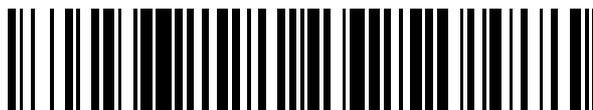


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 732 454**

51 Int. Cl.:

H04W 72/04 (2009.01)
H04W 16/28 (2009.01)
H04B 7/06 (2006.01)
H04W 8/18 (2009.01)
H04B 7/04 (2007.01)
H04B 7/0413 (2007.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **09.04.2012 PCT/US2012/032734**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.10.2012 WO12139101**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.04.2012 E 12767945 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.06.2019 EP 2695305**

54 Título: **Técnicas para lograr una eficiencia espectral promedio alta en un sistema inalámbrico**

30 Prioridad:
07.04.2011 US 201161472900 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.11.2019

73 Titular/es:
**BLUE DANUBE SYSTEMS, INC. (100.0%)
200 Warren Corporate Center Drive, 2nd Floor
Warren, NJ 07059, US**

72 Inventor/es:
**BANU, MIHAI;
FENG, YIPING y
POTICNY, DAVID**

74 Agente/Representante:
SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 732 454 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

Técnicas para lograr una eficiencia espectral promedio alta en un sistema inalámbrico

Campo de la descripción

5 La presente divulgación se refiere en general a sistemas inalámbricos tales como redes de área local móviles o inalámbricas y, más particularmente, a técnicas para lograr una alta eficiencia espectral promedio en un sistema inalámbrico.

Antecedentes de la divulgación

10 La eficiencia espectral de un enlace de comunicación inalámbrico digital es una cifra de mérito definida como el número de bits de información transmitidos por unidad de tiempo (segundo), por unidad de ancho de banda (Hz), sin exceder una tasa de error de bits prescrita. La eficiencia espectral se mide en bits por segundo por hertzio, a menudo escrito como "bits/s/Hz". Cuanto mayor sea la eficiencia espectral de un enlace inalámbrico, más empaquetada estará la información transmitida en el tiempo y en el ancho de banda. Un resultado central de la teoría de la información relaciona la eficiencia espectral con la calidad de la señal del canal de comunicación, generalmente expresada como una relación de la señal al ruido más la interferencia, o SNIR: cuanto mayor es la SNIR, mayor es la eficiencia espectral.

15 Teóricamente, cada transmisión inalámbrica entre dos estaciones (por ejemplo, una estación de base y una estación móvil en un sistema de móviles) podría admitir todas las eficiencias espectrales empezando desde cero (sin información transmitida) hasta un valor máximo determinado por la calidad del canal de comunicación durante esa transmisión. En la práctica, los sistemas inalámbricos digitales no admiten un continuo de velocidades de datos, sino más bien un número finito de velocidades de datos, generalmente especificado por las normas. Cada velocidad de
20 datos corresponde a la eficiencia espectral específica, con la máxima velocidad de datos proporcionando el pico o máxima eficiencia espectral posible para cualquier transmisión en el sistema considerado. El funcionamiento del sistema inalámbrico a la eficiencia espectral pico para todas las transmisiones, produciría la máxima cantidad de datos que podrían transferirse a través de conexiones inalámbricas en el sistema. Esta es la capacidad máxima del sistema. La capacidad máxima y la máxima eficiencia espectral se obtendrían si todos los móviles estuvieran situados junto a
25 la estación de base y todos tuvieran una alta calidad de canal en todo momento. La capacidad real del sistema, es decir, la cantidad real de datos que se transfiere a través de conexiones inalámbricas generalmente es mucho menor que la capacidad máxima, como se explicará a continuación.

30 Normalmente, la calidad del canal inalámbrico en los sistemas inalámbricos cambia de transmisión a transmisión. Este efecto es especialmente pronunciado en los sistemas de móviles donde los móviles cambian su ubicación física a lo largo del tiempo e incluso durante las transmisiones. En este caso, en lugar de centrarse en la eficiencia espectral por transmisión como una indicación de la capacidad real de la red, es más significativo calcular o medir la eficiencia espectral promedio para toda la celda durante un período. Dado que todas las transmisiones se originan o terminan en la estación de base, la eficiencia espectral promedio de la celda está directamente relacionada con el tráfico de datos inalámbrico promedio de la estación de base.

35 Desde su inicio, los sistemas de móviles comerciales han operado con un bajo promedio de eficiencia espectral. Sin embargo, las modestas demandas de velocidad de bits de las comunicaciones tradicionales dominadas por voz permitieron a los operadores inalámbricos enmascarar este defecto de sus redes durante muchos años. Además, el espectro de RF adicional estaba disponible para soportar los aumentos en el tráfico inalámbrico sin mejorar la eficiencia espectral promedio.

40 La limitación inicial de la eficiencia espectral en sistemas de móviles fue el uso de técnicas de modulación muy simples, que solamente contenían números muy bajos de bits por espectro de RF asignado. A medida que las redes evolucionaron de una generación a otra, se introdujeron técnicas de modulación progresivamente más sofisticadas y más eficientes, que mejoraron en gran medida la eficiencia espectral máxima, pero la eficiencia espectral promedio de la red se mantuvo baja. La razón de este rendimiento promedio deficiente es la naturaleza misma de la interfaz
45 aérea con señales diminutas, ruido elevado, presencia de interferencias, desvanecimiento por trayectorias múltiples, etc.

50 Siguiendo la tendencia anterior, los sistemas inalámbricos de cuarta generación (4G) como WiMax y LTE (Evolución a Largo Plazo) han llevado a los esquemas de transmisión a tales niveles de sofisticación que es poco probable que se realicen mejoras adicionales sin mayores penalizaciones en costes y energía, especialmente para los dispositivos móviles. Por ejemplo, los sistemas 4G utilizan múltiples esquemas de transmisor/receptor de RF llamados esquemas MIMO (múltiple entrada - múltiple salida). Estos emplean un procesamiento de señal digital intenso en varias señales de antena, dirigido específicamente a una eficiencia espectral máxima muy alta. Sin embargo, incluso para estos sistemas, la eficiencia espectral promedio sigue siendo baja en comparación con la eficiencia máxima. Como ya se mencionó, esto se debe a la mala calidad del canal de comunicación promedio de la interfaz aérea. El procesamiento
55 de señales digitales en solitario en varias señales de antena no es una solución viable para obtener un aumento sustancial en la eficiencia general promedio del espectro.

La introducción de teléfonos inteligentes, tabletas inalámbricas y otros dispositivos móviles capaces de aceptar y generar grandes cantidades de información digital ha producido un profundo impacto en las redes inalámbricas. Esto, en combinación con el uso intensivo de aplicaciones inalámbricas hambrientas de datos, está llevando las demandas de capacidad de las redes inalámbricas a niveles sin precedentes. La utilización del espectro RF limitado por los métodos tradicionales de baja eficiencia promedio, incluidos los de los sistemas 4G existentes, ya no es apropiada. Operar las redes con una eficiencia espectral promedio, que está lejos de la eficiencia espectral máxima teóricamente posible, es simplemente demasiado despilfarrador. Además, la expansión de las redes inalámbricas tradicionales para adaptarse a las siempre crecientes demandas de capacidad no es económica.

En vista de lo anterior, se puede entender que puede haber problemas significativos y deficiencias asociadas con las redes inalámbricas tradicionales.

El documento EP 1 976 149 describe un método y un dispositivo para transmitir señales en un sistema de comunicación inalámbrico y un método y un dispositivo para recibir señales en un sistema de comunicación inalámbrico, en el que dichas señales se transmiten en tramas consecutivas. El documento WO2008/115949 A2 describe un método para proporcionar datos locales y regionales a un terminal de abonado, en el que los datos regionales pueden transmitirse a través de un haz ancho y los datos locales pueden transmitirse a través de uno de una pluralidad de haces puntuales localizados.

Resumen de la descripción

Las realizaciones de la presente descripción incluyen técnicas para resolver el problema de la baja eficiencia espectral promedio en las comunicaciones inalámbricas tradicionales mediante el uso de unas nuevas arquitectura y funcionalidad de la estación de base. La nueva arquitectura de la estación de base incluye una capacidad de RF de interfaz de radio para crear múltiples, ágiles patrones de haces, tales como haces filiformes orientables en azimut y en elevación según el escaneo espacial programable. Esta capacidad de interfaz requiere el uso de múltiples antenas para la formación, dirección y escaneo de haces electrónicos. La nueva funcionalidad contiene nuevas capacidades de planificación móvil y el uso del software de procesamiento matricial de canal adecuado.

En general, las diversas realizaciones de la presente descripción proporcionan dos cambios fundamentales con respecto a los esquemas de comunicación inalámbrica bidireccionales tradicionales que utilizan múltiples antenas: a) la introducción del escaneo de sectores con múltiples patrones de haces por parte de la estación de base y b) la introducción de la coordinación temporal entre la operación de los móviles y el proceso de escaneo del sector de la estación de base. Además, en comparación con los sistemas tradicionales, las realizaciones de esta descripción pueden usar (1) ganancia de antena múltiple efectiva substancialmente mayor y capacidades de filtrado espacial más potentes, (2) una agilidad sustancialmente mayor en los cambios del patrón de radiación y (3) más flexibilidad en la formación de patrones de radiación.

Según una realización de la presente descripción, se proporciona un método de comunicación con una estación inalámbrica, comprendiendo el método: definir una pluralidad de haces puntuales independientes a ser generados por un dispositivo de formación de haces, cada haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes apuntado en una dirección diferente e intersectando una región diferente de un área finita plana en el espacio, en donde las direcciones de la pluralidad de haces puntuales independientes varían tanto en azimut como en elevación, y en donde las regiones del área finita plana del espacio intersectado por la pluralidad de haces puntuales independientes es una matriz bidimensional de regiones intersectadas; definir un conjunto de múltiples grupos de haces, siendo cada grupo de haces un subconjunto diferente de haces puntuales de entre la pluralidad de haces puntuales independientes, incluyendo cada grupo de haces del conjunto de múltiples grupos de haces más de un haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes, y siendo cada haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes un miembro de uno de los grupos de haces del conjunto de múltiples grupos de haces; hacer un ciclo repetidamente a través del conjunto de grupos de haces, en donde hacer un ciclo a través del conjunto de grupos de haces implica activar sucesivamente cada grupo de haces del conjunto de múltiples grupos de haces, y en donde activar un grupo de haces implica generar simultáneamente múltiples haces puntuales de ese grupo de haces; identificar un haz puntual de entre la pluralidad de haces puntuales independientes que produce un mejor enlace de comunicación con la estación inalámbrica; programar la comunicación con la estación inalámbrica para que se produzca cuando se está activando el grupo de haces del que es miembro el haz puntual identificado; generar, mediante el dispositivo de formación de haces, un haz estático que cubre un área del sector de móviles completo, en donde el haz estático permanece activado mientras realiza un ciclo repetidamente a través del conjunto de grupos de haces, y en donde todas las regiones que son intersectadas por la pluralidad de haces puntuales independientes están contenidas dentro del área del sector de celda; y el uso del haz estático para comunicar información de control a clientes inalámbricos, incluida la estación inalámbrica.

Según otra realización de la presente descripción, se proporciona un aparato para comunicarse con una estación inalámbrica, comprendiendo el aparato: un sistema de radio de múltiples transmisores/receptores para conectarse a una matriz de antenas, estando el sistema de radio de múltiples transmisores/receptores configurado para generar una pluralidad de haces puntuales independientes y un haz estático mediante la matriz de antenas, cubriendo el haz estático un área del sector de celda completo, cada haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes intersectando una región diferente de un área finita plana en el espacio, en donde todas las regiones que son

intersectadas por la pluralidad de haces puntuales independientes están contenidas dentro del área del sector de celda, en donde las direcciones de la pluralidad de haces puntuales independientes varían tanto en azimut como en elevación, y en donde las regiones del área plana finita del espacio intersectado por la pluralidad de haces puntuales independientes es una matriz bidimensional de regiones intersectadas, con la pluralidad de haces puntuales independientes agrupados para formar un conjunto de múltiples grupos de haces, siendo cada grupo de haces del conjunto de múltiples grupos de haces un subconjunto diferente correspondiente de haces puntuales de la pluralidad de haces puntuales independientes, incluyendo cada grupo de haces del conjunto de múltiples grupos de haces más de un haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes, y siendo cada haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes un miembro de uno de los grupos de haces del conjunto de múltiples grupos de haces, y en donde el haz estático cubre simultáneamente todas las regiones que son intersectadas por la pluralidad de haces puntuales independientes; y un sistema de planificación para controlar el sistema de radio de múltiples transmisores/receptores, estando el sistema de planificación configurado para hacer que el sistema de radio de múltiples transmisores/receptores realice repetidamente ciclos a través del conjunto de múltiples grupos de haces, en donde realizar el ciclo a través de un conjunto de múltiples grupos de haces implica la activación sucesiva de cada grupo de haces del conjunto de múltiples grupos de haces, y en donde la activación de un grupo de haces implica la generación simultánea de múltiples haces puntuales de ese grupo de haces; identificar un haz puntual de entre la pluralidad de haces puntuales independientes que produce un mejor enlace de comunicación con la estación inalámbrica; planificar las comunicaciones con la estación inalámbrica para que ocurran cuando el grupo de haces del cual es miembro el haz puntual identificado esté siendo activando; generar el haz estático que permanece activado mientras se realiza repetidamente el ciclo a través del conjunto de grupos de haces; y usar el haz estático para comunicar información de control a los clientes inalámbricos, incluida la estación inalámbrica, en todas las regiones que son intersectadas por la pluralidad de haces independientes.

Otras realizaciones de la invención se definen mediante las reivindicaciones dependientes adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

Con el fin de facilitar una comprensión más completa de la presente descripción, ahora se hace referencia a los dibujos adjuntos, en los que se hace referencia a elementos similares con números similares. Estos dibujos no deben interpretarse como limitantes de la presente descripción, sino que pretenden ser solamente ilustrativos.

La figura 1 muestra un diagrama de una celda inalámbrica;

la figura 2 muestra un diagrama de una celda inalámbrica dividida en tres sectores de 120° ;

la figura 3 muestra un diagrama del patrón de radiación de antena de un sector típico: (a) cobertura de sector en el plano horizontal "x-y", (b) patrón de radiación en el plano vertical "z-suelo";

la figura 4 muestra un diagrama de un sistema de estación de base con una sola antena;

la figura 5 muestra un diagrama simplificado de la distribución de la intensidad de la señal dentro de una celda inalámbrica tradicional;

la figura 6 muestra un diagrama de un sistema de estaciones de base con una matriz de antenas unidimensional;

la figura 7 muestra un diagrama simplificado de la operación MIMO 2x2

la figura 8 muestra un diagrama del patrón de radiación para el sistema tradicional de formación/dirección de haces: (a) cobertura del sector en el plano horizontal "x-y", (b) patrón de radiación en el plano vertical "z-suelo";

la figura 9 muestra un diagrama simplificado de la distribución de la intensidad de la señal dentro de una celda inalámbrica para el sistema tradicional de formación/dirección de haces;

la figura 10 representa un diagrama de un sistema de estación de base con una matriz de antenas bidimensional según una realización de la presente descripción;

la figura 11 muestra un diagrama del patrón de radiación para el sistema con haces filiformes según un aspecto de la presente descripción: (a) cobertura del sector en el plano horizontal "x-y", (b) patrón de radiación en el plano vertical "z-suelo";

la figura 12 muestra un diagrama simplificado de la distribución de la intensidad de la señal dentro de una celda inalámbrica para un sistema con haces filiformes según un aspecto de la presente descripción;

la figura 13 muestra un diagrama de la densidad de potencia de la señal de RF en un haz filiforme a lo largo de una línea en el sector que pasa a través del punto de densidad de potencia máxima según un aspecto de la presente descripción.

la figura 14 representa un diagrama de un sistema de estación de base con una matriz bidimensional en fase según una realización de la presente descripción;

la figura 15 muestra una aproximación de un sector de 120° mediante veinte círculos.

la figura 16 muestra cinco posibles patrones de haces con cuatro haces filiformes según un aspecto de la presente descripción: (a) primer patrón de haces, (b) segundo patrón de haces, (c) tercer patrón de haces, (d) cuarto patrón de haces, (e) quinto patrón de haces;

- 5 la figura 17 representa un diagrama de un subsistema de estación de base según una realización de la presente descripción;

la figura 18 muestra un diagrama simplificado de las intensidades de señal a lo largo de una línea en el sector que cruza dos haces filiformes separados por una región sin haz según un aspecto de la presente descripción: (a) el caso de haces filiformes apropiados, (b) el caso de haces filiformes demasiado estrechos;

- 10 la figura 19 muestra un diagrama simplificado de las intensidades de señal a lo largo de una línea en el sector que cruza dos haces filiformes separados por una región sin haz según un aspecto de la presente descripción: (a) el caso de haces filiformes apropiados, (b) el caso de haces filiformes demasiado anchos;

la figura 20 representa un diagrama de tres haces que intersectan una superficie plana finita en el espacio según un aspecto de la presente descripción;

- 15 la figura 21 representa un diagrama de un subsistema de estación de base según una realización de la presente descripción.

