la red de alimentación (3, 44, 45, 54, 55, 113, 202) está configurada para realizar, mediante los medios de formación de haces digitales (32, 33), un apuntado multihaz electrónico rápido y preciso en acimut y elevación.

15. La antena reflectora de acuerdo con cualquier reivindicación 12-14, provista con una óptica de doble reflector que incluye:

- un único reflector principal (41, 51), y
- un único subreflector o una pluralidad de subreflectores (42, 42, 52, 53);

incluyendo la antena reflectora (4, 5) una pluralidad de redes de alimentación (44, 45, 54, 55), cada una de las cuales se dispone con respecto a una respectiva porción del único subreflector, o con respecto a uno respectivo de la pluralidad de subreflectores (42, 42, 52, 53), para formar, junto con una correspondiente porción del único reflector principal (41, 51), un respectivo subsistema de antena de doble reflector (46, 47, 56, 57).

16. La antena reflectora de acuerdo con cualquier reivindicación 12-14, provista con una óptica de un solo reflector que incluye un único reflector; incluyendo la antena reflectora una pluralidad de redes de alimentación, cada una de las cuales se dispone con respecto a una respectiva porción del único reflector para formar con la misma un respectivo subsistema de antena de un solo reflector.

17. La antena reflectora de acuerdo con la reivindicación 15 o 16, en donde los diferentes subsistemas de antena de un solo reflector/doble reflector:

- están configurados para operar en diferentes bandas de frecuencia; y/o
- están diseñados para apuntar a diferentes regiones de cobertura.

18. Estación terrestre para satélites, equipada con la antena reflectora (4, 5, 100) según se reivindica en cualquier reivindicación 12-17.

19. Satélite (110) equipado con la antena reflectora (200) según se reivindica en cualquier reivindicación 12-17.

20. Sistema de radar de abertura sintética por satélite equipado con la antena reflectora (200) según se reivindica en cualquier reivindicación 12-17.

