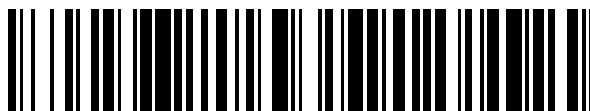


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 679 671**

51 Int. Cl.:

H01Q 1/28 (2006.01)
H01Q 3/26 (2006.01)
H01Q 21/00 (2006.01)
H01Q 21/06 (2006.01)
H01Q 25/00 (2006.01)
H01Q 21/22 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.07.2008 PCT/GB2008/050593**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **29.01.2009 WO09013527**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.07.2008 E 08776228 (2)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.05.2018 EP 2176923**

54 Título: **Sistema de simplificación del procesamiento de red de formación de haz reconfigurable en una antena de estructura en fases para un satélite de comunicaciones**

30 Prioridad:

20.07.2007 GB 0714179
20.07.2007 EP 07252896

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
30.08.2018

73 Titular/es:

ASTRIUM LIMITED (100.0%)
GUNNELS WOOD ROAD STEVENAGE
Hertfordshire SG1 2AS, GB

72 Inventor/es:

CRAIG, ANTONY DUNCAN y
STIRLAND, SIMON, JOHN

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 679 671 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

Sistema de simplificación del procesamiento de red de formación de haz reconfigurable en una antena de estructura en fases para un satélite de comunicaciones

5

Campo técnico

La presente invención se refiere en general a la formación de haz de antena de estructura en fases para una nave espacial de telecomunicaciones y, en particular, se refiere a la simplificación del procesamiento de red de formación de haz reconfigurable en una antena de estructura en fases para un satélite de comunicaciones.

10

Técnica anterior

Una tendencia clara en las comunicaciones por satélite va hacia el uso de una cobertura múltiple de haz puntual para proporcionar una alta ganancia (para reducir la potencia y operar con terminales pequeños) y para dar soporte a la reutilización de la frecuencia espacial (para aumentar la capacidad dentro de los sistemas con ancho de banda limitado). Se sabe de forma precisa definir dichos haces puntuales estrechos, con un sistema de antenas multielemento, mediante técnicas de formación de haz digital que implican asignar pesos digitales complejos a los elementos para cada canal de frecuencia de comunicación para controlar los parámetros del haz puntual; véase A. M. Bishop et al "The INMARSAT 4 Digital Processor and Next Generation Developments", 23rd AIAA ICSSC, Roma, Italia, septiembre del 2005. Un problema persistente es que, aunque existen mejoras continuas a la hora de habilitar tecnologías de procesador digital, existen demandas en continuo aumento en términos de formación de haz y procesamiento asociado con la necesidad de proporcionar mayores cantidades de haces puntuales más estrechos que operen sobre anchos de banda más amplios.

15

Una clase importante de antena que puede proporcionar dicha cobertura es la antena de estructura en fases, ya sea en su forma de estructura radiante directa (DRA) o de estructura radiante representada (IRA). En el caso de una DRA, la antena puede estar compuesta por una matriz bidimensional de elementos de la antena, típicamente, pero no necesariamente idénticos, en la que cada elemento de la antena tiene una señal de elemento respectiva (que opera en modo transmisor o receptor). En un IRA, el diámetro de apertura de un DRA primario se magnifica por medio de "ópticas" de la antena (por ejemplo reflectores parabólicos). Con el fin de la presente especificación, el término "antena de estructura en fases" incluye un DRA, IRA y otros sistemas, que tienen una pluralidad de elementos de antena, cada uno de los cuales proporciona una señal de elemento de antena que tiene una relación en fases y una relación de amplitud con las otras señales del elemento. Las antenas de estructura en fases ofrecen un alto rendimiento en términos de flexibilidad y reconfigurabilidad, lo que resulta del control de la amplitud del elemento y las ponderaciones de la fase con una red de formación de haz. Pero también es bien conocido que las estructuras en fases son complejas, enormes y caras. En comparación con tipos de antena alternativos, por ejemplo, antenas reflectoras alimentadas por estructura (AFR), normalmente requieren muchos más elementos radiantes y, así, una complejidad y coste mayores para la formación del haz.

20

Una red de formación de haz proporciona amplitud reconfigurable y control de fase (equivalente a las ponderaciones complejas en el dominio digital) para cada elemento de la antena (y potencialmente en un base de canal de frecuencia individual) de forma que dicha complejidad de formación de haz escala con el número de elementos. Ni la próxima generación de procesadores digitales sobre placa puede dar soporte a la complejidad necesaria para proporcionar una formación de haz completamente flexible para una estructura en fases diseñada para generar (por ejemplo) 100 haces de un diámetro de $0,5^\circ$, que cubran Europa a una frecuencia de 20 GHz con un ancho de banda de 500 MHz, que es un requisito comercial actual.

25

Se conocen varias formas de simplificar la construcción de antena de estructura en fases. En particular, se conoce cómo dividir las antenas de estructura en fases en subestructuras, y esto puede ofrecer simplificaciones en la construcción y el procesamiento de la señal. Las estructuras superpuestas se describen en "Design Considerations and Results for an Overlapped Sub-array Radar Antenna", Jeffrey S. Herd et al, 2005 IEEE Aerospace Conference, pp. 1087-1092.

30

La solicitud de patente de Estados UnidosUS 4,257,050 divulga una estructura grande de elementos de antena con aberturas superpuestas agrupadas.

35

La solicitud de patente europeaEP 0,917,240 divulga un ejemplo de una antena de estructura adaptativa que tiene los elementos de la antena agrupados en subestructuras.

40

45

50

55

60

La patente de Estados Unidos US 6,559,797 divulga un dispositivo de comunicación de gran altitud que utiliza parches de subestructura superpuesta.

5 La solicitud de patente de Estados Unidos US 4.642,645 divulga una técnica de estrechamiento de amplitud de la subestructura en una antena.

De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se proporciona una antena de estructura en fases de acuerdo con la reivindicación 1.

10 De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se proporciona un proceso de optimización de acuerdo con la reivindicación 8.

Con fines de la presente especificación, el término "subconjunto", significa un grupo de algunos, pero no todos, elementos de la antena.

15 En una situación común, todos los elementos de la antena participarán en más de una subestructura, aparte de algunos en los bordes de la antena.

20 Aquellos expertos en la técnica comprenderán bien el término "direccionalidad", pero para evitar dudas, debe comprenderse en el presente documento como una propiedad del patrón de radiación producido por una antena. En el caso de transmisión, puede considerarse como la proporción de la densidad de flujo de potencia de la antena en una dirección dada a la densidad de flujo de potencia completa que sería producida si el patrón de la antena fuera isotrópico. A menudo se expresa en dBi (decibelios isotrópicos).

25 Los haces de comunicaciones producidos de acuerdo con la invención pueden ser haces puntuales, que tienen una anchura muy estrecha; en el siguiente ejemplo, se consigue un diámetro de 0,5°.

30 Dicha región geográfica predefinida puede no comprender una región única y conectada. Podría ser reconfigurable desde un área conectada (digamos Europa), a varias áreas desconectadas (digamos un subconjunto de Europa más las Islas Canarias), o incluso ser fija sobre una pluralidad de áreas desconectadas. Al proporcionar el formador de haz a nivel de subestructura con múltiples salidas, la antena podría proporcionar cobertura de dos o más regiones reconfigurables independientemente.

35 La antena de estructura en fases de la presente invención puede usarse como una antena receptora, una antena transmisora, o para ambas funciones, para recibir y transmitir. Cada una de dichas subestructuras tiene un puerto (alternativamente en el presente documento "punto de control", para determinar las ponderaciones de formación de haz), que funciona como un puerto de salida cuando la antena está en modo receptor, y como un puerto de entrada cuando la antena está en modo transmisor. En el caso del modo receptor, cada subestructura incluye una función de síntesis para combinar las señales de elemento ponderadas en una única salida, y en el caso de la función de 40 transmisión, cada subestructura incluye una función de división para distribuir una única entrada a cada uno de las ponderaciones de elementos.

45 Los valores de ponderación proporcionados de acuerdo con la invención serán valores complejos, teniendo componentes reales e imaginarios en formato digital, equivalente a tener información de amplitud y fase (A, ϕ) donde las ponderaciones están en formato analógico.

50 Un aspecto adicional de esta invención se refiere a una antena de estructura en fases, formada como una pluralidad de subestructuras superpuestas, que tiene una formación de haces optimizada en una región geográfica predefinida, y un proceso para optimizar las características de formación de haz de dicha antena de estructura en fases.

Por tanto, la presente invención proporciona, en un tercer aspecto, un proceso de optimización para determinar los parámetros de formación de haz de una antena de estructura en fases, la antena proporciona cobertura sobre una región geográfica predefinida, y proporciona una pluralidad de haces dentro de dicha región, la antena tiene una pluralidad de elementos de antena, cada elemento de la antena proporciona una señal de elemento de antena que 55 tiene una relación de fases y una relación de amplitud con las otras señales del elemento, y los elementos de la antena se dividen en una pluralidad de subestructuras superpuestas, cada subestructura comprende un subconjunto de todos los elementos de la antena de estructura en fases, y al menos algunos de los elementos de la antena que participan en más de una subestructura, el proceso de optimización comprende:

60 una primera etapa en la cual las ponderaciones de formación de haz de la subestructura asignadas a los elementos de dicha subestructura se establecen a valores iniciales, y

una segunda etapa en la cual se determinan los valores de ponderación principales de formación de haz asignados a dichas subestructuras, para proporcionar valores de direccionalidad en las ubicaciones de al menos algunos de dichos haces; e

5 iterar dichas primera y segunda etapas, lo que implica cambiar los valores de dichas ponderaciones de formación de haz de la subestructura, hasta que se consigue un nivel deseado de dicha direccionalidad para dichos haces.

En un cuarto aspecto, la invención proporciona una antena de estructura en fases, la antena proporciona cobertura sobre una región geográfica predefinida, y proporciona una pluralidad de haces dentro de dicha región, la antena tiene una pluralidad de elementos de antena, cada elemento de antena proporciona una señal de elemento de
10 antena que tiene una relación en fases y una relación de amplitud con las otras señales del elemento, y los elementos de la antena se dividen en una pluralidad de subestructuras superpuestas, cada subestructura comprende un subconjunto de todos los elementos de la antena de la estructura en fases, y al menos algunos de los elementos de la antena participan en más de un subconjunto, donde las ponderaciones de formación de haz de la subestructura asignadas a cada dicha subestructura han sido optimizadas para conseguir un nivel deseado de dicha
15 direccionalidad para dicha pluralidad de haces por medio de un proceso de optimización donde dichas ponderaciones de formación de haz de la subestructura se cambian en valor en iteraciones, y en cada iteración se determinan los valores de ponderación principales de formación de haz asignados a dichas subestructuras.

Una característica de la optimización de acuerdo con la invención, es que la optimización implica determinar los
20 valores de direccionalidad por medio de valores de ponderación de formación de haz, en cada iteración de los valores de las ponderación de formación de haz de la subestructura.

Tal como se prefiere, todos o al menos algunos de dichos haces tienen un valor deseado de direccionalidad, que es al menos un valor mínimo predeterminado, como se aclarará a continuación.

