

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 639 770**

51 Int. Cl.:

H04B 7/04 (2007.01)

H04B 7/06 (2006.01)

H04L 5/00 (2006.01)

H04W 72/04 (2009.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.04.2011 PCT/SE2011/050416**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.10.2011 WO11126447**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.04.2011 E 11715085 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.06.2017 EP 2556597**

54 Título: **Una estructura de precodificador para precodificación MIMO**

30 Prioridad:

07.04.2010 US 321679 P

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

30.10.2017

73 Titular/es:

**TELEFONAKTIEBOLAGET LM ERICSSON (PUBL)
(100.0%)
164 83 Stockholm, SE**

72 Inventor/es:

**HAMMARWALL, DAVID y
JÖNGREN, GEORGE**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 639 770 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

Una estructura de precodificador para precodificación MIMO

Solicitudes relacionadas

5 Esta solicitud reivindica prioridad de la solicitud de patente provisional de EE.UU. presentada el 7 de abril de 2010 e identificada por la Solicitud N° 61/321.679.

Campo de la invención

10 Las enseñanzas en la presente memoria se refieren de manera general a libros de códigos y precodificación y, particularmente, se refieren a una estructura de precodificador factorizado que proporciona reutilización de precodificadores a través de diferentes configuraciones de antenas de transmisión, y proporciona señalización eficiente de precodificador.

Antecedentes

15 Las técnicas de múltiples antenas pueden aumentar significativamente las tasas de datos y la fiabilidad de un sistema de comunicación inalámbrica. El rendimiento se mejora en particular tanto si el transmisor como el receptor están equipados con múltiples antenas, lo que da como resultado un canal de comunicación de múltiples entradas múltiples salidas (MIMO). Tales sistemas y las técnicas relacionadas se conocen comúnmente simplemente como MIMO.

20 El estándar LTE del 3GPP está evolucionando actualmente con soporte MIMO mejorado. Un componente central de este soporte en LTE es el soporte de despliegues de antenas MIMO y las técnicas relacionadas con MIMO. Una suposición de trabajo actual en LTE-Avanzada es el soporte de un modo de multiplexación espacial de 8 capas para 8 antenas de transmisión (Tx), con la posibilidad de precodificación dependiente de canal. El modo de multiplexación espacial proporciona tasas de datos altas bajo condiciones de canal favorables.

25 Con multiplexación espacial, un vector de símbolo s que transporta información se multiplica por una matriz de precodificador $N_T \times r$ $W_{NT \times r}$, que sirve para distribuir la energía de transmisión en un subespacio del espacio de vector N_T dimensional (que corresponde a N_T puertos de antena). El precodificador se selecciona típicamente a partir de un libro de códigos de precodificadores posibles, y típicamente se indica por medio de un indicador de matriz de precodificador (PMI). El valor de PMI especifica un precodificador único en el libro de códigos para un número dado de flujos de símbolo.

30 No obstante, surgen ciertos retos en este contexto. Por ejemplo, diferentes configuraciones de antenas pueden requerir estructuras de precodificador de un tipo u otro, lo que complica el almacenamiento de libros de códigos de precodificadores predefinidos. Aún más, el uso dinámico de modos MIMO de Usuario Único (SU) y MIMO de Múltiples Usuarios (MU) complica el diseño del libro de códigos debido a que los precodificadores que son óptimos para SU-MIMO generalmente no serán óptimos para MU-MIMO. Como complicación adicional, la sobrecarga asociada con notificación de información de precodificador, por ejemplo, recomendaciones de precodificador, desde un receptor a un transmisor puede ser problemática. Esto es cierto, por ejemplo, en el enlace descendente de LTE donde el Canal Físico de Control de Enlace Ascendente (PUCCH) no puede portar un tamaño de carga útil tan grande como el Canal Físico Compartido de Enlace Ascendente (PUSCH).

35 Se conocen una serie de planteamientos para la implementación de libros de códigos, para abordar al menos algunos de los retos señalados. Por ejemplo, el documento R1-101742, como se presentó en abril de 2010 al WG1 60bis del TSG-RAN del 3GPP, propone usar el dominio de correlación para separar los equipos de usuario (UE) en modos MIMO de Múltiples Usuarios (MU-MIMO). En este contexto, el documento R1-101742 propone el uso de precodificadores de subbanda compuestos de dos matrices precodificadoras, cada una almacenada en un libro de códigos separado. Una matriz componente tal aborda propiedades de canal a largo plazo o de banda ancha, mientras que la otra aborda propiedades de canal a corto plazo o selectivo en frecuencia. Más particularmente, el documento R1-101742 propone el uso de precodificadores basados en DFT que tienen una estructura de diagonal de bloques que proporciona soporte eficiente para conformación de haces de diferentes configuraciones de antena, por ejemplo, grupos de antenas de polarización compartida o de polarización cruzada.

40 Para referencia adicional, ver el documento R1-102104 también presentado en abril de 2010 al WG1 60bis del TSG RAN del 3GPP. Ese documento aborda, entre otras cosas, el diseño de precodificadores para el caso de ocho antenas (8Tx) en el enlace descendente de la Rel-10. En particular, el documento destaca uno o más planteamientos para soportar eficientemente configuraciones de múltiples antenas a través del uso de precodificadores componentes que, similar al documento R1-101742, propone un precodificador compuesto de dos precodificadores componentes que abordan respectivamente propiedades de canal a largo plazo y a corto plazo. El documento R1-102104 también trata ciertos aspectos del diseño de su libro de códigos propuesto en el contexto de Agrupaciones Lineales Uniformes (ULA) y en configuraciones de antenas de polarización cruzada/dual.

55

Compendio

Las enseñanzas en la presente memoria presentan un método y aparato como se define por las reivindicaciones que implementan y usan una estructura de precodificador factorizado que es ventajosa en términos de rendimiento y eficiencia. En particular, las enseñanzas presentadas en la presente memoria describen una estructura de precodificador subyacente que permite cierta reutilización de libro de códigos a través de diferentes escenarios de transmisión, incluyendo transmisión de una Agrupación Lineal Uniforme (ULA) de antenas de transmisión y transmisión de subgrupos de polarización cruzada de tales antenas. Según la estructura de precodificador contemplada, un precodificador global está construido a partir de un precodificador de conversión y un precodificador de sintonización. El precodificador de conversión incluye precodificadores de subgrupo de antenas de tamaño $N_T/2$, donde N_T representa el número de puertos de antena globales considerados. Correspondientemente, el precodificador de sintonización controla el desplazamiento de las fases de haces entre los precodificadores de subgrupo de antenas, permitiendo que el precodificador de conversión sea usado con agrupaciones de polarización cruzada de $N_T/2$ elementos de antena, y con agrupaciones de polarización compartida de N_T elementos de antena.

Una realización descrita en la presente memoria se refiere a un transceptor de comunicación inalámbrica y a un método asociado, donde otro transceptor precodifica transmisiones al transceptor en base al menos en parte a la información de estado de canal de recepción desde el transceptor. Aquí, la información de estado de canal incluye información de precodificador para el otro transmisor. Como un caso ejemplo, el transceptor es un equipo de usuario (UE) y el otro transceptor es una estación base en una red de comunicación inalámbrica que soporta el UE, y el UE envía información de precodificador a la estación base que indica recomendaciones de precodificador por el UE. Como ejemplo particular, la estación base es un eNodoB configurado para operación MIMO en una red LTE, y el UE es un aparato LTE u otro ítem del equipo de comunicación configurado para operación MIMO en el contexto de LTE.

El transceptor está configurado para seleccionar las entradas de uno o más libros de códigos, donde las indicaciones de las entradas seleccionadas sirven como la información de precodificador antes mencionada enviada al otro transceptor. El transceptor selecciona las entradas como un precodificador de conversión seleccionado y un precodificador de sintonización seleccionado, o como un precodificador global seleccionado correspondiente a un precodificador de conversión seleccionado y a un precodificador de sintonización seleccionado. Se entenderá que las selecciones se pueden hacer y notificar dinámicamente, de una forma periódica o como se necesite, para reflejar las condiciones de canal cambiantes. El transceptor está configurado además para transmitir las indicaciones de las entradas seleccionadas en la información de estado de canal.

Varios aspectos de las operaciones anteriores se centran en el libro o libros de códigos almacenados y, en particular, la estructura subyacente de los precodificadores de conversión y de sintonización (o los precodificadores globales correspondientes) almacenada en ellos. Uno o más libros de códigos almacenados en el transceptor incluyen entradas que comprenden $N_T \cdot Q$ diferentes precodificadores de conversión y entradas que comprenden un número de precodificadores de sintonización correspondiente, o incluyen entradas que comprenden una pluralidad de precodificadores globales con cada precodificador global que comprende el producto de un precodificador de conversión y un precodificador de sintonización.

Cada precodificador de conversión comprende una matriz diagonal de bloques en la que un bloque comprende un precodificador de subgrupo de antenas. A su vez, cada precodificador de subgrupo de antenas es un bloque de matriz con $N_T/2$ filas y pertenece a un conjunto de $N_T \cdot Q$ diferentes haces basados en DFT, donde Q es un número entero mayor o igual que 2, y donde cada precodificador de sintonización tal incluye un elemento de desplazamiento de fase tomado de un alfabeto de Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK) $2Q$ y proporciona al menos $2Q$ desplazamientos de fase relativos para desplazar fases de haces entre los precodificadores de subgrupo de antenas en uno correspondiente de los precodificadores de conversión. De esta manera, cada precodificador global comprende un precodificador basado en DFT que proporciona N_T haces de transmisión a través de los N_T puertos de antena de transmisión.

Esta estructura ventajosa de precodificador permite, por ejemplo, precodificación de subgrupos de antenas de polarización cruzada, donde el conjunto de haces de cada subgrupo se controla por uno correspondiente de los precodificadores de subgrupo de antenas basado en DFT en el precodificador de conversión seleccionado por el transceptor que realiza la transmisión precodificada. Además, esa misma estructura de precodificador permite la conformación de haces a través de una agrupación global de antenas de igual tamaño, donde los desplazamientos de fases de haces entre subgrupos se proporcionan por el precodificador de sintonización seleccionado de manera correspondiente.

Aún más, esta disposición en una o más realizaciones se explota notificando selecciones de precodificador de conversión en una resolución de tiempo o de frecuencia menor que la usada para notificar selecciones de precodificador de sintonización. Como ejemplo, el transceptor envía indicaciones del precodificador de sintonización seleccionado más frecuentemente que envía indicaciones del precodificador de conversión seleccionado. El otro transceptor está configurado para determinar el precodificador global seleccionado entre medias de recibir selecciones de precodificador de conversión, en base a mantener el mismo precodificador de conversión pero actualizando el cálculo de precodificador global con cada selección de precodificador de sintonización recién recibida. El transceptor también puede enviar una selección de precodificador de conversión a ser usada en común

con dos o más selecciones de precodificador de sintonización, cada una que representa una subbanda diferente de una banda de frecuencia asociada con el precodificador de conversión común.

En otra realización, un método y un transceptor asociado se dirigen a la precodificación de transmisiones de múltiples antenas a otro transceptor de comunicación inalámbrica. Esta realización se puede entender con relación al lado transmisor de las enseñanzas descritas, mientras que los ejemplos precedentes se refieren al lado receptor. De esta manera, en este ejemplo, el transceptor, que puede ser una estación base que precodifica a un UE de destino, recibe información de estado de canal desde el otro transceptor, donde esa información incluye información de precodificador, tal como indicaciones de selecciones de precodificador que representan recomendaciones de precodificador.

El transceptor está configurado para usar la información de precodificador recibida para identificar las recomendaciones de precodificador desde el otro transceptor. En el caso donde la información de precodificador recibida incluya indicadores de selección tales como PMI u otros valores de índices de libros de códigos, el transceptor usa los indicadores de selección para seleccionar entradas desde uno o más libros de código. El transceptor está configurado además para precodificar una transmisión al otro transceptor, en base al menos en parte a las recomendaciones de precodificador. A este respecto, se entenderá que transceptor puede simplemente seguir las recomendaciones de precodificador enviadas por el otro transceptor. No obstante, el transceptor no usa necesariamente las selecciones de precodificador indicadas por el otro transceptor y en su lugar puede hacer diferentes selecciones, en base a circunstancias globales, tales como la programación de múltiples transmisiones tales, el modo de MIMO en uso, etc.