- Los encabezados utilizados en este documento son solamente para fines organizativos y no están destinados a ser utilizados para limitar el alcance de la descripción o de las reivindicaciones. Tal como se utiliza en esta solicitud, la palabra "puede" se usa en un sentido permisivo (es decir, significando que tiene el potencial de), en lugar del sentido obligatorio (es decir, significando una obligación). De manera similar, las palabras "incluir", "que incluye", e "incluye" significan incluido pero no limitado.
- 20

Descripción detallada de las realizaciones

Sistemas inalámbricos móviles tradicionales

- El componente básico de un moderno sistema inalámbrico digital móvil, tal como el de móviles o el WiFi, es una celda 3, como se ilustra en la figura 1. Una estación 1 de base, llamada sistema de estaciones de base, proporciona acceso inalámbrico a estaciones móviles o fijas dentro de la celda, tales como la estación 2, llamadas conjuntamente clientes inalámbricos. El significado de acceso inalámbrico es la capacidad del sistema de comunicaciones inalámbricas bidireccionales entre la estación de base y los clientes inalámbricos. La estación de base se puede conectar a redes más grandes jerárquicamente (no mostradas en la figura 1), incluyendo en última instancia la red telefónica mundial, Internet, etc., enlazando así a los clientes inalámbricos con estas redes.
- 25
- 30

- Por simplicidad, el sistema de estación de base de la figura 1 se muestra en el centro del área 3 de cobertura de celda y la forma de celda se muestra como circular. Esta es una situación ideal, utilizada aquí solamente para ilustrar el principio y las limitaciones de la operación de móviles. En la mayoría de los casos prácticos, los obstáculos naturales o artificiales, tales como colinas, rocas, árboles, edificios, puentes, etc. crean trayectorias de propagación inalámbrica muy irregulares y complicadas. Estos se tienen en cuenta al colocar las estaciones de base para una cobertura óptima y, en general, las celdas resultantes tienen formas irregulares.
- 35

- Además, en la mayoría de los casos, para maximizar el área de cobertura de una estación de base, es muy ventajoso dividir la región de 360° a su alrededor en tres sectores de 120° . Esto se muestra en la figura 2. Normalmente, antenas de estaciones de base separadas con cobertura de 120° sirven a cada sector 4. En la figura 3(a) se muestra una antena 11 de sector en una torre 5 de celda.
- 40

- Una antena de sector típica tiene un patrón de radiación como se ilustra en las figuras 3(a) y 3(b). En el plano horizontal, la cobertura 12 de radiación del suelo está sobre todo el sector. En el plano vertical, la radiación apunta principalmente hacia el suelo, como lo muestra la sección 13 de radiación de la antena. Esto evita el desperdicio de energía hacia direcciones ascendentes donde no hay clientes inalámbricos. El diagrama de radiación completo de la antena del sector se puede describir como un haz, que tiene un ancho de 120° en el plano horizontal y mucho más estrecho en el plano vertical. Es importante enfatizar que este patrón de radiación es válido tanto para transmitir como para recibir. Por ejemplo, la sección 13 de radiación en la figura 3(b) es la región a través de la cual la antena transmite la potencia de RF en el modo de transmisión y recibe la potencia de RF en el modo de recepción. Cualquier móvil fuera del patrón de radiación, no puede alcanzar la estación de base ni puede ser alcanzado por la estación de base.
- 45

- La figura 4 muestra un sistema de estación de base que comprende una antena 11 de sector, un subsistema 100 de procesamiento de señales llamado procesador de una RF, y una red 101 de interconexión llamada interfaz dúplex total de una RF. La antena 11 de sector transmite o recibe energía de RF que se origina o termina en el procesador 100 de una RF. El subsistema 100 contiene todas las funciones de procesamiento de RF, analógicas y digitales necesarias en una estación de base inalámbrica. Un aspecto esencial de este subsistema es que procesa las señales hacia y
- 50

desde una única antena, de ahí el nombre de procesador de una RF. De manera similar, la interfaz 101 dúplex total de una RF porta señales hacia/desde una única antena (de ahí el nombre de una RF) en las direcciones tanto de recepción como de transmisión (de ahí el nombre de dúplex total).

5 En la práctica, los operadores inalámbricos utilizan antenas de sector separadas para recibir y para transmitir, y muy a menudo usan dos antenas de sector de recepción para diversificar. Otras configuraciones similares son posibles. Sin embargo, en los sistemas convencionales, estas múltiples antenas aún están conectadas a un procesador de una RF y, en principio, realizan la función de una sola antena como en la figura 4. Naturalmente, un procesador de una RF que usa varias antenas por sector tiene circuitos de RF (radios, etc.) adicionales en comparación con un procesador de una RF que usa una única antena por sector, pero este detalle práctico no se incluye en la definición de un
10 procesador de una RF. La propiedad fundamental y definitoria de un procesador de una RF es que transmite o recibe una única señal de RF, aunque a través de varias antenas físicas del sector en algunas implementaciones prácticas. Por esta razón y para el propósito de esta especificación, será suficiente considerar que un procesador de una RF está conectado a una única antena de un sector como en la figura 4, sin ninguna pérdida de generalidad en la siguiente descripción.

15 Además, para el resto de esta especificación, los conceptos del sistema se discuten ya sea para sectores en algunos casos o para celdas completas en otros casos. Esto se hace solamente con el propósito de la claridad de la presentación y no como una limitación de los conceptos respectivos, que son válidos en cualquier caso.

Eficiencia espectral en sistemas inalámbricos tradicionales.

20 Como se introdujo anteriormente, la eficiencia espectral es una cifra de mérito definida como el número de bits de información transmitidos por segundo, por Hz, sin exceder una tasa de error de bits prescrita. En los sistemas inalámbricos, la máxima eficiencia espectral, también conocida como eficiencia espectral pico, se establece mediante el formato de modulación especificado por las normas.

25 En la práctica, los sistemas inalámbricos móviles muy rara vez operan a la eficiencia espectral pico. De hecho, la eficiencia espectral promedio es normalmente muy baja en comparación con la eficiencia pico. La razón principal de esta gran diferencia es la naturaleza misma de la transmisión inalámbrica. La SNIR de las señales de comunicación varía ampliamente dentro de la celda. Los móviles cerca de la antena de la torre y/o en la línea de visión directa generalmente experimentan una calidad de señal mucho mejor que aquellos en el borde de la celda o en la "sombra de RF" de los edificios, etc. Además, los efectos de trayectoria múltiple crean grandes variaciones de la SNIR llamadas desvanecimiento, que varían en el tiempo.

30 La figura 5 ilustra la gran variación de la SNIR dentro de una celda de manera simplificada, mostrando tres áreas de calidad de señal decreciente: una pequeña área 40 de señal fuerte, un área 41 ligeramente mayor de señal moderada y un área 42 extensa de señal débil. En el caso real, hay un continuo no uniforme de variación de la calidad de la señal por toda la celda. Sin embargo, la simplificación de la figura 5 es suficiente para demostrar que la eficiencia espectral promedio es baja, comparada con la eficiencia espectral pico.

35 Los sistemas inalámbricos típicos manejan una gran variación de la SNIR en la celda al admitir muchas velocidades de datos desde tasas muy bajas, posibles con SNIR bajas, hasta la tasa pico, posible solamente cuando está disponible una SNIR alta. Con respecto al diagrama de la figura 5, las tasas de pico o cerca del pico se usan solamente en el área 40 pequeña de señal fuerte, las tasas bajas a moderadas se usan en el área 41 de señal moderada y las tasas bajas a muy bajas (mínimo permitido por la norma antes de las caídas de llamada) se usan en el área 42 extensa de señal débil. Claramente, la eficiencia espectral promedio es pequeña en comparación con la eficiencia pico teórica, siendo esta última calculada asumiendo que el área de señal fuerte cubre toda la celda. En otras palabras, dado que la mayoría de los móviles se comunican a velocidades de datos bajas la mayor parte del tiempo, se obtiene una eficiencia espectral promedio baja. Es importante advertir que este problema es añadido y no en lugar de otros parámetros de eficiencia espectral, tales como la modulación.

45 Mejora de la eficiencia espectral en sistemas de antena única

A pesar del problema de calidad de la señal ilustrado en la figura 5, en el pasado, los operadores inalámbricos han podido proporcionar servicios de comunicación adecuados porque a) el tráfico de información ha estado dominado por la voz, requiriendo bajas tasas de bits, b) los operadores tenían espectro de RF extra disponible, y c) era posible una mejor utilización del espectro disponible a través de técnicas de modulación más eficientes. Las dos primeras
50 circunstancias de ahorro fueron solamente temporales. En la actualidad, y en el futuro previsible, el tráfico inalámbrico, dominado por aplicaciones hambrientas de datos, tales como la transmisión de video, está aumentando a un ritmo sin precedentes. Además, el espectro de RF se ha vuelto escaso y es, fundamentalmente, un recurso limitado.

La actualización de los sistemas inalámbricos con técnicas de modulación más eficientes de una generación a otra (por ejemplo, las generaciones de sistemas de móviles 1G, 2G, 3G, 4G) abordó el problema del aumento de la
55 eficiencia espectral, pero también ha sido solamente una solución temporal de escala limitada. La razón es que las técnicas de modulación más eficientes espectralmente requieren una SNIR más alta. Además de los problemas fundamentales de variación de la SNIR por toda la celda, como se analizó anteriormente, el coste de los móviles y la disipación de potencia aumentan rápidamente con los aumentos de la SNIR. Elevar el requisito de la SNIR del sistema

más allá de los niveles ya altos en 4G es muy improbable, considerando este hecho en solitario. Además, incrementar la eficiencia espectral del sistema a través de aumentos en la SNIR (modulación más avanzada) se limita fundamentalmente a una ley logarítmica de crecimiento lento impuesta por la teoría de la información de Shannon. Por lo tanto, la opción de obtener una mejor eficiencia espectral a través de la modulación ha alcanzado el punto de disminuir los rendimientos más allá de los sistemas inalámbricos 4G.

Como se esperaba, debido al problema de la SNIR de celda ilustrado en la figura 5, y a pesar de usar una modulación espectralmente eficiente, la eficiencia espectral promedio de los sistemas inalámbricos 4G tales como la LTE (Evolución a Largo Plazo) es baja. Por ejemplo, el foro 4G Americas (anteriormente 3G Americas) predice la eficiencia espectral LTE promedio de solamente 1,4 bits/s/Hz para una implementación de antena única convencional (como se define en relación con la figura 4), mientras que la eficiencia pico respectiva es de 4 bits/s/Hz. Esto se muestra en un libro blanco de 4G Americas titulado "MIMO Transmission Schemes for LTE and HSPA networks", junio de 2009, figura 22, página 40. Incluso en la implementación más avanzada de LTE de múltiples antenas con cuatro antenas en el móvil, la eficiencia espectral es solo de 2,5 bits/s/Hz (véase el mismo libro blanco de 4G Americas), mientras que la eficiencia pico teórica para este sistema es de 16 bits/s/Hz. En realidad, muy pocos móviles tendrán cuatro antenas y la eficiencia espectral promedio real para una celda 4G típica estará por debajo de 2 bit/s/Hz.

Aumento de la eficiencia espectral con los sistemas MIMO

Un planteamiento bien conocido para abordar el problema de baja eficiencia espectral en las comunicaciones inalámbricas es utilizar un pequeño número de antenas múltiples. Una aplicación popular es el sistema de diversidad espacial MIMO (múltiple entrada múltiple salida), que aprovecha la dispersión de la señal para reutilizar el espectro de RF para múltiples transmisiones paralelas. Un MIMO 4x4 como el admitido por LTE tiene cuatro antenas en la estación de base y cuatro antenas en el móvil, y en condiciones ideales, transmite cuatro veces los datos en el mismo espectro de RF en comparación con un sistema convencional no MIMO (un incremento de cuatro veces la máxima eficiencia espectral).

En la figura 6 se muestra un diagrama de un sistema de estación de base adecuado para la operación de MIMO. Este sistema comprende una matriz 21 unidimensional de antenas con N antenas, un subsistema 200 de procesamiento de señales llamado procesador N-RF y una red 201 de interconexión llamada interconexión dúplex total N-RF, pasando señales de una a otra entre las N antenas de la matriz de antenas y el procesador NRF. Además de la funcionalidad estándar como en el procesador de una RF de la figura 4, el procesador N-RF incluye N-1 circuitos de RF adicionales (radios) e interfaces respectivas y una capacidad de procesamiento digital complejo llamada "procesamiento matricial de canal", que realiza los cálculos en tiempo real necesarios para la operación de MIMO. En efecto, el procesamiento matricial del canal utiliza la diversidad espacial de la propagación de la señal de RF para separar unas de otras N señales de RF individuales transmitidas en el mismo espectro de RF. Una forma especial de MIMO es cuando el cliente inalámbrico tiene una única antena. En este caso, el espectro de RF no se reutiliza mediante múltiples transmisiones en paralelo, sino que la SNIR de una única transmisión se potencia combinando adecuadamente las señales que se propagan a través de múltiples trayectorias.

El concepto de MIMO de diversidad espacial se ilustra conceptualmente en la figura 7 para el caso N=2 (dos antenas en el sistema de estación de base y dos antenas en el cliente inalámbrico). La estación de base 6 transmite dos señales independientes en el mismo espectro con dos antenas (una antena por señal). Debido a las diferencias en las posiciones físicas de las antenas de la estación de base (por ejemplo, la diversidad espacial), cada señal se propaga a través de diferentes trayectorias para llegar al cliente 7 inalámbrico. Este último recibe las dos señales con sus propias dos antenas colocadas físicamente en diferentes posiciones. Por lo tanto, cada antena de cliente inalámbrico recibe una superposición de dos señales de estación de base, habiéndose propagado cada señal a través de un canal físico único representado gráficamente en la figura 7 como una trayectoria inalámbrica. La ruta 8 de señal inalámbrica es una de las cuatro trayectorias de señal inalámbrica. El MIMO 2x2 tiene cuatro parámetros de canal (primera antena de estación de base a primera antena de cliente, primera antena de estación de base a segunda antena de cliente, segunda antena de estación de base a primera antena de cliente y segunda antena de estación de base a segunda antena de cliente). Suponiendo ciertas condiciones de dispersión en la propagación de la señal, el cliente inalámbrico puede separar por medio de cálculos las dos señales transmitidas desde la estación de base.

El sistema MIMO de diversidad espacial tiene el inconveniente fundamental de que los móviles requieren múltiples antenas, lo que es difícil de implementar en los teléfonos móviles. Además, los móviles tienen múltiples circuitos de RF (radios) que consumen mucha energía y requisitos substanciales de procesamiento digital para los cálculos de MIMO, lo que acorta el tiempo de funcionamiento con la batería. Además, el procesamiento MIMO para velocidades pico requiere señales grandes con respecto al ruido del canal. Cuando los móviles no están demasiado cerca de la estación de base, las posibles tasas de MIMO y la eficiencia espectral de MIMO caen drásticamente. El ejemplo de LTE analizado anteriormente muestra que no solamente un aumento por 4 en el número de antenas (de una antena a cuatro antenas) resulta en un aumento menor de 2 veces en la eficiencia espectral promedio, sino que la relación entre la eficiencia promedio y la eficiencia pico para la MIMO 4x4 es mucho más baja que para un sistema convencional no MIMO. Aumento de la eficiencia espectral con los sistemas tradicionales de formación y dirección de haces

Una aplicación diferente de las antenas múltiples está en los sistemas tradicionales de formación/dirección de haces.

Un beneficio de este planteamiento es que los móviles son estándar como se usan en sistemas inalámbricos convencionales y solamente la estación de base tiene múltiples antenas y circuitos de RF (radios). En el lado de la estación de base, la formación/dirección tradicional de haces es similar a la de MIMO, requiriendo múltiples circuitos de RF (el número de radios es igual al número de antenas) y empleando un intenso procesamiento de señales llamado "procesamiento de haces". El diagrama del sistema de estación de base ilustrado en la figura 6 también se aplica a los sistemas tradicionales de formación/dirección de haces. Sin embargo, el procesamiento de haces es diferente del procesamiento matricial de canal. En el procesamiento de haces, las señales de RF de N antenas se combinan para agregar señales deseadas constructivamente y cancelar señales no deseadas (interferencias).

Las figuras 8(a) y 8(b) muestran un patrón de radiación efectivo de un sistema tradicional de formación/dirección de haces que usa una matriz 21 de antenas. En el plano horizontal, la cobertura 22 de radiación del suelo es una sección estrecha del sector denominada haz en abanico. En el plano vertical, la radiación es la misma que en las antenas de sector convencionales. Una sección 23 vertical de la figura 8(b) es la misma que la sección 13 vertical en la figura 3(b). El uso del término "radiación efectiva" anterior se refiere al hecho de que el haz en abanico es real solamente en el modo de transmisión y es virtual en el modo de recepción. Esto se explica a continuación.

En el modo de transmisión, las N antenas de la matriz 21 de antenas de la figura 8(a) transmiten N señales de RF separadas pero coherentes, que son versiones de RF separadas de la misma señal de banda de base que contiene la información a transmitir. En general, cada versión de RF tiene una fase de RF diferente y una amplitud de RF diferente de las demás. Como cada antena de la matriz 21 de antenas es una antena de sector convencional, las N señales de RF se transmiten a través de todo el sector pero interfieren coherentemente entre sí. Esta interferencia coherente se produce por diseño porque todas las señales de RF se originan en la misma fuente y el sistema tradicional de formación/dirección de haces está especialmente diseñado y calibrado para esta operación coherente. El resultado neto es que las N señales de RF transmitidas interfieren constructivamente dentro del área 22 de cobertura y destructivamente en el resto del sector. Por lo tanto, en el modo de transmisión, el sistema tradicional de formación/dirección de haces crea haces en abanicos estrechos reales.

En el modo de recepción, las N antenas de la matriz 21 de antenas de la figura 8(a) reciben N señales de RF separadas, que representan N versiones de las señales de sector (de móviles e interferencias), con cada versión recibida en una posición espacial diferente. El sistema tradicional de formación/dirección de haces digitaliza cada señal por separado y las combina de manera coherente en el dominio digital para crear efectivamente el área 22 de cobertura y la cobertura cero en el resto del sector. Por lo tanto, en el modo de recepción, el sistema tradicional de formación/dirección de haz crea solamente haces en abanicos estrechos virtuales.