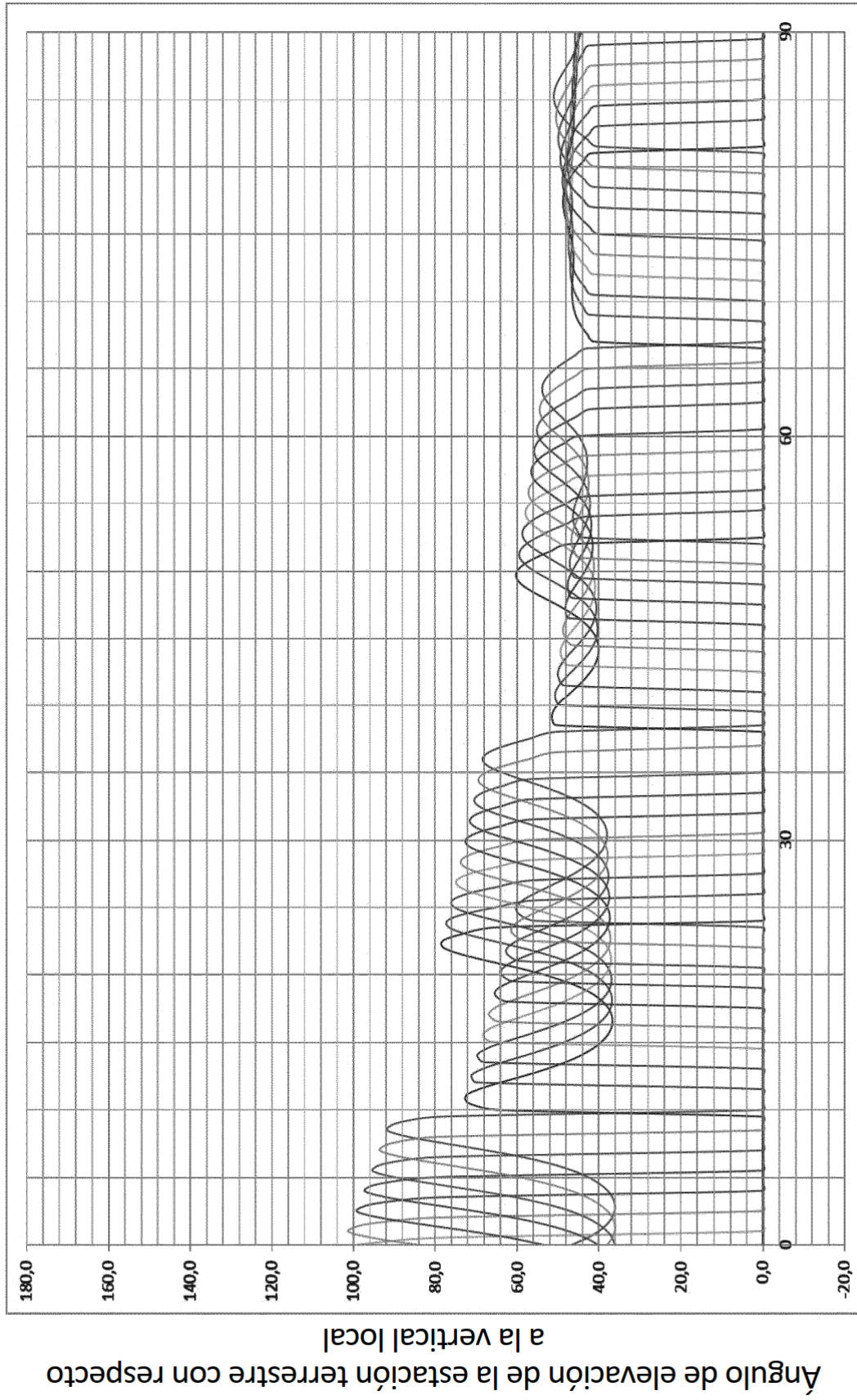


Fig. 1
Ángulos de elevación de varios satélites en diferentes LEO

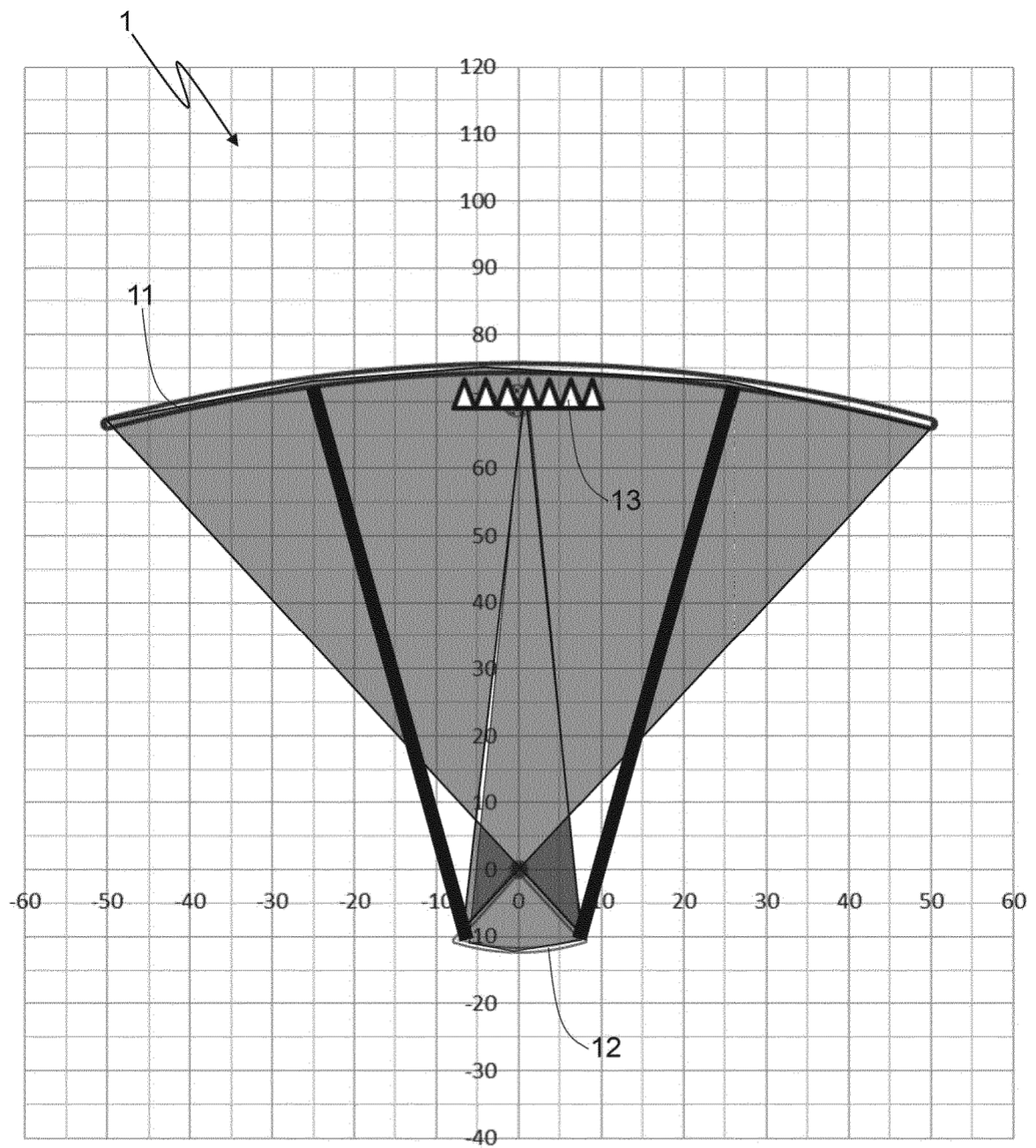