De particular interés, el transceptor usa el mismo uno o más libros de códigos usados por el otro transmisor cuando se hacen las recomendaciones de precodificador. Por ejemplo, ambos transceptores almacenan copias de los mismos libros de códigos, o uno de ellos almacena uno o más libros de códigos que son equivalentes a los almacenados en el otro transceptor.

Por tanto, el libro o los libros de códigos del transceptor, que se pueden mantener en una memoria del transceptor, almacenan entradas que comprenden $N_T Q$ diferentes precodificadores de conversión y entradas que comprenden un número de precodificadores de sintonización correspondiente, o entradas que comprenden una pluralidad de precodificadores globales, donde cada precodificador global comprende el producto de un precodificador de conversión y un precodificador de sintonización. Además, como se ha descrito anteriormente, cada precodificador de conversión de entre las $N_T Q$ diferentes entradas para los precodificadores de conversión comprende una matriz diagonal de bloques, en la que cada bloque comprende un precodificador de subgrupo de antenas basado en DFT que corresponde a un subgrupo de N_T puertos de antena de transmisión. Cada precodificador de subgrupo de antenas tal proporciona $N_T Q$ diferentes haces basados en DFT para el subgrupo correspondiente, donde Q es un valor entero y donde los $N_T Q$ diferentes precodificadores de conversión, junto con uno o más de los precodificadores de sintonización, corresponden a un conjunto de $N_T Q$ diferentes precodificadores globales. Cada precodificador global en ese conjunto representa un haz basado en DFT de tamaño N_T sobre los N_T puertos de antenas de transmisión.

El transceptor en una o más realizaciones es una estación base configurada para operación en una red de comunicación inalámbrica, por ejemplo, un eNodeB configurado para operación en una red LTE. En este caso, la estación base opera como un transmisor MIMO de múltiples antenas que considera las recomendaciones de precodificador del otro transceptor, que puede ser un UE u otro dispositivo de comunicación inalámbrica que esté soportado por la estación base.

Por supuesto, el breve resumen anterior de características y ventajas no es limitante. Otras características y ventajas serán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada de realizaciones ejemplo y de los dibujos anexos.

Breve descripción de los dibujos

La Fig. 1 es un diagrama de bloques de realizaciones ejemplo de un primer transceptor que está configurado para transmitir transmisiones precodificadas a un segundo transceptor que está configurado para proporcionar recomendaciones de precodificador al primer transceptor.

La Fig. 2 es un diagrama de una realización de un precodificador de conversión que tiene una estructura de diagonal de bloques y que incluye dos precodificadores de subgrupo de antenas.

La Fig.3 es un diagrama de bloques de una red de comunicación inalámbrica ejemplo, donde el primer transceptor de la Fig.1 está representado como una estación base de red y el segundo transceptor de la Fig. 1 está representado como un ítem del equipo de usuario.

La Fig. 4 es un diagrama de precodificadores de conversión y sintonización ejemplo, que se usa para formar un precodificador global.

Las Fig. 5 y 6 son diagramas de libros de códigos ejemplo, donde la Fig. 5 representa un libro de códigos que contiene precodificadores de conversión y otro que contiene precodificadores de sintonización, y donde la Fig. 6 representa un libro de códigos que contiene precodificadores globales, cada uno que corresponde a un precodificador de conversión particular y a un precodificador de sintonización particular.

5 La Fig. 7 es un diagrama de flujo lógico de una realización de un método de provisión de recomendaciones de precodificador desde un segundo transceptor a un primer transceptor, tal como se muestra en la Fig. 1.

La Fig. 8 es un diagrama de bloques parcial de una realización de circuitería de procesamiento en el segundo transceptor, para determinar recomendaciones de precodificador.

10 La Fig. 9 es un diagrama de flujo lógico de una realización de un método de precodificación de transmisiones desde un primer transceptor a un segundo transceptor, tal como se muestran en la Fig. 1.

La Fig. 10 es un diagrama de bloques parcial de una realización de circuitería de procesamiento dentro del primer transceptor para controlar la precodificación de transmisiones al segundo transceptor.

La Fig. 11 es un diagrama de bloques de una realización de circuitos de precodificación adicionales para el primer transceptor.

15 Descripción detallada

La Fig.1 representa un primer transceptor de comunicación inalámbrica 10 y un segundo transceptor de comunicación inalámbrica 12, conocidos por comodidad como los transceptores 10 y 12. El transceptor 10 incluye un número de antenas 14 y circuitos transceptores 16 asociados, que incluyen uno o más transmisores 18 y receptores 20 de radiofrecuencia. Aún más, el transceptor 10 incluye circuitos de control y procesamiento 22, que incluyen un procesador de realimentación 24, un controlador de precodificación 26 y uno o más dispositivos de memoria/almacenamiento 28 que almacenan uno o más libros de códigos 30. Los dispositivos de memoria/almacenamiento 28 se conocen simplemente como "memoria 28" por comodidad.

25 El uno o más libros de códigos 30 almacenados en el transceptor 10 incluyen entradas que comprenden $N_T Q$ diferentes precodificadores de conversión 32 y entradas que comprenden un número de precodificadores de sintonización 34 correspondiente, o incluyen entradas que comprenden una pluralidad de precodificadores globales 36, con cada precodificador global 36 que comprende el producto de un precodificador de conversión 32 y un precodificador de sintonización 34. Aquí, se entenderá que el número de referencia "32" se usa para referirse a precodificadores de conversión en los sentidos plural y singular, pero cada precodificador de conversión 32 generalmente es único a partir de los otros, en términos de los valores numéricos que representan sus elementos de matriz. El mismo entendimiento se aplica a los números de referencia "34" y "36" que se usan para los precodificadores de sintonización y los precodificadores globales, respectivamente.

30 Cada precodificador de conversión 32 comprende una matriz diagonal de bloques en la que cada bloque comprende un precodificador de subgrupo de antenas 38 basado en DFT (mostrado en la Fig. 2). Cada precodificador de subgrupo de antenas 38 es un bloque de matriz con $N_T/2$ filas y pertenece a un conjunto de $N_T Q$ diferentes haces basados en DFT, donde Q es un número entero mayor o igual que 2, y donde cada precodificador de sintonización 34 incluye un elemento de desplazamiento de fase tomado a partir de un alfabeto de Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK) 2Q y proporciona al menos 2Q desplazamientos de fase relativos para desplazar las fases de haces entre los precodificadores de subgrupo de antenas 38 en uno correspondiente de los precodificadores de conversión 32.

40 Continuando con la Fig. 1, el segundo transceptor 12 incluye un número de antenas 40 y circuitos transceptores 42 asociados (incluyendo uno o más receptores 44 y transmisores 46 de radiofrecuencia). El transceptor 12 incluye además circuitos de control y procesamiento 48. Al menos funcionalmente, los circuitos de control y procesamiento 48 incluyen circuitería de procesamiento de señal recibida 50, por ejemplo, circuitos de demodulación/decodificación, uno o más circuitos de estimación 52 para estimar condiciones de canal y/o calidad de señal, un generador de realimentación de precodificación 54, y uno o más dispositivos de memoria/almacenamiento 56 (por ejemplo, memoria no volátil tal como EEPROM o FLASH, simplemente conocida como "memoria 56" por comodidad).

45 La memoria 28 en el transceptor 10 y la memoria 56 en el transceptor 12 cada una almacena una copia del mismo uno o más libros de códigos 30 o, de manera equivalente, almacenan libro o libros de códigos o información equivalente que permiten que el transceptor 10 y el transceptor 12 tengan el mismo entendimiento en términos de los precodificadores seleccionados por el transceptor 12 como "recomendaciones de precodificador". Es decir, en operación el transceptor 10 precodifica las transmisiones 60 al transceptor 12 en base a la determinación de una operación de precodificador a aplicar – es decir, en base a la determinación de la configuración MIMO particular y las ponderaciones de precodificador correspondientes a ser usadas para la transmisión de múltiples antenas desde el transceptor 10 al transceptor 12.

55 El transceptor 10 determina la operación de precodificador en base al menos en parte a la recepción de la información de estado de canal (CSI) 62 del transceptor 12, que incluye información de precodificador 64. La

información de precodificador 64 se puede entender como que proporciona recomendaciones para la selección de precodificador, y la información de precodificador 64 se puede proporcionar de esta manera como valores de Indicador de Matriz de Precodificador (PMI) para indexar en uno o más libros de códigos 30, o como algún otro tipo de indicadores de selección. En una o más realizaciones, el transceptor 10 envía la señalización de control 66 al transceptor 12, para controlar su información de precodificador 64. Por ejemplo, la señalización de control 66 puede restringir las selecciones de precodificador a un subconjunto particular de precodificadores – por ejemplo, los destinados para modo SU-MIMO, o los destinados para modo MU-MIMO.

En al menos una realización, los circuitos de control y procesamiento 22 del transceptor 10 comprenden, al menos en parte, circuitería basada en ordenador, por ejemplo, uno o más microprocesadores y/o procesadores de señales digitales u otra circuitería de procesamiento digital. En al menos una realización, tal circuitería se configura especialmente para implementar los métodos enseñados en la presente memoria para el transceptor 10, en base a la ejecución de las instrucciones de programa de ordenador almacenadas. Estas instrucciones están, en una o más realizaciones, almacenadas en la memoria 28. Del mismo modo, en al menos una realización, los circuitos de control y procesamiento 48 del transceptor 12 se implementan al menos en parte a través de circuitería de procesamiento digital programable. Por ejemplo, los circuitos de control y procesamiento 48 en una o más realizaciones incluyen uno o más microprocesadores o procesadores de señales digitales configurados para implementar al menos una parte del método enseñado en la presente memoria para el transceptor 12, en base a la ejecución de instrucciones de programa de ordenador almacenadas en la memoria 56.

Tales implementaciones se pueden entender en el caso ejemplo de la Fig. 3 donde el transceptor 10 está configurado como una estación base de red de comunicación inalámbrica 70 que opera en una red de comunicación inalámbrica 72. El transceptor 12 está configurado como un UE 74 y está soportado por la red 72. El diagrama de red simplificado representa además una Red de Acceso por Radio (RAN) 76, que incluye una o más estaciones base 70, y una Red Central (CN) 78 asociada. Esta disposición acopla comunicativamente el UE 74 a otros dispositivos en la misma red y/o en una o más redes. Para tal fin, la CN 78 se acopla comunicativamente a una o más redes externas 80, tales como Internet y/o la PSTN.

La estación base 70 almacena uno o más libros de códigos 30, como lo hace el UE 74. Por consiguiente, uno ve las transmisiones precodificadas 60 enviadas desde la estación base 70 al UE 74, junto con la señalización de control 66 opcional que controla las recomendaciones de precodificador hechas por el UE 74. Tal señalización se puede enviar usando señalización de Control de Recursos de Radio (RRC), por ejemplo.

Uno también ve la transmisión de la información de precodificador 64 (es decir, realimentación de selección de precodificador) desde el UE 74 a la estación base 70. Como se ha señalado, estas recomendaciones comprenden indicadores de selección, tales como PMI, que indican los precodificadores de conversión y de sintonización 32 y 34 particulares que se recomiendan actualmente por el UE 74 para su uso por la estación base 70 en transmisiones de precodificación al UE 74. En otra realización, las recomendaciones comprenden indicaciones del precodificador global 36 seleccionado, que corresponde a la selección de un precodificador de conversión 32 particular y un precodificador de sintonización 34 particular. No obstante, incluso en esta realización, una indicación del precodificador global 36 recomendado se puede entender como que es equivalente a la indicación de precodificadores de conversión y sintonización 32 y 34 recomendados.