25 Además, dichas subestructuras son deseablemente esencialmente idénticos entre ellos, en particular con conjuntos de ponderaciones esencialmente similares, con amplitudes y fases asignadas a los elementos correspondientes de la antena, y en particular con una configuración geométrica similar. No es necesario que éste sea el caso, sin embargo: no es necesario que las subestructuras comprendan conjuntos contiguos de elementos, y no es necesario
30 que las subestructuras tengan conjuntos idénticos de amplitudes y fases implementados sobre ellos. De hecho, si las subestructuras se implementan de forma reconfigurable mediante MEMS o componentes similares, pueden ser diferentes entre ellos, pero al coste de un aumento de etapas de optimización. Además, no es necesario que la estructura subyacente en sí mismo comprenda elementos dispuestos en una red regular, ni que tenga un contorno poligonal regular, ni elementos idénticos.

35 Así, la invención proporciona un esquema mediante el cual la función de formación de haz dentro de una estructura en fases pueda simplificarse dividiéndola en dos etapas, en las cuales la etapa de subestructura (adyacente a la estructura física) se relacione con un conjunto fijo, o cambiado infrecuentemente, de subestructuras superpuestas y la etapa principal proporciona la reconfiguración del patrón principal, normalmente en forma de múltiples haces
40 puntuales reconfigurables dentro de una región de cobertura definida. Una ventaja clave reside en la reducción significativa del número de los puntos de control de la etapa principal de formación de haz (en la cual se aplican la amplitud independiente y las señales de fase) cuando se compara con una estructura en fases convencional (donde el control de amplitud y fase se aplica para cada elemento de la estructura). En el caso de que la formación de haz y el procesamiento asociado se realice digitalmente, la reducción en el número de puntos de control de la formación
45 principal de haz simplifica el procesamiento hasta el punto de que la implementación es factible dentro de los límites de la tecnología digital actual.

La formación de haz de la subestructura puede implementarse en tecnología analógica o digital, pero preferiblemente utilizará tecnología analógica. La etapa principal de formación de haz puede implementarse de
50 forma similar en tecnología analógica o digital, pero las principales ventajas se relacionan con los sistemas digitales donde las funciones de procesamiento clave de conversión A/D o D/A, frecuencia (des)multiplexación y formación de haz todas escalan con el número de puntos de control. Aunque la invención se presta naturalmente a una implementación de formación de haz analógica/digital híbrida, ésta no es una característica necesaria. Cualquiera de las versiones toda analógica o toda digital de la invención pueden ser factibles.

55

Breve descripción de los dibujos

Ahora se describirá una realización preferida de la invención con referencia a los dibujos que la acompañan, donde:

60 La figura 1 es un diagrama esquemático que ilustra una antena de estructura en fases dividida en subestructuras superpuestas;

- La figura 2 es un diagrama de bloque esquemático de redes de formación de haz, acopladas a una antena de estructura en fases, en un modo de operación de recepción, y que se divide en subestructuras superpuestas, de acuerdo con una primera realización preferida de la invención;
- 5 La figura 3 es un diagrama de bloque esquemático de redes de formación de haz, acopladas a una antena de estructura en fases, en un modo de operación de transmisión, y que se divide en subestructuras superpuestas, de acuerdo con la primera realización preferida de la invención;
- La figura 4 es un diagrama de bloque esquemático de redes de formación de haz, acopladas a una antena de estructura en fases dividida en subestructuras superpuestas, de acuerdo con una segunda realización preferida de la invención;
- 10 La figura 5 es un diagrama de bloque esquemático de redes de formación de haz, acopladas a una antena de estructura en fases dividida en subestructuras superpuestas, de acuerdo con una tercera realización preferida de la invención;
- La figura 6 es un gráfico de flujo que muestra etapas significativas en el proceso de optimización de las ponderaciones de formación de haz de la invención;
- 15 La figura 7 es un diagrama de la faz de un ejemplo de una antena de estructura en fases que muestra la división de los elementos de la antena en subestructuras superpuestas;
- La figura 8 es un diagrama que muestra una región geográfica predefinida del globo, Europa, con 100 haces puntuales que cubren la región;
- La figura 9 es un diagrama que muestra la cobertura de la región europea en términos de direccionalidad, producido mediante un ejemplo de una subestructura individual de la invención;
- 20 La figura 10 es un diagrama que muestra la cobertura de la región europea en términos de direccionalidad, producida mediante la superposición de todas las subestructuras de la antena de estructura en fases de un ejemplo de la invención;
- Las figuras 11 y 12 son diagramas que muestran haces puntuales producidos mediante un ejemplo de la invención, en términos de direccionalidad, y
- 25 La figura 13 es un diagrama de un haz puntual reoptimizado de la figura 12.

Descripción de las realizaciones preferidas

- 30 Las estructuras en fases con radiación directa tienen un espaciado de elementos seleccionado de forma que no generen lóbulos reticulados dentro de algún campo de vista definido. Para los satélites que operan en una órbita geoestacionaria, normalmente es necesario (para mitigar las interferencias) mantener los lóbulos reticulados fuera de la Tierra. Esto, junto con la necesidad que normalmente tiene la antena de poder barrer los haces en cualquier parte sobre la Tierra visible, implica que el espaciado de elementos no debería superar las 2 o 3 longitudes de onda.
- 35 Por otro lado, el tamaño general de la estructura se determina en relación inversa con el tamaño angular de los haces que está diseñado para generar. Para proporcionar haces puntuales de 0,5 grados, una abertura general de aproximadamente 2,4 m puede ser necesaria en la frecuencia seleccionada de 20 GHz. Con un espaciado de elementos de aproximadamente 3,3 cm (2,2 longitudes de onda a 20 GHz), se necesitan más de 4000 elementos.
- 40 No sería práctico proporcionar una antena de estructura en fases específicamente diseñada y dimensionada solo para cubrir únicamente la región europea, debido a las consideraciones anteriores. Por otro lado, una antena reflectora AFR (que no tiene el problema de los lóbulos reticulados) diseñada para cubrir solo la región europea en la cual se contienen 100 haces puede ser diseñada para un rendimiento similar usando aproximadamente 150 mecanismos de alimentación. Existe claramente una enorme diferencia en la complejidad de la disposición de
- 45 formación de haz necesaria para las dos arquitecturas de antena. Esto ha impedido la amplia adopción de la tecnología de estructura en fases a pesar del amplio reconocimiento de la antena de estructura en fases como muy flexible y reconfigurable.
- Una forma de reducir la complejidad de una estructura en fases es reducir el número de puntos de control activos (puertos de la antena) requeridos en la estructura en fases para determinar las ponderaciones de formación de haz, formando los elementos en clúster no superpuesto ("subestructuras"), normalmente subestructuras idénticas, donde los elementos en cada subestructura tienen ponderaciones de amplitud y fase fijas (a menudo amplitud uniforme, fase igual), de forma que el número de puntos de control activos se reduce por factor igual al número medio de
- 50 elementos en cada subestructura. La desventaja de este enfoque es que el rendimiento del barrido de la antena se reduce, de forma que los haces apuntados hacia el borde de la región de cobertura de interés sufren de un rendimiento reducido. Además, el espaciado angular del lóbulo reticulado de la antena ahora se corresponde con el espaciado entre las subestructuras, no entre los elementos individuales, de forma que se pierde la propiedad de evitar que los lóbulos reticulados caigan a la Tierra.
- 55
- 60 La invención evita ambas desventajas anteriores, sin aumentar el número de puntos de control. Esto se consigue

aumentando el tamaño de las subestructuras, pero no el espaciado. Así, las subestructuras se "superponen", y cada elemento participa en un número de subestructuras. El número de puntos de control (puertos) se reduce, sin embargo. Consultando la figura 1, se muestra un ejemplo de una estructura superpuesta, que comprende una estructura lineal de elementos de antena 2. Se forman cuatro subestructuras 4, cada una comprende seis elementos, y cada uno tiene un puerto 6 de punto de control/interfaz respectiva. Tres elementos 8 de cada subestructura también forman parte de una subestructura adyacente (en cada lado), de forma que en la parte principal, central de la antena, cada elemento (en este ejemplo de estructura lineal) participa en dos subestructuras.

Las ventajas de este enfoque son primero que subestructuras más grandes, sin restricción de su espaciado físico, ofrecen un mayor alcance de optimización del patrón de las subestructuras individuales. Esto puede incluir perfilar el patrón de forma que proporcione una baja direccionalidad en el área fuera de la región de cobertura, realizando así una supresión activa de los lóbulos reticulados. También puede incluir optimización para un rendimiento mejorado del barrido dentro de la región de cobertura, hasta el punto en el cual la pérdida de barrido del haz puede ser solo insignificativamente peor que el rendimiento de barrido de una estructura no diezmada. El rendimiento (dentro de la región especificada) es esencialmente igual al de la estructura completa, pero la complejidad de la formación de haz principal se reduce en un gran factor (aproximadamente 20 en el ejemplo descrito a continuación). La formación de haz de nivel de haz se realiza mediante un formador de haz principal considerablemente simplificado. La formación de haz implementada (preferiblemente mediante medios analógicos) a nivel de subestructura puede ser fija, o podría permitir la reconfiguración ocasional (mediante Sistemas Microelectromecánicos (MEMS) o componentes de Circuitos integrados de microondas monolíticas (MMIC), por ejemplo, para reconfigurar la región de cobertura bruta desde un área de la tierra a otra, por ejemplo, de Europa a América.

Segundo, una característica clave de la invención es que las ponderaciones complejas en las subestructuras se personalizan para la cobertura necesaria. Las ponderaciones de la subestructura pueden, por ejemplo, optimizarse específicamente para la forma detallada de la cobertura europea, con el resultado de que el rendimiento del barrido de la antena general se optimiza enormemente para Europa, de forma que haya muy poca pérdida del barrido en Europa, y una rápida caída del rendimiento fuera, como se requiere para la supresión del lóbulo reticulado.

La invención tiene un número de variantes de nivel alto en términos de división entre tecnología digital y analógica. La primera variante asume el uso de tecnología analógica para la formación de haz de la subestructura y tecnología digital para la formación de haz principal. La arquitectura es relevante para los casos de recepción (figura 2) y transmisión (figura 3).

Consultando ahora la figura 2, la primera realización de la invención comprende una antena de estructura en fases configurada en el modo de recepción, y que comprende un Sistema Radiante Directo (DRA) con abertura formada por una estructura bidimensional de NE elementos de antena 20 (solo se muestra una dimensión en la figura 2). La estructura es normalmente, pero no necesariamente, planar. Las estructuras conformadas (es decir, estructuras donde los elementos se colocan sobre alguna superficie no plana, generalmente ya presente para otro fin), podrían usarse igualmente. La estructura comprende una geometría regular en términos de ubicaciones centrales del elemento (pero no esencialmente), normalmente sobre una red cuadrada, rectangular o hexagonal; la descripción en el presente documento asume una red cuadrada.

Cada elemento proporciona una señal de elemento receptor a un Amplificador de bajo ruido (LNA) 22, con filtración asociada para detener la saturación del amplificador cuando se produce la transmisión.

Los elementos proporcionan entradas a un conjunto de NS Redes de formación de haz 24 (BFN) de la subestructura que se implementan en tecnología analógica (normalmente para RF (GHz) pero alternativamente para una IF baja donde la conversión descendente se produce en una etapa temprana, en cuyo caso los componentes de las redes 24 pueden ser de una especificación inferior. Cada subestructura 24 comprende como se muestra, en este ejemplo específico, cuatro elementos similares geoméricamente adyacentes, con cada subestructura superpuesta a una subestructura adyacente en los dos elementos. Cada elemento por tanto participa en dos subestructuras en la dirección lineal mostrada, de forma que el espaciado entre las subestructuras sea el doble que el espaciado del elemento. Existe una disposición similar de las subestructuras en una segunda dirección, de forma que sobre el área de la estructura, el número de subestructuras NS sea menor por un factor de 4 que el número de elementos NE. Las subestructuras pueden, sin embargo, ser de cualquier tamaño deseado, y los elementos de cada subestructura pueden no estar adyacentes unos a otros, sino que pueden estar distribuidos sobre la faz de la antena.