Fig. 2

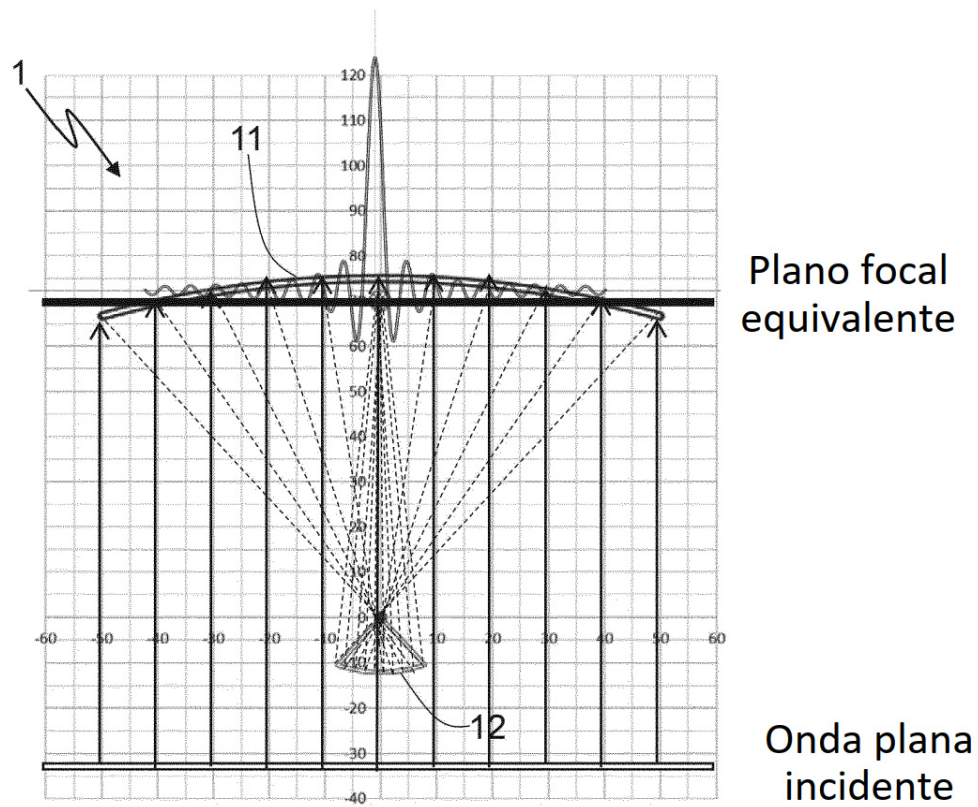


Fig. 3

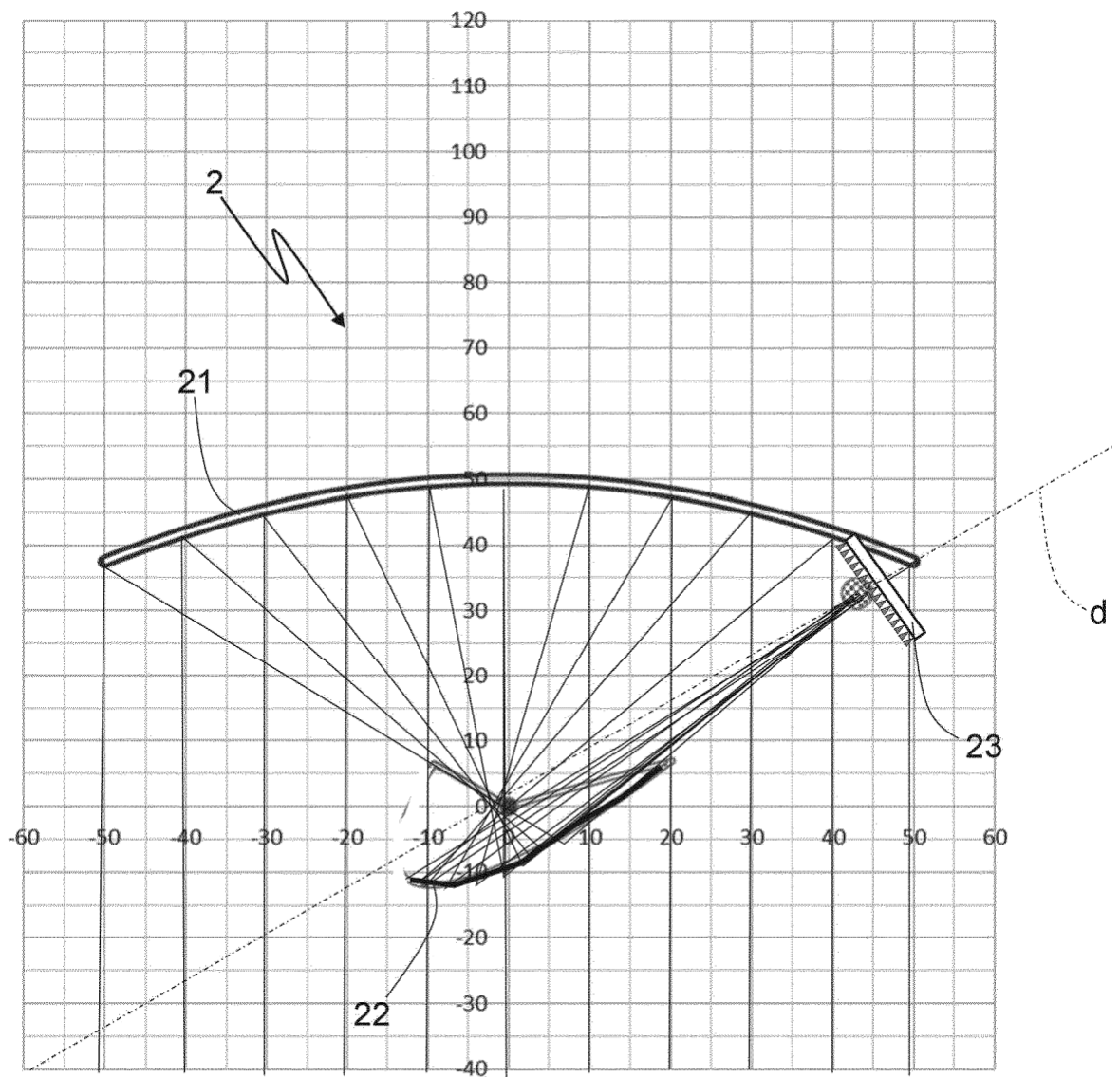


Fig. 4