La Fig. 4 proporciona una mejor ilustración de esta flexibilidad de “precodificador factorizado”, donde se forma un precodificador global 36 (denotado como “ W ”) como la multiplicación de matrices de un precodificador de conversión 32 seleccionado (denotado como “ $W^{(c)}$ ”) y un precodificador de sintonización 34 seleccionado (denotado como “ $W^{(t)}$ ”). El libro o los libros de códigos 30 pueden comprender un libro de códigos que incluye un número de precodificadores de conversión 32 en las primeras posiciones de índice y un número de precodificadores de sintonización 32 en las segundas posiciones de índice, permitiendo de esta manera diferentes rangos de valores de índice para denotar selecciones de precodificador de conversión y selecciones de precodificador de sintonización. Alternativamente, el libro o los libros de códigos 30 se pueden implementar como dos libros de códigos, tal como se muestra en la Fig. 5. Aquí, un libro de códigos 82 contiene precodificadores de conversión 32, y un libro de códigos 84 contiene precodificadores de sintonización 34. Como alternativa adicional, la Fig. 6 ilustra que uno o más libros de códigos 30 pueden comprender un libro de códigos 86 que contiene un conjunto de precodificadores globales 36, con cada precodificador global 36 formado como el producto (multiplicación de matrices) de un precodificador de conversión 32 particular y un precodificador de sintonización 34 particular.

En el caso donde se usan libros de códigos de precodificador de conversión y sintonización 82 y 84 separados, la información de precodificador 64 puede comprender un primer valor de índice que indexa (apunta) a un precodificador de conversión 32 particular en el libro de códigos 82, y un segundo valor de índice que indexa (apunta) a un precodificador de sintonización 34 particular en el libro de códigos 84. En el caso donde se usa un libro de códigos 86 de precodificadores globales 36, los valores de índice pueden ser valores de índice de fila-columna bidimensionales que apuntan a un precodificador global 36 particular en una estructura de tabla.

Ventajosamente, en cualquiera de estos casos, la información de precodificador 64 puede incluir indicaciones separadas para las selecciones de precodificador de conversión y de sintonización. Esto proporciona ganancias ventajosas en eficiencia de señalización. Por ejemplo, el transceptor 12 envía recomendaciones de precodificador de

conversión en un primer intervalo, y recomendaciones de precodificador de sintonización en un segundo intervalo más corto. En este caso, desde la perspectiva del transceptor 10, el precodificador global 36 como se recomienda por el transceptor 12, es el producto del precodificador de conversión 32 más recientemente recomendado y el precodificador de sintonización 34 más recientemente recomendado. En otra realización ejemplo, el transceptor 12

5 recomienda un precodificador de conversión 32 para una banda de frecuencia global, y recomienda dos o más precodificadores de sintonización 34 para cada una de dos o más sub-bandas. El transceptor 10 reconoce en este caso la información de precodificador 64 como dos o más precodificadores globales 36, cada uno formado a partir del precodificador de conversión 32 común y uno respectivo de los dos o más precodificadores de sintonización 34 recomendados.

10 En el caso donde se use un único libro de códigos 86 de precodificadores globales 36, ese libro de códigos se puede disponer de manera que cada fila (o columna) corresponda a un precodificador de conversión 32 particular, mientras que cada columna (o fila) corresponda a un precodificador de sintonización 34 particular. Un índice completo comprende de esta manera un puntero de fila y un puntero de columna, y el transceptor 12 puede enviar éstos juntos o por separado. Por ejemplo, las actualizaciones de puntero de fila se pueden enviar en un intervalo de

15 tiempo o para una banda de frecuencia global, para la selección de precodificador de conversión, mientras que las actualizaciones de puntero de columna se pueden enviar en otro intervalo de tiempo más rápido, o para subbandas particulares de la banda de frecuencias global, para la selección o selecciones de precodificador de sintonización. A este respecto, se debería entender que un precodificador de conversión 32 se puede usar como una base común para dos o más precodificadores globales 36, en base a multiplicarlo con cada uno de dos o más precodificadores de sintonización 34.

20 Con estos ejemplos en mente, la Fig. 7 ilustra un método 700 implementado en el transceptor 12. El transceptor 12 se configura para llevar a cabo el método 700 en base a la ejecución de instrucciones de programa de ordenador almacenadas en su memoria 56 y/o en base a tener circuitería configurada específicamente. En todo caso, el método 700 incluye el transceptor 12 que selecciona entradas de uno o más libros de códigos 30 como un

25 precodificador de conversión 32 seleccionado y un precodificador de sintonización 34 seleccionado, o como un precodificador global 36 seleccionado que corresponde a un precodificador de conversión 32 seleccionado y a un precodificador de sintonización 34 seleccionado (Bloque 702). Se entenderá que el generador de realimentación de precodificación 54 está adaptado para realizar estas selecciones, en base al cálculo de las recomendaciones según el formato de precodificador de conversión y de sintonización factorizado.

30 Además, se entenderá que el transceptor 12 almacena el libro o los libros de códigos 30 en su memoria 56 - por ejemplo, almacena un libro de códigos 82 de precodificadores de conversión 32 y otro libro de códigos 84 de precodificadores de sintonización 34, o almacena un libro de códigos 86 de precodificadores globales 36, por ejemplo, cada uno que representa la combinación de un precodificador de conversión 32 particular y un precodificador de sintonización 34 particular. Con eso en mente, el método 700 continúa con la transmisión de

35 información de precodificador 64 al transceptor 10 (Bloque 704).

Como se ha señalado, se pueden usar indicaciones separadas para el precodificador de conversión 32 seleccionado y el precodificador de sintonización 34 seleccionado, para permitir una señalización más frecuente o de mayor resolución de las recomendaciones de precodificador de sintonización y una señalización de resolución más lenta o más baja (frecuencia) de las recomendaciones de precodificador de conversión. En al menos una realización, las

40 recomendaciones de precodificador de sintonización se envían sobre una capa inferior del protocolo de señalización usado para acoplar comunicativamente el transceptor 12 al transceptor 10 que se usa para señalar las recomendaciones de precodificador de conversión. Por ejemplo, con referencia al caso de red inalámbrica de la Fig. 3, las recomendaciones de precodificador de conversión se envían usando señalización de Control de Recursos de Radio (RRC), mientras que las recomendaciones de precodificador de sintonización se envían en una capa inferior.

45 Independientemente, el transceptor 12 hace sus selecciones de recomendación de precodificación en base a, por ejemplo, la evaluación de las condiciones de canal a través de los circuitos de estimación 52, que estiman las condiciones del canal y/o evalúan la calidad de la señal recibida, tal como la SNR. Y, como se ha señalado, puede controlar sus recomendaciones en respuesta a la señalización de control 66 recibida desde el transceptor 10. Tal disposición se ve en el ejemplo de la Fig. 8, en donde el generador de realimentación de precodificación 54

50 (abreviado como "PFG" en la ilustración) realiza una selección dinámica de precodificadores de conversión 32 y precodificadores de sintonización 34 del libro o de los libros de código 30, en base a la evaluación de las propiedades del canal como se determina por los circuitos de estimación 52.

Se entenderá que la información de propiedades de canal comprende, por ejemplo, coeficientes complejos que representan características de canal de propagación multitrayecto y/o propiedades de canal tales como

55 correlaciones de deterioro, etc. Las selecciones de precodificador se pueden hacer sujetas a cualquier restricción impuesta por la señalización de control 66, que puede restringir las selecciones de recomendación a subconjuntos predefinidos de los precodificadores, tales como un subconjunto para el caso donde el transceptor 10 está operando en un modo MU-MIMO, y otro subconjunto para el caso donde el transceptor 10 está operando en un modo SU-MIMO. Este ejemplo es particularmente pertinente al caso de red ejemplo de la Fig. 3, donde el transceptor 10 es

60 una estación base 70 y puede soportar pluralidades de UE 74 ("usuarios").

Mientras que la Fig. 7 ilustra lo que se podría considerar como un ejemplo del método del lado de “recepción”, la Fig. 9 ilustra un caso ejemplo para el método del lado de “transmisión” – es decir, detalla operaciones ejemplo implementadas por el transceptor 10. El método 900 está dirigido a precodificar transmisiones de múltiples antenas 60 al transceptor 12, e incluye recibir información de estado de canal 62 desde el otro transceptor 12, que incluye recibir indicadores de selección como la información de precodificador 64 (Bloque 902). El método 900 continúa con la identificación de la información de precodificador 64 seleccionando entradas de uno o más libro de códigos 30 almacenados en el transceptor 10, en base a las indicaciones de selección incluidas en la información de estado de canal 62 (Bloque 904). Aquí, se entenderá que el procesador de realimentación 24 en el transceptor 10 está adaptado para manejar la realimentación factorizada contemplada para la información de precodificador 64. Es decir, el procesador de realimentación 24 está configurado para extraer y proporcionar las recomendaciones de precodificador de conversión y de sintonización incluidas en la información de estado de canal 62.

El método 900 incluye además el transceptor 10 que precodifica una transmisión 60 al transceptor 12, en base al menos en parte a la información de precodificador 64 (Bloque 906). Como se ha señalado, la “selección” realizada en el Bloque 904 se puede entender como el transceptor 10 que identifica el precodificador global 36 que el transceptor 12 recomienda para precodificar la transmisión 60 al transceptor 12. No obstante, cuando el transceptor 10 determina la operación de precodificación real a aplicar en la generación de la transmisión 60, puede seguir las recomendaciones o hacer sus propias selecciones o modificaciones.

La Fig. 10 ilustra una configuración ejemplo donde el procesador de realimentación 24 y el controlador de precodificación 26 (abreviados “FP” y “PC”) determinan las selecciones de precodificador real a ser usadas para precodificación de las transmisiones 60 al transceptor 12. Estas decisiones dependen, por ejemplo, de la información de precodificador 64 y las propiedades de canal como se indica en la información de estado de canal 62, y en la información de programación. En particular, en el caso donde el transceptor 10 transmite a múltiples transceptores 12, puede considerar varios conjuntos de datos (por ejemplo, condiciones de canal y datos de programación para múltiples transceptores 12) en la determinación de sus operaciones de precodificación.

En cuanto a la generación de la transmisión precodificada 60, la Fig. 11 representa un circuito de precodificación 90 incluido en el transmisor 18 del transceptor 10 y se entenderá que está asociado con el controlador de precodificación 26. El circuito de precodificación 90 permite al transceptor 10 precodificar las transmisiones según una operación de precodificación aplicada, y el transceptor 10 puede tener más de un circuito tal.

Según la ilustración ejemplo, el circuito de precodificación 90 recibe datos de entrada, por ejemplo, símbolos de información a ser transmitidos, e incluye circuitos de procesamiento de capas 92 que son en respuesta a una señal de control de rango del controlador de precodificación 26. Dependiendo del rango de transmisión en uso, los datos de entrada se colocan sobre una o más capas de multiplexación espacial y el vector o los vectores de símbolo s correspondientes se introducen en un precodificador 94.

Como ejemplo, el precodificador 94 se muestra como que se aplica a un precodificador global 36 seleccionado (denotado como “W”) que se forma como la multiplicación de matrices de un precodificador de conversión 32 seleccionado (denotado como $W^{(c)}$) y un precodificador de sintonización 34 seleccionado (denotado como $W^{(t)}$). Más ampliamente, el precodificador 94 se aplica a una operación de precodificación determinada por el valor o los valores de precodificación proporcionados a él por el controlador de precodificación 26. Esos valores pueden o no seguir la información de precodificador 64 incluida en la información de estado de canal 62 recibida desde el transceptor 12, pero el transceptor 10 considera al menos esas recomendaciones en sus determinaciones de precodificación. En cualquier caso, el precodificador 94 emite señales precodificadas a circuitos de procesamiento de Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT) 96, que a su vez proporcionan señales a un número de puertos de antena 98 asociados con las antenas 14 mostradas en la Fig. 1.

Señalar que estos puertos se gestionan como una ULA en una realización, y se gestionan como subgrupos de antenas en otra realización. Ventajosamente, se pueden usar los mismos precodificadores de conversión 32 para cualquiera de los casos debido a que cada precodificador de conversión 32 comprende una matriz diagonal de bloques.