Cada red de formación de haz 25 de la subestructura comprende un dispositivo de ponderación de amplitud respectivo y un dispositivo de ponderación de fase acoplado a cada entrada del elemento, seguido de un dispositivo de síntesis para sintetizar las contribuciones del elemento ponderado para proporcionar el resultado general de la

subestructura en el puerto de salida 26. Normalmente, pero no necesariamente, el mismo conjunto de ponderaciones puede aplicarse a cada subestructura. El patrón de radiación formado por la subestructura proporciona una envoltura a los patrones que pueden formarse por el sistema DRA general, de forma que el patrón de la subestructura cubra una región dentro de la cual se requiera formar una red de haces puntuales y puede, además, limitar la ganancia fuera de esta región para limitar las interferencias. En una variación, las ponderaciones dentro de la subestructura pueden ser constantes a lo largo del tiempo. En una segunda variación, pueden ser controlables en cuyo caso es posible implementar una reconfiguración en bruto de la envoltura de cobertura mientras está en órbita. Los valores precisos de las ponderaciones complejas de la subestructura se determinan mediante un proceso de optimización, como se describirá más particularmente a continuación.

10 Cada salida de la subestructura, o punto de control 26, se conecta a un conversor descendente 28 para reducir la señal RF a una frecuencia IF. La conversión descendente requiere una fuente de frecuencia 30 de oscilador común local para mantener el seguimiento de la fase entre las señales de la subestructura. Los filtros de banda 32 limitan las señales de la subestructura a la banda general de frecuencia de interés, y cada señal de la subestructura se
15 convierte, mediante un conversor A/D 34, a una secuencia de muestras de señales.

La conversión descendente normalmente coloca la banda de interés cerca de la frecuencia cero (teniendo en cuenta el ancho de banda de la señal y la frecuencia de muestreo del ADC 34) para cada subestructura. La frecuencia de muestreo de los conversores A/D es al menos el doble que el ancho de banda de la banda de interés y puede
20 implicar muestreo real (A/D único por subestructura) o muestreo complejo (par de A/D por subestructura operando en cuadratura). El muestreo complejo requiere convertir la señal de entrada a formato IQ antes de la conversión A/D, y esto puede producirse de una forma conocida en la etapa de conversión descendente 28, donde las señales locales del oscilador se proporcionan en cuadratura de fase.

25 La banda general de interés contiene K canales de banda estrecha que están contenidos dentro de una serie de haces puntuales formados dentro de la región general de cobertura tal como define el patrón de la subestructura. Cada señal de la subestructura digitalizada se desmultiplexa digitalmente en frecuencia en K canales independientes en un desmultiplexador 36. Ventajosamente, cada señal de canal implica normalmente la eliminación en el desmultiplexador de la frecuencia de muestreo compleja consistente con el ancho de banda del canal, para la
30 simplificación del posterior procesamiento.

Hay una red de formación de haz digital (BFN) 38 asociada con cada uno de los K canales, que está conectada a las salidas respectivas de cada desmultiplexador 36, para recoger todos los componentes del canal respectivo. Cada BFN digital multiplica la entrada muestreada de cada subestructura por un coeficiente complejo (equivalente al
35 control de amplitud y fase en términos analógicos) y suma las salidas ponderadas para formar una señal de salida general del canal. La selección de las ponderaciones complejas para un canal dado determina las propiedades del haz para ese canal. Por ejemplo, para formar un haz puntual en una dirección dada, ya que las ponderaciones de la subestructura ya se han determinado, las ponderaciones se seleccionan, mediante un proceso que será fácilmente evidente para la persona experta en la técnica, de forma que haya un gradiente de fase uniforme en el conjunto de
40 subestructuras superpuestas de forma que los patrones de la subestructura se añadan de forma coherente en la dirección requerida. Así, la selección de ponderaciones de DBFN puede usarse para dirigir la capacidad entre las direcciones del haz puntual en respuesta a un patrón de tráfico cambiante o para ejercitar un control más general en las propiedades del haz (tamaño y forma). En otra variación un canal de frecuencia dado puede ser reutilizado por múltiples haces puntuales, en cuyo caso existen múltiples DBFN para un canal dado, cada uno formando un haz
45 independiente para el cual hay suficiente espaciado para limitar la interferencia mutua.

Una característica clave de esta invención es que el uso de las subestructuras superpuestas sirve para simplificar el procesamiento digital dentro de la arquitectura general cuando se compara con un sistema de estructura en fases donde cada uno de los N_e elementos primarios se muestrea y procesa digitalmente. Específicamente, el número de
50 conversores descendentes, filtros de banda, conversores A/D y desmultiplexadores de frecuencia se reduce de N_e a N_s (es decir, por un factor de 4 en este ejemplo) y además la dimensión de los BFN digitales se reduce similarmente de N_e a N_s . Esta simplificación se traduce en una reducción de la masa y la potencia dentro de una implementación práctica que puede suponer la diferencia entre viabilidad o no viabilidad para una nave espacial, dado el estado de las tecnologías capacitadoras digitales relevantes.

55 Para el ejemplo específico descrito a continuación del haz puntual europeo, el número de puntos de control es un factor de aproximadamente 20 menor que el número de elementos (4000). Esto implica una dramática reducción de la complejidad de procesamiento digital, que puede hacer que dicho sistema sea factible.

60 Consultando ahora la figura 3, que es una arquitectura equivalente a la de la figura 2, pero para un modo de

transmisión, cada uno de los K canales de comunicación de banda estrecha se alimenta a una red de formación de haz digital respectiva (DBFN) 40, donde se aplica una ponderación compleja para definir los haces puntuales. Los canales ponderados se multiplexan en una serie de Ns multiplexadores 42 de frecuencia digital de modo K. La salida de cada multiplexador se acopla a un conversor D/A 44 respectivo, y la salida análoga se alimenta a un filtro de banda 46 y un conversor ascendente 48 para convertir la señal multiplexada a una frecuencia RF. La señal RF se aplica a un puerto de entrada 50 de una subestructura 52. Cada subestructura tiene una red de formación de haz 54, donde la señal se divide mediante un divisor en señales de elemento de antena individuales, cuatro en este caso, cada señal sometida a una ponderación de amplitud y fase respectiva. Las señales de elemento ponderadas se combinan en un dispositivo de síntesis 56 con señales de elemento correspondientes de otras subestructuras 52, y se alimentan mediante un amplificador de alta potencia (HPA) 58 a un elemento radiante 20.

Las funciones de las DBFN 40 y las redes de formación de haz 52 de la subestructura son iguales al las del caso de recepción de la figura 2, y no se describirán adicionalmente.

15 Existen otras variaciones en términos de otras arquitecturas de procesamiento digital. Un ejemplo se refiere a un enfoque eficiente a una formación de haz digital donde una FFT (Transformación rápida de Fourier) se utiliza para formar una red regular de haces puntuales. Las salidas de la subestructura digitalizadas forman entradas a la FFT mientras que las salidas de la FFT representan una red regular de haces puntuales. De nuevo, el enfoque de subestructura superpuesta proporciona simplificación en términos de los números de A/D y la dimensión de la FFT.

20 En una segunda realización importante (variante de la implementación), como se muestra en la figura 4, la formación de haz en subestructura y la formación de haz principal se implementan usando tecnología digital. En la figura 4, partes similares a aquellas de la figura 2 se denotan mediante los mismos numerales de referencia. En la figura 4, cada elemento 20 se acopla a un bloque 60 que comprende un amplificador de bajo ruido, conversor descendente, filtro de paso banda, ADC (es decir, el bloque 40 sustituye a los elementos 22, 28-34 de la figura 2). Así, cada uno de los Ne elementos 20 tiene una función de recepción analógica que comprende un LNA, filtrado de banda general, y conversión descendente. Cada señal de elemento digital se muestrea digitalmente en un conversor A/D, de la misma forma que en la figura 2.

30 El esquema de subestructura subyacente es igual al de la figura 2, con cuatro elementos formando una subestructura en una dirección lineal mostrada. Una red de formación de haz digital 62 se proporciona para cada subestructura; la formación de haz se implementa digitalmente con una serie de ponderaciones complejas y síntesis digital. Al igual que las ponderaciones analógicas de la figura 2, las ponderaciones pueden ser fijas o variables, pero este enfoque se presta bien a una implementación de ponderación variable. Las salidas de la subestructura se desmultiplexan de frecuencia en 66 y forman en haz en una estructura de haces puntuales con redes digitales de formación de haz 68.

Las ventajas de este enfoque, cuando se compara con un sistema implementado digitalmente sin subestructuras, son menos obvias. El número de conversores A/D y cadenas receptoras asociadas aumenta a Ne, pero sigue habiendo ventajas en términos de reducción del número de desmultiplexadores de frecuencia (que tienen una alta carga de procesamiento) y de la dimensión de las BFN digitales principales.

45 En una tercera realización importante (variante de la implementación), como se muestra en la figura 5, la formación de haz en subestructura y la formación de haz principal se implementan usando tecnología analógica. En la figura 5, partes similares a aquellas de la figura 2 se denotan mediante los mismos numerales de referencia. En la figura 5, las subestructuras 24 tienen un conjunto de redes de formación de haz analógicas de la subestructura, igual que en la figura 2. Las salidas 26 de la BFN de la subestructura forman entradas a la disposición BFN analógica 70, los detalles de la cual no se describirán, ya que serán evidentes para la persona experta en la técnica. La ventaja del enfoque reside en la reducción de la dimensión de la BFN analógica 70 en comparación con una implementación analógica completa sin subestructuras.

Consultando la figura 6, ésta muestra un gráfico de flujo de un proceso de optimización para determinar las características de la subestructura y las ponderaciones de formación de haz principal, como sigue:

55 Etapa 1 (71): Determinar el tamaño total de la antena en base al requisito de direccionalidad del haz puntual (pico de -52,5 dBi para este ejemplo)

Etapa 2 (72): Determinar el tamaño del elemento individual en base al tamaño de la zona de exclusión del lóbulo reticulado o el requisito de reconfiguración del área global (tierra visible en este ejemplo).

Etapa 3 (74): Determinar el espaciado del punto de control (puerto) de las subestructuras para un tamaño máximo de región geográfica a cubrir (Europa en este ejemplo).

60 Etapa 4 (76): Determinar el tamaño de las subestructuras (extensión de las superposiciones) estableciendo un valor

inicial predeterminado, y posteriormente si es necesario, por iteración, incluyendo las siguientes etapas 5 a 7.

Etapa 5 (78): Establecer ponderaciones iniciales en las subestructuras todas iguales o para maximizar la direccionalidad mínima de la subestructura en la región de cobertura. En este ejemplo, todas las subestructuras tienen ponderaciones idénticas, pero esto no es necesario, y las mejoras del rendimiento pueden conseguirse con subestructuras no idénticas.

Etapa 6 (80): En base a las ponderaciones actuales intra-subestructura (las ponderaciones dentro de las subestructuras), calcular las direccionalidades del pico en las ubicaciones de los haces puntuales deseados (100 en este ejemplo): Dadas las ponderaciones intra-subestructura es fácil determinar las ponderaciones externas para poner en los puntos de control de la subestructura para conseguir esto, como sigue. Con solo una pequeña pérdida del rendimiento, los centros de la subestructura se consideran como elementos independientes, con amplitud igual aplicada a las subestructuras y una fase determinada a partir de la ubicación del centro de la subestructura y la dirección deseada a la que apunta el haz. Para aplicar una determinación rigurosa, se requerirán manipulaciones adicionales a la matriz, que serán fácilmente evidentes para las personas expertas en la técnica.