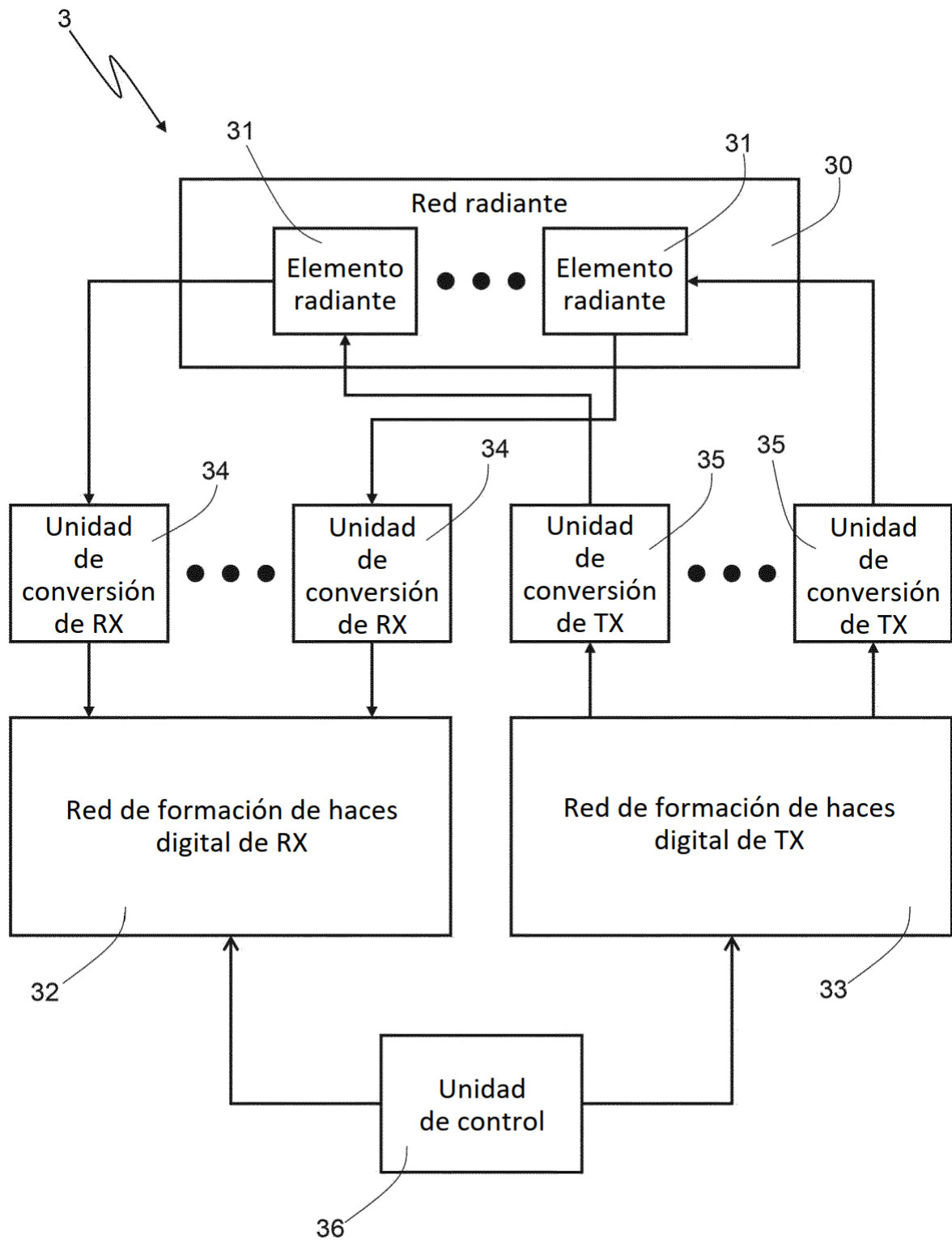


Fig. 5

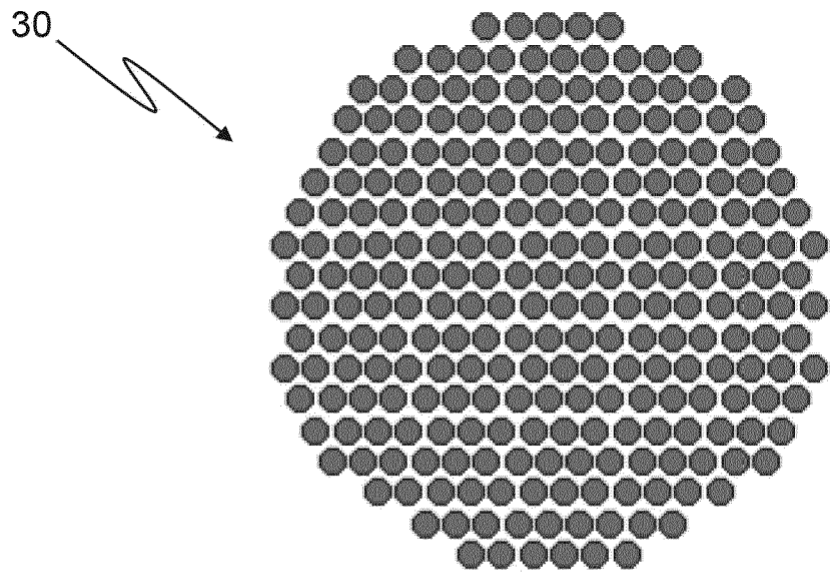


Fig. 6

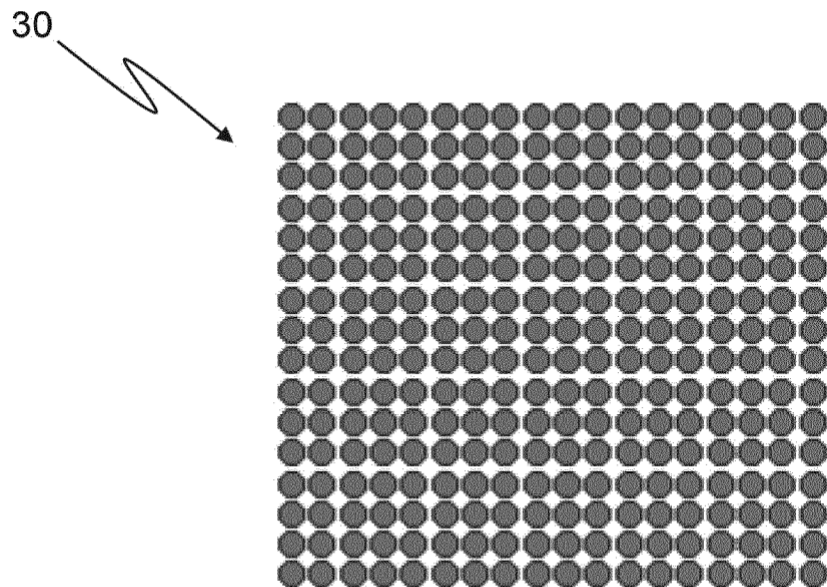