Con más detalle, cada precodificador de conversión 32 es uno entre $N_T Q$ entradas diferentes en un libro de códigos. Cada precodificador de conversión 32 comprende una matriz diagonal de bloques. Cada una de tales matrices diagonales de bloques es un precodificador de subgrupo de antenas 38 basado en DFT que corresponde a un subgrupo N_T de puertos de antena de transmisión 98 y proporciona $N_T Q$ diferentes haces basados en DFT para el subgrupo correspondiente, donde Q es un valor entero y donde los $N_T Q$ diferentes precodificadores de conversión 32, junto con uno o más de los precodificadores de sintonización 34, corresponden a un conjunto de $N_T Q$ diferentes precodificadores globales 36, cada precodificador global 36 que representa de esta manera un haz basado en DFT de tamaño N_T sobre los N_T puertos de antenas de transmisión 98.

Para comprender mejor la disposición anterior, consideremos que el precodificador de subgrupo de antenas 38 es un bloque de matrices con $N_T/2$ filas y pertenece a un conjunto de $N_T Q$ diferentes haces basados en DFT, donde Q es un número entero mayor o igual que 2. Además, cada precodificador de sintonización 34 incluye un elemento de desplazamiento de fase tomado de un alfabeto de Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK) 2Q y proporciona

al menos 2Q desplazamientos de fase relativos para desplazar las fases de haces entre los precodificadores de subgrupo de antenas 38 en uno correspondiente de los precodificadores de conversión 32. Con esta estructura, cada precodificador global 36 comprende un precodificador basado en DFT que proporciona N_T haces de transmisión a través de N_T puertos de antena de transmisión.

5 Por tanto, en al menos una realización, el transceptor 10 está configurado para realizar precodificación de transmisiones basada en DFT 60 a partir de dos o más subgrupos de las antenas 14 en el transceptor 10. Estas operaciones están basadas en el transceptor 10 que usa los precodificadores de subgrupo de antenas 38 en uno de los precodificadores de conversión 32, que se seleccionan por el transceptor 10 a partir de uno o más libros de códigos 30 en base al menos en parte a la información de precodificador 64.

10 Para entender mejor las ventajas de la estructura de precodificador anterior y en el desarrollo de las operaciones matemáticas subyacentes, consideremos una matriz de precodificador global. Si la matriz de precodificador se confina para tener columnas ortonormales, entonces el diseño del libro de códigos de matrices de precodificador corresponde a un problema de empaquetado de subespacio de Grassmann. En cualquier caso, los r símbolos en el vector de símbolos s corresponden cada uno a una capa y r se conoce como el rango de transmisión. De esta forma, se logra multiplexación espacial debido a que se pueden transmitir simultáneamente múltiples símbolos sobre el mismo elemento de recursos de tiempo/frecuencia (TFRE). El número de símbolos r está adaptado típicamente para adaptarse a las propiedades actuales del canal de propagación.

15 LTE usa OFDM en el enlace descendente (y OFDM precodificada con DFT en el enlace ascendente) y por lo tanto el vector $N_R \times 1$ recibido y_n para un cierto TFRE en la subportadora n (o alternativamente número de TFRE de datos n) se modela de esta manera por

$$y_n = H_n W_{N_T \times r} s_n + e_n \quad (1)$$

donde e_n es un vector de ruido/interferencia obtenido como realizaciones de un proceso aleatorio y H_n es el canal complejo. El precodificador, $W_{N_T \times r}$, puede ser un precodificador de banda ancha, que es constante sobre la frecuencia, o selectivo en frecuencia.

25 Convencionalmente, la matriz de precodificación se elige a menudo para que coincida con las características de la matriz de canal $N_R \times N_T$ MIMO H , dando como resultado la llamada precodificación dependiente de canal. Esto también se conoce comúnmente como precodificación de bucle cerrado y esencialmente intenta enfocar la energía de transmisión en un subespacio que es fuerte en el sentido de transportar gran parte de la energía transmitida al receptor de destino. Además, la matriz de precodificador también se puede seleccionar con el objetivo de ortogonalizar el canal, lo que significa que después de una equalización lineal adecuada en un UE u otro receptor de destino, se reduce la interferencia entre capas.

30 Según la estructura de precodificador factorizada descrita en la presente memoria, los precodificadores de conversión 32 están configurados para tener una dimensión $N_T \times k$, donde k es configurable y preferiblemente es menor que el número de puertos de antena de transmisión N_T considerado para la precodificación. A este respecto, $k < N_T$ restringe ventajosamente el número de dimensiones de canal que se deben de contar en los precodificadores de sintonización 34. Correspondientemente, los precodificadores de sintonización 34 están configurados para tener dimensión $k \times r$, donde r es el rango de transmisión. Esta disposición se muestra a continuación:

$$W_{N_T \times r} = W_{N_T \times k}^{(c)} W_{k \times r}^{(t)} \quad (2)$$

35 donde el precodificador de conversión 32, $W_{N_T \times k}^{(c)}$, se esfuerza por capturar las propiedades de banda ancha/largo plazo del canal tales como correlación, mientras que el precodificador de sintonización 34, $W_{k \times r}^{(t)}$, se dirige a las propiedades del canal selectivo en frecuencia/a corto plazo.

40 El precodificador de conversión 32 explota las propiedades de correlación para enfocar el precodificador de sintonización 34 en "direcciones" donde el canal de propagación H en promedio, es "fuerte". Típicamente, esto se logra reduciendo el número de dimensiones k cubiertas por el precodificador de sintonización 34. En otras palabras, el precodificador de conversión 32 llega a ser una matriz alta con un número reducido de columnas. En consecuencia, el número de filas k del precodificador de sintonización 34 se reduce también. Con tal número reducido de dimensiones, el libro de códigos usado para almacenar los precodificadores de sintonización 34 se puede hacer más pequeño, mientras que se mantiene aún un buen rendimiento.

45 En una disposición ya mostrada, los precodificadores de conversión 32 están en un libro de códigos 82 y los precodificadores de sintonización 34 están en otro libro de códigos 84. Esta disposición explota el hecho de que los precodificadores de conversión 32 deberían tener una alta resolución espacial y de esta manera se implementan ventajosamente como un libro de códigos 82 con muchos elementos, mientras que el libro de códigos 84 para los

precodificadores de sintonización 34 se debería hacer pequeño para mantener la sobrecarga de señalización a un nivel razonable.

5 Para ver cómo se explotan las propiedades de correlación y se logra la reducción de dimensión, consideremos el caso donde las N_T diferentes antenas 14 en el transceptor 10 están dispuestas en $N_T/2$ polos cruzados estrechamente separados. En base a la dirección de polarización de los subconjuntos de antenas, las antenas en la configuración de polos cruzados estrechamente separados se pueden dividir en dos grupos, donde cada grupo es una Agrupación Lineal Uniforme (ULA) de polarización compartida estrechamente separada con $N_T/2$ antenas. Las antenas estrechamente separadas a menudo conducen a una alta correlación de canal y la correlación puede a su vez ser explotada para mantener una baja sobrecarga de señalización. Los canales correspondientes a cada ULA de grupos de antenas tales se denotan H_l y H_r , respectivamente.

10 Por comodidad en la notación, las siguientes ecuaciones dejan caer los subíndices que indican las dimensiones de las matrices, así como el subíndice n . Supongamos que cada precodificador de conversión 32 tiene una estructura de diagonal de bloques,

$$\mathbf{W}^{(c)} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{W}}^{(c)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{W}}^{(c)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

15 El producto del canal MIMO H y del precodificador global 36 se puede escribir entonces como

$$\begin{aligned} \mathbf{H}\mathbf{W} &= \begin{bmatrix} H_l & H_r \end{bmatrix} \mathbf{W}^{(c)} \mathbf{W}^{(t)} \\ &= \begin{bmatrix} H_l & H_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{W}}^{(c)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{W}}^{(c)} \end{bmatrix} \mathbf{W}^{(t)} \\ &= \begin{bmatrix} H_l \tilde{\mathbf{W}}^{(c)} & H_r \tilde{\mathbf{W}}^{(c)} \end{bmatrix} \mathbf{W}^{(t)} = \mathbf{H}_{\text{eff}} \mathbf{W}^{(t)} \end{aligned} \quad (4)$$

20 Como se ve, la matriz $\tilde{\mathbf{W}}^{(c)}$ precodifica por separado cada ULA de grupos de antenas, formando por ello un canal eficaz más pequeño y mejorado H_{eff} . Por tanto, los bloques dentro de $\mathbf{W}^{(c)}$ se conocen como precodificadores de subgrupo de antenas 38. Si $\tilde{\mathbf{W}}^{(c)}$ corresponde a un vector de conformación de haces, el canal eficaz se reduciría a tener solamente dos antenas virtuales, lo que reduce el tamaño necesario del libro o de los libros de códigos 30 usados para la segunda matriz de precodificador de sintonización $\mathbf{W}^{(t)}$ cuando se hace el seguimiento de las propiedades instantáneas de canal. En este caso, las propiedades instantáneas de canal van a ser dependientes en gran medida de la relación de fase relativa entre las dos polarizaciones ortogonales.

25 También es útil para una comprensión más completa de esta descripción considerar la teoría con respecto a una "cuadrícula de haces", junto con precodificación basada en Transformada Discreta de Fourier (DFT). Los vectores de precodificador basados en DFT para N_T antenas de transmisión se pueden escribir de la forma

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_n^{(N_T, Q)} &= \begin{bmatrix} w_{1,n}^{(N_T, Q)} & w_{2,n}^{(N_T, Q)} & \dots & w_{N_T, n}^{(N_T, Q)} \end{bmatrix}^T \\ w_{m,n}^{(N_T, Q)} &= \exp\left(j \frac{2\pi}{N_T Q} mn\right), \quad m = 0, \dots, N_T - 1, \quad n = 0, \dots, QN_T - 1, \end{aligned} \quad (5)$$

30 donde $w_{m,n}^{(N_T, Q)}$ es la fase de la antena de orden m , n es el índice del vector de precodificador (es decir, cuyo haz de entre los QN_T haces) y Q es el factor de sobremuestreo. Como se ve, la fase aumenta con la misma cantidad de un puerto de antena a otro, es decir, fase de crecimiento linealmente con respecto al índice de puerto de antena m . Esto es, de hecho, una característica de precodificación basada en DFT. De esta manera, los vectores de precodificador basado en DFT pueden incluir desplazamientos de fase adicionales en la parte superior de los mostrados en la expresión anterior, siempre que el desplazamiento de fase global esté aumentando linealmente con m .

35 Para un buen rendimiento, es importante que la función de ganancia de matriz de agrupación de dos haces de transmisión consecutivos se superponga en el dominio angular, de modo que la ganancia no caiga demasiado

cuando va de un haz a otro. Esto requiere un factor de sobremuestreo de al menos $Q = 2$. De esta manera, para N_T antenas, se necesitan al menos $2N_T$ haces.

Una parametrización alternativa de los vectores anteriores de precodificador basado en DFT es

$$\mathbf{w}_{l,q}^{(N_T,Q)} = \begin{bmatrix} w_{1,Ql+q}^{(N_T,Q)} & w_{2,Ql+q}^{(N_T,Q)} & \dots & w_{N_T,Ql+q}^{(N_T,Q)} \end{bmatrix}^T$$

$$w_{m,Ql+q}^{(N_T,Q)} = \exp\left(j \frac{2\pi}{N_T} m \left(l + \frac{q}{Q}\right)\right), \quad (6)$$

- 5 para $m = 0, \dots, N_T - 1, l = 0, \dots, N_T - 1, q = 0, 1, \dots, Q - 1$ y donde l y q determinan juntos el índice del vector de precodificador a través de la relación $n = Ql + q$. Esta parametrización también destaca que hay Q grupos de haces, donde los haces dentro de cada grupo son ortogonales entre sí. El grupo de orden q se puede representar por la matriz generadora

$$\mathbf{G}_q^{(N_T)} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{0,q}^{(N_T,Q)} & \mathbf{w}_{1,q}^{(N_T,Q)} & \dots & \mathbf{w}_{N_T-1,q}^{(N_T,Q)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

- 10 Asegurando que solamente los vectores de precodificador de la misma matriz generadora están siendo usados juntos como columnas en el mismo precodificador, es directo formar conjuntos de vectores de precodificador para su uso en la denominada precodificación unitaria donde las columnas dentro de una matriz de precodificador deberían formar un conjunto ortonormal.