Etapa 7 (82): ¿El rendimiento ha convergido a un máximo (local), en base a alguna métrica de calidad acordada?

Si es Sí, Registrar resultados y DETENER (84)

Si es NO, iterar ponderaciones intra-subestructura (86). Si es NO, para todas las ponderaciones intra-subestructura, iterar el tamaño (etapa 4) y si es necesario el espaciado (etapa 3) de las subestructuras.

EJEMPLO

Consultando la figura 8, ésta muestra una disposición deseada para cobertura europea, de 100 haces puntuales, apuntada por referencia de alineación óptica a 17° E, 48,5° N, desde una ubicación geoestacionaria a 7° E.

Para las consideraciones de diseño inicial de la antena:

Comenzar con una abertura DRA de 2,4 m (comparable al tamaño de un reflector AFR), espaciado del elemento 2,12 longitudes de onda. El espaciado del elemento determina cuánto rendimiento pierde la antena cuando se barre. Es decir, la caída en rendimiento de cada elemento individual entre el centro y el borde de la tierra resulta en una pérdida de rendimiento irrecuperable. Por otro lado, cuanto más pequeños sean los elementos, más de ellos serán necesarios, así, hay una compensación que normalmente para satélites geoestacionarios resulta en un tamaño del elemento en el intervalo de 2 a 3 longitudes de onda.

La cobertura tiene una extensión de 6,75° E/O, 3,12° N/S
Longitud de onda de 2,12 del elemento, se intenta eliminación en subestructuras superpuestas en 3 E/O y 6 N/S sobre un entramado de elemento cuadrado.

Esto resulta en una estructura que contiene 4349 elementos y 249 puntos de control como se muestra en la figura 7. Los picos ligeros muestran puntos de control, la estructura fina muestra elementos individuales. En cuanto a la selección de subestructuras, para llegar a un equilibrio entre el grado de superposición y la complejidad RF analógica de las subestructuras, se elige que las subestructuras ocupen 2 X 2 rectángulos de punto de control. Cada elemento participa en 4 subestructuras, excepto en los bordes de la estructura. Cada subestructura contiene $2 \times 2 = 4$ elementos.

Consultando la figura 7, se muestra una estructura en fases planar de contorno aproximadamente circular, con un diámetro de 2,4 m, que comprende aproximadamente 4000 elementos. Los elementos se agrupan en subestructuras superpuestas de 4 elementos, espaciadas en seis elementos en una dirección, y tres en la otra. Las subestructuras pueden implementarse en placas entrelazadas, y cada elemento participa en cuatro subestructuras.

Los elementos en una subestructura tienen ponderaciones optimizadas inicialmente para maximizar la direccionalidad pico del haz puntual mínima alcanzable en las ubicaciones de los 100 centros de haz mediante el proceso descrito anteriormente con referencia a la figura 6.

Las subestructuras parcialmente ocupadas simplemente se reducen; las ponderaciones en los elementos ocupados son iguales a aquellas en las subestructuras completas.

La optimización puede realizarse también para suprimir la direccionalidad en las direcciones potenciales del lóbulo reticulado.

Los resultados muestran que cuando una subestructura comprende 2 x 2 celdas de punto de control, la direccionalidad mínima en cualquiera de las 100 direcciones es de 52,60 dBi, tras la optimización de la amplitud y la

fase sobre los elementos de la subestructura.

Los elementos con longitud de onda de 2,12 (de acuerdo con este modelo simple) tienen una direccionalidad pico de 16,7 dBi, con caída de -0,3 dB a 4°.

- 5 Por tanto, el mejor mínimo posible con los 4349 elementos en -52,8 dBi. Cuando una subestructura comprende 1 X 1 celda (es decir, no se superponen) lo mejor que puede conseguirse parece ser 50,4 dBi desde los 249 puntos de control.

- 10 La figura 9 muestra gráficas de pico de haz puntual vs. la dirección para una subestructura única. La figura 9 muestra que el haz de la subestructura está centrado en la región europea. Otras subestructuras proporcionarán haces de amplitud similar. La figura 10 muestra el patrón de subestructura compuesta, y debe tenerse en cuenta que hay un valor de direccionalidad muy alto dentro de la región europea, que cae rápidamente fuera de la región. La creación de fases relativa entre las subestructuras genera los haces puntuales. Se muestran dos haces puntuales específicos en las figuras 11 y 12.

- 15 Para la optimización posterior del haz puntual, retener las ponderaciones internas de la subestructura optimizadas anteriores, las ponderaciones en las 249 subestructuras se optimizaron para los 100 haces a su vez:

- 20 Contra un objetivo que combina la direccionalidad del borde del haz y los niveles del lóbulo lateral. Para estos 100 haces de 0,45°, las direccionalidades de pico optimizadas normalmente son de 52 dBi, aproximadamente 0,5 dB por debajo de la direccionalidad máxima posible, presumiblemente porque los haces son ligeramente más grandes que el mínimo posible desde esta abertura, y la optimización del lóbulo lateral requiere un cierto estrechamiento del borde.

La figura 13 muestra el resultado de la reoptimización para el haz puntual de la figura 12.

REIVINDICACIONES

1. Una antena de estructura en fases, la antena proporciona cobertura sobre una región geográfica predefinida y proporciona una pluralidad de haces dentro de dicha región, y comprende:
- 5 una pluralidad de elementos de antena (20), cada elemento de antena tiene una señal de elemento de antena que tiene una relación en fases y una relación de amplitud con las otras señales del elemento, y dichos elementos de la antena se dividen en una pluralidad de subestructuras superpuestas (24), cada subestructura comprende un subconjunto de todos los elementos de la antena de la estructura en fases, y al menos algunos de los elementos de la antena participan en más de una subestructura,
- 10 una red de formación de haz (25) en la subestructura que asigna a los elementos de cada subestructura ponderaciones respectivas de formación de haz en la subestructura, y una red de formación de haz principal que asigna ponderaciones de formación de haz de cada subestructura para cada dicha pluralidad de haces, para producir dicha pluralidad de haces dentro de dicha región
- 15 **caracterizada porque** las ponderaciones de formación de haces en la subestructura asignadas a cada subestructura han sido optimizadas para conseguir un nivel deseado de dicha direccionalidad para dicha pluralidad de haces mediante un proceso de optimización donde dichas ponderaciones de formación de haz en la subestructura se cambian de valor en iteraciones, y en cada iteración se determinan los valores de ponderación de formación de haz asignados a cada subestructura.
- 20
2. Una antena de estructura en fases de acuerdo con la reivindicación 1, donde al menos algunos de dichos haces tiene dicho valor deseado de direccionalidad, que es al menos un valor mínimo predeterminado.
3. Una antena de estructura en fases de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, donde dichos haces son
- 25 haces de comunicación y la antena de estructura en fases es para una nave espacial de comunicaciones.
4. Una antena de estructura en fases de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicha red de formación de haz (25) de la subestructura asigna a cada subestructura un conjunto de ponderaciones, que es igual a los conjuntos asignados a otras subestructuras.
- 30
5. Una antena de estructura en fases de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicha red de formación de haz (25) de la subestructura incluye un medio de cambio de la fase analógica respectiva y un medio de cambio de la ganancia analógica respectiva acoplado a cada elemento de la antena.
- 35
6. Una antena de estructura en fases de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la antena de estructura en fases tiene una función receptora, y dicha red de formación de haz (25) de la subestructura incluye, para cada subestructura (24), un medio de combinación de señal para las señales del elemento de la subestructura para proporcionar una señal de salida combinada a un puerto de salida (26) de la subestructura, y donde la antena de estructura en fases además comprende medios de conversión analógica a
- 40 digital (34) para digitalizar las señales de salida de cada subestructura, medios de desmultiplexación de frecuencia (36) par desmultiplexar la señal de salida de cada subestructura en una pluralidad (K) de señales de canal, y una red de formación de haz digital (38) respectiva para cada uno de dicha pluralidad (K) de canales, acoplada para recibir la señal de canal respectiva desde la salida de cada subestructura, y dispuesta para aplicar una ponderación compleja a cada una de dichas señales de canal, y para sumar las señales de canal ponderadas, para proporcionar
- 45 una señal de salida de canal.
7. Una antena de estructura en fases de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, donde la antena de estructura en fases tiene una función de transmisión, y para cada subestructura (56), dicha red de formación de haz (54) de la subestructura incluye un medio de distribución de señal acoplado a un puerto de entrada
- 50 de la subestructura para proporcionar las señales del elemento a la subestructura, y donde la antena de estructura en fases además comprende una red de formación de haz digital (40) respectiva para cada uno de la pluralidad (K) de canales de comunicaciones, y dispuesta para aplicar una ponderación compleja a cada una de dichas señales de canal,
- medios de multiplexación (42) para combinar dichas señales de canal ponderadas en una pluralidad de señales de salida que comprenden una señal respectiva para cada subestructura, y
- 55 medios de digital a analógico (44) para convertir las señales de salida de los medios de multiplexación a formato analógico.
8. Un proceso de optimización para determinar los parámetros de formación de haz de una antena de
- 60 estructura en fases, la antena proporciona cobertura sobre una región geográfica predefinida y una pluralidad de

- haces dentro de dicha región, la antena tiene una pluralidad de elementos de antena (20), cada elemento de la antena proporciona una señal de elemento de antena que tiene una relación de fases y una relación de amplitud con las otras señales del elemento, y los elementos de la antena se dividen en una pluralidad de subestructuras superpuestas (24), cada subestructura comprende un subconjunto de todos los elementos de la antena de estructura en fases, y al menos algunos de los elementos de la antena que participan en más de una subestructura, el proceso de optimización comprende:
- 5 una primera etapa en la cual las ponderaciones de formación de haz de la subestructura asignadas a cada subestructura se establecen en valores iniciales, y
- 10 una segunda etapa en la cual se determinan los valores de ponderación principales de formación de haz asignados a dichas subestructuras, para proporcionar valores de direccionalidad en las ubicaciones de al menos algunos de dichos haces; e
- iterar dichas primera y segunda etapas, lo que implica cambiar los valores de dichas ponderaciones de formación de haz de la subestructura, hasta que se consigue un nivel deseado de dicha direccionalidad para dichas haces.
- 15 9. Un proceso de optimización de acuerdo con la reivindicación 8, donde en dicha segunda etapa, dichos valores de ponderación de formación de haz principal se determinan, para proporcionar valores pico de direccionalidad en dichas ubicaciones.
10. Un proceso de optimización de acuerdo con la reivindicación 8 o 9, que incluye determinar el tamaño
- 20 total de la antena en base a un requisito de direccionalidad del haz puntual.
11. Un proceso de optimización de acuerdo con la reivindicación 8, 9 o 10, que incluye determinar el tamaño/espaciado individual del elemento en base al tamaño de la zona de exclusión del lóbulo reticulado.
- 25 12. Un proceso de optimización de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, que incluye determinar el espaciado de los puertos de dichas subestructuras (24) para el tamaño máximo de dicha región.
13. Un proceso de optimización de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, que incluye determinar el tamaño de las subestructuras (24) y extender las superposiciones mediante iteración del proceso de la
- 30 reivindicación 8.
14. Un proceso de optimización de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 13, donde las ponderaciones iniciales dentro de cada subestructura (24) se establecen como todas iguales o para maximizar la direccionalidad mínima de la subestructura en dicha región.
- 35 15. Un proceso de optimización de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 14, que incluye una optimización adicional donde dichas ponderaciones de formación de haz principal se optimizan contra un objetivo que combina direccionalidad del borde del haz y niveles del lóbulo lateral.