Un problema potencial para cualquier sistema de formación de haces que cree grandes huecos de señales en todo el sector (sin señal fuera de los haces) es el seguimiento de los móviles. A medida que los móviles se mueven fuera de un área cubierta, el enlace inalámbrico aparentemente se rompería. Una característica importante del sistema tradicional de formación/dirección de haces es su capacidad para monitorear todo el sector en todo momento a pesar del hecho de que los patrones de radiación son efectivamente estrechos. Esto se debe a que los haces recibidos son virtuales a través de cálculos y no son reales. El sistema tiene información completa sobre todos los móviles en el sector en todo momento (N versiones de esta información). Esta información se utiliza para rastrear a los clientes inalámbricos a medida que se mueven a través de la celda y para apuntar los haces (o ceros, véase más adelante) de forma dinámica hacia los clientes inalámbricos seleccionados.

La figura 9 muestra una celda a la que da servicio un sistema 24 tradicional ideal de formación/dirección de haz, que mejora las señales de/a los móviles dentro de varios haces en abanico estrechos, tales como 25 , y elimina las señales de/a móviles fuera de estos haces en abanico. Efectivamente, la estación 24 de base con formación/dirección de haces aumenta la SNIR dentro de las áreas del haz en comparación con la estación 1 de base convencional de la figura 5.

El método para la cobertura inalámbrica de la figura 9 es fundamentalmente diferente del de la figura 5. El primero contiene múltiples haces en abanico (dos en este caso), que cubren solamente una parte del sector a la vez. Esta concentración de radiación de la antena es responsable de aumentar la SNIR de las señales de RF dentro de los haces por dos medios. Primero, la parte de señal de la SNIR se incrementa con respecto al ruido y a los niveles de interferencia. Segundo, la probabilidad de desvanecimiento por múltiple trayectoria disminuye porque las señales de RF se propagan solamente en una parte de la celda. Este intercambio entre la SNIR mejorada dentro de los haces y la SNIR de cero fuera de los haces requiere coordinación con el proceso de comunicación inalámbrica. Por esta razón, el sistema apunta los haces hacia los clientes inalámbricos seleccionados.

Los haces en abanico, como en la figura 9, se crean naturalmente con matrices de antenas unidimensionales, en las cuales N antenas de sector regular se colocan una al lado de la otra. Desfasar de manera apropiada las señales de RF de cada antena es suficiente para generar haces de abanico con pequeños lóbulos laterales, que pueden reducirse aún más variando las amplitudes de las señales de la antena. Cuanto mayor sea el número de antenas, más estrechos serán los haces de la propagación en el azimut. Sin embargo, la forma del haz siempre es alargada, abarcando el sector en dirección radial desde las antenas de la estación de base hasta el final del sector. Otros patrones de radiación, tales como colocar valles en varios ángulos de azimut para reducir las interferencias son extremadamente útiles y son posibles por medio de variaciones de fase y amplitud similares de las señales de las N antenas. Sin embargo, se enfatiza que tener una matriz unidimensional como se describe (cualquier número de antenas) puede no

ser suficiente para dar forma a los haces en la dirección radial. Las matrices de antenas unidimensionales no pueden generar haces puntuales, también conocidos como haces filiformes. En otras palabras, los patrones generados por las matrices de antenas unidimensionales son invariantes en la dirección radial.

5 A pesar de los atributos teóricos atractivos tales como el aumento de la eficiencia espectral, los sistemas convencionales de formación/dirección de haces adolecen de importantes limitaciones prácticas. Una limitación clave para los sistemas inalámbricos de móviles es la dificultad de aumentar la escala del sistema más allá de un pequeño número de antenas (rara vez hay más de ocho antenas). Además, el coste del hardware se vuelve excesivo (demasiadas radios de alta calidad), y la complejidad del procesamiento de banda de base necesario se vuelve demasiado alta, requiriendo procesadores digitales y software costosos. Usar solamente unas pocas antenas limita la ganancia máxima de la antena en cualquier dirección y el efecto de filtrado espacial del sistema. Por esta razón, en la práctica, en lugar de utilizar haces en abanico como se ilustra idealmente en la figura 9, generalmente se prefiere la eliminación de las interferencias de canales conjuntos (señales dentro del mismo espectro de RF) mediante la colocación de cerros/valles en las direcciones de las interferencias. Como cada señal móvil se comunica con la estación de base en diferentes múltiples trayectorias, el procesamiento del tráfico inalámbrico de la vida real, incluido el rastreo de móviles, es complejo. En la práctica, un sistema de dirección de haz de ocho antenas consigue un aumento de menos de un factor de dos en la eficiencia espectral, lo que representa una relación de rendimiento a coste mediocre.

Las discusiones previas muestran que los métodos existentes para aumentar la eficiencia espectral, utilizando un pequeño número de antenas y el procesamiento de señales digitales exclusivamente, tienen una eficacia limitada. Por ejemplo, la norma LTE permite una eficiencia espectral pico de 16 bits/s/Hz, aunque se espera que la eficiencia promedio sea inferior a 2 bits/s/Hz, incluso con el procesamiento más sofisticado disponible.

Una forma de ir más allá de estas limitaciones de rendimiento, según un aspecto de la presente descripción, es introducir nuevas capacidades de hardware en la interfaz de RF del sistema de la estación de base para aumentar la SNIR de la señal antes de la digitalización. Esto permite posibilidades adicionales para que los algoritmos de procesamiento optimicen la eficiencia espectral promedio. Por supuesto, el sistema mejorado también debe ser económico.

Aumento de la eficiencia espectral con grandes matrices de antenas

El uso de grandes matrices de antenas en sistemas inalámbricos comerciales no ha sido posible debido al alto costo de tales sistemas, como se analizó anteriormente. Sin embargo, teóricamente, el concepto de formación/dirección de haces analizado anteriormente se beneficia enormemente de un mayor número de antenas. El potencial sistema respectivo de estación de base, que es una generalización del sistema de la figura 6, se ilustra en la figura 10. La matriz 31 de antenas es bidimensional de tamaño $N \times M$. Estas $N \times M$ antenas transmiten y reciben $N \times M$ señales de RF separadas. Como una generalización adicional del sistema de la figura 6, las $N \times M$ señales de RF pueden combinarse de cualquier manera específica para generar K señales de RF, que se transmiten a través de una red 301 de interconexión dúplex total denominada interfaz dúplex total K -RF. Un procesador 300 de señales de RF/análogicas/digitales llamado procesador K -RF procesa las K señales de RF para obtener una eficiencia espectral promedio mejorada en el sector/celda. Los detalles de esta función del procesador K -RF se describirán con más detalle a continuación.

La adición de una segunda dimensión en la matriz de antenas crea una nueva capacidad fundamental, que es la posibilidad de configurar la radiación global en la dirección radial, así como en el azimut. Como resultado, este sistema puede crear haces filiformes. Las figuras 11(a) y 11(b) muestran el patrón de radiación de un sistema de este tipo que utiliza la matriz 31 bidimensional de antenas. En el plano horizontal, la cobertura 32 de radiación del suelo es un área redonda de señal rodeada por un área de señal cero. En el plano vertical, la radiación es estrecha, como lo muestra la sección 33 de la figura 11(b). El haz 34 filiforme entero se ilustra en la figura 11(a).

La figura 12 muestra una celda inalámbrica a la que da servicio una estación 35 de base, que utiliza una matriz bidimensional de antenas y haces filiformes, según un aspecto de la presente descripción. La estación 35 de base mejora las señales de/a los móviles dentro de tres áreas de señal fuerte cubiertas por tres haces filiformes tales como el haz 34 filiforme, y elimina las señales de/a los móviles fuera de estas áreas de señal fuerte. Efectivamente, la estación 35 de base con haces filiformes aumenta la SNIR dentro de las áreas del haz, no solamente en comparación con la estación 1 de base de la figura 5, sino también en comparación con la estación 24 de base de la figura 9. Es importante mencionar que, en teoría, los haces filiformes tales como el haz 34 filiforme se pueden colocar y mover electrónicamente a cualquier posición en el sector cambiando las fases y amplitudes de las $N \times M$ señales de RF.

Las figuras 11 y 12 muestran haces definidos de manera nítida (por ejemplo, la amplitud de la señal de RF cambiando bruscamente de un valor finito a cero sobre una línea del borde del haz). Esta es solamente una representación gráfica simple del caso real ilustrado en la figura 13. En la práctica, la densidad 50 de potencia de RF dentro de un haz cambia continuamente sin discontinuidades. Naturalmente, hay un punto 52 en el sector donde la densidad de potencia de RF está en el máximo. Al alejarse de ese punto en cualquier dirección en una línea recta, la densidad de potencia de RF disminuye hasta que se convierte en la mitad del valor máximo en un punto 53, lo que representa una variación de 3 dB desde el valor pico. Este punto 53 es donde se puede definir, arbitrariamente, el borde del haz según la presente descripción. Fuera de esta área, la densidad de potencia del haz decae a cero en el punto 51 según el diseño de

filtrado espacial utilizado. Cuanto mayor sea el tamaño de la matriz de antenas, más pronunciada será la región de transición del filtro espacial que se puede realizar.

Por lo tanto, por convención y sin ninguna pérdida de generalidad, las regiones de cobertura del haz como se describen en este documento (por ejemplo, el área 40 de señal fuerte) se consideran dentro de la línea del borde de densidad de potencia de -3dB. Además, el ancho del haz se define como el ángulo de visión desde el punto de origen del haz (es decir, el centro de la matriz de antenas). Por ejemplo, un "haz de 15°" puede ser el área que rodea el punto de densidad de potencia pico con una densidad de potencia no inferior a 3 dB desde ese punto, teniendo esta área un ángulo de visión de 15° desde el centro de la matriz de antenas.

Como los haces filiformes son estrechos en ambas direcciones, azimutal y radial, pueden reutilizar el espectro de RF de forma natural, una capacidad clave para aumentar la eficiencia espectral de la red inalámbrica. En otras palabras, los haces filiformes colocados suficientemente alejados entre sí en el sector pueden usar de manera segura el mismo espectro de RF (poca o ninguna interferencia de haz a haz) para transmitir información en flujos paralelos independientes. Teóricamente, cuanto más estrechos sean los haces, más haces podrían utilizarse para la transmisión en paralelo en el mismo espectro de RF y mayor será la eficiencia espectral alcanzada. Sin embargo, el número de transmisiones en paralelo de señales independientes está limitado a K, el tamaño de la interfaz 301 dúplex total K-RF de la figura 10. En general, las señales que viajan a través de esta red de interconexión son combinaciones lineales de las señales de los haces. Un caso particular importante es la situación en la que hay K haces y cada canal en la interfaz dúplex total K-RF porta la señal de un único haz.

El tamaño del parámetro K y los métodos de hardware del sistema de la figura 10 desempeñan papeles clave en el coste del sistema. Esto se analiza con más detalle a continuación.

Uso de matrices en fase

La sección RF/analógica del sistema de estaciones de base de la figura 10, es un subsistema crítico que comprende la matriz 31 NxM, la interfaz 301 dúplex total K-RF y los circuitos de radio en el procesador 300 K-RF. En la práctica, esta sección de RF/analógica se puede implementar con matrices en fase. Hay muchos tipos de dispositivos de este tipo: matrices analógicas, matrices digitales, una gama completa de soluciones híbridas y matrices novedosas en las fases de investigación y desarrollo.

Como primer ejemplo, si $K=1$ (sistema de radio única), la sección RF/analógica del sistema de la figura 10 es una matriz analógica convencional en fase donde todas las señales de antena se combinan en una única señal de RF utilizando una alimentación corporativa (por ejemplo, véase R. Mailloux, "Phased Array Antenna Handbook", 2ª edición, Artech House, 2005). Actualmente, estas matrices analógicas convencionales en fase son muy caras para su aplicación en sistemas inalámbricos comerciales tales como el móvil.

Como segundo ejemplo, si $K=N \times M$ (sistema de $N \times M$ radios), la sección RF/analógica del sistema de la figura 10 es una matriz digital moderna en fase, donde cada señal de antena se genera o procesa de forma independiente en el dominio digital. Al igual que las matrices analógicas, estos sistemas versátiles que se utilizan habitualmente en radares militares también son muy costosos para los sistemas inalámbricos comerciales. Las soluciones híbridas clásicas que utilizan matrices en fase en parte analógicas y en parte digitales son costosas, igualmente.

En la publicación de la patente U.S. 2012/0142280 A1 se ha descrito una solución de matriz en fase sustancialmente más económica para la sección RF/analógica de un sistema de estación de base con capacidades de haz filiforme. Esta matriz en fase utiliza un parámetro K pequeño (por ejemplo, $K=2-8$) y las interfaces de frecuencia intermedia (IF). Un sistema con capacidad de haz de lápices que utiliza dicha solución de matriz en fase se ilustra en la figura 14. La matriz 36 en fase es bidimensional de un tamaño de $N \times M$ y puede ser conformada (por ejemplo, no plana). K señales de IF se transmiten a través de una red 401 de interconexión dúplex total denominada interfaz dúplex total K-IF a/de un procesador 400 de señales de IF/analógica/digital denominado procesador K-IF. El avance en los costes de esta solución de matriz en fase proviene del uso de circuitos integrados de silicio y del ensamblaje de bajo coste posibilitado por un método de sincronización de RF tal como se describe en la publicación de patente de EE. UU. U.S. 2012/0142280 A1. Debido a los métodos de hardware utilizados, esta matriz en fase también es extremadamente ágil en cuanto a las capacidades de dirección y formación de haces (es decir, puede cambiar muy rápido de una configuración de haz a otra). En la práctica, esta velocidad de cambio de haz puede considerarse instantánea con respecto a la velocidad del flujo de información, tal como se representa por las velocidades de datos transmitidas. Por supuesto, se pueden emplear otros planteamientos más convencionales para la dirección de haces, pero generalmente con una penalización de mayor complejidad y coste y, posiblemente, menor agilidad.

La técnica de haces ágiles

El sistema de estación de base de la figura 10 y el de la figura 14 tienen la capacidad fundamental de generar múltiples haces filiformes, que teóricamente conceden la oportunidad de aumentar la eficiencia espectral, como se analizó anteriormente. Sin embargo, son necesarias consideraciones adicionales para la realización práctica. El principal objetivo de estas consideraciones es describir las técnicas de operación del sistema para una cobertura óptima del sector y para una conectividad óptima del cliente inalámbrico. Una nueva técnica de operación, llamada técnica de haces ágiles, se presenta en este documento. La técnica de haces ágiles es válida igualmente tanto para transmitir

como para recibir. Por lo tanto, no es necesario analizar cada caso por separado y todas las consideraciones a continuación son para ambos casos.

El sistema de estación de base de la figura 10 o el de la figura 14 no pueden admitir más de K transferencias de datos independientes en paralelo con clientes móviles. Asumiendo un valor pequeño para K , que es consistente con la solución de bajo coste de matrices en fases mencionada anteriormente, y con el uso de K haces filiformes estrechos, está claro que una gran parte del sector permanece fuera de los haces. La técnica de haces ágiles mitiga esta deficiencia.

En el ejemplo que se analiza a continuación, considérese que se tienen cuatro haces de 15° ($K=4$) en uso al mismo tiempo, pero solamente como ejemplo y sin ninguna pérdida de generalidad. Resultará obvio que las técnicas descritas son válidas para muchos otros números de haces o anchos de haz. Estas técnicas son válidas incluso si los haces no son haces filiformes, en general.

La figura 15 muestra geoméricamente que un sector de celda de 120° puede aproximarse mediante dos triángulos equiláteros adyacentes que contienen veinte áreas circulares iguales que se llamarán "círculos" por simplicidad. El área 60 circular es uno de los veinte círculos. Los círculos periféricos, tales como el círculo 61, tienen un ángulo de visión de aproximadamente 15° desde la posición de la torre de la celda (el ángulo de 60° del triángulo equilátero dividido por 4 círculos periféricos por triángulo es de 15°). Por convención y por simplicidad, cualquiera de los veinte círculos puede considerarse como la intersección con el plano del suelo de un haz de 15° que se origina en la torre de la celda. Esto ignora los efectos de ampliación del haz cerca de la torre, los efectos de la altura de torre y los efectos de la inclinación del haz. Sin embargo, estos detalles no pretenden ser limitantes. En principio, los sistemas de las figuras 10 o 14 podrían generar haces filiformes de tamaños variables para cubrir cualquiera de los veinte círculos de la figura 15 exactamente como se muestra. Además, la figura 15 asume la propagación en la línea de visión (LOS) para todos los haces. Más adelante, eliminaremos esta condición ideal sin consecuencias fundamentales para la viabilidad y el rendimiento del sistema.

El uso de cuatro haces filiformes de 15° cubre aproximadamente una quinta parte del área del sector (cuatro de veinte círculos). Para extender la cobertura a todo el sector son necesarios múltiples conjuntos de haces. Los diagramas de la figura 16 demuestran que tal cobertura es posible con una interferencia mínima o ninguna interferencia de haz a haz. Hay cinco conjuntos de círculos que aproximan el sector como se muestra en la figura 15, mostrados en las figuras 16(a)-(e), respectivamente. Cada conjunto de círculos corresponde a una configuración diferente de cuatro haces filiformes que cubren cuatro áreas respectivas con señales fuertes. Por ejemplo, en la figura 16(a), el primer haz generado por la matriz 62 de antenas proporciona al área 63 señales fuertes y el tercer haz proporciona al área 65 señales fuertes. De manera similar, la figura 16(b) muestra que los haces segundo y cuarto proporcionan a las áreas 64 y 66 señales fuertes, respectivamente. Cada configuración de cuatro haces que cubren cuatro áreas respectivas con señales fuertes se denomina grupo de haces.