- 15 Además, para maximizar el rendimiento de precodificación basada en DFT, es útil centrar la cuadrícula de haces simétricamente alrededor del tamaño amplio de la formación. Tal rotación de los haces se puede hacer multiplicando desde la izquierda los vectores de DFT $\mathbf{w}_n^{(N_T,Q)}$ anteriores con una matriz diagonal \mathbf{W}_{rot} que tiene elementos

$$[\mathbf{W}_{\text{rot}}]_{mm} = \exp\left(j \frac{\pi}{QN_T} m\right). \quad (8)$$

- 20 La rotación se puede incluir o bien en el libro de códigos del precodificador o bien, alternativamente, se puede llevar a cabo como un paso separado donde todas las señales se giran de la misma manera y la rotación se puede absorber de esta manera en el canal desde la perspectiva del receptor (transparente al receptor). Para el resto de la discusión de precodificación de DFT en la presente memoria, se supone tácitamente que la rotación puede o no haber sido llevada a cabo como parte de la precodificación basada en DFT.

- 25 Un aspecto de la estructura de precodificador factorizada descrita anteriormente se refiere a la disminución de la sobrecarga asociada con la señalización de los precodificadores de conversión y de sintonización 32 y 34, en base a señalarlos con diferente granularidad de frecuencia y/o de tiempo. El uso de un precodificador de conversión 32 de diagonal de bloques se optimiza específicamente para el caso de una agrupación de antenas de transmisión que comprende polos cruzados estrechamente separados, pero también existen otras disposiciones de antenas. En particular, también se debería lograr un rendimiento eficiente con una ULA de polos compartidos estrechamente separados usando los mismos precodificadores de conversión 32. Las estructuras de precodificador descritas en la presente memoria proporcionan ventajosamente el uso de la misma estructura de precodificador de conversión, con independencia de si el transceptor 10 usa sus antenas como una ULA de N_T polos compartidos estrechamente separados, o como dos subconjuntos de polos cruzados, cada subconjunto que tiene $N_T/2$ elementos de antena.

- 35 En particular, en una o más realizaciones, los precodificadores de conversión 32 comprenden precodificadores basados en DFT que son adecuados para las dos ULA de grupos de antenas de $N_T/2$ elementos en una configuración de polos cruzados estrechamente separados, mientras que aún se proporciona su reutilización en la formación del número necesario de precodificadores de tamaño N_T basados en DFT para una ULA de N_T elementos. Además, una o más realizaciones descritas en la presente memoria proporcionan una estructura para el precodificador de conversión que permite reutilizar libros de códigos existentes con precodificadores basados en DFT y extender su resolución espacial.

- 40 En cualquier caso, un ejemplo de realización ilustra la reutilización de elementos de precodificador basado en DFT para una ULA de grupos de antenas en un polo cruzado estrechamente separado y también en la creación de una cuadrícula de haces con suficiente solapamiento para una ULA de dos veces el número de elementos comparado con la ULA de grupos de antenas. En otras palabras, los precodificadores de conversión 32 se pueden diseñar para su uso con las múltiples antenas 14 del transceptor 10, con independencia de si esas antenas 14 están configuradas

y operadas como una ULA global de N_T antenas, o como dos subgrupos de ULA polarizados cruzados, cada uno que tiene $N_T/2$ antenas.

Consideremos de nuevo el diseño de precodificador factorizado de diagonal de bloques dado como

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}^{(c)} \mathbf{W}^{(t)} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{W}}^{(c)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{W}}^{(c)} \end{bmatrix} \mathbf{W}^{(t)}, \quad (9)$$

- 5 y señalar que con el fin de adaptar la transmisión a polos cruzados de ± 45 grados, la estructura de un precodificador de conversión 32 se puede modificar por medio de una multiplicación desde la izquierda con una matriz

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I}e^{j\phi} \\ \mathbf{I} & -\mathbf{I}e^{j\phi} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

que, para $\phi = 0$, gira las polarizaciones 45 grados para alinearse con polarización horizontal y vertical. Se pueden usar otros valores de ϕ para lograr diversas formas de polarización circular.

- 10 Para una ULA de N_T elementos, el precodificador global 36 para un rango 1 ha de ser un vector $N_T \times 1$ como

$$\mathbf{W} = \mathbf{w}_n^{(N_T, Q)} = \begin{bmatrix} w_{1,n}^{(N_T, Q)} & w_{2,n}^{(N_T, Q)} & \dots & w_{N_T, n}^{(N_T, Q)} \end{bmatrix}^T. \quad (11)$$

Para antenas $m = 0, 1, \dots, N_T/2 - 1$,

$$w_{m,n}^{(N_T, Q)} = \exp\left(j \frac{2\pi}{N_T Q} mn\right) = \exp\left(j \frac{2\pi}{\frac{N_T}{2}(2Q)} mn\right) = w_{m,n}^{(N_T/2, 2Q)}, \quad n = 0, \dots, QN_T - 1, \quad (12)$$

mientras que para las antenas restantes $m = N_T/2 + m', m' = 0, 1, \dots, N_T/2 - 1$,

$$\begin{aligned} w_{N_T/2+m', n}^{(N_T, Q)} &= \exp\left(j \frac{2\pi}{N_T Q} (N_T/2 + m')n\right) \\ &= \exp\left(j \frac{2\pi}{\frac{N_T}{2}(2Q)} m'n\right) \exp\left(j \frac{\pi}{Q} n\right) \\ &= w_{m', n}^{(N_T/2, 2Q)} \exp\left(j \frac{\pi}{Q} n\right) \\ &= w_{m', n}^{(N_T/2, 2Q)} \alpha, \quad n = 0, \dots, QN_T - 1. \end{aligned} \quad (13)$$

- 15

Aquí, $\alpha \in \left\{ \exp\left(j \frac{\pi}{Q} n\right) : n = 0, 1, \dots, 2Q - 1 \right\}.$

Cualquier precodificador global 36 de DFT de N_T elementos se puede escribir de esta manera como

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_n^{(N_T, Q)} &= \begin{bmatrix} w_{0,n}^{(N_T, Q)} & w_{1,n}^{(N_T, Q)} & \dots & w_{N_T-1,n}^{(N_T, Q)} & w_{0,n}^{(N_T, Q)} \alpha & w_{1,n}^{(N_T, Q)} \alpha & \dots & w_{N_T-1,n}^{(N_T, Q)} \alpha \end{bmatrix}^T \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{w}_n^{(N_T/2, 2Q)} \\ \mathbf{w}_n^{(N_T/2, 2Q)} \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_n^{(N_T/2, 2Q)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{w}_n^{(N_T/2, 2Q)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

Uno ve en la disposición anterior que $\mathbf{w}_n^{(N_T, Q)}$ se puede considerar como un ejemplo de un precodificador global

36 formado a partir de un precodificador de conversión 32 dado como $\begin{bmatrix} \mathbf{w}_n^{(N_T/2, 2Q)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{w}_n^{(N_T/2, 2Q)} \end{bmatrix}$, y un precodificador de sintonización 34 dado como $\begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \end{bmatrix}$.

- 5 Señalar además que cada bloque, $\mathbf{w}_n^{(N_T/2, 2Q)}$, del precodificador de conversión 32 representa uno de los precodificadores de subgrupo de antenas 38 incluido en el precodificador de conversión 32, y señalar que los precodificadores de sintonización 34 se determinan como

$$\left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\left(j \frac{\pi}{Q} n\right) \end{bmatrix} : n = 0, 1, \dots, 2Q-1 \right\}. \quad (15)$$

10 La disposición anterior se ajusta perfectamente a la agrupación de antenas de polarización cruzada estrechamente separada debido a que los precodificadores de subgrupo de antenas 38 basados en DFT de tamaño $N_T/2$ se aplican ahora en cada ULA de grupos de antenas y el precodificador de sintonización 34 proporciona $2Q$ diferentes desplazamientos de fase relativos entre las dos polarizaciones ortogonales. También se ve cómo se reutilizan los precodificadores de subgrupo de antenas 38 de $N_T/2$ elementos para construir el precodificador global 36 de N_T elementos. Señalar además que el factor de sobremuestreo Q es dos veces más grande en el caso de polarización cruzada que lo es para el caso de polarización compartida, pero esos elementos no se desperdician debido a que ayudan a aumentar incluso más la resolución espacial de los precodificadores de cuadrícula de haces. Esta característica es particularmente útil en aplicaciones MU-MIMO donde un buen rendimiento se basa en la capacidad de formar de manera muy precisa haces hacia el UE de interés y nula hacia los otros UE de programación compartida.

- 20 Por ejemplo, tomemos un caso especial de $N_T = 8$ antenas de transmisión - es decir, supongamos que el transceptor 10 de la Fig. 1 incluye ocho antenas 14, para su uso en transmisiones MIMO precodificadas, y supongamos que $Q = 2$ para la ULA estrechamente separada. Uno ve que el precodificador global 36 se construye como

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_n^{(8,2)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{w}_n^{(N_T/2, 2Q)} \\ \mathbf{w}_n^{(N_T/2, 2Q)} \alpha \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{w}_n^{(4,4)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{w}_n^{(4,4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\left(j \frac{\pi}{2} n'\right) \end{bmatrix}, \quad n = 0, \dots, 2N_T - 1, \quad n' = 0, 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (16)$$

25 Las entradas del libro de códigos para los precodificadores de sintonización 34 se pueden elegir entonces a partir del libro de códigos de 2 Tx de rango 1, en LTE y, por lo tanto, el libro de códigos se puede reutilizar en las enseñanzas descritas en la presente memoria. El libro de códigos para los precodificadores de conversión 32 contiene elementos construidos a partir de cuatro matrices generadoras basadas en DFT como en la Ec. (7). El libro o los libros de códigos 30 pueden contener otros elementos además de los basados en DFT que se describen aquí. En general, el principio de la construcción de precodificadores globales 36 basados en DFT de N elementos de entre precodificadores de subgrupo de antenas 38 basados en DFT de $N/2$ elementos, menores se puede usar en general para añadir una ULA estrechamente separada y un soporte de polo cruzado eficientes a un intervalo de esquemas de precodificación basada en libro de códigos. Como ventaja adicional, la estructura de precodificador descrita se puede usar incluso si las configuraciones de antenas difieren de lo que se está tratando aquí.