Fig.1.

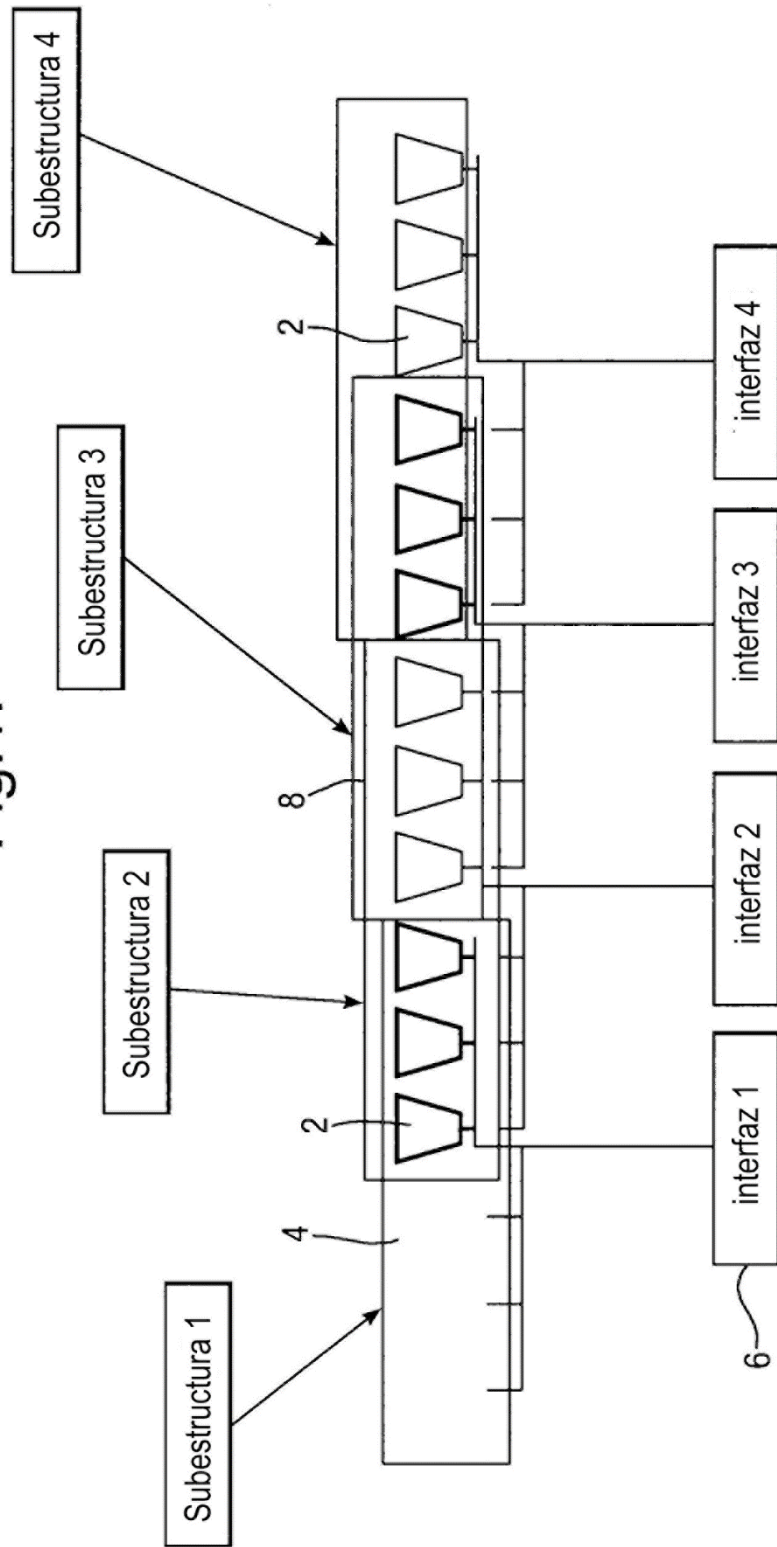


Fig.2.

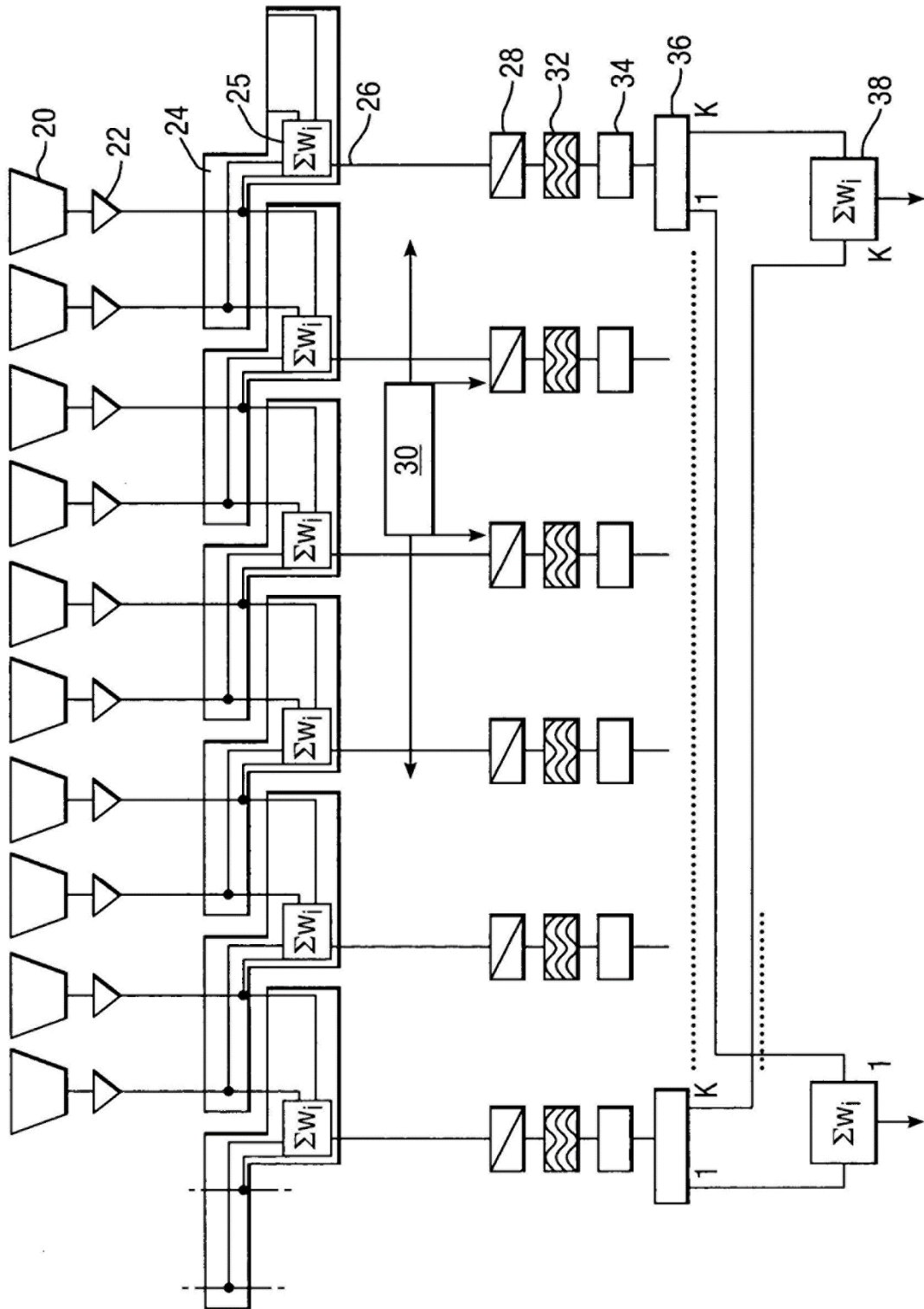


Fig.3.

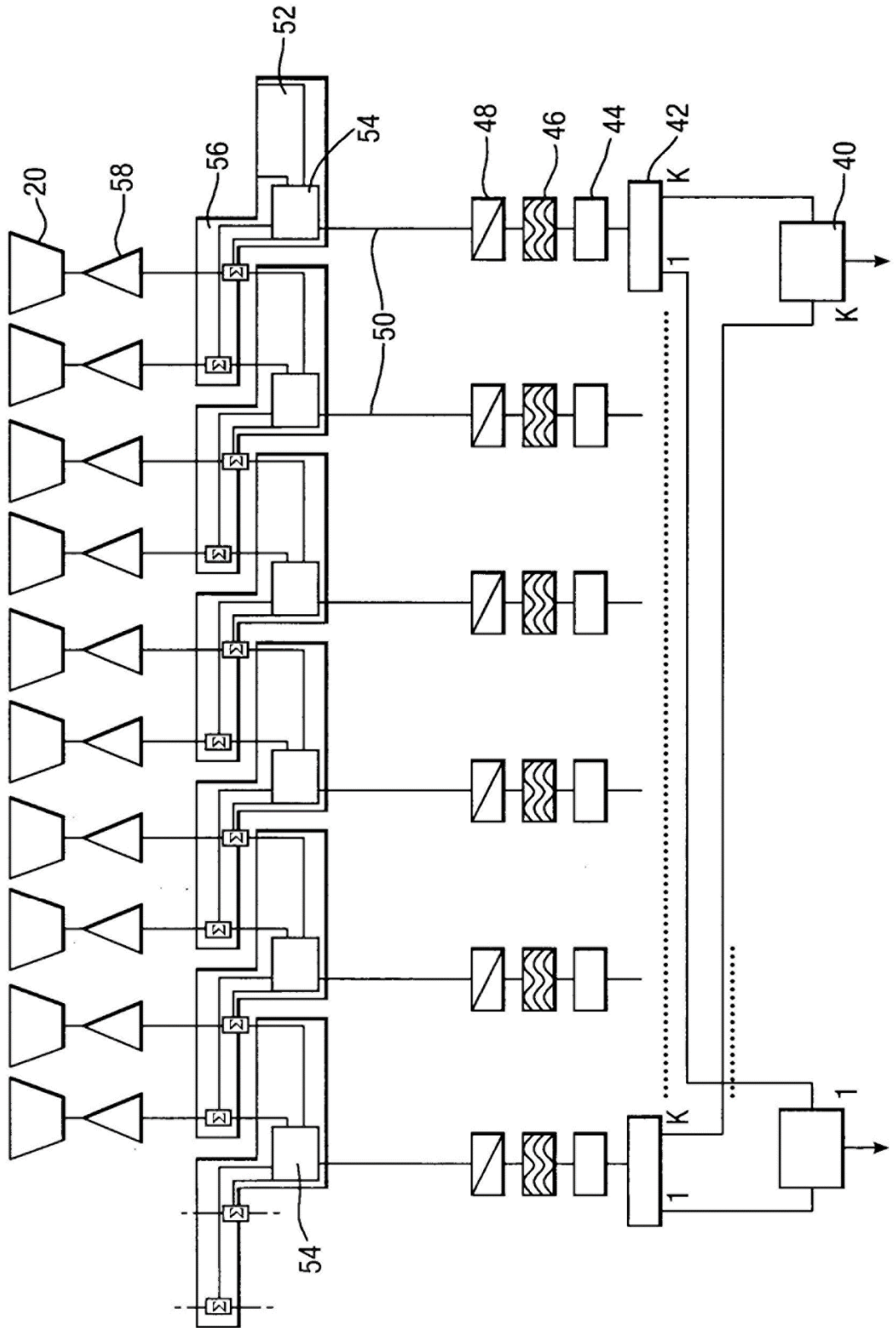


Fig.4.