Fig. 7

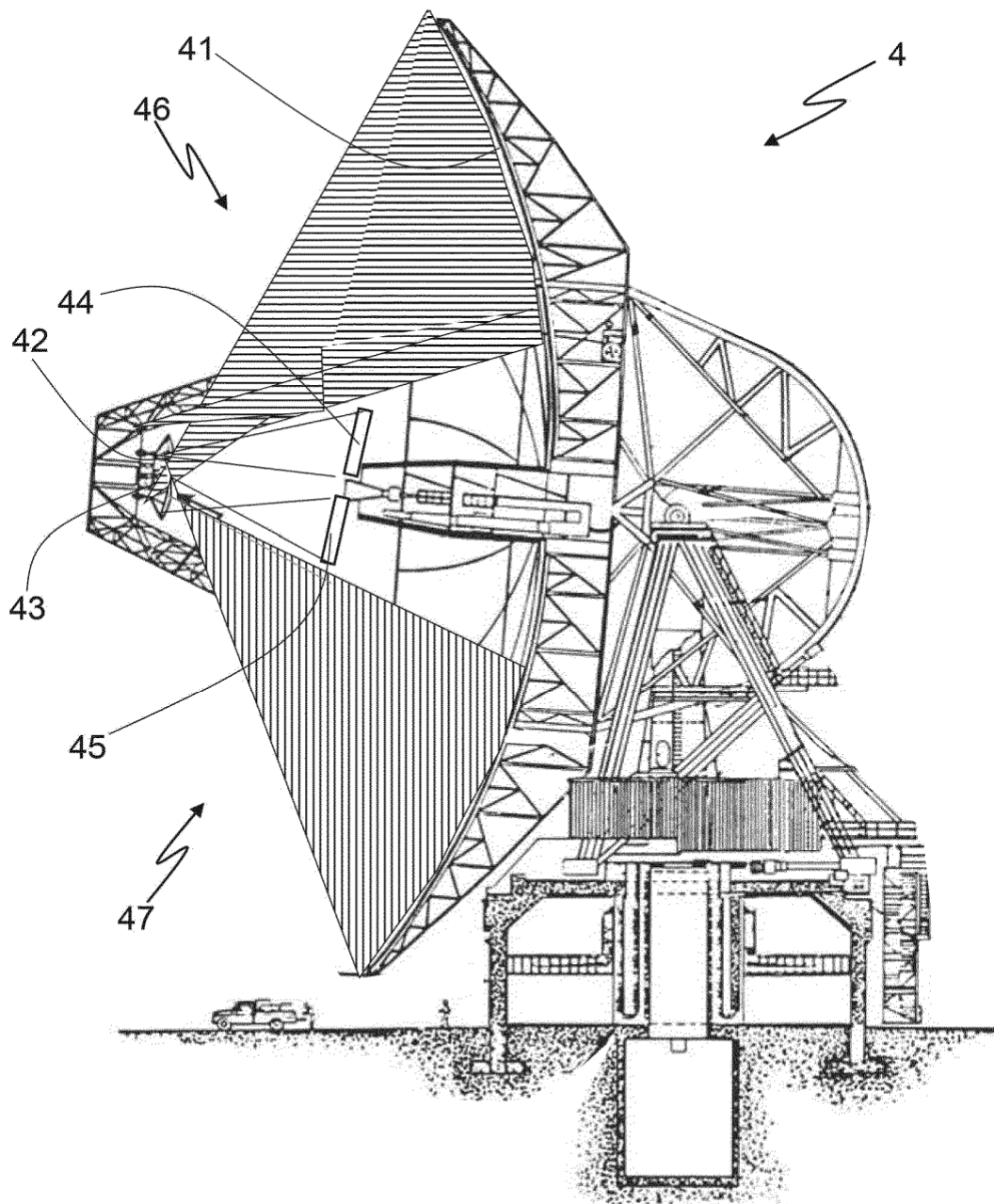


Fig. 8

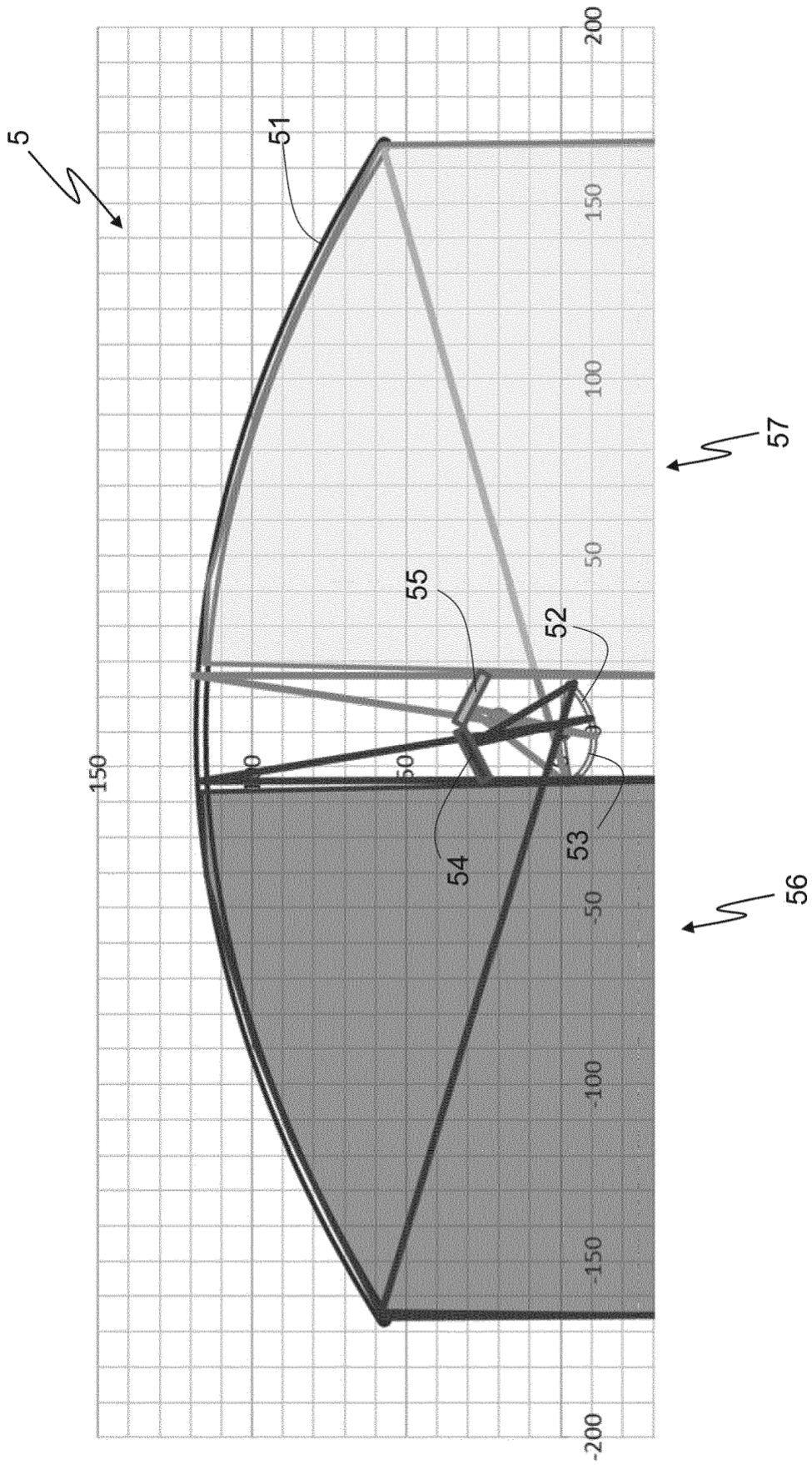


Fig. 9

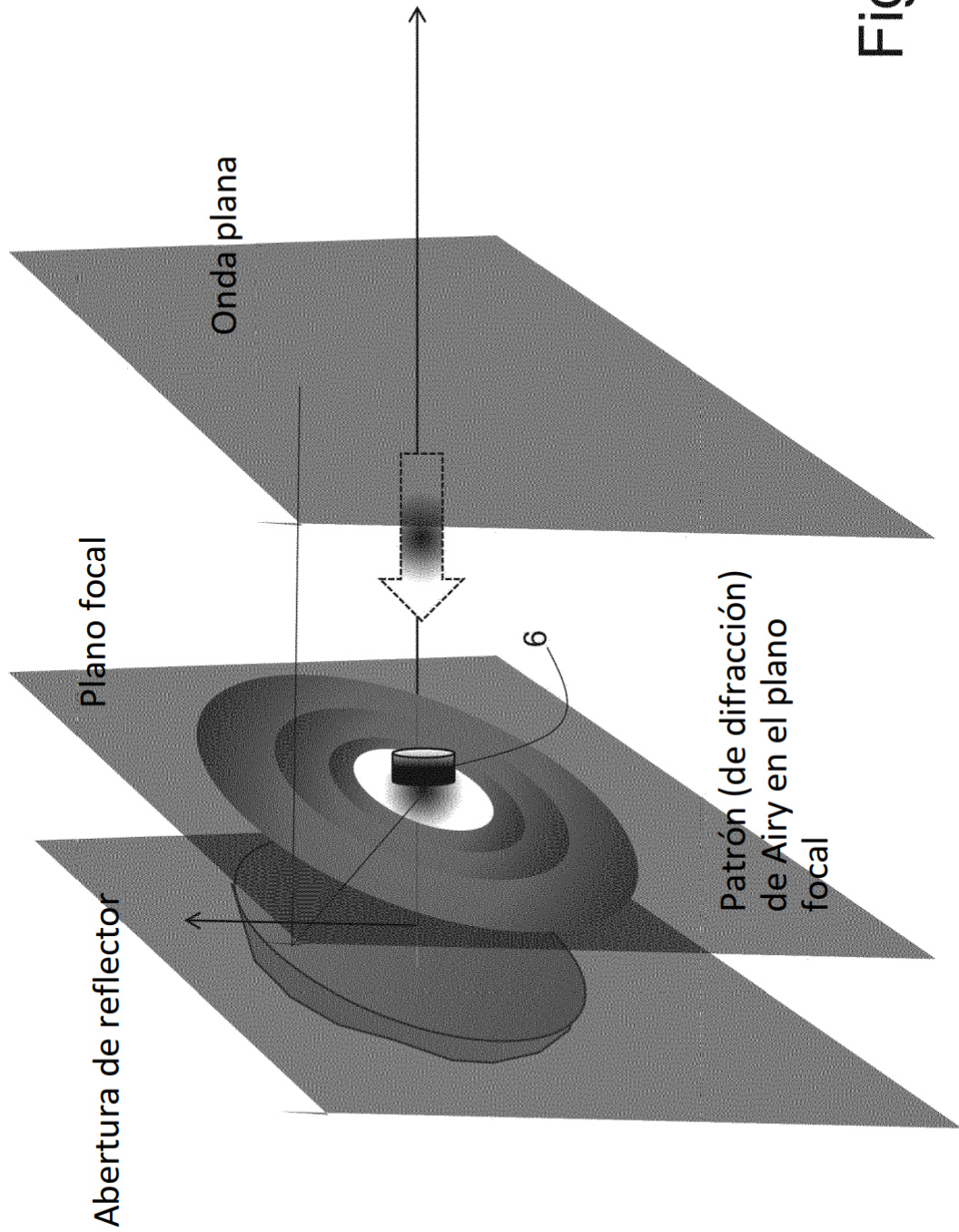