Además, señalar que los precodificadores globales 36 basados en DFT se pueden usar para rangos de transmisión más altos que uno. Una forma de lograr esto es escoger los precodificadores de conversión 32 como subconjuntos de columnas de matrices generadoras basadas en DFT, tal como se muestra en la Ec. (7). Los precodificadores de sintonización 34 se pueden extender también con columnas adicionales, para hacer coincidir el valor deseado del rango de transmisión. Para el rango de transmisión 2, un precodificador de sintonización 34 se puede estructurar como

$$\mathbf{W}^{(t)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \alpha & -\alpha \end{bmatrix}, \quad \alpha \in \left\{ \exp\left(j \frac{\pi}{Q} n\right) : n = 0, 1, \dots, 2Q-1 \right\}. \quad (17)$$

Algunas veces es beneficioso reutilizar libros de códigos existentes en el diseño de nuevos libros de códigos. No obstante, un problema asociado es que los libros de códigos existentes pueden no contener todos los vectores de precodificador de DFT necesarios para proporcionar al menos $Q = 2$ veces el sobremuestreo de la cuadrícula de haces. Suponiendo, por ejemplo, que uno tiene un libro de códigos existente para $N_T/2$ antenas con precodificadores de DFT que proporcionan $Q = Q_e$ en factor de sobremuestreo y que el factor de sobremuestreo objetivo para la ULA de grupos de antenas de $N_T/2$ elementos es $Q = Q_t$. La resolución espacial del libro de códigos existente se puede mejorar entonces al factor de sobremuestreo objetivo en el diseño de precodificador factorizado como

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \Lambda_{\bar{q}} \mathbf{w}_n^{(N_T/2, Q_e)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Lambda_{\bar{q}} \mathbf{w}_n^{(N_T/2, Q_e)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \end{bmatrix}, \quad n = 0, \dots, Q_e N_T - 1, \quad \bar{q} = 0, 1, \dots, Q_t / Q_e - 1$$

$$\Lambda_{\bar{q}} = \text{diag} \left(1, \exp\left(j \frac{2\pi}{N_T} \frac{\bar{q}}{Q_t} 1\right), \exp\left(j \frac{2\pi}{N_T} \frac{\bar{q}}{Q_t} 2\right), \dots, \exp\left(j \frac{2\pi}{N_T} \frac{\bar{q}}{Q_t} (N_T/2 - 1)\right) \right).$$

Aquí, los $\mathbf{w}_n^{(N_T/2, Q_e)}$ podría ser elementos en el libro de códigos existente House Holder de 4 Tx de LTE, que contiene 8 precodificadores basados en DFT (que usan un factor de sobremuestreo de $Q=2$ de modo que haya algún solapamiento entre los haces que abarcan cuatro antenas) para un rango 1. Cuando el rango de transmisión es mayor que uno, la estructura de diagonal de bloques se puede mantener y la estructura de esta manera se generaliza a

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \Lambda_{\bar{q}} \bar{\mathbf{W}}^{(c)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Lambda_{\bar{q}} \bar{\mathbf{W}}^{(c)} \end{bmatrix} \mathbf{W}^{(t)}, \quad (19)$$

donde \mathbf{W} es ahora una matriz $N_T \times r$, $\bar{\mathbf{W}}^{(c)}$ es una matriz con al menos una columna igual a un precodificador de subgrupo de antenas basado en DFT, $\mathbf{w}_n^{(N_T/2, Q_e)}$, y el precodificador de sintonización $\mathbf{W}^{(t)}$ tiene r columnas.

Para ver que la resolución espacial se puede mejorar multiplicando un precodificador de subgrupo de antenas 38 con una matriz diagonal como se ha descrito anteriormente, consideremos la parametrización alternativa de los precodificadores de DFT en la Ec. (6),

$$w_{m, Q_t l + q}^{(N_T, Q_t)} = \exp\left(j \frac{2\pi}{N_T} m \left(l + \frac{q}{Q_t}\right)\right), \quad m = 0, \dots, N_T - 1, l = 0, \dots, N_T - 1, q = 0, \dots, Q_t - 1, \quad (20)$$

y permitamos

$$q = \frac{Q_t}{Q_e} q' + \bar{q}, \quad q' = 0, \dots, Q_e - 1, \quad \bar{q} = 0, \dots, \frac{Q_t}{Q_e} - 1, \quad (21)$$

para llegar a

$$\begin{aligned}
 w_{m, Q_t l + \frac{Q_t}{Q_e} q' + \bar{q}}^{(N_T, Q_t)} &= \exp \left(j \frac{2\pi}{N_T} m \left(l + \frac{1}{Q_t} \left(\frac{Q_t}{Q_e} q' + \bar{q} \right) \right) \right) \\
 &= \exp \left(j \frac{2\pi}{N_T} m \left(l + \frac{q'}{Q_e} \right) \right) \exp \left(j \frac{2\pi}{N_T} m \frac{\bar{q}}{Q_t} \right) \\
 &= w_{m, Q_e l + q'}^{(N_T, Q_e)} \exp \left(j \frac{2\pi}{N_T} m \frac{\bar{q}}{Q_t} \right)
 \end{aligned} \tag{22}$$

para $m = 0, \dots, N_T - 1, l = 0, \dots, N_T - 1, q' = 0, \dots, Q_e - 1, \bar{q} = 0, \dots, \frac{Q_t}{Q_e} - 1$.

Las formulaciones anteriores demuestran un aspecto ventajoso de las enseñanzas presentadas en la presente memoria. Esto es, un libro de códigos que contiene precodificadores de DFT con factor de sobremuestreo Q_e se puede usar para crear un libro de códigos de DFT de mayor resolución multiplicando el elemento de orden m con

$\exp \left(j \frac{2\pi}{N_T} m \frac{\bar{q}}{Q_t} \right)$ y demostrando por lo tanto que la transformación diagonal dada por $\Lambda_{\bar{q}}$ funciona verdaderamente como se pretende.

Otro aspecto a tener en cuenta cuando se diseñan precodificadores es asegurar un uso eficiente de los amplificadores de potencia (PA), por ejemplo, los PA en los transmisores 18 usados para transmisión de múltiples antenas desde el transceptor 10. Normalmente, la potencia no puede ser tomada prestada a través de antenas debido a que hay un PA separado para cada antena. Por lo tanto, para el uso máximo de los recursos del PA, es importante que la misma cantidad de potencia se transmita desde cada antena. En otras palabras, una matriz de precodificador global W para precodificar desde las antenas de transmisión debería cumplir

$$\left[\mathbf{W} \mathbf{W}^* \right]_{mm} = \kappa, \quad \forall m. \tag{23}$$

Por lo tanto, es beneficioso desde un punto de vista de utilización de un PA hacer cumplir esta restricción cuando se diseñan libros de códigos de precodificadores. La utilización de plena potencia también se asegura por la denominada propiedad de módulo constante, lo que significa que todos los elementos escalares de un precodificador tienen la misma norma (módulo). Se verifica fácilmente que un precodificador de módulo constante también cumple la restricción de utilización completa de un PA en la Ecuación (23). Por lo tanto, la propiedad de módulo constante constituye una condición suficiente pero no necesaria para la utilización completa de un PA.

Con el aspecto beneficioso de utilización completa de un PA en mente, otro aspecto de las enseñanzas presentadas en la presente memoria se refiere a proporcionar precodificadores que producen la utilización completa de un PA. En particular, una o más realizaciones propuestas en la presente memoria resuelven los problemas asociados con la utilización completa de un PA y la satisfacción de la propiedad anidada de rango, en el contexto de un diseño de precodificador factorizado. Usando un denominado precodificador de sintonización 34 de diagonal de bloques doble, combinado con un precodificador de conversión 32 de diagonal de bloques, se garantiza la utilización completa de un PA y también es posible una anulación de rango explotando la propiedad anidada para el precodificador global formado como la combinación de un precodificador de conversión 32 y un precodificador de sintonización 34 que tiene las propiedades y la estructura descritas en la presente memoria.

Un primer paso en el diseño eficiente de libros de códigos de precodificador factorizado, mientras que se logra la utilización completa de un PA y el cumplimiento de la propiedad anidada de rango es hacer la diagonal de bloques de precodificadores de conversión, como se muestra en la Ec. (3), por ejemplo. En un caso particular, el número de columnas k de un precodificador de conversión se hace igual a $2 \lceil r / 2 \rceil$, donde $\lceil \cdot \rceil$ denota la función techo. Esta estructura se logra añadiendo dos nuevas columnas que contribuyen por igual a cada polarización para cada otro rango. En otras palabras, el precodificador de conversión 32 en cuestión aquí se puede denotar como $W^{(c)}$ y escribir de la forma

$$\mathbf{W}^{(c)} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{W}}^{(c)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{W}}^{(c)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{w}_1^{(c)} & \bar{w}_2^{(c)} & \dots & \bar{w}_{\lceil r/2 \rceil}^{(c)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \bar{w}_1^{(c)} & \bar{w}_2^{(c)} & \dots & \bar{w}_{\lceil r/2 \rceil}^{(c)} \end{bmatrix}, \tag{24}$$

donde $\bar{w}_l^{(c)}$ es un vector $N_T/2 \times 1$.

Extender la dimensión de conversión de esta manera ayuda a mantener pequeño el número de dimensiones y además sirve para asegurarse de que ambas polarizaciones se excitan por igual. Es beneficioso si el precodificador de conversión, denotado aquí como $\bar{W}^{(c)}$, también se hace para obedecer a una propiedad anidada de rango generalizado en que hay libertad para elegir $\bar{W}^{(c)}$ con L columnas como un subconjunto de columnas arbitrarias de cada $\bar{W}^{(c)}$ posible con $L + 1$ columnas. Una alternativa es tener la posibilidad de señalar el orden de columnas usado en $\bar{W}^{(c)}$. La flexibilidad en la elección de las columnas para $\bar{W}^{(c)}$ de los diferentes rangos es beneficiosa para ser capaces aún de transmitir en el subespacio más fuerte del canal incluso cuando se realiza la anulación de rango usando un subconjunto de columnas.

Además, con respecto a asegurar una utilización completa de un PA, por ejemplo, en el transceptor 10, los precodificadores de sintonización 34, que se denotan $W^{(t)}$, están construidos en una o más realizaciones como sigue: (a) el vector de conversión $\bar{w}_n^{(c)}$ se hace de módulo constante; y (b) una columna en el precodificador de sintonización tiene exactamente dos elementos distintos de cero con módulo constante. Si el elemento de orden m es distinto de cero, así lo es el elemento $m + [r / 2]$. Por lo tanto para un rango $r = 4$, las columnas en el precodificador de sintonización 34 son la siguiente forma

$$\begin{bmatrix} x \\ 0 \\ x \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ x \\ 0 \\ x \end{bmatrix}, \quad (25)$$

donde x denota un valor arbitrario distinto de cero que no es necesariamente el mismo de una x a otra. Debido a que hay dos elementos distintos de cero en una columna, se pueden añadir dos columnas ortogonales con las mismas posiciones de los elementos distintos de cero antes de que se consideren columnas con otras posiciones distintas de cero. Tales columnas ortogonales en forma de pares con una propiedad de módulo constante se pueden parametrizar como

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ e^{j\phi} \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -e^{j\phi} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

La propiedad anidada de rango para el precodificador global se confirma cuando se aumenta el rango en uno, asegurando que las columnas de rangos anteriores excitan las mismas columnas del precodificador de conversión también para el rango superior. Combinando esto con la Ec. (25) y la propiedad ortogonal en forma de pares mencionada de las columnas conduce a una estructura de *diagonal de bloques doble* del precodificador de sintonización que toma la forma

$$W = \begin{bmatrix} \bar{w}_1^{(c)} & \bar{w}_2^{(c)} & \dots & \bar{w}_{[r/2]}^{(c)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \bar{w}_1^{(c)} & \bar{w}_2^{(c)} & \dots & \bar{w}_{[r/2]}^{(c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x & x & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & x & x & \dots \\ \vdots & & & & \ddots \\ x & x & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & x & x & \dots \\ \vdots & & & & \ddots \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Usando la propiedad de ortogonalidad en forma de pares en la Ec. (26), y representando la estructura para el precodificador global 36, denotado como W , como $W = W^{(c)}W^{(t)}$, la estructura de precodificador se puede especializar además a

$$W = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1^{(c)} & \tilde{w}_2^{(c)} & \dots & \tilde{w}_{\lceil r/2 \rceil}^{(c)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{w}_1^{(c)} & \tilde{w}_2^{(c)} & \dots & \tilde{w}_{\lceil r/2 \rceil}^{(c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \dots \\ \vdots & & & & \ddots \\ e^{j\phi_1} & -e^{j\phi_1} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & e^{j\phi_2} & -e^{j\phi_2} & \dots \\ \vdots & & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (28)$$

5 Señalar que la estructura de diagonal de bloques doble para el precodificador de sintonización se puede describir de diferentes formas dependiendo de la ordenación de las columnas usadas para almacenar los precodificadores de conversión $W^{(c)}$ como entradas en el libro de códigos 26. Es posible hacer equivalentemente la diagonal de bloques de los precodificadores de sintonización $W^{(t)}$ escribiendo

$$W = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1^{(c)} & 0 & \tilde{w}_2^{(c)} & 0 & \dots & \dots & \tilde{w}_{\lceil r/2 \rceil}^{(c)} & 0 \\ 0 & \tilde{w}_1^{(c)} & 0 & \tilde{w}_2^{(c)} & \dots & \dots & 0 & \tilde{w}_{\lceil r/2 \rceil}^{(c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x & x & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ x & x & 0 & 0 & & & \vdots \\ 0 & 0 & x & x & \ddots & & \\ \vdots & & x & x & & & \\ & & & & 0 & 0 & \\ & & & & \vdots & & 0 & 0 \\ & & & & & & \ddots & x & x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & x & x \end{bmatrix} \quad (29)$$

10 Reordenaciones similares a éstas no afectan al precodificador global W y por lo tanto se consideran equivalentes y se supone que están cubiertas bajo los términos “precodificador de conversión de diagonal de bloques y precodificador de sintonización de diagonal de bloques doble”. También es interesante señalar que si se relajan los requisitos sobre la restricción de ortogonalidad y la utilización completa de un PA, el diseño para la propiedad anidada de rango se puede resumir con la siguiente estructura para los precodificadores de sintonización 34

$$\begin{bmatrix} x & x & x & x & x & x \\ 0 & 0 & x & x & x & x \\ \vdots & & & x & x & \ddots \\ & & & & & \\ x & x & x & x & x & x \\ 0 & 0 & x & x & x & x \\ \vdots & & & x & x & \ddots \end{bmatrix} \quad (30)$$

15 Además, merece la pena mencionar que la propiedad anidada de rango puede ser útil cuando se aplica por separado a los precodificadores de conversión 32 y a los precodificadores de sintonización 34. Incluso aplicarla solamente a los precodificadores de sintonización 34 puede ayudar a ahorrar complejidad computacional, debido a que los cálculos de precodificador a través de rangos se pueden reutilizar siempre que el precodificador de conversión $W^{(c)}$ seleccionado permanezca fijo.