Cada conjunto de cuatro círculos en las figuras 16(a)-(e) con señales fuertes se denomina patrón de haces. El conjunto de cinco patrones de haces cubre todo el sector y cada patrón de haces contiene cuatro áreas de señal fuerte cubiertas por cuatro haces filiformes de 15° en un grupo de haces. Por lo tanto, en las figuras 16(a)-(e) hay cinco patrones de haces generados por cinco grupos de haces correspondientes: Grupo 1, Grupo 2, Grupo 3, Grupo 4, Grupo 5. Los haces de cada grupo de haces se posicionan lo suficientemente lejos los unos de los otros para que no interfieran entre sí. Otros conjuntos similares de patrones de haces filiformes (generados por los respectivos grupos de haces) con las mismas propiedades son posibles. También es posible crear tales conjuntos de patrones con haces, que no son haces filiformes, sino haces alargados, haces con forma de estrella, etc.

Usando los cinco patrones de haces de la figura 16 como ejemplo, una forma de cubrir todo el sector es activar y desactivar los patrones de haces de tal manera que solamente un patrón de haces esté activado a la vez y todos los patrones de haces estén activados algunas veces. Alcanzar la máxima eficiencia espectral requiere que no haya tiempos sin un patrón de haces activado. En otras palabras, para lograr la máxima eficiencia espectral, la información debe fluir entre la estación de base y los clientes inalámbricos en todo momento.

Para obtener un sistema de comunicación inalámbrica viable, la transferencia de información entre la estación de base y los clientes inalámbricos debe coordinarse con el proceso de cambio de patrón de haces. Esta combinación de cambio de patrón de haces y transferencia de información coordinada se denomina técnica de haces ágiles. La palabra "ágil" se refiere al requisito implícito de que los patrones de haces cambien muy rápido en comparación con las tasas de transferencia de información para evitar cualquier pérdida de información durante el cambio de haz.

La estrategia de planificación coordinada de la técnica de haces ágiles es fundamentalmente diferente de las estrategias de procesamiento de la tecnología de dirección de haces convencional. Como se explicó anteriormente, en un caso de dirección de haces convencional, el sistema tiene pleno conocimiento de todo el sector en todo momento y crea configuraciones de "haz" con máximos en algunas direcciones (clientes atendidos) y ceros en otras (cancelación por interferencia). Esta estrategia puede describirse como de "estación de base que sigue a los móviles". En la técnica de haces ágiles, no hay seguimiento de los móviles con haces, sino que los móviles están planificados/programados para comunicarse con la estación de base según un proceso de cobertura de sector con haces ágiles generados por

la estación de base. Por lo tanto, esta estrategia se puede describir como de "móviles que siguen a la estación de base".

Ejemplos de sistemas de haces ágiles

5 En el caso más general, la técnica de haces ágiles se podría utilizar con la conmutación irregular y dinámica de patrones de haces y con patrones de haces cambiantes (en número de haces y en tamaño de haces). Por ejemplo, si un área determinada del sector no tiene clientes inalámbricos durante un período, los haces respectivos que cubren esa área se podrían dejar desactivados en favor de la activación de otros patrones de haces. Del mismo modo, para un tráfico inalámbrico muy intenso en un área determinada, los haces respectivos podrían mantenerse activados en todo momento. En una aplicación menos general pero más simple de la técnica de haces ágiles, los cinco patrones de haces de la figura 16, o un equivalente, pueden repetirse indefinidamente, y cada grupo de haces genera un patrón de haces que se enciende una quinta parte del tiempo. En efecto, este proceso simple es equivalente a escanear el sector con cuatro haces en pasos discretos.

15 La coordinación adecuada entre el cambio de patrón de haces y la transferencia de información es clave para la técnica de haces ágiles. La figura 17 muestra un diagrama de un posible subsistema de estación de base que proporciona esta funcionalidad en el caso simple del escaneo de haz múltiple. Este subsistema puede incluirse en el sistema de estación de base de la figura 10 o en el de la figura 14. La matriz NxM 37 en fase de la figura 17 genera K haces ágiles que transmiten o reciben K señales de RF, que se mueven desde/hacia el procesamiento 71 de la capa física por medio de las señales 70. Los haces de las matrices en fase se programan a través del módulo 73, denominado módulo de escaneo y formación de K Haces, controlado por el software MAC (control de acceso a los medios). Este módulo realiza una conversión de comandos MAC de alto nivel en números de fase y amplitud utilizados por la matriz en fase para generar los patrones de haces requeridos y en programas de conmutación/escaneo de haces. Las señales 74 de control transfieren la información de formación de haces a la matriz en fase.

20 Es en la capa MAC donde tiene lugar la coordinación entre la conmutación/exploración de haces y las transferencias de información. Un planificador 72, una parte del MAC que asigna recursos de comunicación de tiempo/frecuencia a los clientes inalámbricos, planifica los tiempos de recepción y transmisión para los clientes inalámbricos durante el tiempo en que los haces brindan cobertura a las áreas donde están los clientes respectivos. El bloque 71 de procesamiento de capa física proporciona la operación estándar de traducir señales de RF de/a datos digitales a/de formatos analógicos modulados.

25 Debe entenderse que la funcionalidad descrita en la figura 17 y analizada anteriormente podría implementarse normalmente mediante firmware o por un sistema de procesamiento que incluya uno o más procesadores, memoria (por ejemplo, ROM, almacenamiento en disco, almacenamiento permanente, etc.) para almacenar el código de programa apropiado para las diversas funciones, y memoria RAM y/o memoria activa que se utiliza durante la ejecución del código de programa, o por una combinación de ambos.

30 La técnica de haces ágiles con cuatro patrones de haces como en los ejemplos analizados anteriormente se ajusta bien a la norma LTE. Dado que esta última permite hasta cuatro antenas de estación de base para MIMO, admite cuatro flujos independientes de transmisión de datos a través de la capa física y de las interfaces. Además, la planificación de la capa LTE MAC es extremadamente flexible las asignaciones de los espacios de tiempo y de frecuencia, lo que permite la posibilidad de una planificación coordinada. Además, la técnica de haces ágiles se integra naturalmente en la estructura de trama de datos de LTE, lo que da como resultado una gran eficiencia espectral promedio.

35 En una realización, el esquema de escaneo descrito con respecto a la figura 16 se puede repetir indefinidamente cada 5 ms, con cada patrón de cuatro haces activado 1 ms cada vez. Esto se corresponde con el cambio del patrón de haces de la antena (o grupo de haces) cada subtrama de LTE (1 ms), enfocando la antena a un 20% diferente del sector de cada subtrama. Durante un marco de LTE de 10 ms, cada punto del sector se cubrirá dos veces para un total de 2 ms, lo que corresponde a 28 paquetes con un prefijo cíclico corto (14 paquetes por subtrama) o 24 paquetes con un prefijo cíclico largo (12 paquetes por subtrama).

40 Para los móviles que se mueven a 250 Km/h (cambio de posición de 0,7 m por trama LTE), habrá al menos 280 paquetes LTE dentro de un cambio de posición de 7 m (10 tramas LTE, 14 paquetes por subtrama, dos subtramas servidas por trama para cada área de haz). Este cambio de posición es relativamente pequeño en comparación con el radio del área cubierta por cada haz. Por ejemplo, para un pequeño sector de 500 m de radio, cada haz cubre un área circular con un radio de 64,5 m. Para un sector de radio de 5 km, cada haz cubre un área circular con un radio de 645 m. Los móviles con movimiento más lento pueden obtener una cobertura incluso mejor para cada posición predeterminada del haz, mientras que los móviles en reposo pueden obtener cobertura continua desde una posición del haz. Estos cálculos simples muestran la ventaja de cubrir el sector con múltiples haces filiformes ágiles: hay una continuidad de facto en la cobertura del sector y nunca hay periodos largos en los que la estación de base no está en contacto con los móviles.

55 Se presentó un ejemplo en el que el sistema recorre repetidamente en ciclos los grupos de haces de manera secuencial y de forma regular (es decir, la secuencia de Grupo 1, Grupo 2, Grupo 3, Grupo 4, Grupo 5 se repite

continuamente con cada grupo de haces generado durante la misma cantidad de tiempo). Sin embargo, el recorrido repetido en ciclos por los grupos de haces también puede ocurrir de manera irregular o no periódica, dependiendo de los requisitos de la situación. Por ejemplo, diferentes grupos de haces pueden estar activados durante diferentes períodos de tiempo y/o pueden activarse fuera de orden, y/o algunos grupos pueden generarse más de una vez durante un ciclo de operación. Un punto más delicado sobre este tema se analiza a continuación.

Control del cliente inalámbrico

En la descripción anterior de la técnica de haces ágiles, se asumió tácitamente que la estación de base puede comunicarse con la información de control de los clientes inalámbricos, incluida la información de planificación del tiempo. Esto normalmente se realiza a través de canales de control especiales, que normalmente requieren una SNIR sustancialmente más baja que los canales de datos de alta velocidad. Una forma sencilla de establecer y mantener canales de control puede ser a través de un haz estático separado de 120° que cubra todo el sector. Sin embargo, este planteamiento puede desperdiciar un haz y probablemente requeriría modificaciones en los estándares inalámbricos actuales. Un planteamiento alternativo se analiza a continuación.

El número de haces y tamaños de haz se pueden seleccionar de la siguiente manera: a) los haces deben ser lo suficientemente estrechos de modo que en el punto medio entre los haces, el filtrado espacial de la antena alcance la banda de parada; y b) los anchos de los haces no deben ser tan estrechos como para dejar grandes porciones del sector sin cobertura con poca radiación de antena. Esto es posible eligiendo el ancho del haz correcto y el número de haces, asumiendo que el sistema tiene la capacidad de generar haces estrechos (por ejemplo, una matriz en fase lo suficientemente grande). Las figuras 18 y 19 ilustran este punto. El diseño adecuado se muestra en las figuras 18(a) y 19(a). En este caso, la intensidad de un primer haz 54 se hace despreciable fuera de un radio de 1,5 anchos de haz desde el centro del haz, por lo que no produce ninguna interferencia significativa en un segundo haz 55. Sin embargo, el área entre los haces está aún cubierta, aunque con menor energía. Dado que al menos dos haces cubren esta área en cualquier dirección, la estación de base mantiene la posibilidad de comunicarse con información de control de móviles a una SNIR inferior. En general, se pretende que las áreas entre haces sean silenciosas, es decir, no se permite que los móviles dentro de esas áreas envíen o reciban datos de carga útil, pero la estación de base aún puede mantener la señalización de control de baja velocidad con los móviles por razones de administración de la red. Esto crea la posibilidad de controlar los móviles con la misma eficacia que en una implementación clásica sin utilizar la técnica de haces ágiles.

El uso de haces más estrechos que los óptimos, como en la figura 18(b) dificulta la capacidad de control de móviles porque las áreas entre haces permanecen descubiertas ya sea por un primer haz 56 o por un segundo haz 57. El uso de haces más anchos que los óptimos como en la figura 19(b) crea la posibilidad de interferencia entre haces cuando un primer haz 58 y un segundo haz 59 extienden sus distribuciones de potencia entre sí.

Caso sin línea de visión (NLOS)

En las consideraciones anteriores, se asumieron conexiones inalámbricas con LOS (línea de visión) por simplicidad. En realidad, hay muy pocos casos, si es que los hay, en los que las comunicaciones inalámbricas de móviles ocurren exclusivamente en condiciones de LOS. La situación típica es que solamente unos pocos móviles están en LOS, y la mayoría de los móviles se comunican con la estación de base a través de reflexiones de señales en edificios u otras estructuras hechas por el hombre y en obstáculos naturales tales como árboles, rocas grandes, etc. Además, muchas reflexiones de la misma señal a menudo llegan en diferentes momentos, causando interferencias por trayectorias múltiples y desvanecimiento.

Si bien las propagaciones en LOS y NLOS son consideraciones importantes para el sistema de comunicación general, desde la perspectiva de la antena de la estación de base, lo único que importa son sus capacidades espaciales para proveer o degradar la energía de RF y no la forma en que la radiación entrante o saliente viaja a través del sector. Por lo tanto, en general, los patrones de la figura 16 generados, por ejemplo, por la matriz en fase de la figura 14 son reales en el mismo frente de la matriz en fase, ya sea para el caso de LOS total o para el caso de NLOS total o para cualquier combinación de los mismos. En otras palabras, si se considera un plano paralelo con la matriz en fase colocada en frente de él, los patrones de provisión o degradación de RF de los cuatro haces a través de este plano serían como se muestra en la figura 16. Esto supone que el plano está lo suficientemente lejos para evitar los efectos de campo cercano y que no hay obstáculos físicos entre la matriz en fase y el plano. Una ilustración de esta consideración teórica se muestra en la figura 20 para tres haces. Una superficie 81 plana finita está posicionada en frente de una matriz 80 de antenas y tres haces 82, 83, 84 intersectan la superficie 81 plana finita en tres regiones 85, 86, 87 correspondientes, similares a los patrones de la figura 16.

En el caso de LOS total, como se supuso anteriormente, los patrones de haces sobre la superficie plana finita se proyectan directamente en las áreas del sector correspondiente por medio de proyecciones geométricas simples (conos), conservando las propiedades topológicas, es decir, las áreas continuas se proyectan en áreas continuas, etc. En el caso de NLOS, esta proyección podría ser mucho más complicada y en general no conservará las propiedades topológicas. Es decir, un área circular continua en la superficie plana finita en frente de la antena puede proyectarse en varias áreas desunidas (por ejemplo, los móviles que no están demasiado cerca físicamente todavía pueden comunicarse mejor con la estación de base sobre el mismo haz). Naturalmente, cuanto más estrechos sean los haces

de la matriz en fase, más probable es que tengan una proyección en el sector más simple que la radiación de la antena. A continuación, se identifican dos casos de NLOS para la técnica de haces ágiles: un caso simple y el caso general.

El caso simple de NLOS es el caso de "un móvil a un haz". Independientemente de las complejidades de la proyección del sector a la radiación de la antena, si para una planificación particular cada móvil se comunica con la estación de base a través de solamente uno de los tres haces, entonces este caso NLOS es esencialmente el mismo que el caso LOS para la técnica de haces ágiles. En otras palabras, si, por ejemplo, el planificador 72 sabe qué haz único cubre cada móvil en todo momento, la ubicación física real del móvil es irrelevante. Por supuesto, en este caso, un móvil que se mueve a alta velocidad puede atravesar un pequeño punto cubierto por NLOS mucho más rápido que en el caso de LOS. Sin embargo, es probable que esta situación no sea mucho mejor para cualquier otro sistema inalámbrico con la misma implementación de torre. La mitigación adecuada de esta situación es mediante la planificación de la red y la colocación de la antena (asegurándose de que todas las áreas bajo cobertura estén razonablemente "iluminadas") apropiadas.

En entornos altamente dispersos, tales como los centros de las ciudades, puede que no siempre sea posible planificar los móviles de modo que tengan un caso simple de NLOS. Este es el caso general de NLOS. En esta situación, al menos dos haces de los patrones de haces cubren algunos de los móviles. Sin embargo, esto no es diferente de la MIMO de diversidad espacial convencional con clientes que tienen una única antena y puede abordarse con la misma solución de procesamiento. La figura 21 muestra un subsistema similar al de la figura 17 pero mejorado con el procesamiento 75 MIMO estándar. En comparación con los sistemas MIMO convencionales, la técnica de haces ágiles tiene el beneficio adicional de que la matriz en fase genera un efecto de filtrado espacial pronunciado y programable en la interfaz de RF, incrementando la SNIR de las señales de RF.

Algoritmos de asignación de haz

En la discusión anterior, se asumió que, por ejemplo, el planificador 72 sabe en todo momento qué haz es apropiado para cada móvil. En tal caso, hay varias formas posibles para que el planificador 72 adquiera y mantenga este conocimiento. Una técnica basada en búsquedas simples se analiza a continuación.

Primero, asumimos que en un cierto tiempo después de que se enciende un sistema que funciona según la técnica de haces ágiles, todos los móviles se asignan a los haces correctos y se comunican con la estación de base en coordinación con el escaneo del sector como se muestra en la figura 16. A medida que los móviles se mueven por el sector, algunos de ellos se alejarán de su área cubierta asignada hacia un área diferente cubierta en un momento diferente por un haz diferente. Sin embargo, debido a que el sistema se comunica con cada móvil muy a menudo debido al rápido escaneo, la "salida" de un haz se indicará por una disminución monótona en la calidad del canal. Esto puede hacer que el planificador 72 solicite al móvil que comience a enviar datos de control en intervalos de tiempo correspondientes a otros patrones de haces. Se recuerda que la estación de base tiene la capacidad de mantener el contacto con todo el sector en todo momento (debido a los múltiples haces y escaneos diseñados adecuadamente). Para un ejemplo del LTE que se ha considerado, en solamente 5 ms, el planificador 72 debería saber si el móvil "aparece" en otro haz y qué haz es ese. Además, el planificador 72 puede monitorear la calidad del canal del móvil y en el momento apropiado (la calidad del canal en un nuevo haz mejor que en el haz anterior) cambiará el móvil al nuevo haz.

El algoritmo simple descrito anteriormente basado en búsquedas "a ciegas" es factible porque el sistema es ágil y hay muchas posibilidades para intercambiar información entre los móviles y la estación de base. Incluso en el caso general de NLOS, estas búsquedas convergerán rápidamente hacia la asignación óptima de móviles a haces. Una interpretación a alto nivel de este algoritmo es que los móviles con alta calidad de canal se mantienen sincronizados con el proceso de escaneo del sector, mientras que los móviles con calidad de canal degradada se colocan en una operación asíncrona determinista (en su mayoría datos de control) con el patrón de escaneo hasta que se encuentra un nuevo óptimo.

El inicio del sistema puede diseñarse para añadir gradualmente móviles uno por uno y colocar cada uno en un haz óptimo correspondiente antes de añadir móviles adicionales. Principios de asignación de dispositivos móviles más sofisticados son posibles, por ejemplo, basados en informes de coordenadas GPS por teléfonos móviles y mapas GPS almacenados y actualizados dinámicamente en la estación de base. Otro posible principio para los algoritmos de asignación de haz es el uso de informes de los móviles de la calidad del canal vecino.