Fig. 10

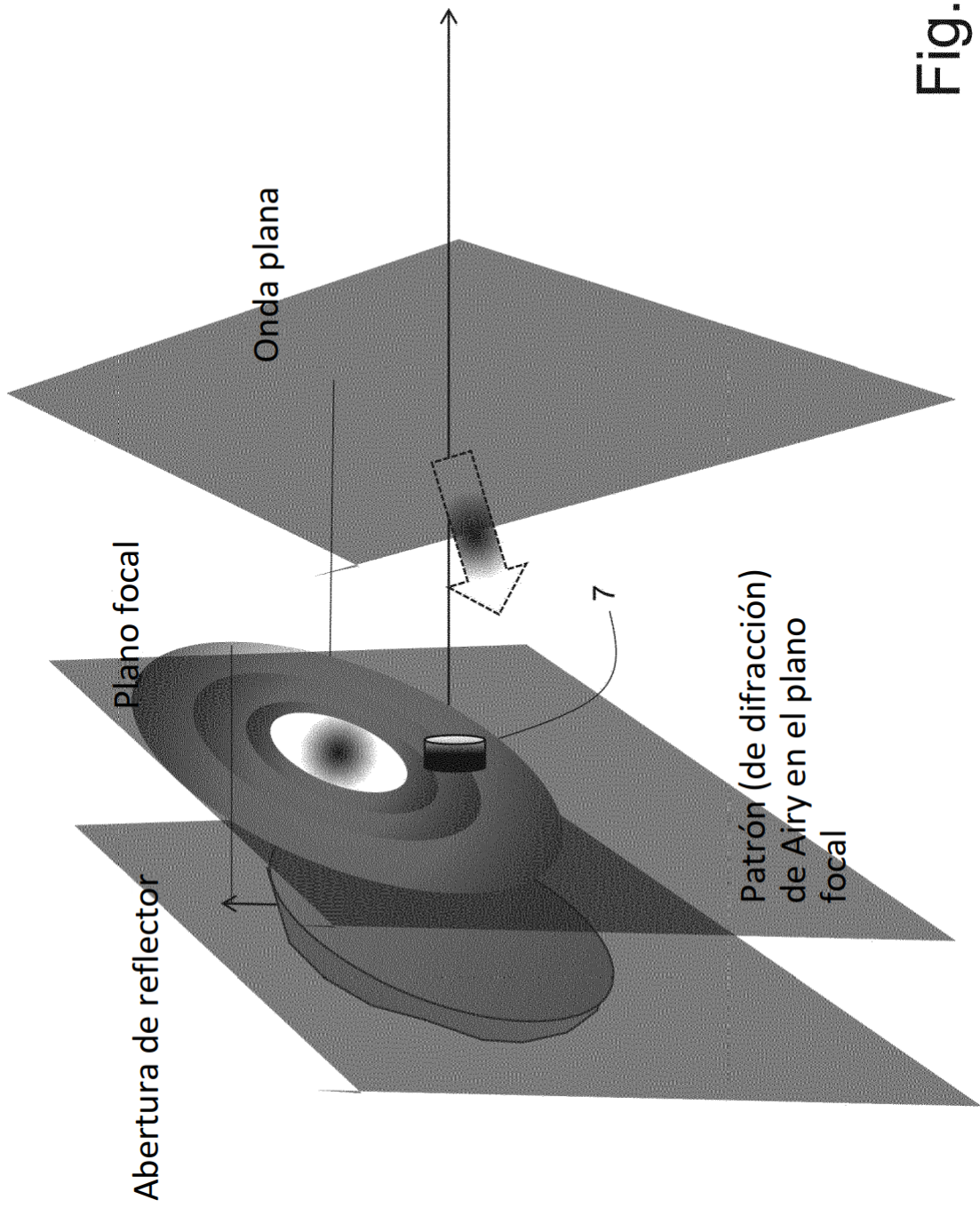


Fig. 11

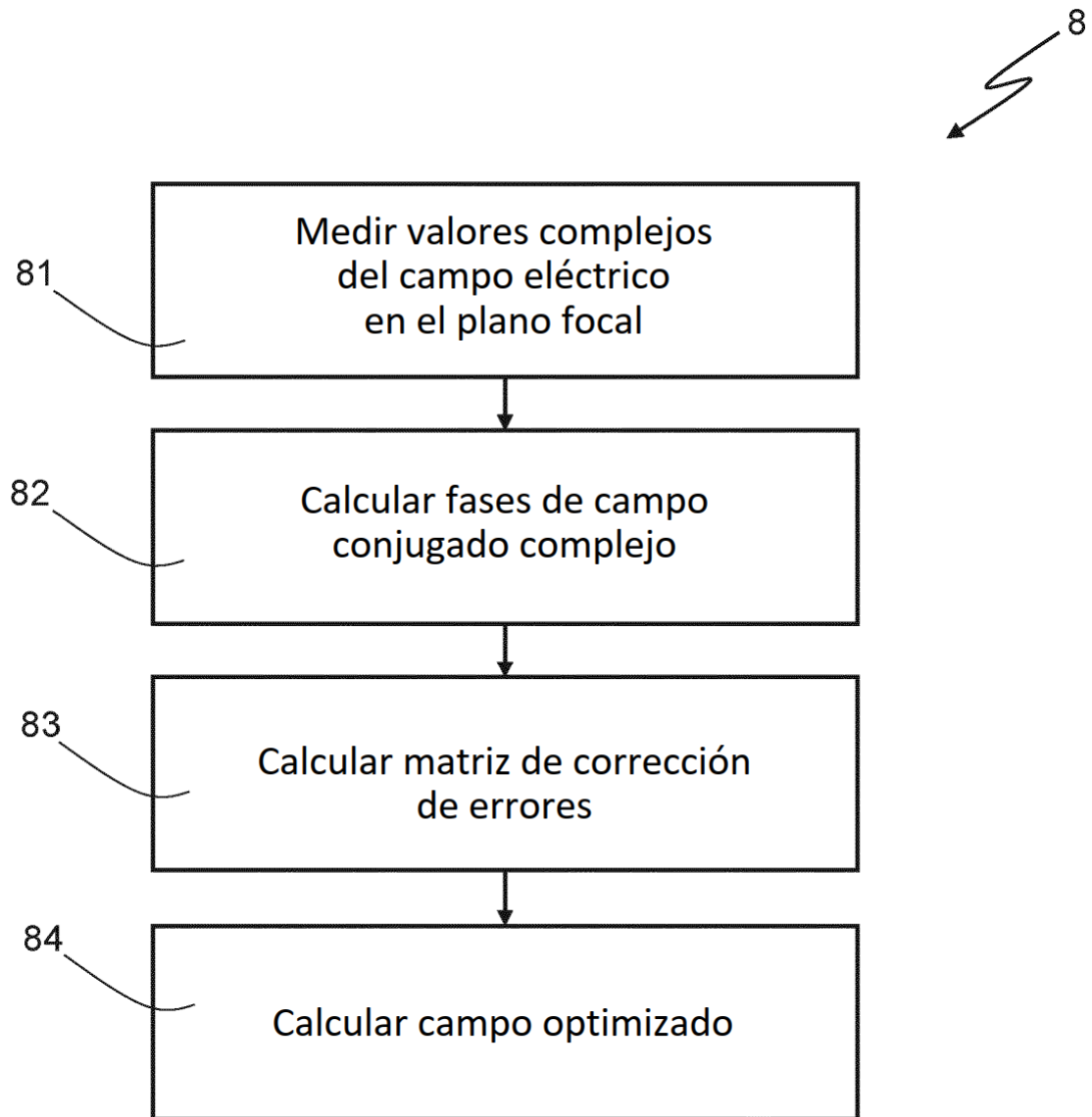


Fig. 12