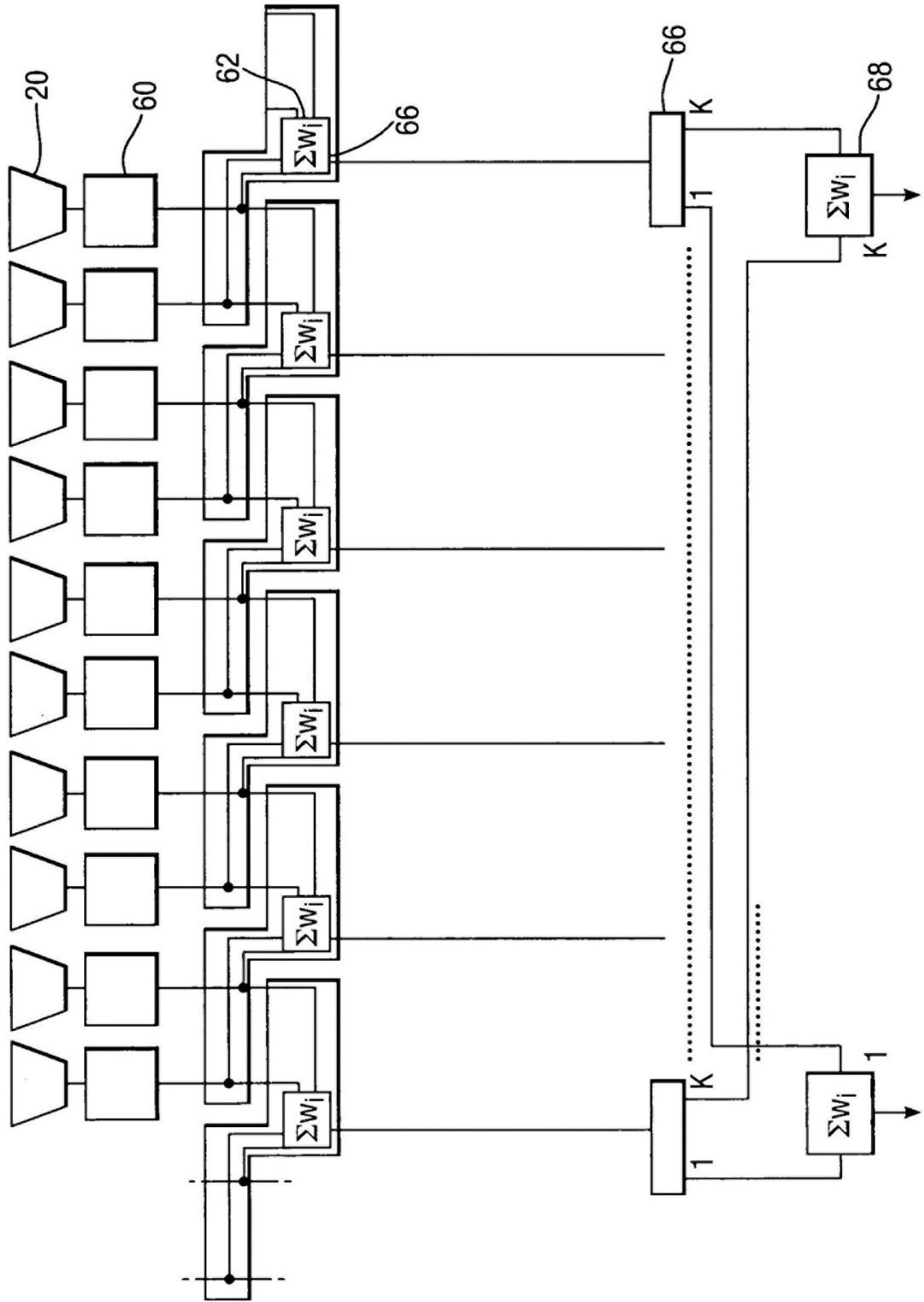


Fig.5.

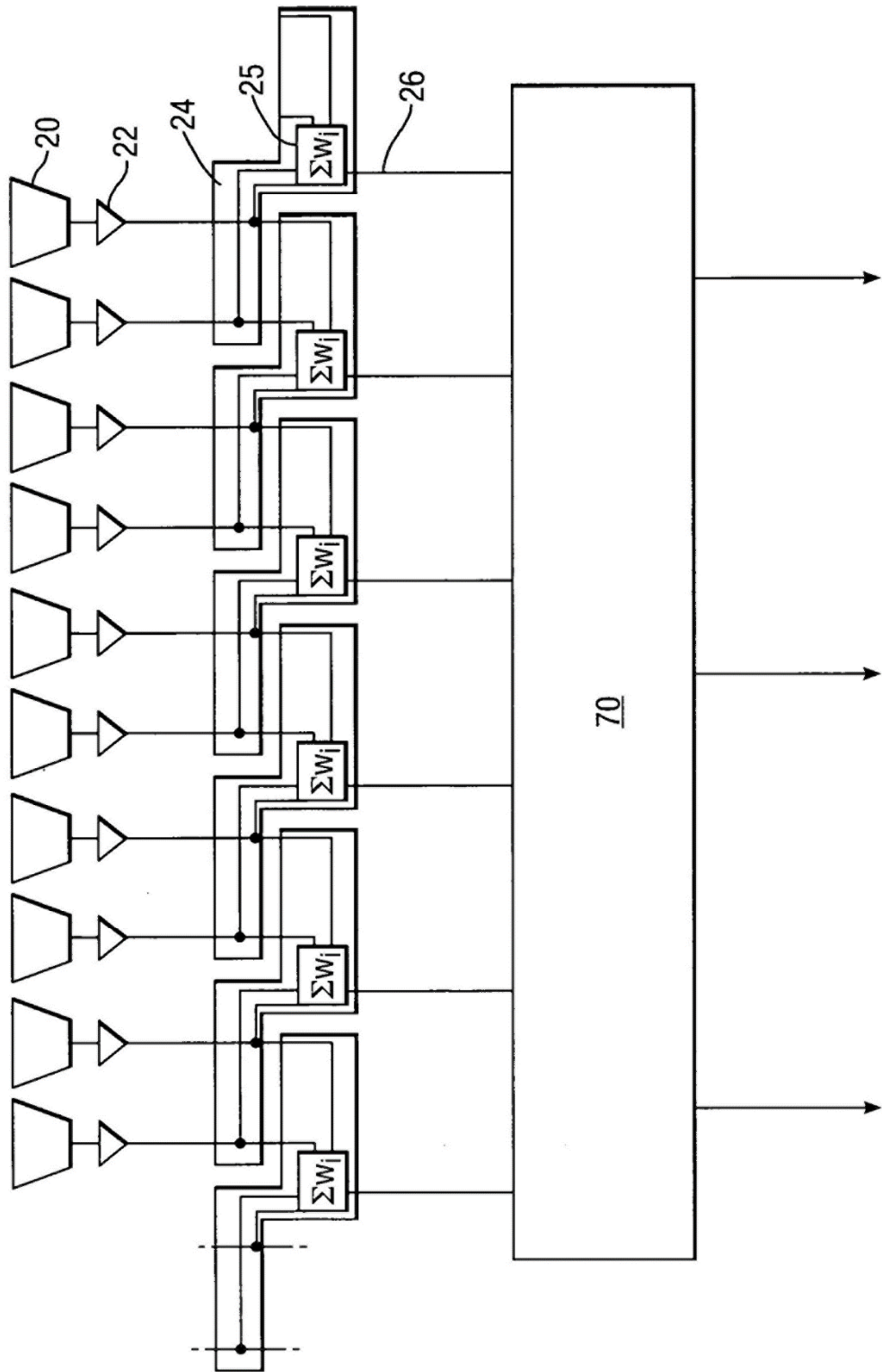


Fig.6.

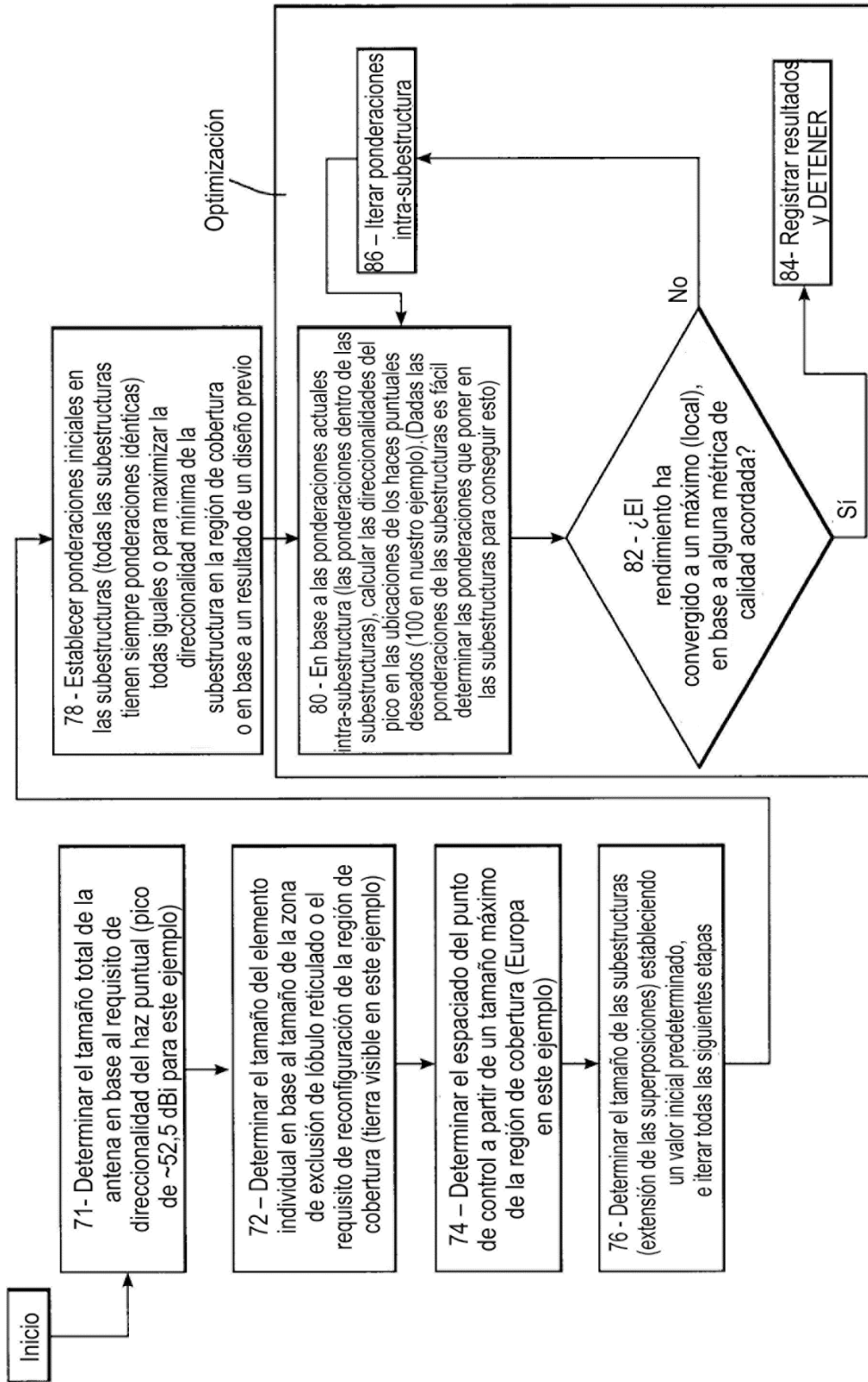


Fig.7.