En resumen, la presente descripción describe técnicas para lograr una eficiencia espectral promedio cercana a la eficiencia espectral pico. Esto representa hasta un aumento de diez veces en la capacidad del sistema inalámbrico con una actualización de bajo coste de la red.

En este punto, debe observarse que las técnicas para lograr una alta eficiencia espectral promedio en un sistema inalámbrico según la presente descripción como se describe anteriormente pueden implicar el procesamiento de datos de entrada y la generación de datos de salida en cierta medida. Este procesamiento de datos de entrada y la generación de datos de salida pueden implementarse en el hardware o en el software. Por ejemplo, se pueden emplear componentes electrónicos específicos en una estación de base o circuitos similares o relacionados para implementar las funciones asociadas con el logro de una eficiencia espectral promedio alta en un sistema inalámbrico según la

5 presente descripción como se describió anteriormente. Alternativamente, uno o más procesadores que funcionan según las instrucciones pueden implementar las funciones asociadas con el logro de una eficiencia espectral promedio alta en un sistema inalámbrico según la presente descripción como se describió anteriormente. Si tal es el caso, está dentro del alcance de la presente descripción que dichas instrucciones puedan almacenarse en uno o más medios de almacenamiento no transitorio legibles por un procesador (por ejemplo, un disco magnético u otro medio de almacenamiento), o transmitirse a uno o más procesadores por medio de una o más señales incorporadas en una o más ondas portadoras.

10 La presente descripción no está limitada en su alcance por las realizaciones específicas descritas en el presente documento. De hecho, otras diversas realizaciones y modificaciones de la presente descripción, además de las descritas en este documento, serán evidentes para los expertos en la técnica a partir de la descripción anterior y de los dibujos adjuntos. Por lo tanto, se pretende que tales otras realizaciones y modificaciones estén dentro del alcance de la presente descripción. Además, aunque la presente descripción se ha descrito en el presente documento en el contexto de al menos una implementación particular en al menos un entorno particular para al menos un propósito particular, los expertos en la técnica reconocerán que su utilidad no está limitada a los mismos y que la presente descripción puede implementarse beneficiosamente en cualquier número de entornos para cualquier número de propósitos. Por consiguiente, las reivindicaciones expuestas a continuación deben interpretarse en vista de la amplitud completa de la presente descripción, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método de comunicación con una estación inalámbrica, comprendiendo el método:

5 definir una pluralidad de haces (63, 64, 65, 66) puntuales independientes para ser generados por un dispositivo (37, 62) de formación de haces, con cada haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes apuntado en una dirección diferente e intersectando una región de un área plana finita en el espacio, en donde las direcciones de la pluralidad de haces puntuales independientes varían tanto en azimut como en elevación, y en donde las regiones del área plana finita del espacio intersectada por la pluralidad de haces puntuales independientes es una matriz bidimensional de regiones intersectadas;

10 definir un conjunto de múltiples grupos de haces, siendo cada grupo de haces un subconjunto diferente de haces puntuales de entre la pluralidad de haces puntuales independientes, incluyendo cada grupo de haces del conjunto de múltiples grupos de haces más de un haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes, y siendo cada haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes un miembro de uno de los grupos de haces del conjunto de múltiples grupos de haces; hacer repetidamente un ciclo a través del conjunto de grupos de haces, en donde hacer un ciclo a través del conjunto de grupos de haces implica activar sucesivamente cada grupo de haces del conjunto de múltiples grupos de haces, y en donde activar un grupo de haces implica generar simultáneamente múltiples haces puntuales de ese grupo de haces;

15 identificar un haz puntual de entre la pluralidad de haces puntuales independientes que produce un mejor enlace de comunicación con la estación inalámbrica;

20 planificar la comunicación con la estación inalámbrica para que se produzca cuando se está activando el grupo de haces del que es miembro el haz puntual identificado;

generar, mediante el dispositivo de formación de haces, un haz estático que cubre un área del sector de celda completa, en donde el haz estático permanece activado mientras hace repetidamente un ciclo a través del conjunto de grupos de haces, y en donde todas las regiones que son intersectadas por la pluralidad de haces puntuales independientes están contenidas dentro del área del sector de móviles; y

25 utilizar el haz estático para comunicar información de control a clientes inalámbricos, incluida la estación inalámbrica.

2. El método de la reivindicación 1, que comprende además la comunicación con la estación inalámbrica a través del haz puntual identificado durante los momentos en que se está activando el grupo de haces del cual el haz puntual identificado es miembro.

30 3. El método de la reivindicación 1, en donde planificar comunicaciones implica comunicar información de planificación a la estación inalámbrica, en donde la información de planificación indica cuándo estará disponible el haz puntual identificado para su uso por la estación inalámbrica.

4. El método de la reivindicación 1, en donde el hacer repetidamente un ciclo a través del conjunto de grupos de haces se realiza de tal manera que no hay tiempo durante el ciclo en el que ninguno de los grupos de haces de entre el conjunto de grupos de haces esté siendo activando.

35 5. El método de la reivindicación 1, en donde uno o más de:

cada grupo de haces se compone de 4 haces puntuales seleccionados de entre la pluralidad de haces puntuales; y/o el conjunto de grupos de haces consta de 5 grupos de haces.

6. El método de la reivindicación 1, en donde uno o más de:

40 para cada grupo de haces del conjunto de grupos de haces, las diferentes regiones del área plana finita que son intersectadas por los haces puntuales de ese grupo de haces están separadas entre sí por al menos una región que está intersectada por un haz puntual de otro grupo de haces de entre el conjunto de grupos de haces; y/o

los haces puntuales de cada grupo de haces intersectan regiones del área plana finita que son diferentes de las regiones intersectadas por los haces puntuales de los otros grupos de haces.

7. El método de la reivindicación 1, en donde la información de control incluye información de planificación de tiempo.

45 8. Un aparato para comunicarse con una estación inalámbrica, comprendiendo el aparato:

50 un sistema de radio de múltiples transmisores/receptores para ser conectado a una matriz de antenas, estando el sistema de radio de múltiples transmisores/receptores configurado para generar una pluralidad de haces (62, 63, 64, 65, 66) puntuales independientes y un haz estático mediante la matriz de antenas, cubriendo el haz estático un área del sector de celda completo, cada haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes intersectando una región diferente de un área plana finita en el espacio, en donde todas las regiones que son intersectadas por la

- pluralidad de haces puntuales independientes están contenidas dentro del área del sector de celda, en donde las direcciones de la pluralidad de haces puntuales independientes varían tanto en azimut como en elevación, y en donde las regiones del área plana finita del espacio intersectada por la pluralidad de haces puntuales independientes es una matriz bidimensional de regiones intersectadas, con la pluralidad de haces puntuales independientes agrupados para formar un conjunto de múltiples grupos de haces, siendo cada grupo de haces del conjunto de múltiples grupos de haces un subconjunto diferente correspondiente de haces puntuales de la pluralidad de haces puntuales independientes, cada grupo de haces del conjunto de múltiples grupos de haces incluyendo más de un haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes, y siendo cada haz puntual de la pluralidad de haces puntuales independientes miembro de uno de los grupos de haces del conjunto de múltiples grupos de haces, y en donde el haz estático cubre simultáneamente todas las regiones que son intersectadas por la pluralidad de haces puntuales independientes; y un sistema de planificación para controlar el sistema de radio de múltiples transmisores/receptores, estando el sistema de planificación configurado para hacer que el sistema de radio de múltiples transmisores/receptores:
- 5 haga repetidamente un ciclo a través del conjunto de grupos de haces múltiples, en donde hacer el ciclo a través del conjunto de grupos de haces múltiples implica la activación sucesiva de cada grupo de haces del conjunto de grupos de haces múltiples, y en donde la activación de un grupo de haces implica la generación simultánea de múltiples haces puntuales de ese grupo de haces;
- 10 identificar un haz puntual de entre la pluralidad de haces puntuales independientes que produce un mejor enlace de comunicación con la estación inalámbrica;
- 15 planificar las comunicaciones con la estación inalámbrica para que ocurran cuando el grupo de haces del cual es miembro el haz puntual identificado está siendo activado;
- 20 generar el haz estático que permanece activado mientras hace repetidamente un ciclo por el conjunto de grupos de haces; y
- 25 utilizar el haz estático para comunicar información de control a los clientes inalámbricos, incluida la estación inalámbrica, en todas las regiones que son intersectadas por la pluralidad de haces independientes.
9. El aparato de la reivindicación 8, que comprende además la matriz de antenas; opcionalmente en donde:
- la matriz de antenas es una matriz bidimensional de elementos de antena; y/o el sistema de radio transmisor/receptor múltiple y la matriz de antenas constituyen una matriz en fase.
- 30 10. El aparato de la reivindicación 8, en donde el sistema de radio de transmisor/receptor múltiple está configurado para comunicarse con la estación inalámbrica cuando el grupo de haces del cual es miembro el haz puntual identificado está siendo activado.
- 35 11. El aparato de la reivindicación 8, en donde el sistema de radio de múltiples transmisores/receptores está configurado para definir los grupos de haces del conjunto de múltiples grupos de haces de modo que cada grupo de haces del conjunto de grupos de haces esté formado por 4 haces puntuales seleccionados de entre la pluralidad de haces puntuales independientes.
12. El aparato de la reivindicación 8, en donde el sistema de radio de transmisor/receptor múltiple está configurado para usar el haz estático para comunicar información de control que incluye información de planificación de tiempos.