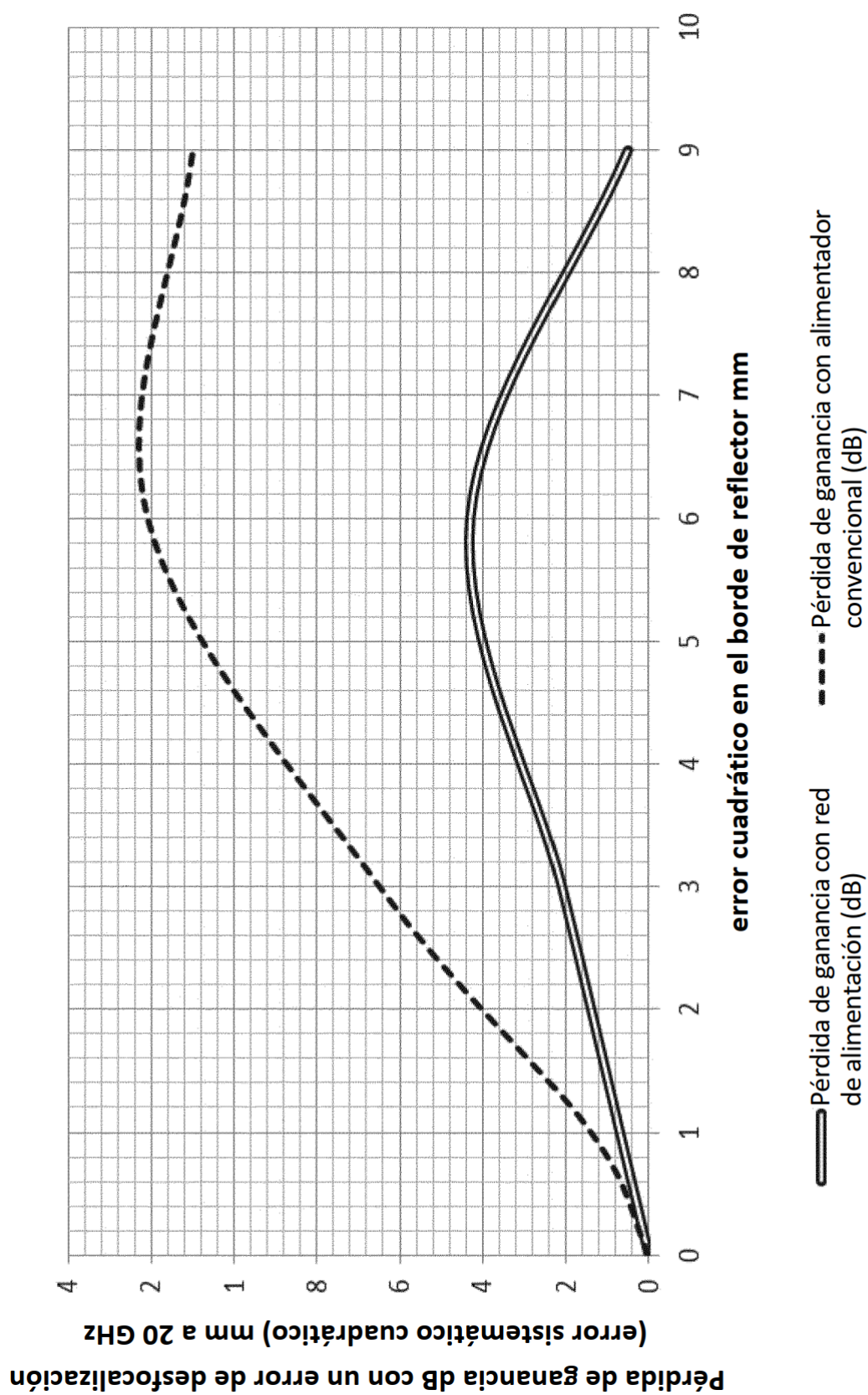


Fig. 13

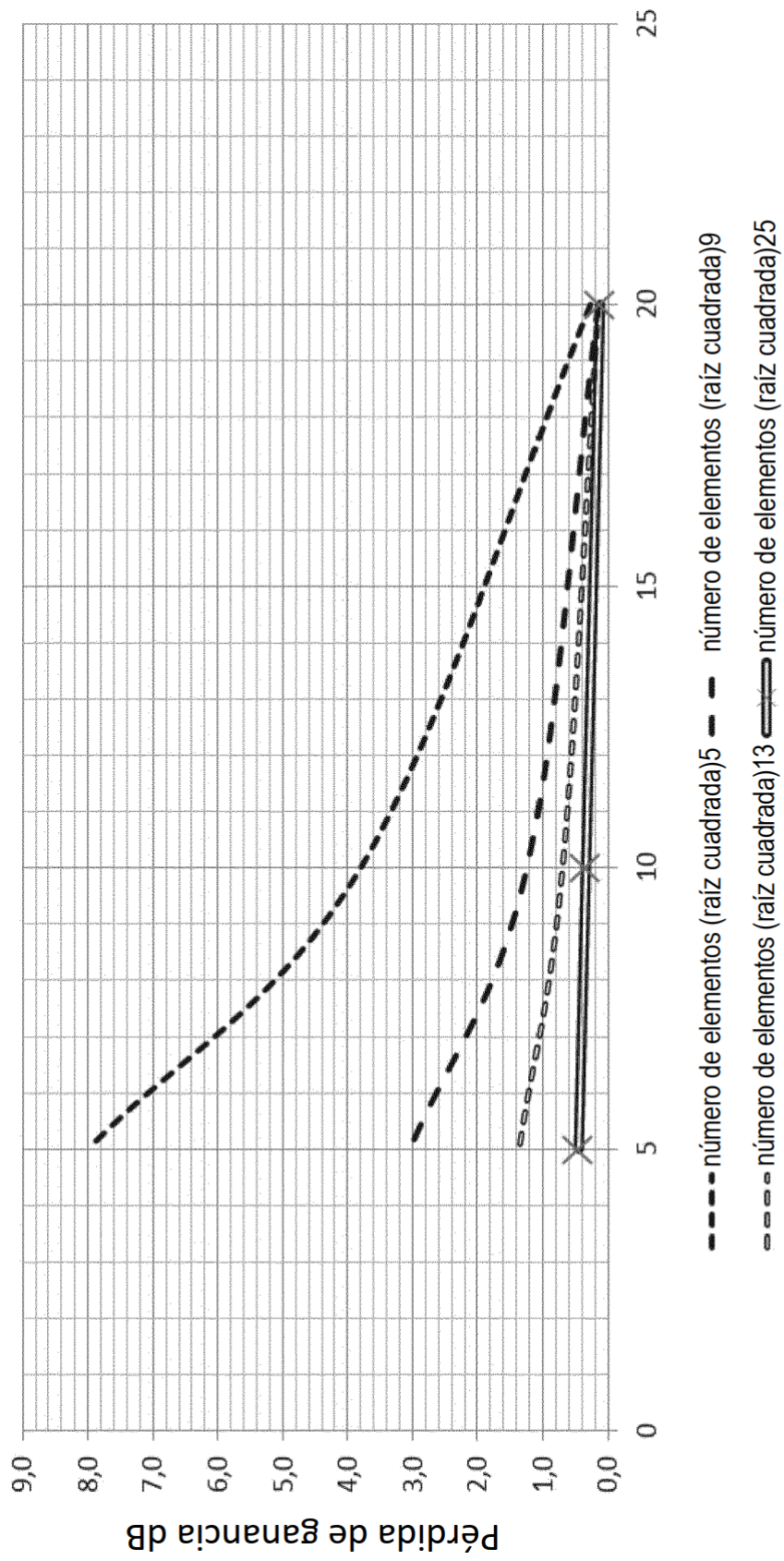
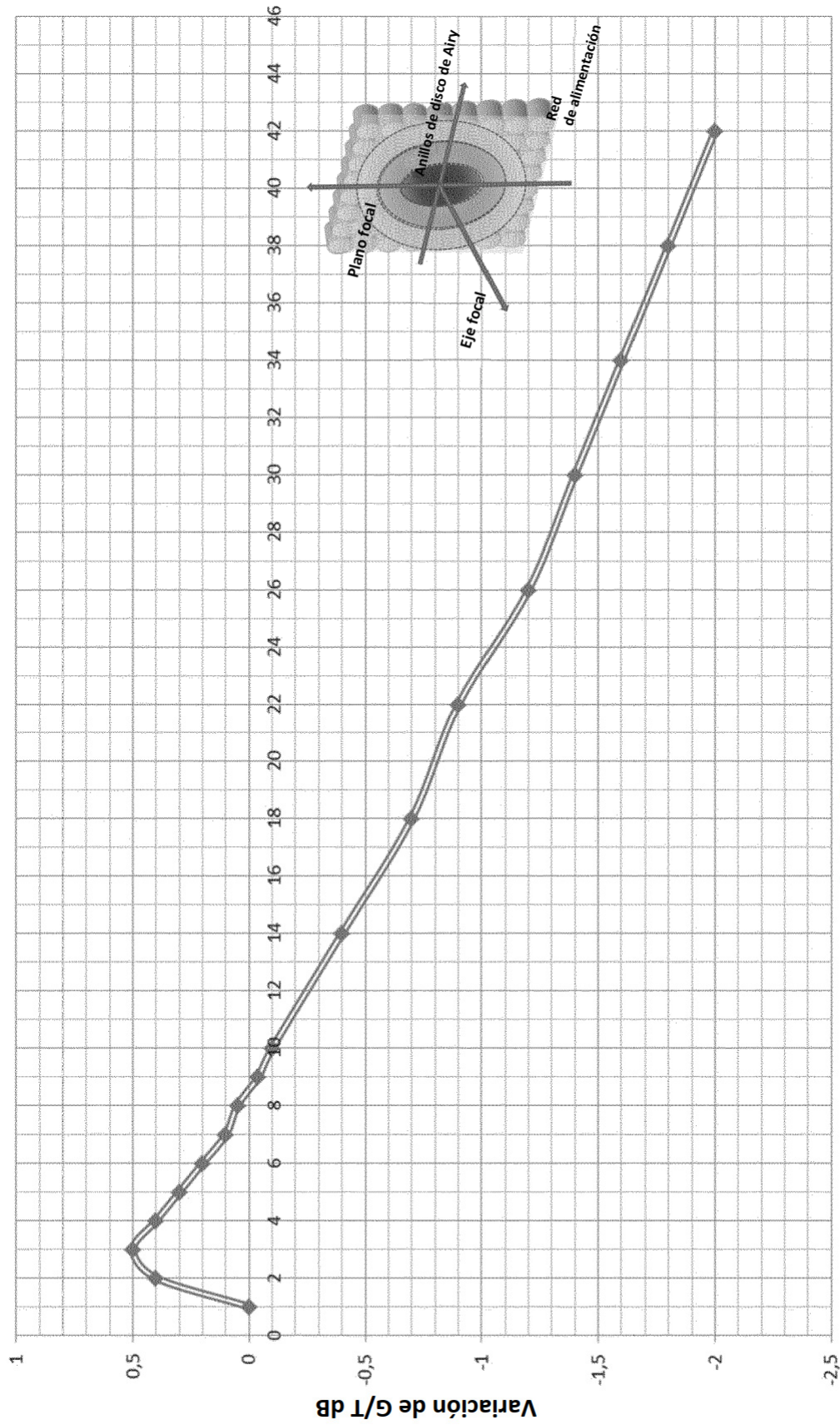