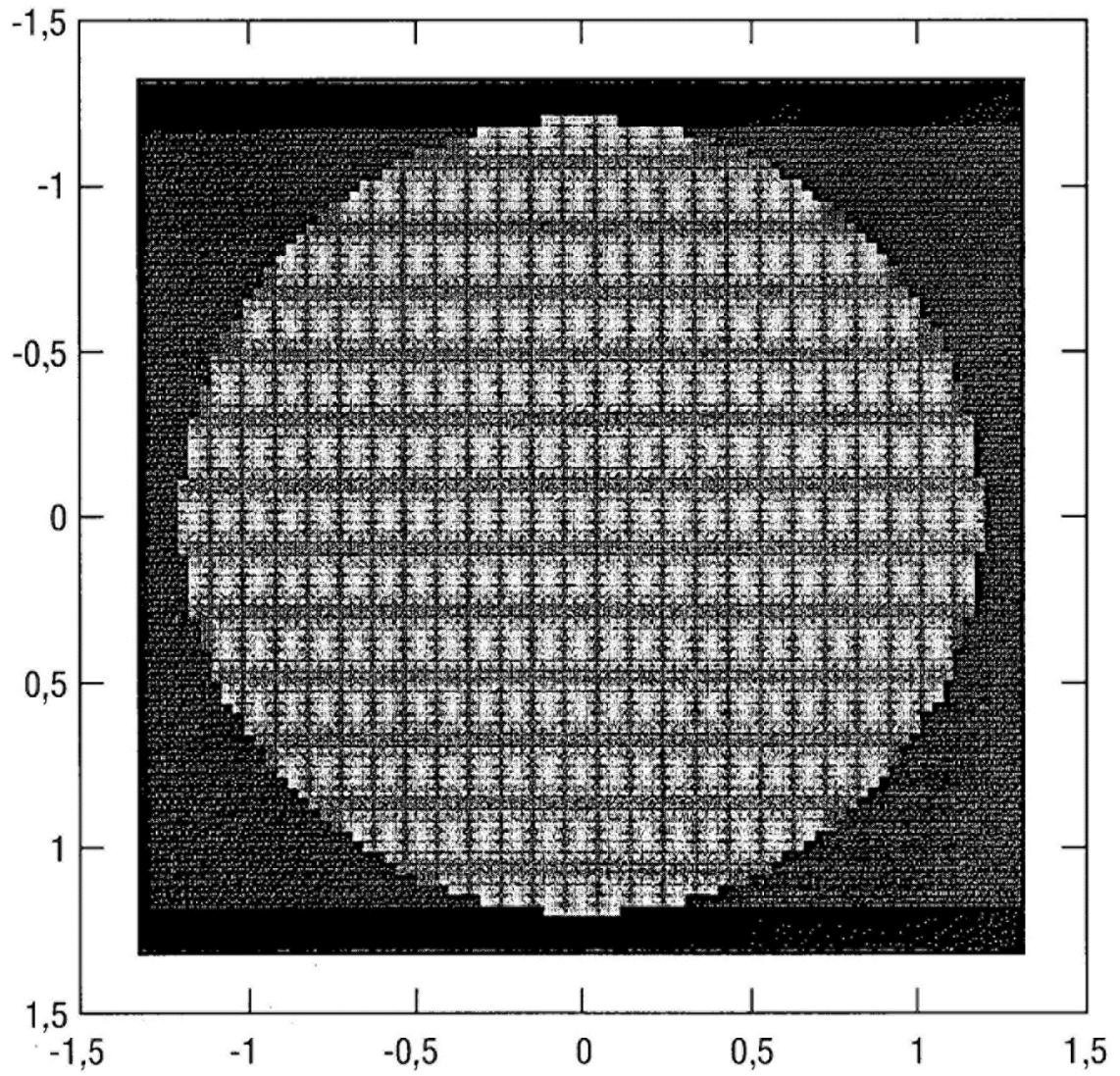


Fig.8.

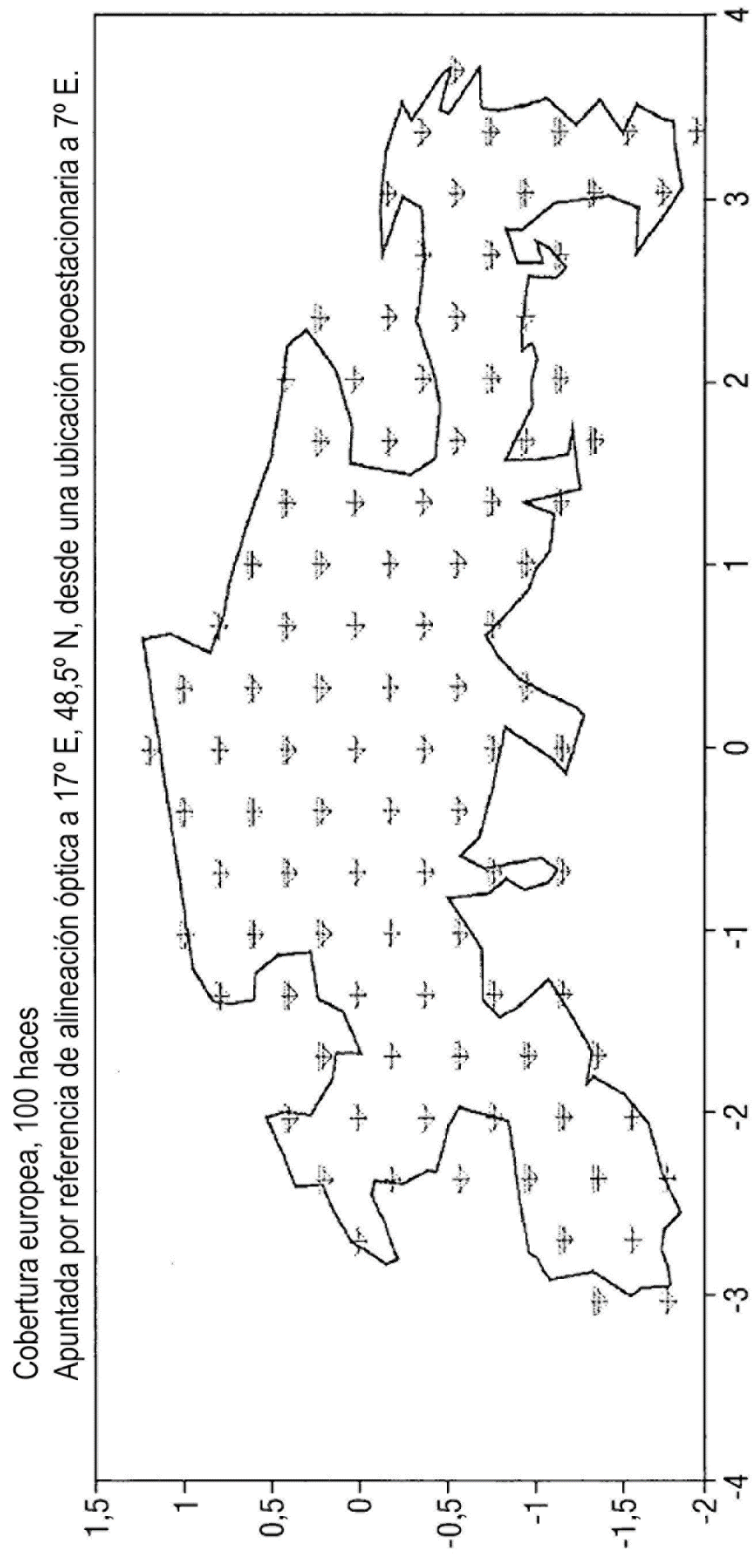
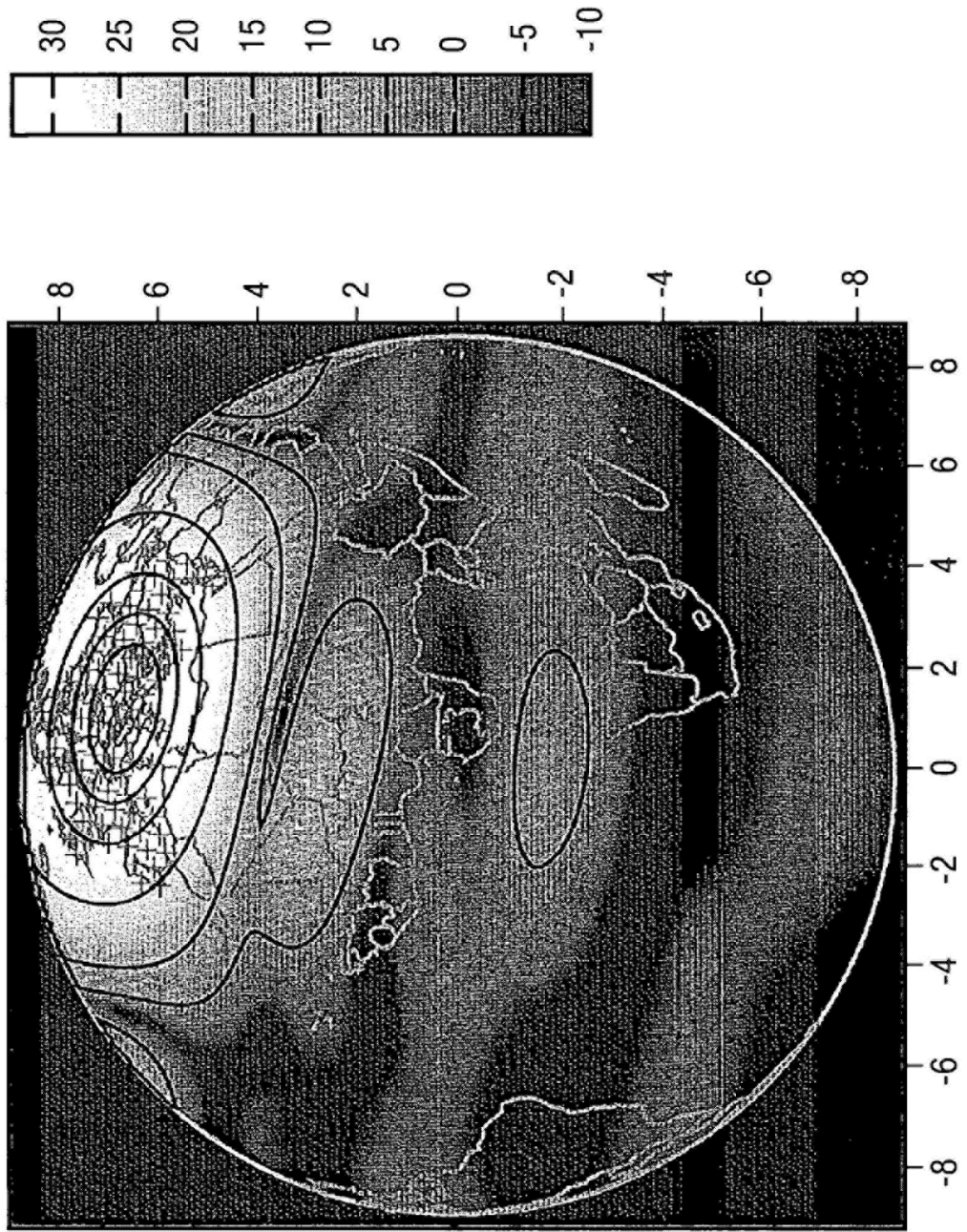


Fig.9.