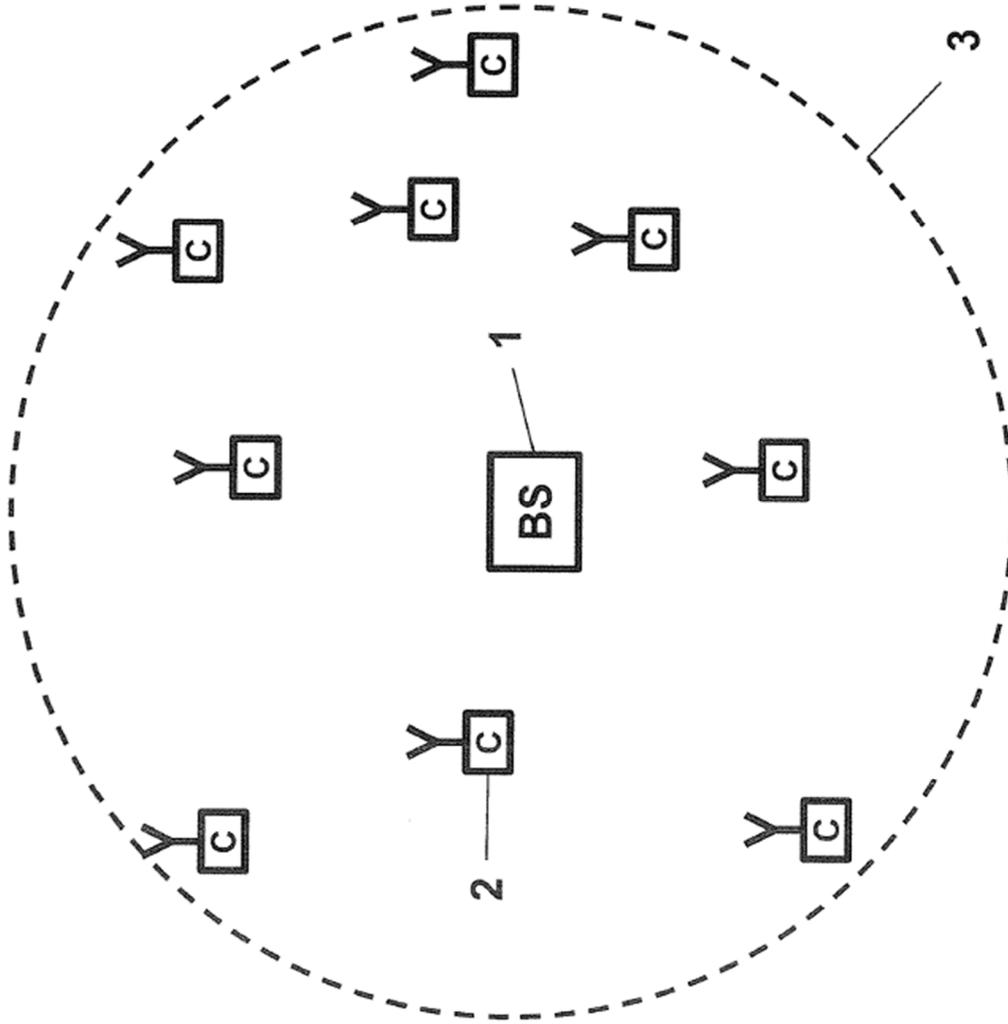


Figure 1

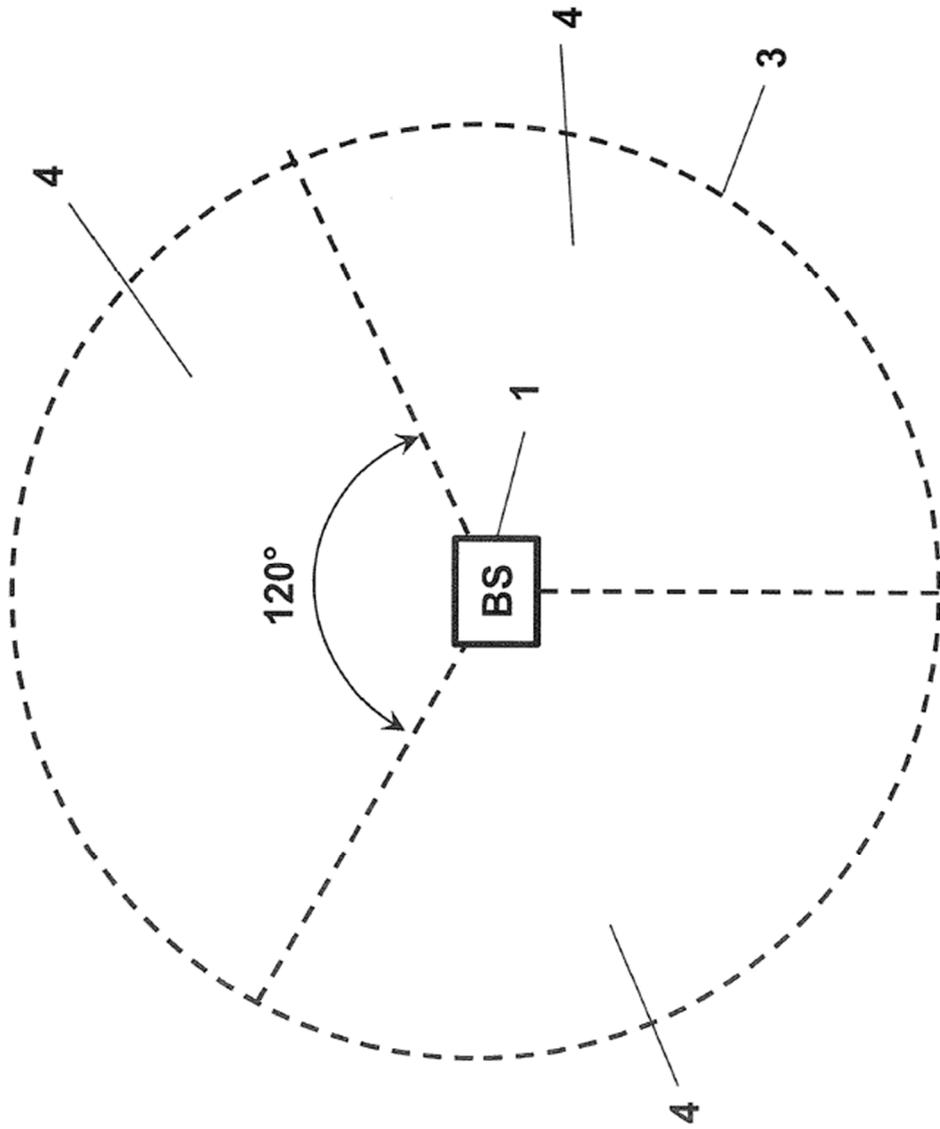


Figura 2

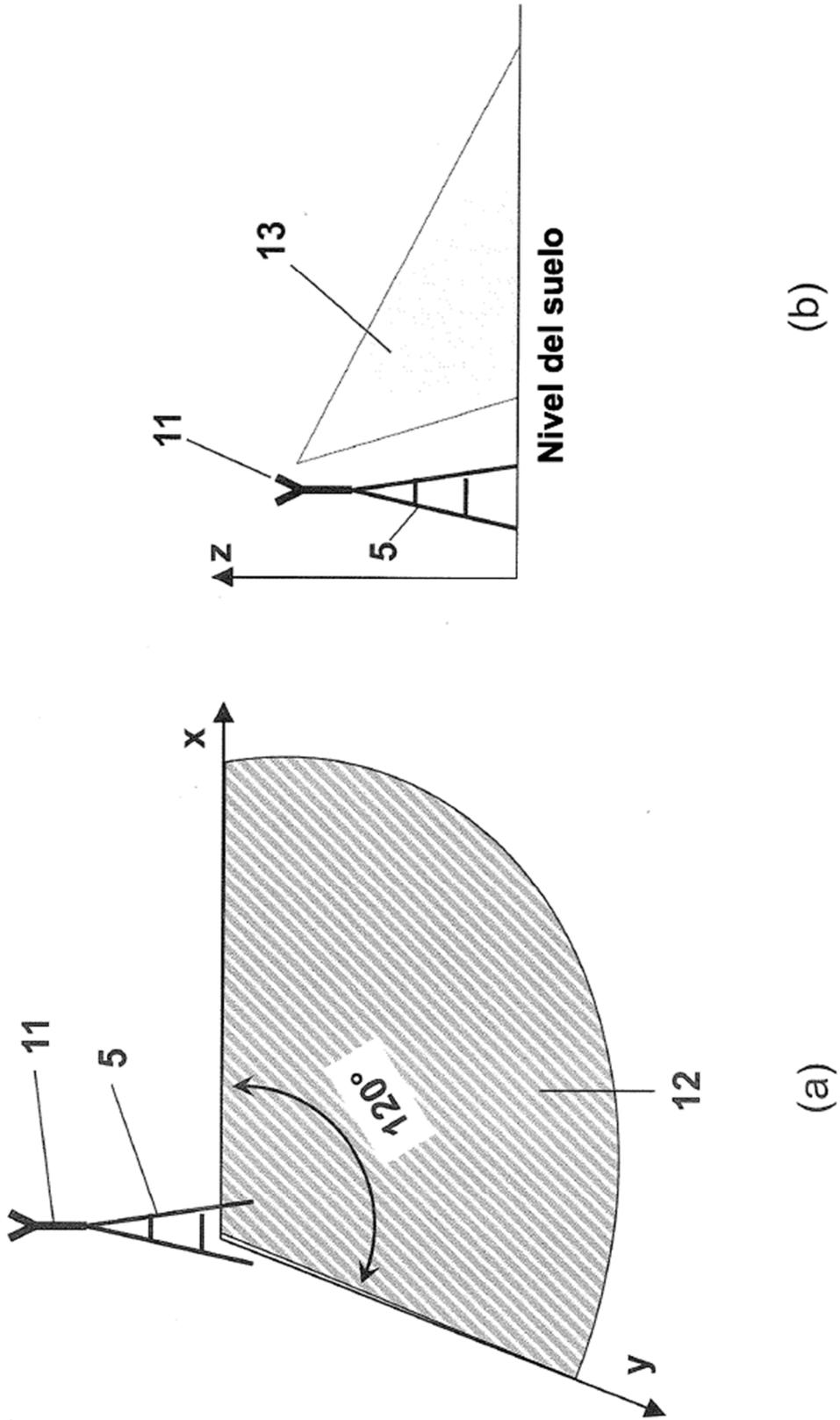


Figura 3

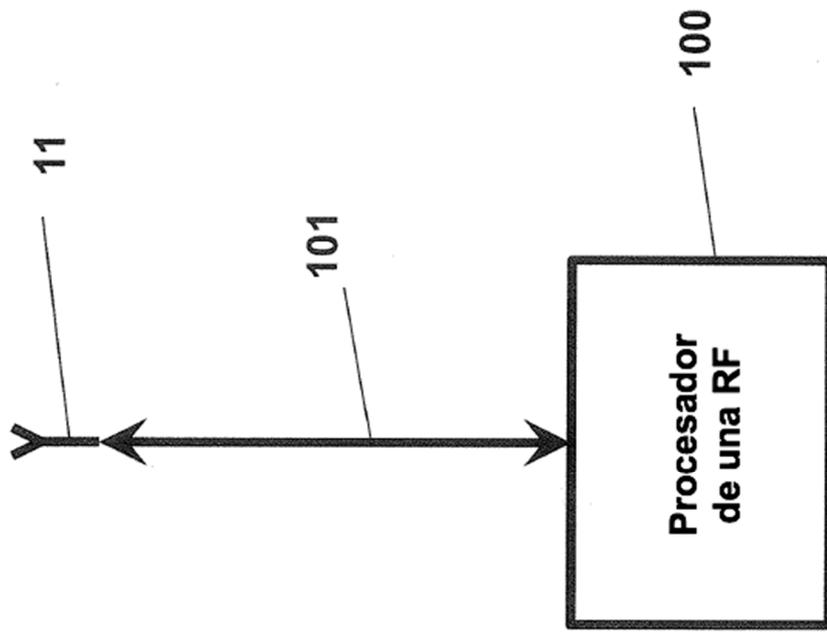


Figura 4

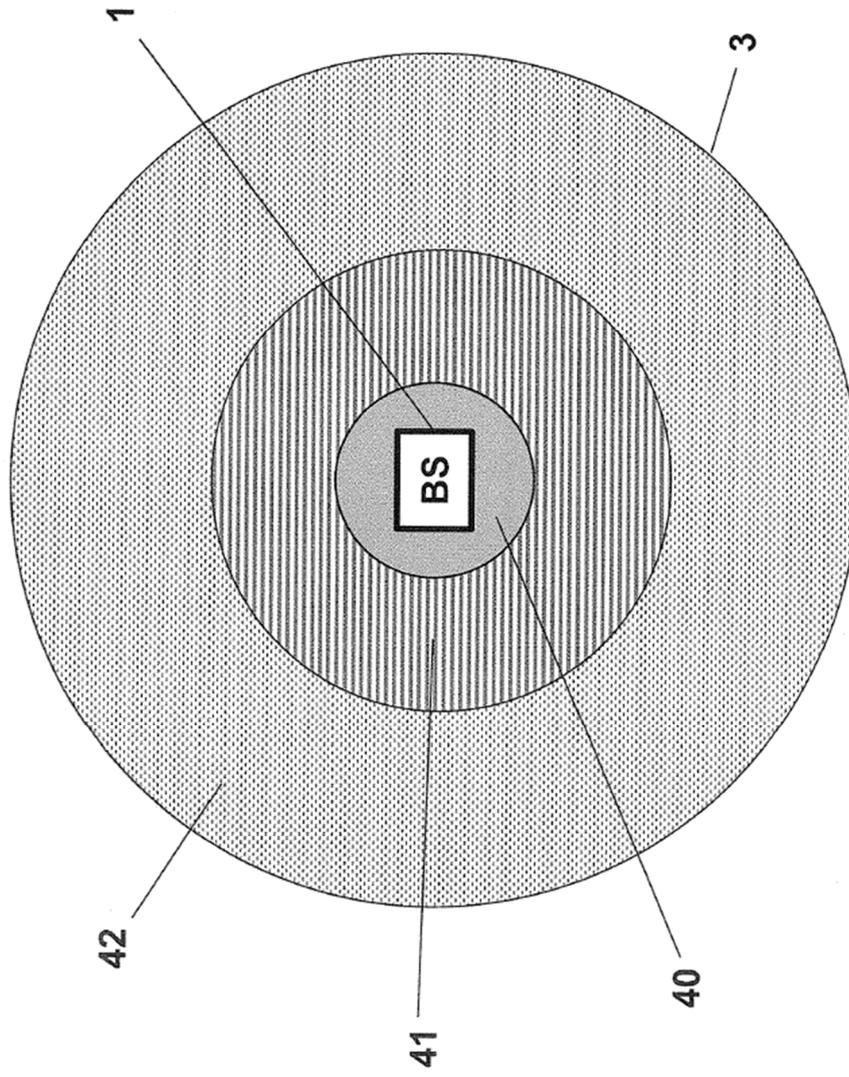


Figura 5

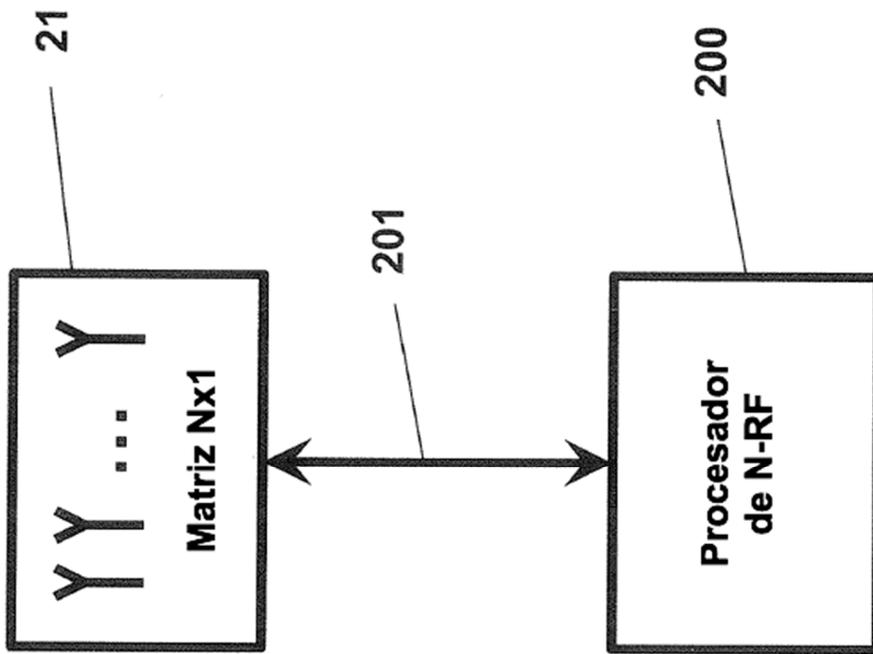


Figura 6

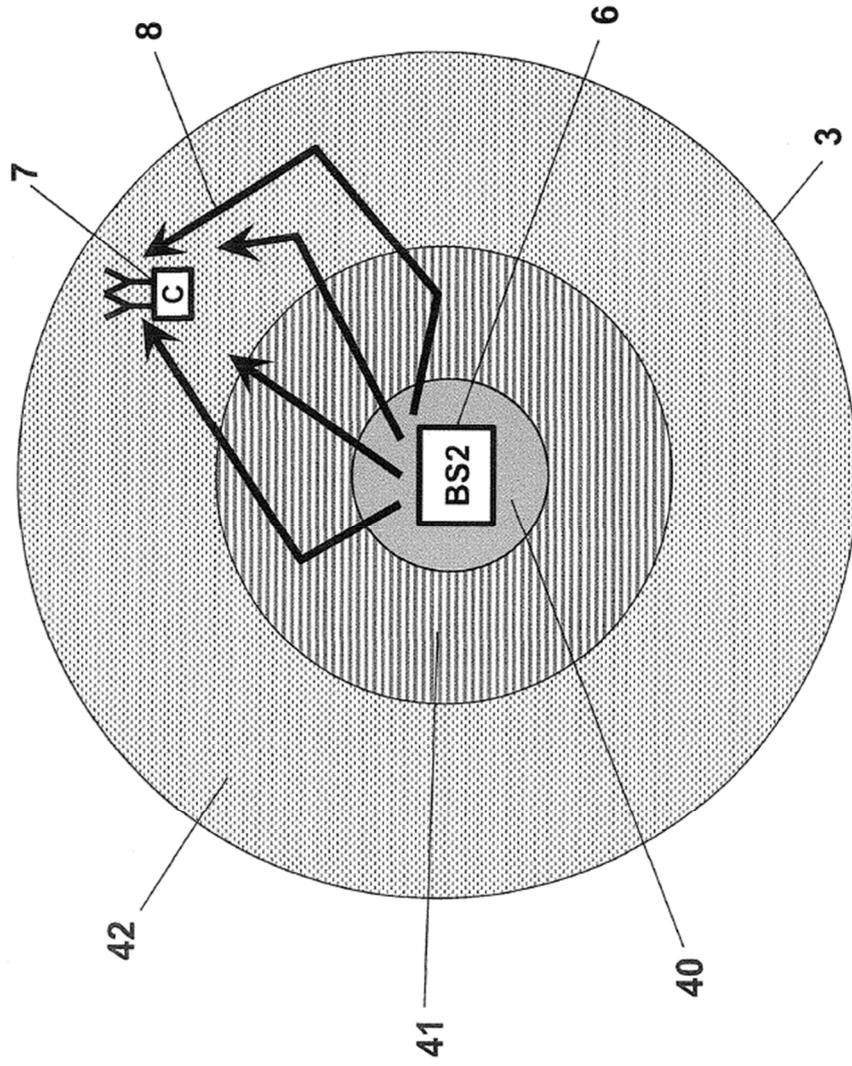


Figura 7