Fig. 14

Variación de G/T dB frente a número anillos de Airy



Anillos de Airy incluidos en la red

Fig. 15

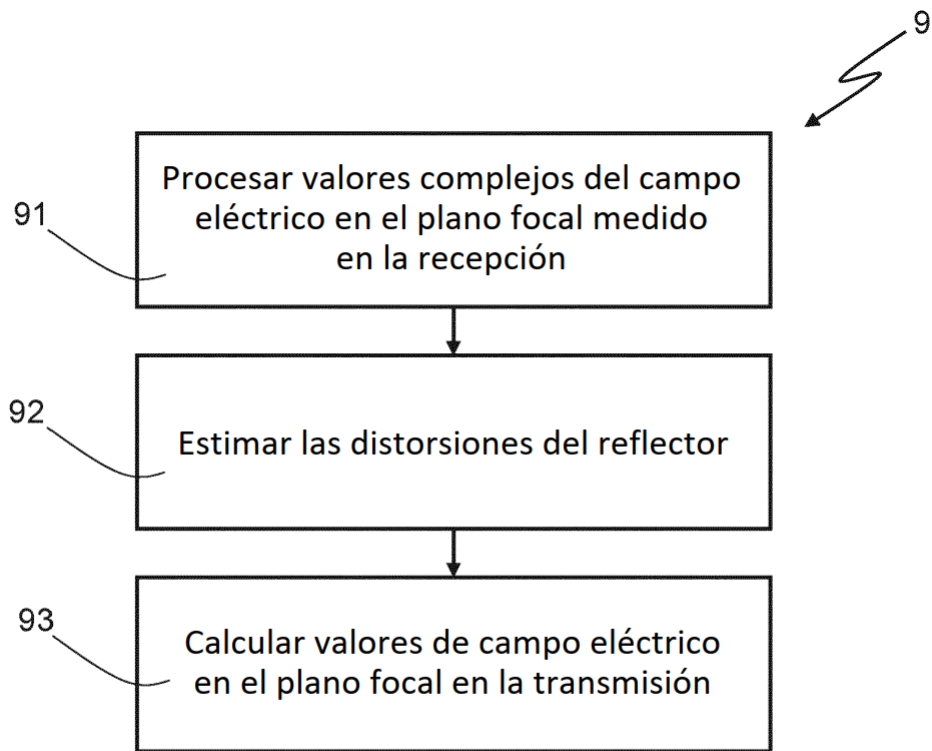


Fig. 16

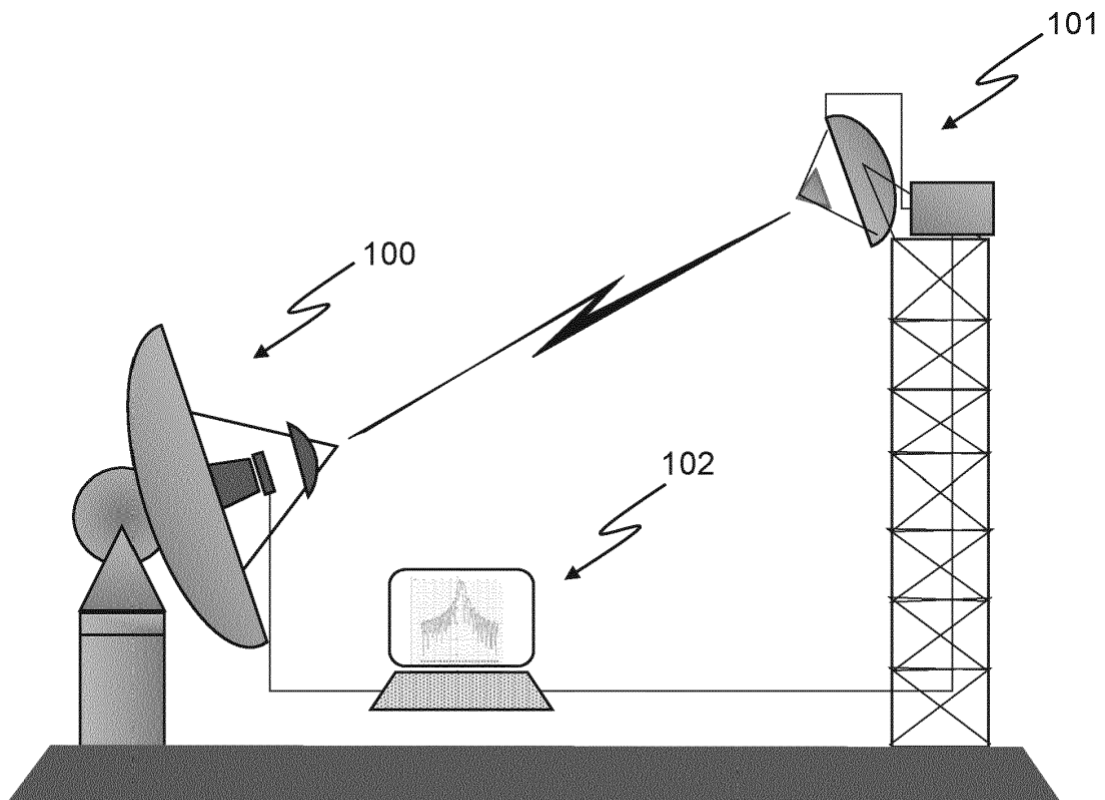


Fig. 17

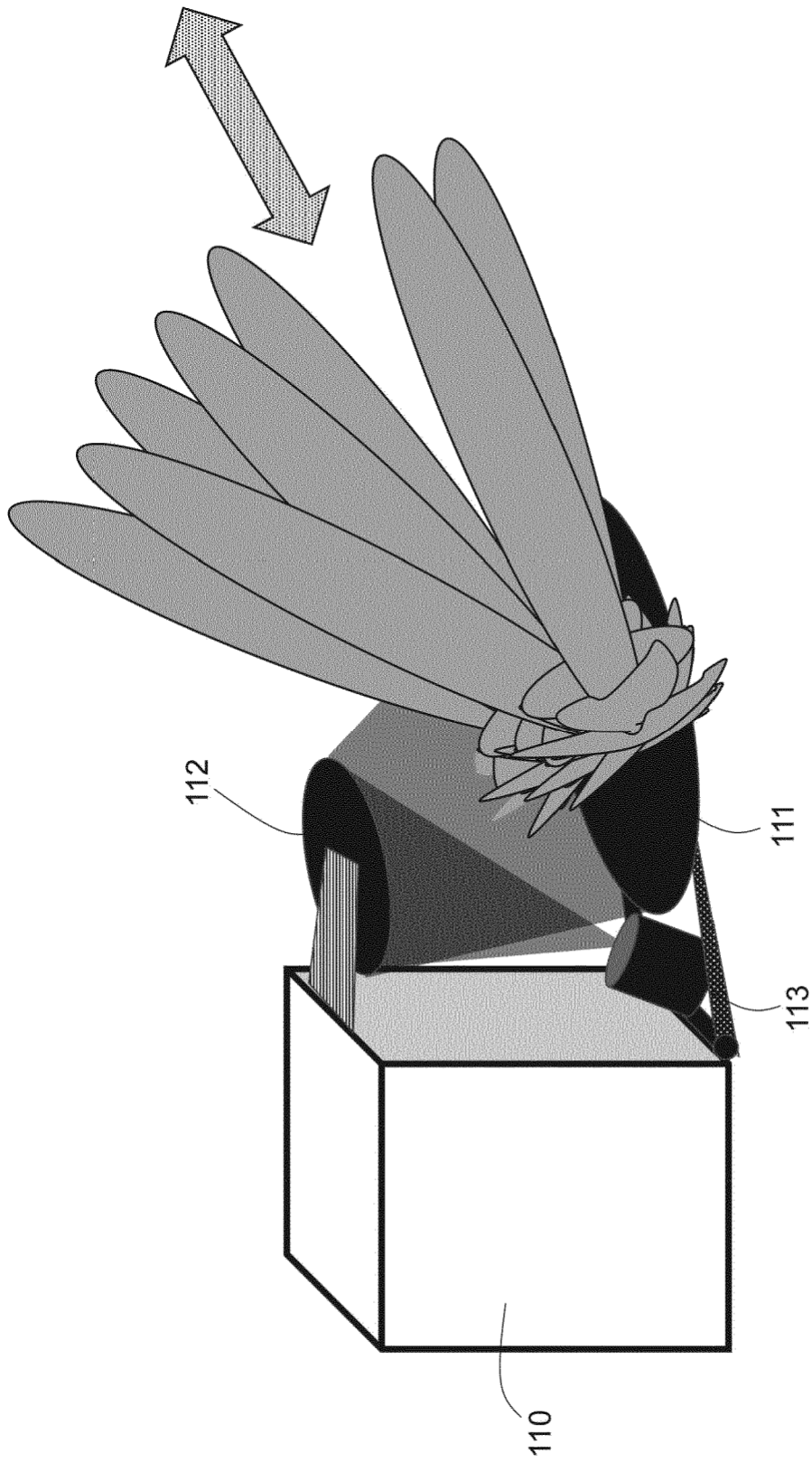


Fig. 18

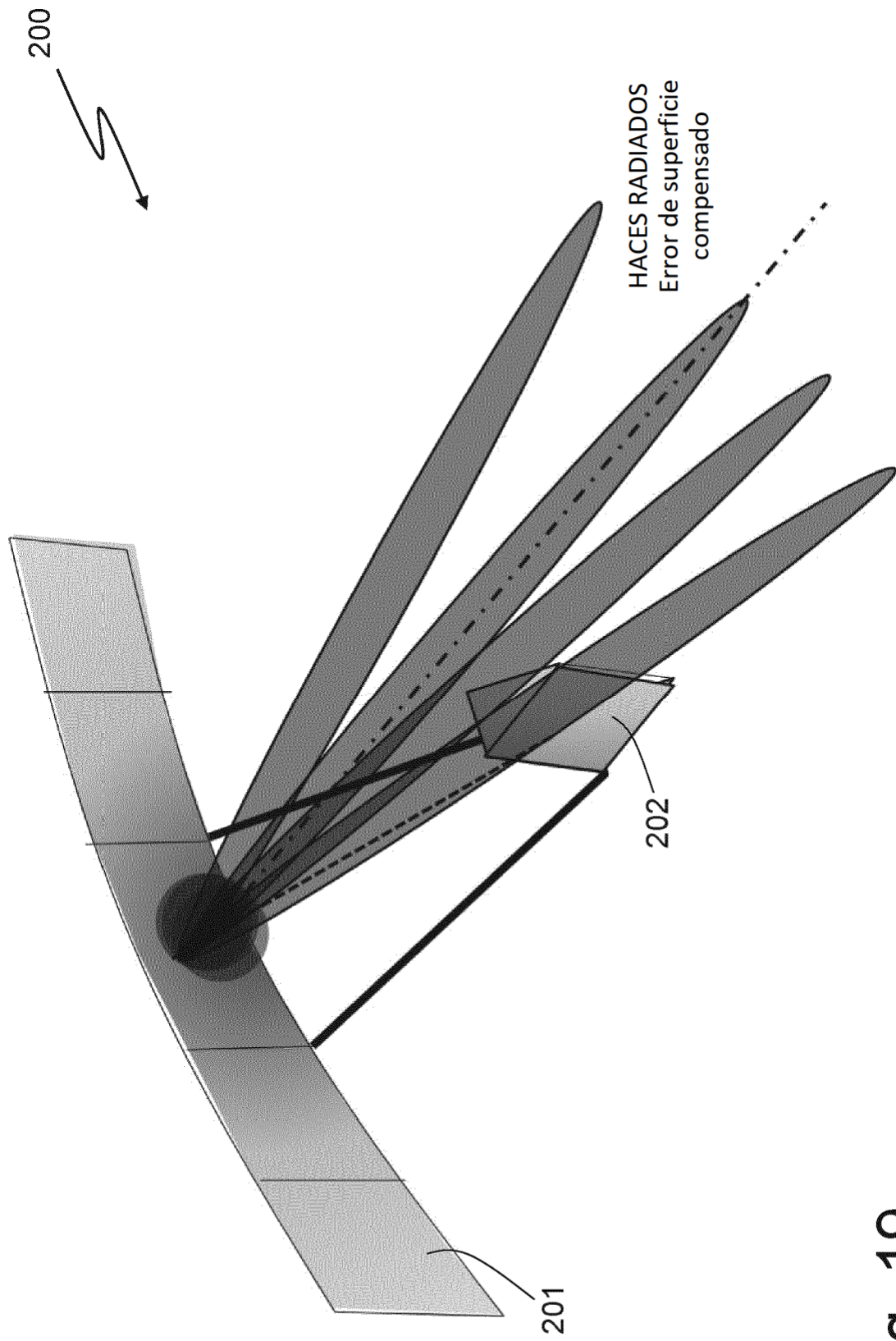


Fig. 19

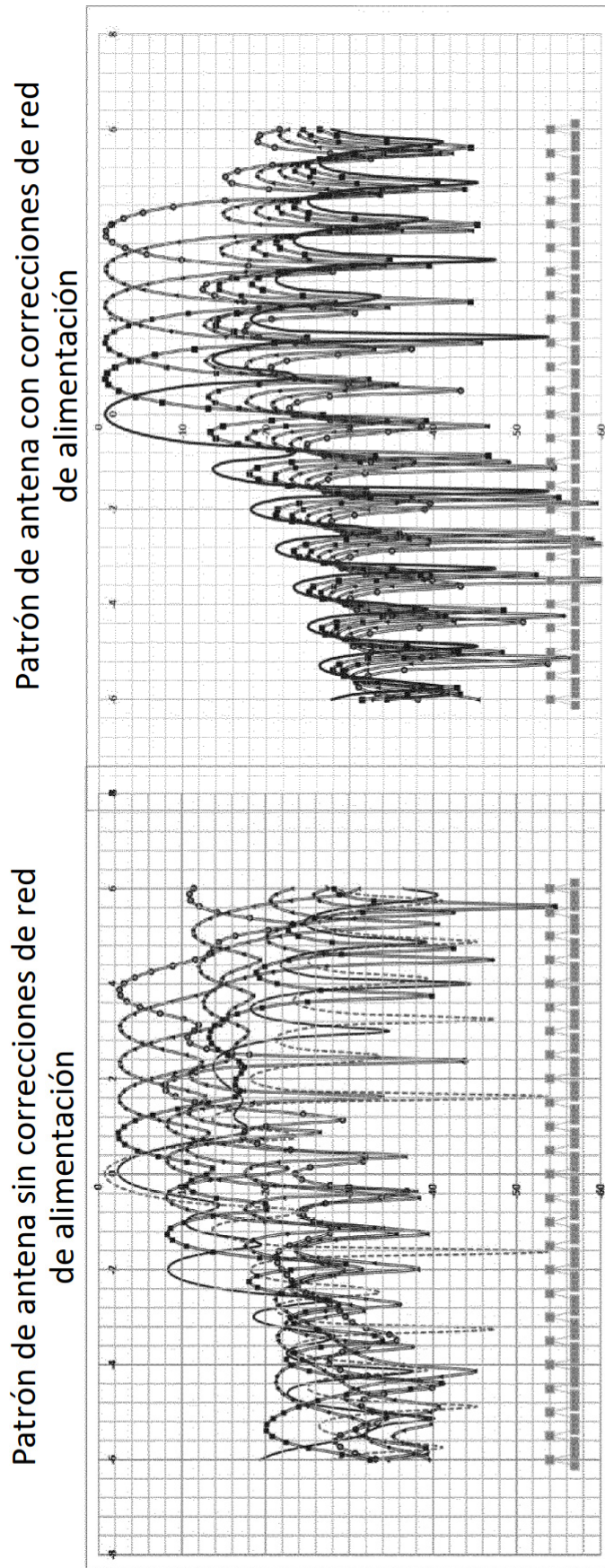


Fig. 20