Como ejemplo ilustrativo para ocho antenas de transmisión 14 en el transceptor 10, suponemos que el Rango $r = 1$

$$W = \begin{bmatrix} w_1^{(1)} \\ w_1^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\phi_k} \end{bmatrix} \quad (31)$$

20 Rango $r = 2$

$$W = \begin{bmatrix} w_1^{(1)} \\ w_1^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ e^{j\phi_k} & -e^{j\phi_k} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Rango $r = 3$

$$W = \begin{bmatrix} w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & & & \\ & & w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & \\ & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ e^{j\varphi_k} & e^{j\varphi_k} & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\varphi_l} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Rango $r = 4$

$$W = \begin{bmatrix} w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & & & \\ & & w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & \\ & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ e^{j\varphi_k} & -e^{j\varphi_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\varphi_l} & -e^{j\varphi_l} \end{bmatrix} \quad (34)$$

5 Rango $r = 5$

$$W = \begin{bmatrix} w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & w_3^{(1)} & & & \\ & & & w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & w_3^{(1)} \\ & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ e^{j\varphi_k} & -e^{j\varphi_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\varphi_l} & -e^{j\varphi_l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{j\varphi_m} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Rango $r = 6$

$$W = \begin{bmatrix} w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & w_3^{(1)} & & & \\ & & & w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & w_3^{(1)} \\ & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ e^{j\varphi_k} & -e^{j\varphi_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\varphi_l} & -e^{j\varphi_l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{j\varphi_m} & -e^{j\varphi_m} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Rango $r = 7$

$$W = \begin{bmatrix} w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & w_3^{(1)} & w_4^{(1)} & & & \\ & & & & w_1^{(1)} & w_2^{(1)} & w_3^{(1)} & w_4^{(1)} \\ & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ e^{j\varphi_k} & -e^{j\varphi_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\varphi_l} & -e^{j\varphi_l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{j\varphi_m} & -e^{j\varphi_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{j\varphi_n} \end{bmatrix} \quad (37)$$

10

Rango $r = 8$

El método incluye el segundo transceptor 12 que selecciona un precodificador global 36 que se factoriza en un precodificador de conversión 32 y un precodificador de sintonización 34, o que selecciona el precodificador de conversión 32 y el precodificador de sintonización 34 correspondiente a un precodificador global 36 particular, y enviando al primer transceptor 10 como dicha información de precodificador una indicación del precodificador global 36 seleccionado o indicaciones de los precodificadores de conversión y de sintonización 32, 34 seleccionados.

Para este método, los precodificadores de conversión 32 son cada uno de diagonales de bloques y cada precodificador de sintonización 34 tiene las siguientes propiedades: todos los elementos distintos de cero son de módulo constante; cada columna tiene exactamente dos elementos distintos de cero; y cada fila tiene exactamente dos elementos distintos de cero; dos columnas o bien tienen elementos distintos de cero en las mismas dos filas o bien no tienen ningún elemento distinto de cero en las mismas filas; y dos columnas que tienen elementos distintos de cero en las mismas dos filas son ortogonales entre sí. Adicionalmente, según el método, el precodificador de conversión 32 tiene $2\lceil k/2 \rceil$ columnas, donde k es un número entero no negativo, y si la fila m en una columna de precodificador de sintonización tiene un elemento distinto de cero, también lo tiene la fila $m + \lceil k/2 \rceil$. Aún más, al menos en una realización, las columnas de un precodificador de sintonización 34 para un rango r son un subconjunto de las columnas de un precodificador de sintonización para un rango $r + 1$.

Por supuesto, las enseñanzas en la presente memoria no se limitan a las ilustraciones específicas anteriores. Por ejemplo, la terminología de LTE del 3GPP se usó en esta descripción para proporcionar un contexto relevante y ventajoso para entender las operaciones en los transceptores 10 y 12, que se identificaron en una o más realizaciones como que son un eNodoB de LTE y un UE de LTE, respectivamente. No obstante, las enseñanzas descritas en la presente memoria no se limitan a estas ilustraciones ejemplo y se pueden aplicar ventajosamente a otros contextos, tales como redes basadas en WCDMA, WiMax, UMB o GSM.

Además, el transceptor 10 y el transceptor 12 no son necesariamente una estación base y un ítem de equipo móvil dentro de una red celular estándar, aunque las enseñanzas en la presente memoria tienen ventajas en tal contexto. Además, aunque ciertos ejemplos de redes inalámbricas dados en la presente memoria implican el “enlace descendente” desde un eNodoB u otra estación base de red, las enseñanzas presentadas en la presente memoria también tienen aplicabilidad al enlace ascendente. Más ampliamente, se entenderá que las enseñanzas en la presente memoria están limitadas por las reivindicaciones, más que por los ejemplos ilustrativos dados en la presente memoria.

REIVINDICACIONES

1. Un método (700) en un transceptor de comunicación inalámbrica (12), en donde otro transceptor (10) precodifica las transmisiones (60) al transceptor (12) en base al menos en parte al transceptor (12) que envía información de estado de canal (62) al otro transceptor (10) que incluye información de precodificador (64) que comprende una recomendación de precodificador desde el transceptor (12) al transceptor (10) y en donde el método se caracteriza por:
- 5 seleccionar (702) entradas desde uno o más libros de códigos (30) como un precodificador de conversión (32) seleccionado y un precodificador de sintonización (34) seleccionado, o como un precodificador global (36) seleccionado que es el producto de un precodificador de conversión (32) seleccionado y un precodificador de sintonización (34) seleccionado; y
- 10 transmitir (704) indicaciones de las entradas seleccionadas como dicha información de precodificador (64) incluida en la información de estado de canal (62); y
- en donde hay $2N_T$ precodificadores de conversión (32), cada uno que comprende una matriz diagonal de bloques que tiene dos o más columnas con bloques en la diagonal de la matriz, cada bloque tal que comprende un precodificador de subgrupo de antenas (38) basado en DFT que corresponde a un subgrupo de $N_T/2$ de los N_T puertos de antena de transmisión (98) en el transceptor (10) y proporciona $2N_T$ diferentes haces basados en DFT para el subgrupo correspondiente, y donde todos los $2N_T$ diferentes precodificadores de conversión (32) son reutilizables, junto con uno o más de los precodificadores de sintonización (34), para formar un conjunto de $2N_T$ diferentes precodificadores globales (36), en donde cada precodificador global (36) representa un haz basado en DFT de tamaño N_T sobre los N_T puertos de antena de transmisión (98),
- 15
- 20 en donde dicho uno o más libros de códigos (30) incluye precodificadores de conversión y de sintonización (32, 34) o precodificadores globales (36) correspondientes para múltiples rangos de transmisión, y en donde para un rango de transmisión $r > 2$:
- el precodificador de sintonización (34) tiene $2\lceil r/2 \rceil$ filas y r columnas, donde r es el rango de transmisión, en donde todos los elementos distintos de cero son de módulo constante, cada columna tiene exactamente dos elementos distintos de cero, y cada fila tiene exactamente dos elementos distintos de cero, y dos columnas que tienen elementos distintos de cero en las mismas dos filas son ortogonales entre sí,
- 25
- y el precodificador de conversión (32) tiene $2\lceil r/2 \rceil$ columnas, y si la fila m en una columna de precodificador de sintonización en dicho precodificador de sintonización (34) tiene un elemento distinto de cero, también lo tiene la fila $m + \lceil r/2 \rceil$.
- 30
2. El método (700) de la reivindicación 1, caracterizado además por que el otro transceptor (10) es una estación base (70) en una red de comunicación inalámbrica (72) y el transceptor (12) es un equipo de usuario (74), UE, que envía dicha información de estado de canal (62) a dicha estación base (70).
- 35
3. El método (700) de la reivindicación 1, en donde las columnas de un precodificador de sintonización (34) para rango r es un subconjunto de las columnas de un precodificador de sintonización para rango $r+1$.
- 40
4. Un transceptor de comunicación inalámbrica (12) configurado para enviar información de estado de canal (62) a otro transceptor de comunicación inalámbrica (10) que precodifica transmisiones (60) al transceptor (12) en base al menos en parte a la información de estado de canal (62), dicho transceptor (12) que incluye un receptor (44) para recibir señales desde el otro transceptor (10) y un transmisor (46) para transmitir señales al otro transceptor (10), incluyendo transmitir señales que transportan dicha información de estado de canal (62) que comprende una recomendación de precodificador desde el transceptor (12) al transceptor (10), en donde dicho transceptor (12) se caracteriza por:
- una memoria (56) que almacena uno o más libros de códigos (30) que incluyen entradas que comprenden $2N_T$ diferentes precodificadores de conversión (32) y uno o más precodificadores de sintonización (34), o entradas que comprenden una pluralidad de precodificadores globales (36), con cada precodificador global (36) que comprende el producto de un precodificador de conversión (32) seleccionado y un precodificador de sintonización (34) seleccionado, en donde cada dicho precodificador de conversión (32) comprende una matriz diagonal de bloques que tienen dos o más columnas con bloques en la diagonal de la matriz, cada bloque tal que comprende un precodificador de subgrupo de antenas (38) basado en DFT que corresponde a un subgrupo de $N_T/2$ de los N_T puertos de antena de transmisión (98) en el transceptor (10) y proporciona $2N_T$ diferentes haces basados en DFT para el subgrupo correspondiente, y donde todos los $2N_T$ diferentes precodificadores de conversión (32) son reutilizables, junto con uno o más de los precodificadores de sintonización (34), para formar un conjunto de $2N_T$ diferentes precodificadores globales (36), y cada precodificador global (36) representa un haz basado en DFT de tamaño N_T sobre los N_T puertos de antena de transmisión (98); y
- 45
- 50

un generador de realimentación de precodificación (54) configurado para seleccionar entradas desde uno o más libros de códigos (30) que representan un precodificador global (36) seleccionado como dicha recomendación de precodificador;

5 dicho generador de realimentación de precodificación (54) configurado además para transmitir, a través de dicho transmisor (46), dicha recomendación de precodificador en dicha información de estado de canal (62),

en donde dicho uno o más libros de códigos (30) incluyen precodificadores de conversión y de sintonización (32, 34) o precodificadores globales (36) correspondientes para múltiples rangos de transmisión, y en donde para un rango de transmisión $r > 2$:

10 el precodificador de sintonización (34) tiene $2\lceil r/2 \rceil$ filas y r columnas, donde r es el rango de transmisión, en donde todos los elementos distintos de cero son de módulo constante, cada columna tiene exactamente dos elementos distintos de cero, y cada fila tiene exactamente dos elementos distintos de cero, y dos columnas que tienen elementos distintos de cero en las mismas dos filas son ortogonales entre sí,

15 y el precodificador de conversión (32) tiene $2\lceil r/2 \rceil$ columnas, y si la fila m en una columna de precodificador de sintonización en dicho precodificador de sintonización (34) tiene un elemento distinto de cero, también lo tiene la fila $m + \lceil r/2 \rceil$.