Contornos 5, 15, 25, 30, 32, 33 dBi



Subestructuras superpuestas de celdas 2X2 (72 elementos)

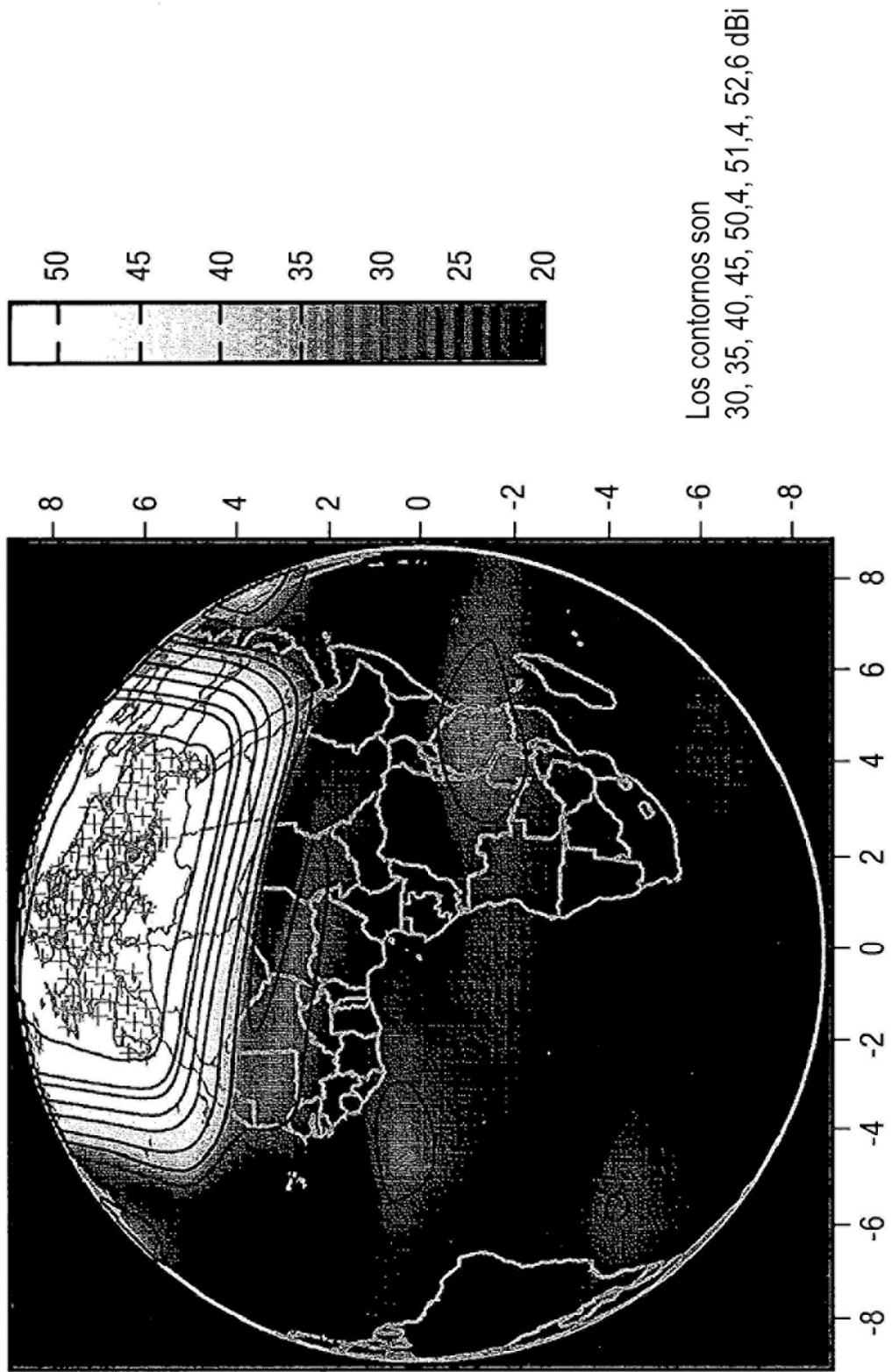


Fig.11.

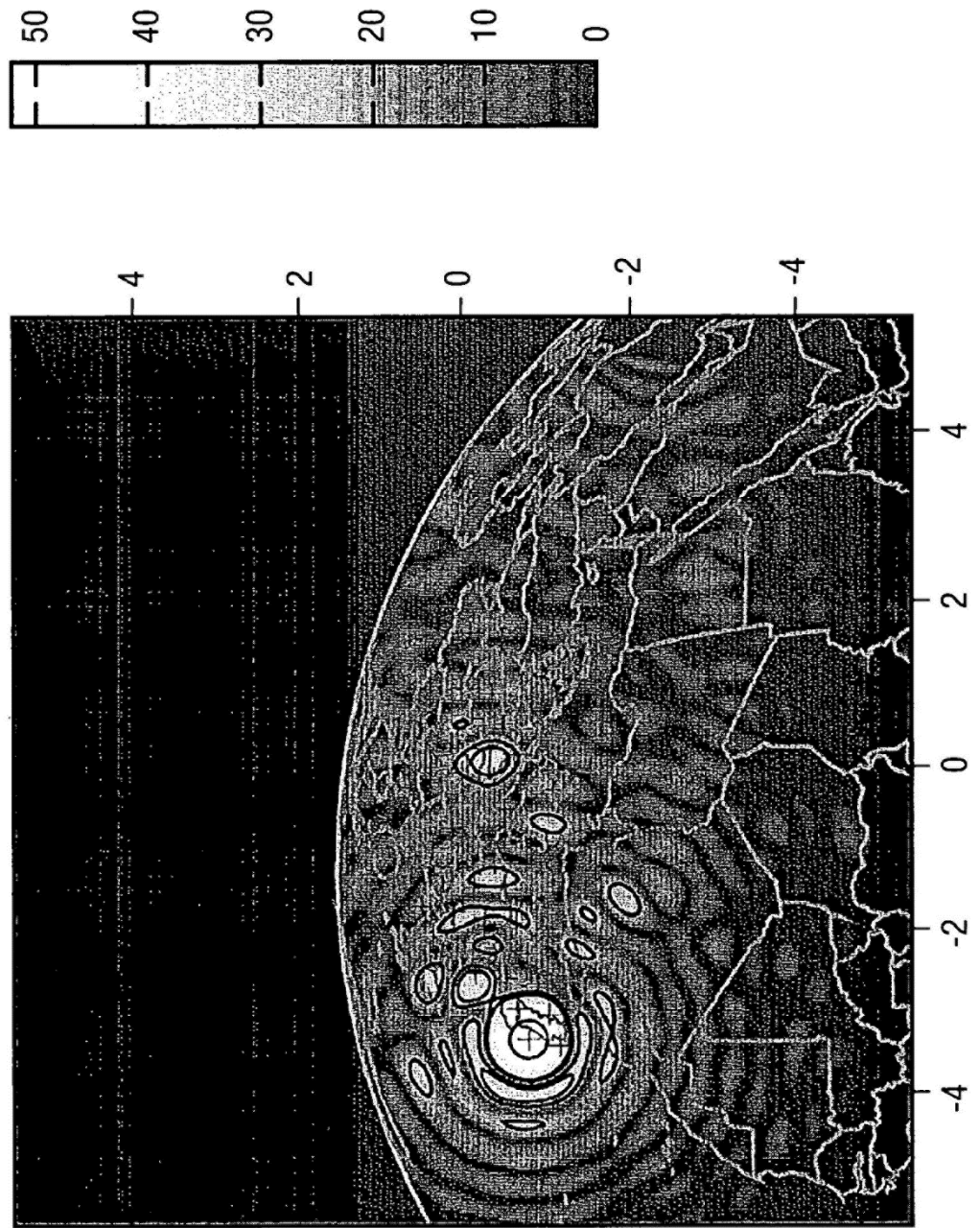


Fig.12.

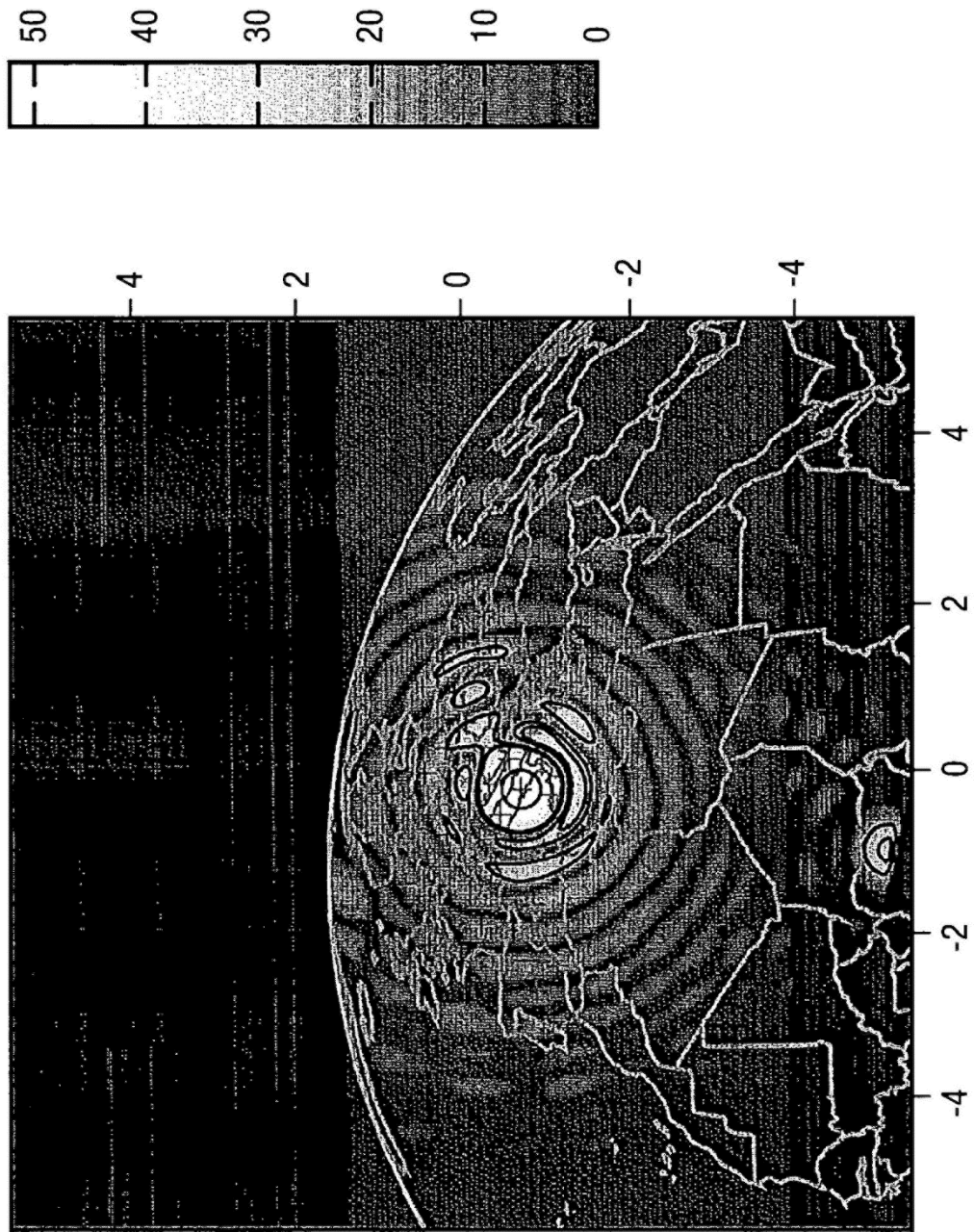


Fig.13.