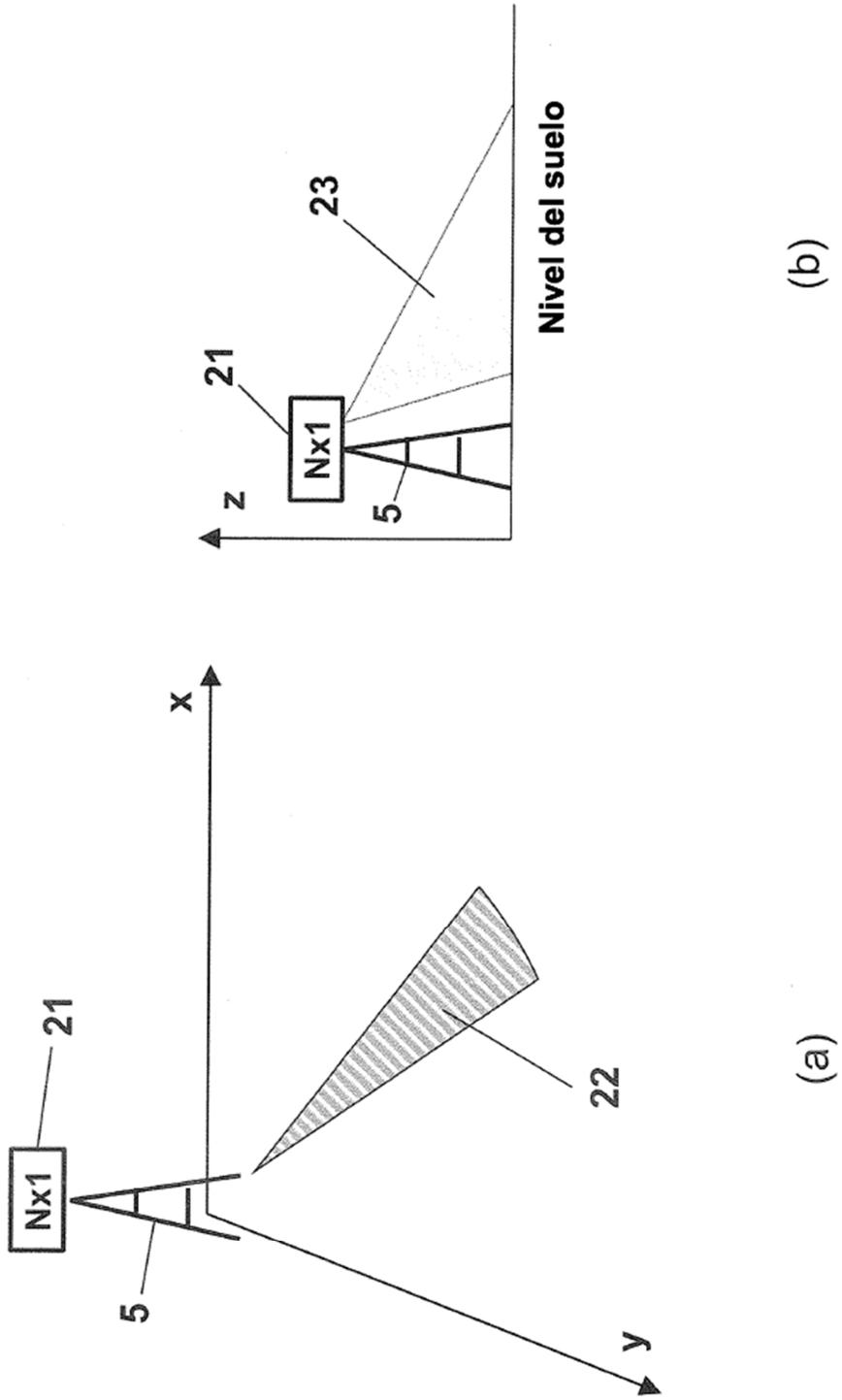


Figura 8

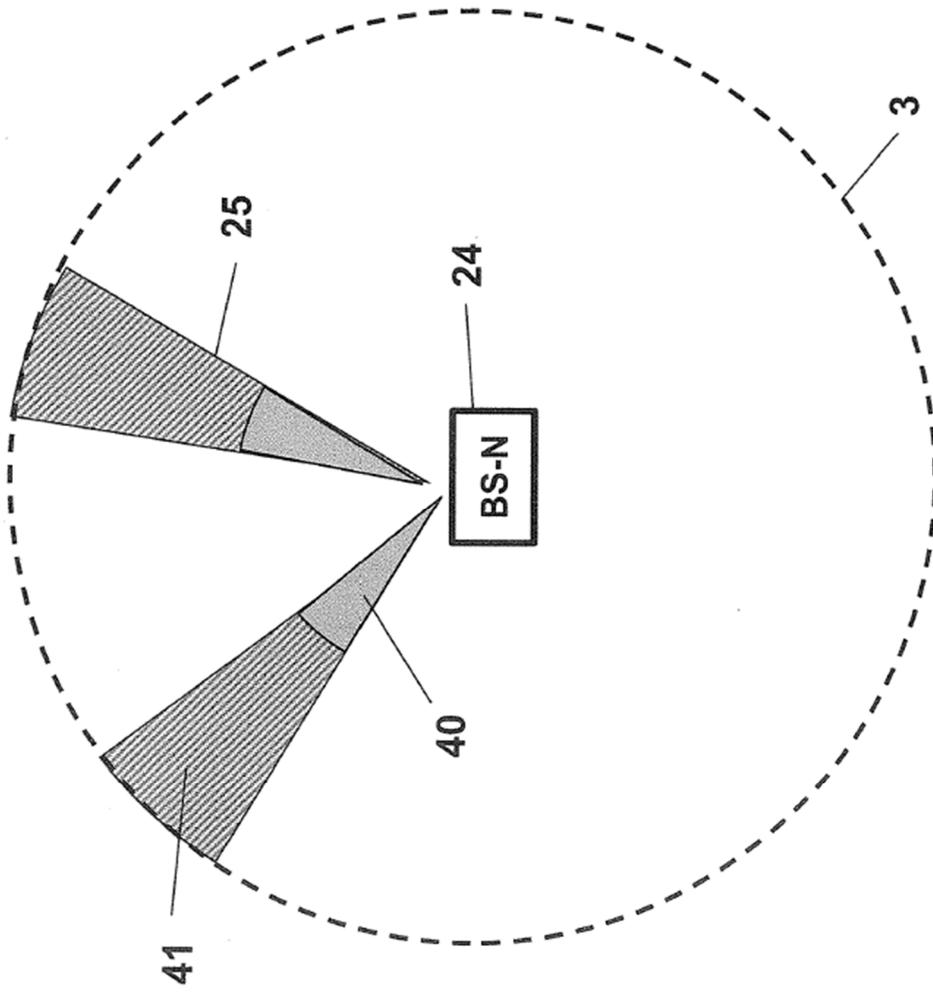


Figura 9

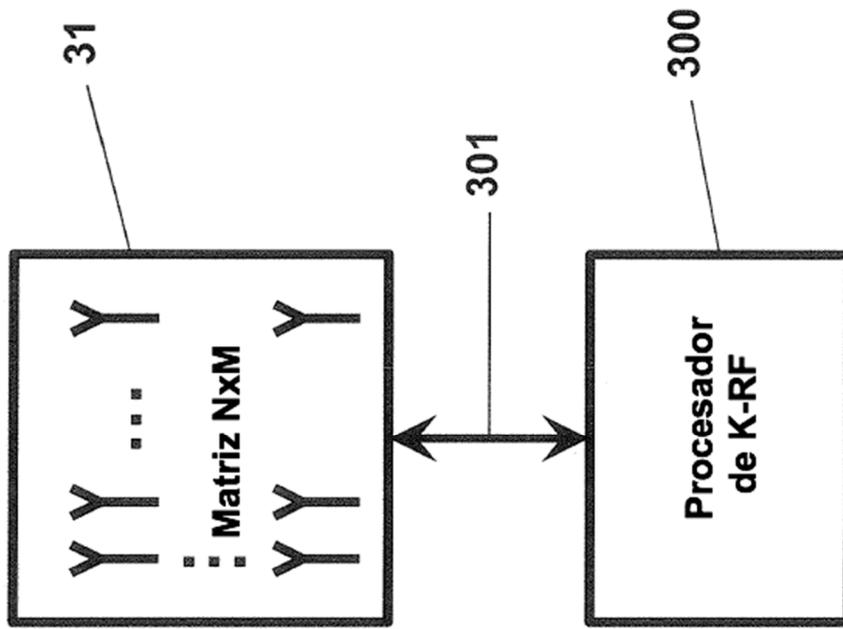


Figura 10

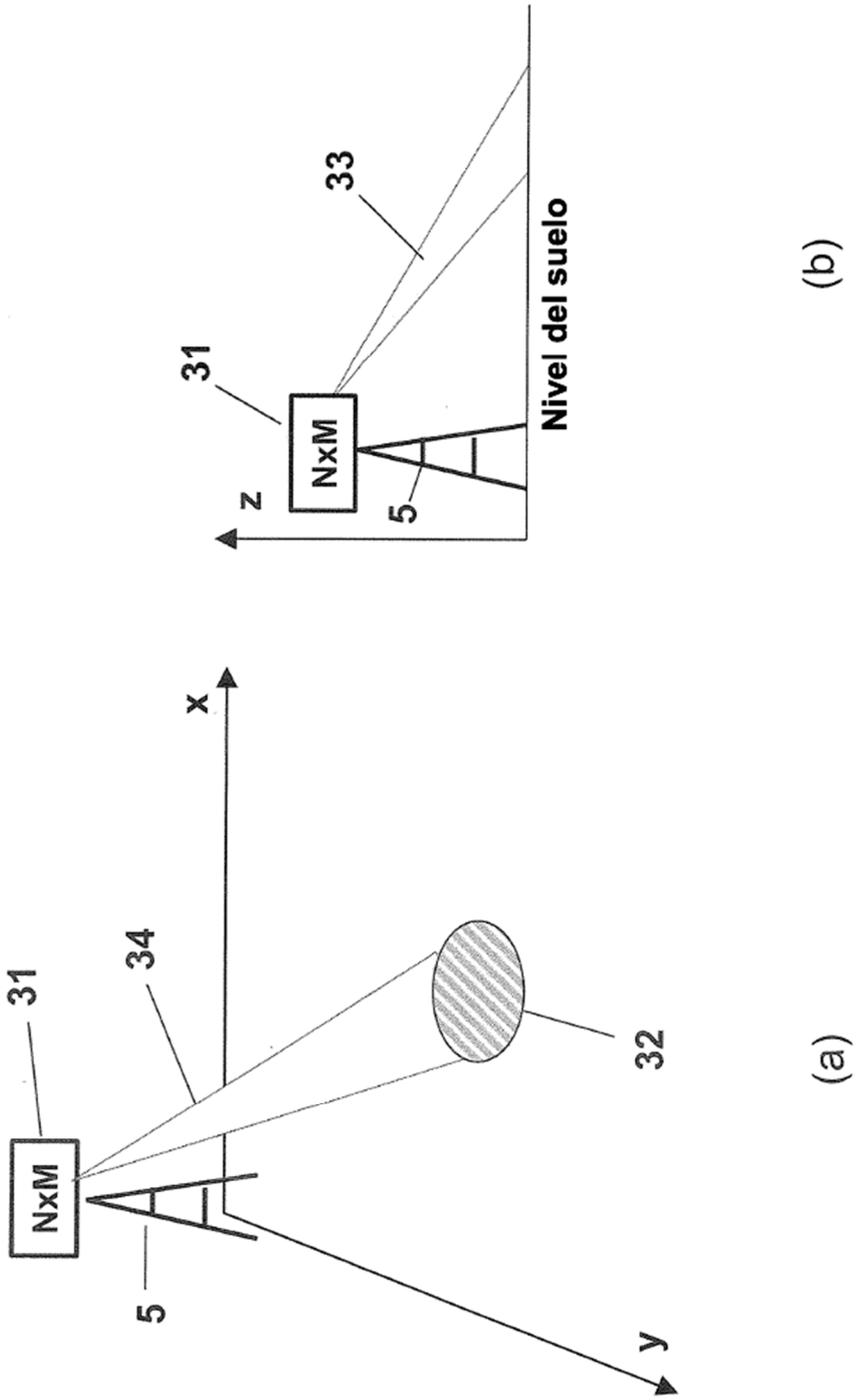


Figura 11

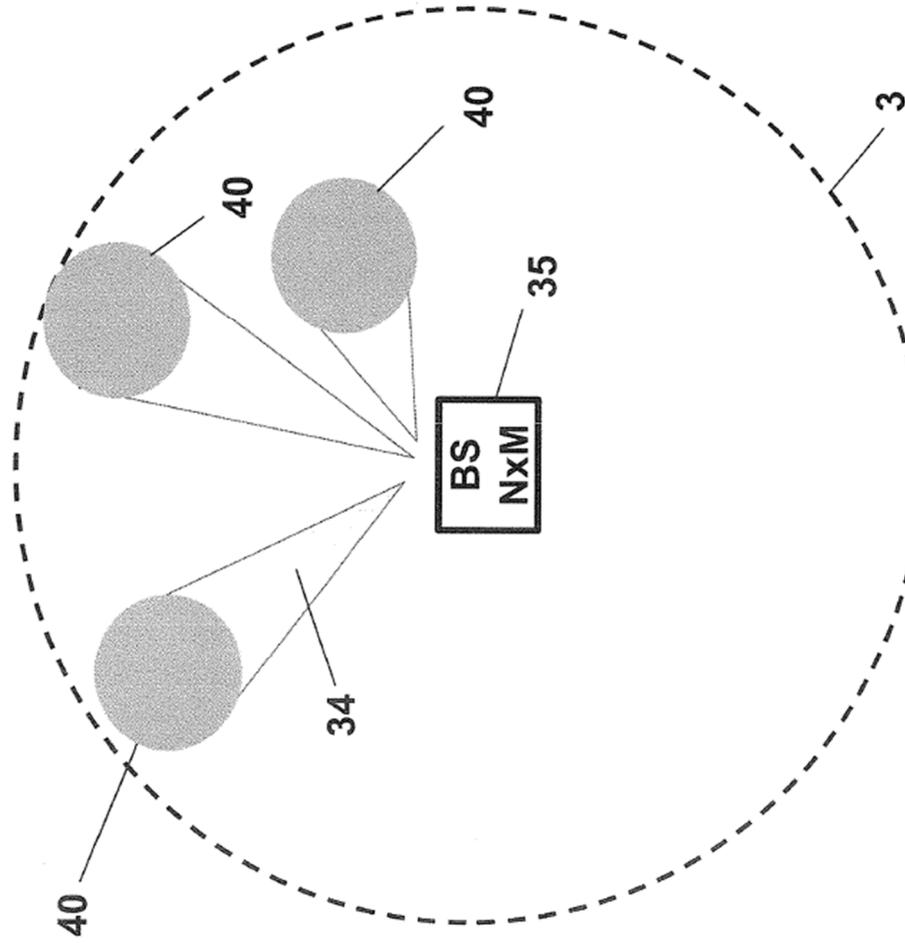


Figura 12

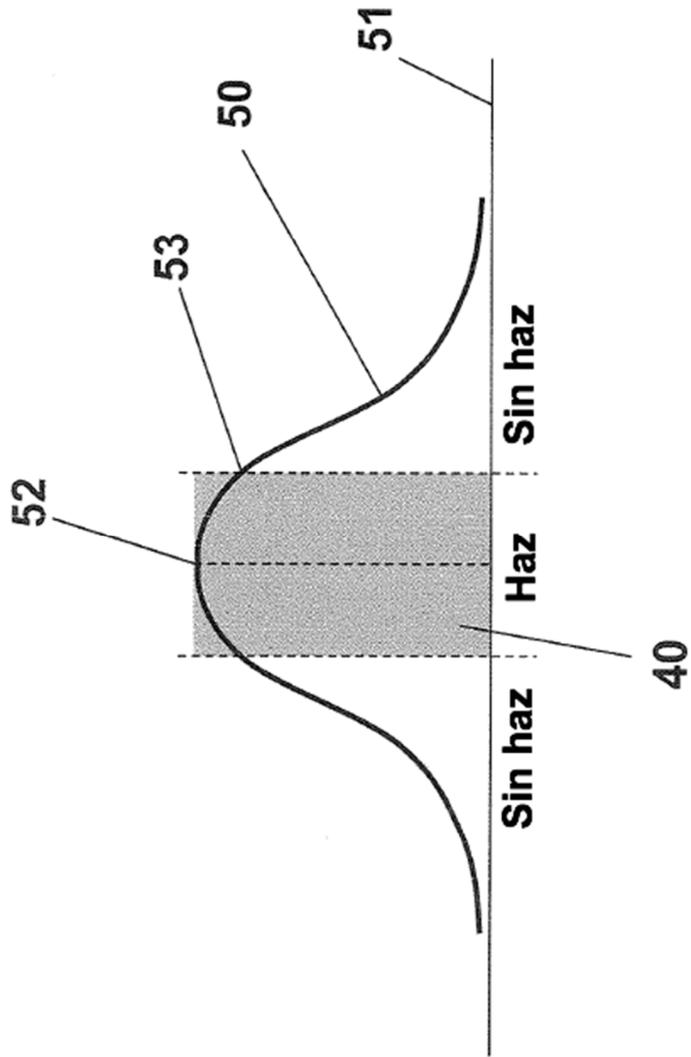


Figura 13

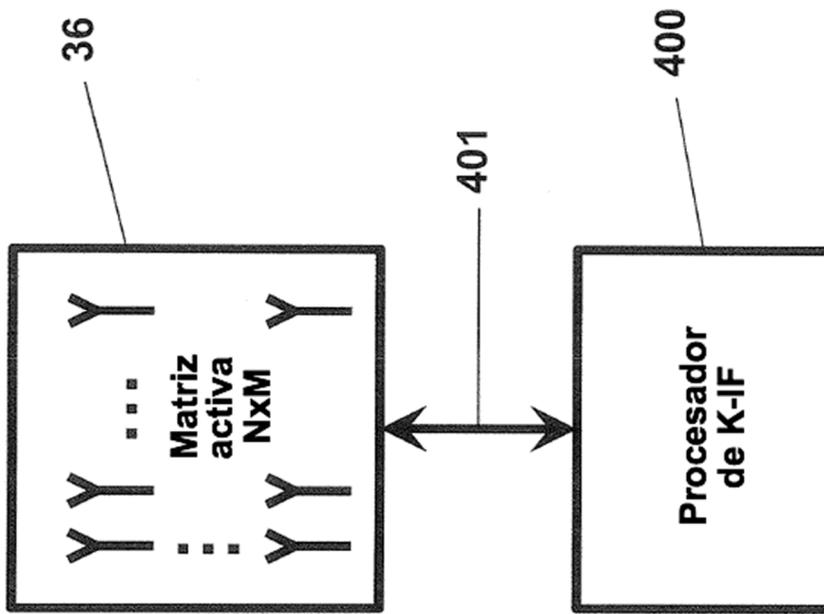


Figura 14

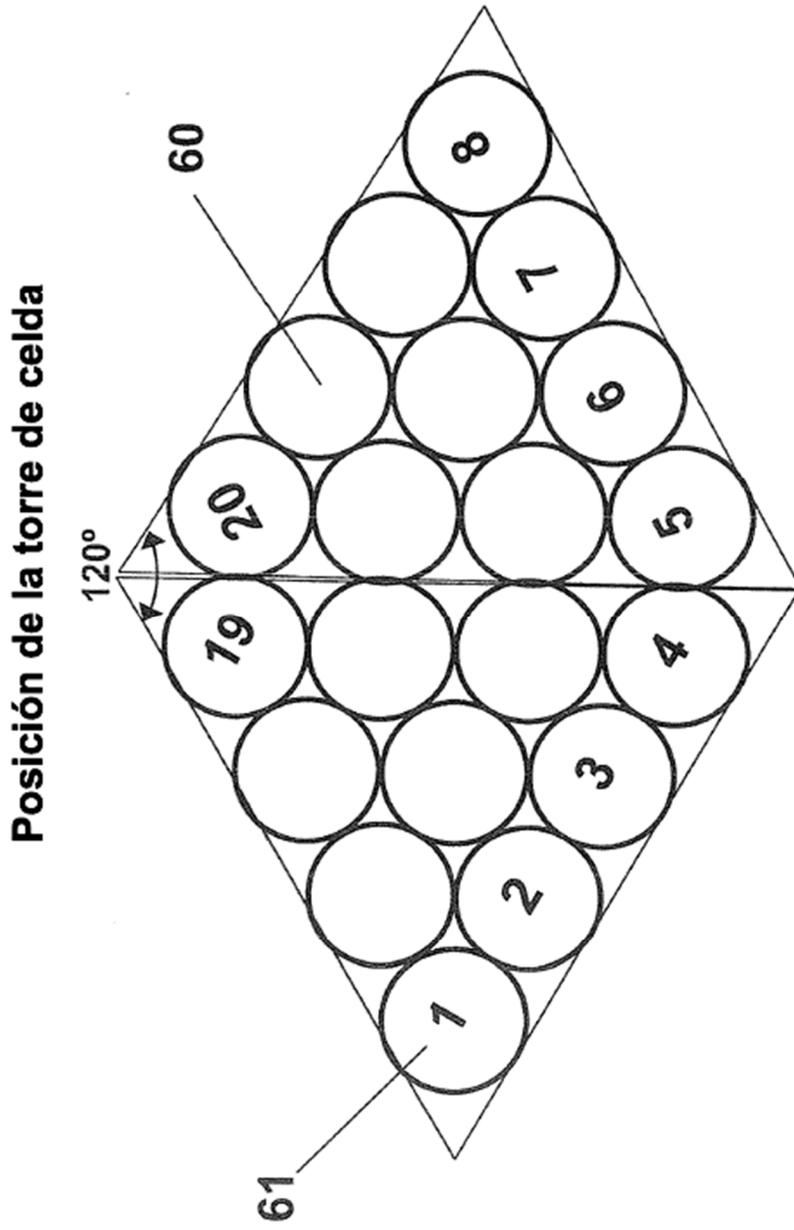


Figura 15

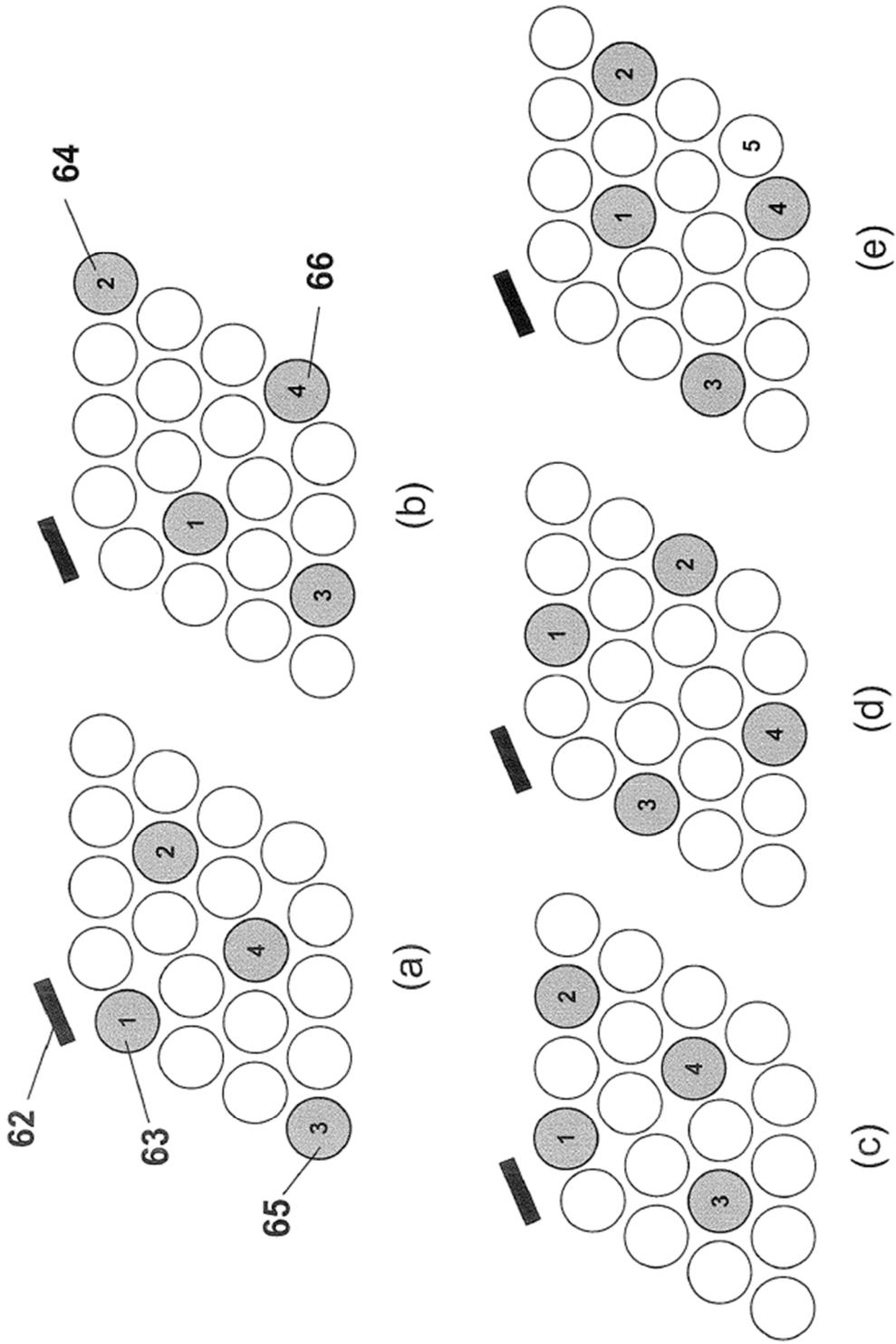


Figura 16

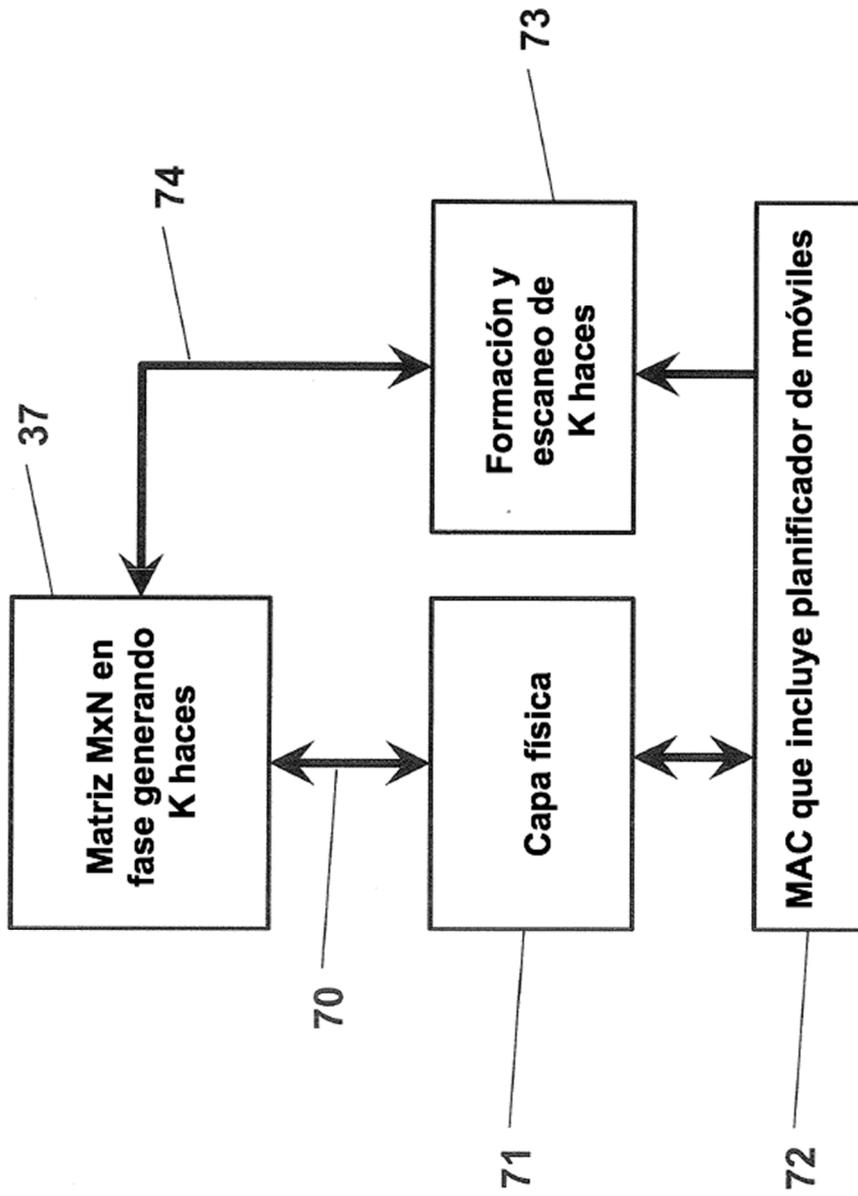
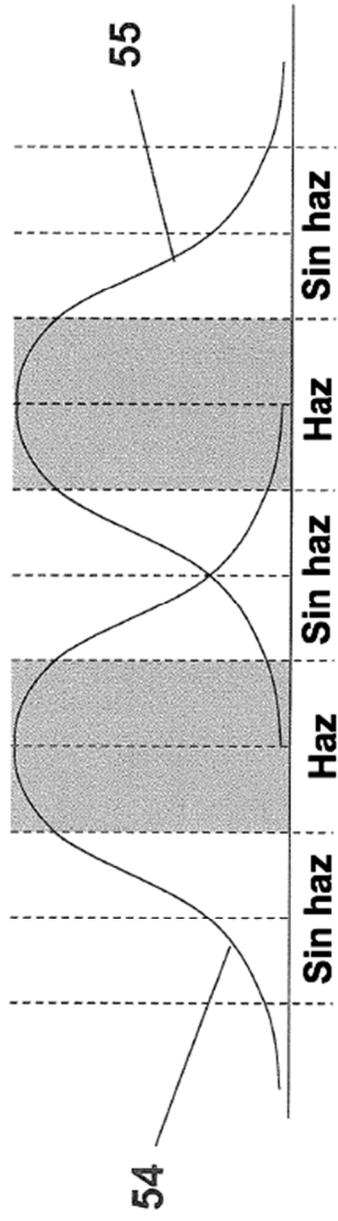
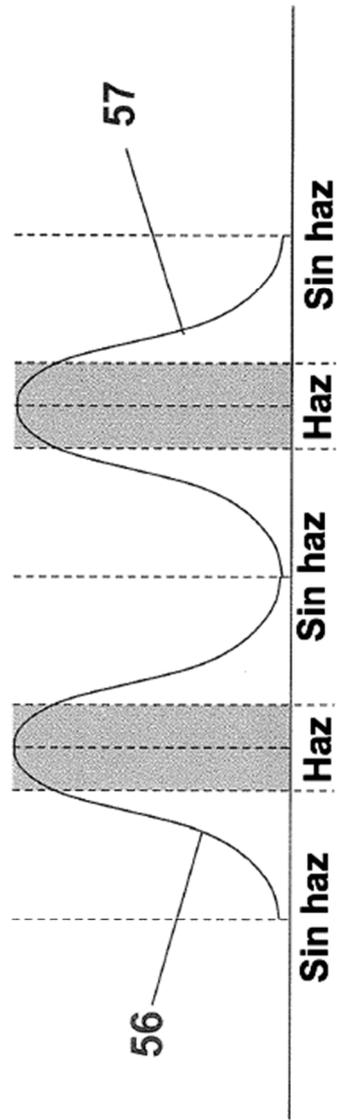


Figura 17



(a)



(b)

Figura 18

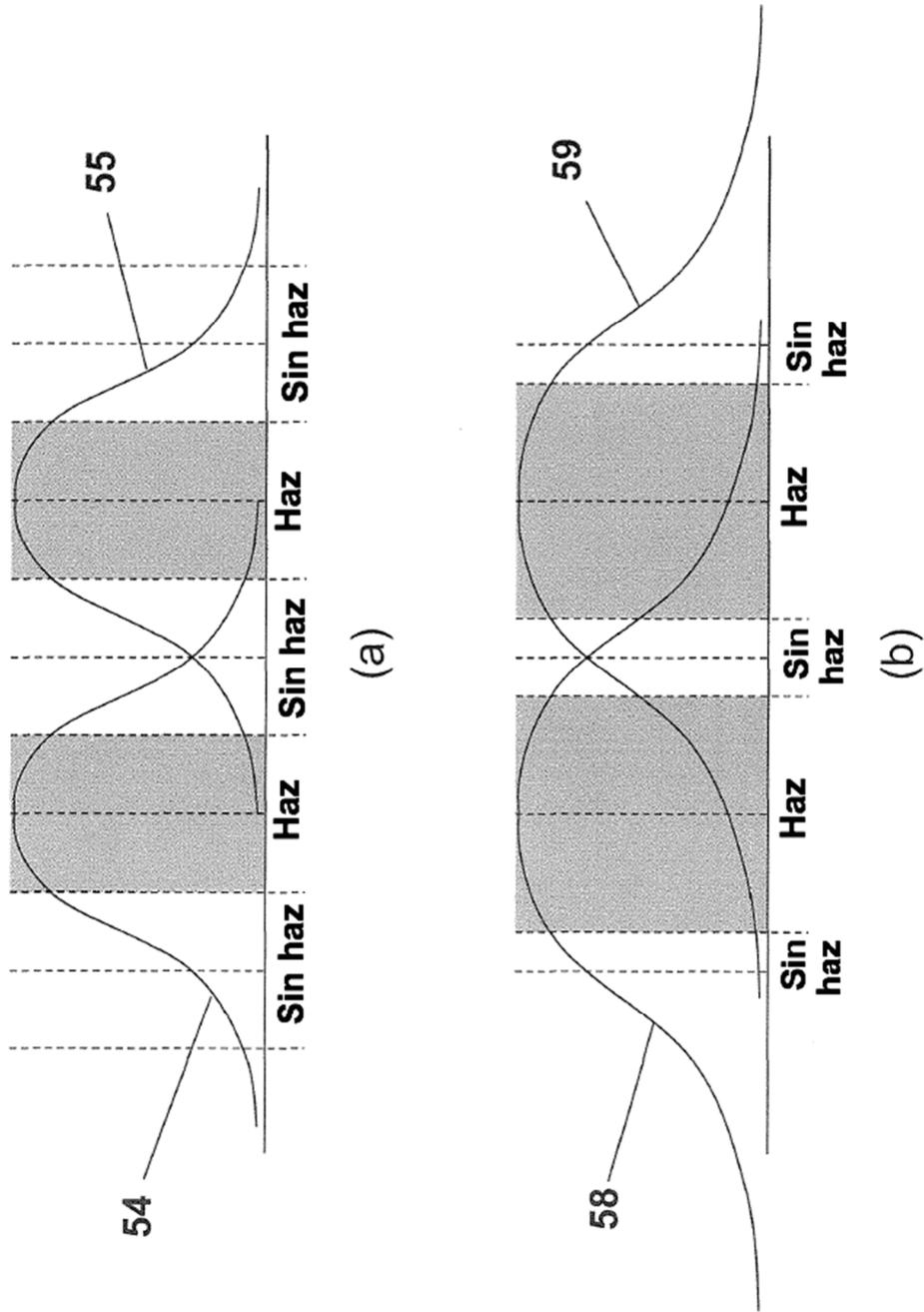


Figura 19

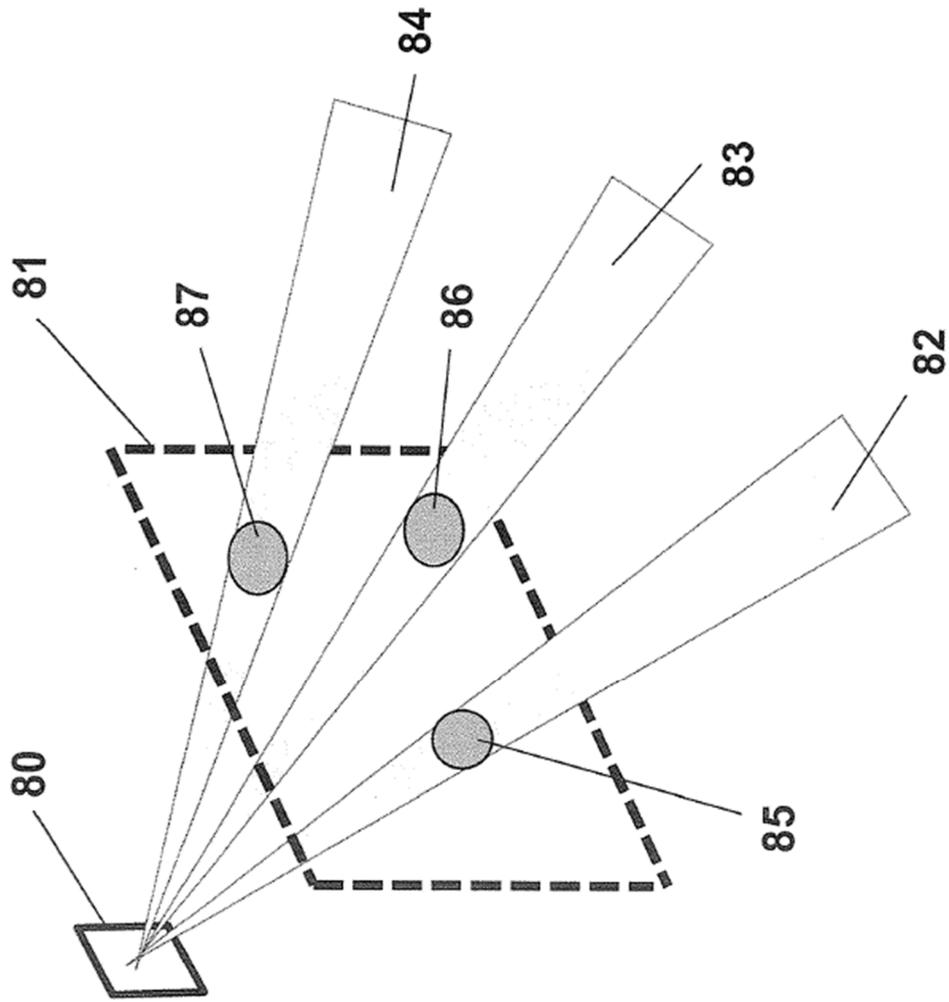


Figura 20

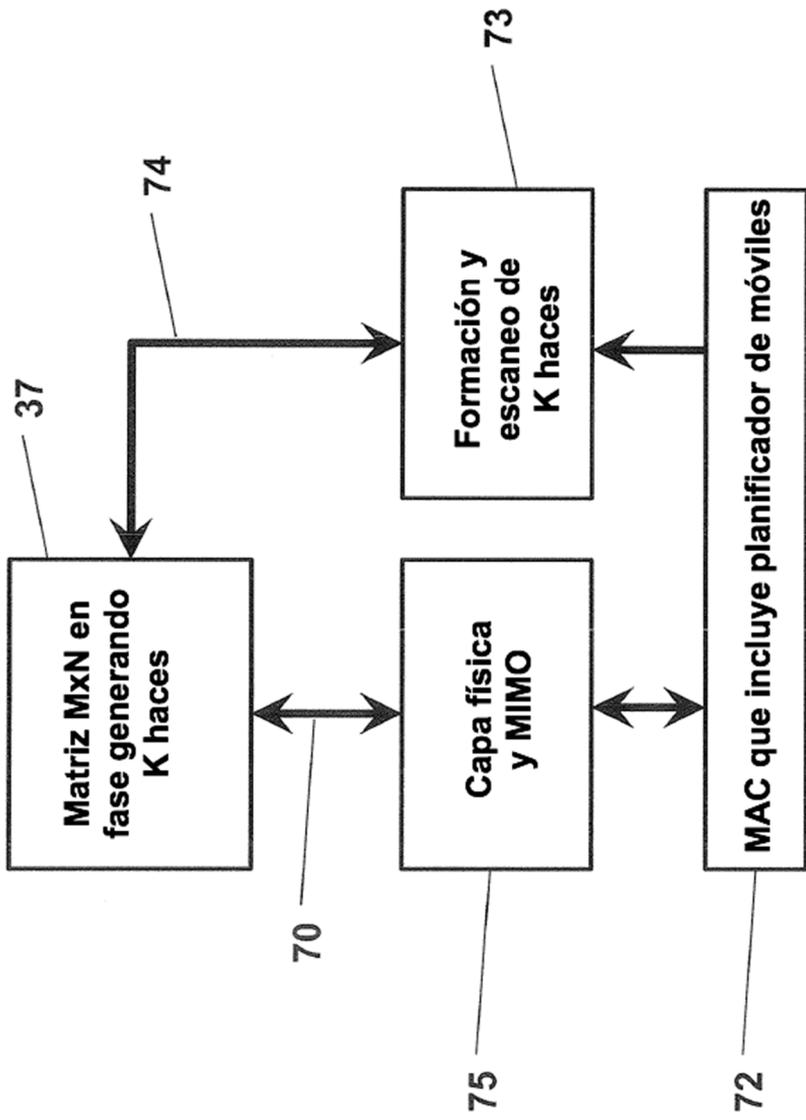


Figura 21