5. El transceptor (12) de la reivindicación 4, caracterizado además por que el otro transceptor (10) es una estación base (70) en una red de comunicación inalámbrica (72) y el transceptor (12) es un equipo de usuario (74), UE, que envía dicha información de estado de canal (62) a dicha estación base (70).

20 6. Un método (900) de precodificación de transmisiones de múltiples antenas (60) desde un transceptor de comunicación inalámbrica (10) a otro transceptor de comunicación inalámbrica (12), en base al menos en parte a recibir (902) información de estado de canal (62) desde el otro transceptor (12) que incluye información de precodificador (64) que comprende una recomendación de precodificador, dicho método caracterizado por:

25 identificar (904) la información de precodificador (64) seleccionando entradas desde uno o más libros de códigos (30) conocidos en el transceptor (10) en respuesta a las indicaciones de selección incluidas en la información de estado de canal (62); y

precodificar (906) una transmisión (60) al otro transceptor (12) en base al menos en parte a dicha recomendación de precodificador;

30 en donde uno o más libros de códigos (30) incluyen entradas que comprenden $2N_T$ diferentes precodificadores de conversión (32) y uno o más precodificadores de sintonización (34), o entradas que comprenden precodificadores globales (36), cada precodificador global (36) formado como el producto de un precodificador de conversión (32) seleccionado y un precodificador de sintonización (34) seleccionado, y en donde cada uno de los $2N_T$ precodificadores de conversión (32) comprende una matriz diagonal de bloques que tiene dos o más columnas con bloques en la diagonal de la matriz, cada bloque tal que comprende un precodificador de subgrupo de antenas (38) basado en DFT que corresponde a un subgrupo de $N_T/2$ de los N_T puertos de antena de transmisión (98) en el transceptor (10) y proporciona $2N_T$ diferentes haces basados en DFT para el subgrupo correspondiente, y donde todos los $2N_T$ diferentes precodificadores de conversión (32) son reutilizables, junto con uno o más de los precodificadores de sintonización (34), para formar un conjunto de $2N_T$ diferentes precodificadores globales (36), y cada precodificador global (36) representa un haz basado en DFT de tamaño N_T sobre los N_T puertos de antena de transmisión (98),

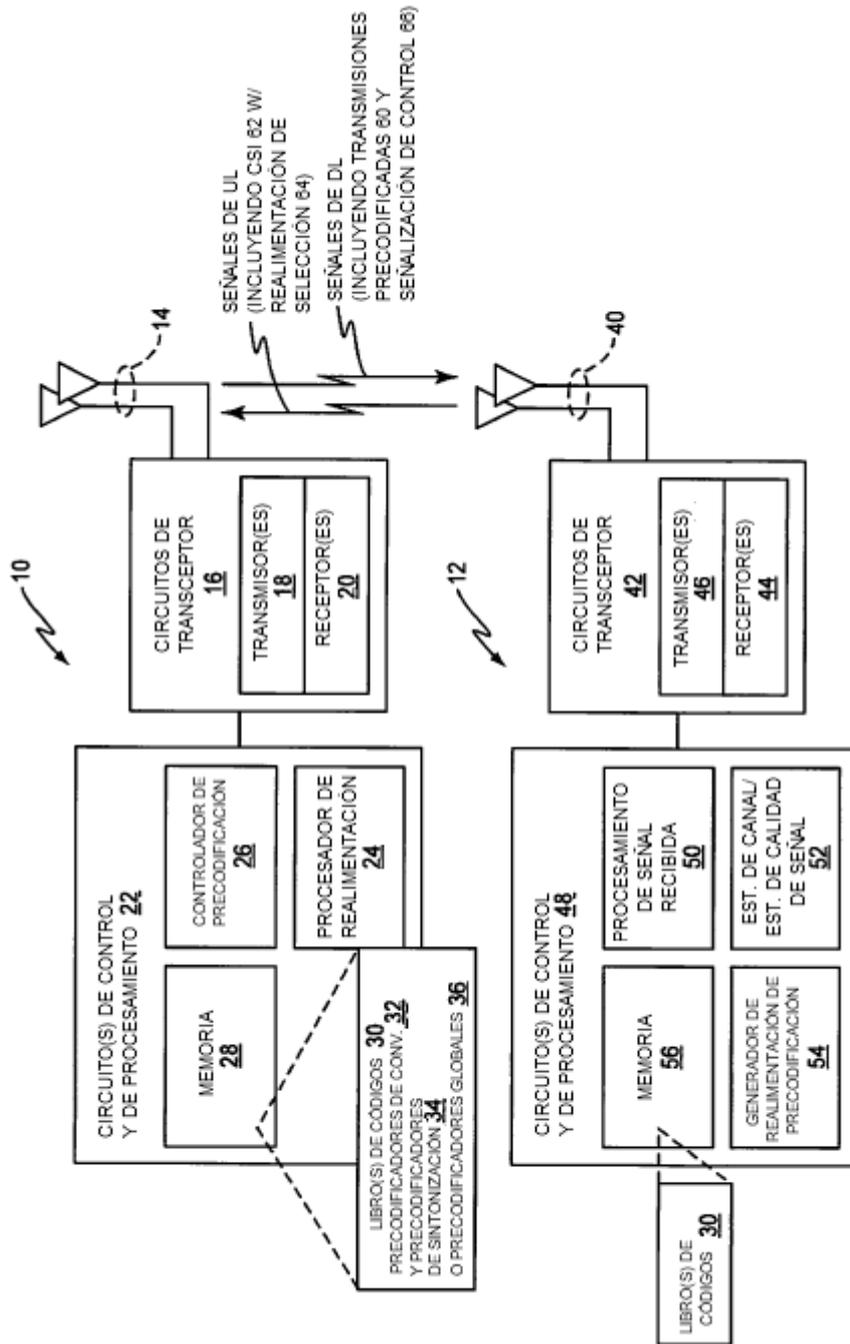
40 en donde dicho uno o más libros de códigos (30) incluye precodificadores de conversión y de sintonización (32, 34) o precodificadores globales (36) correspondientes para múltiples rangos de transmisión, y en donde para el rango de transmisión $r > 2$:

45 el precodificador de sintonización (34) tiene $2\lceil r/2 \rceil$ filas y r columnas, donde r es el rango de transmisión, en donde todos los elementos distintos de cero son de módulo constante, cada columna tiene exactamente dos elementos distintos de cero, y cada fila tiene exactamente dos elementos distintos de cero; y dos columnas que tienen elementos distintos de cero en las mismas dos filas son ortogonales entre sí,

y el precodificador de conversión (32) tiene $2\lceil r/2 \rceil$ columnas, y si la fila m en una columna de precodificador de sintonización en dicho precodificador de sintonización (34) tiene un elemento distinto de cero, también lo tiene la fila $m + \lceil r/2 \rceil$.

50 7. El método (900) de la reivindicación 6, caracterizado además por realizar precodificación de transmisiones basada en DFT desde dos o más subgrupos de antenas (14) en el transceptor (10) usando los precodificadores de subgrupo de antenas (38) en uno de los precodificadores de conversión (32), como se selecciona por el transceptor (10) desde uno o más libros de códigos (30) en base al menos en parte a la recomendación de precodificador.

8. Un transceptor de comunicación inalámbrica (10) configurado para precodificar transmisiones de múltiples antenas (60) a otro transceptor de comunicación inalámbrica (12) en base al menos en parte a la información de estado de canal (62) desde el otro transceptor (12), dicho transceptor (10) que incluye un transmisor (18) y una pluralidad de antenas (14) para transmitir dichas transmisiones de múltiples antenas (60) y un receptor (20) para recibir la información de estado de canal (62), y en donde el transceptor (10) se caracteriza por:
- 5 una memoria (28) que almacena uno o más libros de códigos (30) que incluyen entradas que comprenden $2N_T$ diferentes precodificadores de conversión (32) y uno o más precodificadores de sintonización (34), o entradas que comprenden precodificadores globales (36), cada uno formado como el producto de un precodificador de conversión (32) seleccionado y un precodificador de sintonización (34) seleccionado, y en donde cada uno de los $2N_T$
- 10 precodificadores de conversión (32) comprende una matriz diagonal de bloques que tiene dos o más columnas con bloques en la diagonal de la matriz, cada bloque tal que comprende un precodificador de subgrupo de antenas (38) basado en DFT que corresponde a un subgrupo de $N_T/2$ de los N_T puertos de antena de transmisión (98) en el transceptor (10) y proporciona $2N_T$ diferentes haces basados en DFT para el subgrupo correspondiente, y donde todos los $2N_T$ diferentes precodificadores de conversión (32) son reutilizables, junto con uno o más de los
- 15 precodificadores de sintonización (34), para formar un conjunto de $2N_T$ diferentes precodificadores globales (36), en donde cada precodificador global (36) representa un haz basado en DFT de tamaño N_T sobre los N_T puertos de antena de transmisión (98);
- un procesador de realimentación (24) configurado para identificar la recomendación de precodificador desde el otro transceptor (12) en base a usar indicaciones de selección incluidas en la información de estado de canal (62); y
- 20 un controlador de precodificación (26) y un circuito de precodificación (90) asociado configurado para precodificar la transmisión (60) al otro transceptor (12), en base al menos en parte a la recomendación de precodificador,
- en donde dicho uno o más libros de códigos (30) incluyen precodificadores de conversión y de sintonización (32, 34) o precodificadores globales (36) correspondientes para múltiples rangos de transmisión, y en donde para un rango de transmisión $r > 2$:
- 25 el precodificador de sintonización (34) tiene $2\lceil r/2 \rceil$ filas y r columnas, donde r es el rango de transmisión, en donde todos los elementos distintos de cero son de módulo constante, cada columna tiene exactamente dos elementos distintos de cero, y cada fila tiene exactamente dos elementos distintos de cero, y dos columnas que tienen elementos distintos de cero en las mismas dos filas son ortogonales entre sí,
- 30 y el precodificador de conversión (32) tiene $2\lfloor r/2 \rfloor$ columnas, y si la fila m en una columna de precodificador de sintonización en dicho precodificador de sintonización (34) tiene un elemento distinto de cero, también lo tiene la fila $m + \lfloor r/2 \rfloor$.
9. El transceptor (10) de la reivindicación 8, caracterizado además por que el controlador de precodificación (26) y el circuito de precodificación (90) asociado están configurados para precodificar la transmisión (60) al otro transceptor (12) realizando precodificación de transmisiones basada en DFT desde dos o más subgrupos de las antenas (14) usando los precodificadores de subgrupo de antenas (38) en el precodificador de conversión o global (32, 36)
- 35 seleccionado por el transceptor (10) desde el uno o más libros de códigos (30), donde dicha selección por el transceptor (10) se basa al menos en parte en la recomendación de precodificador desde el otro transceptor (12).



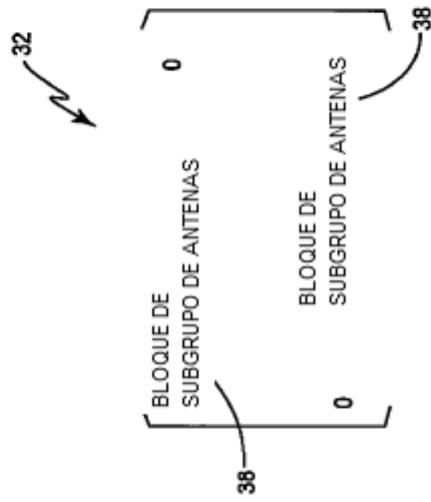


FIG. 2

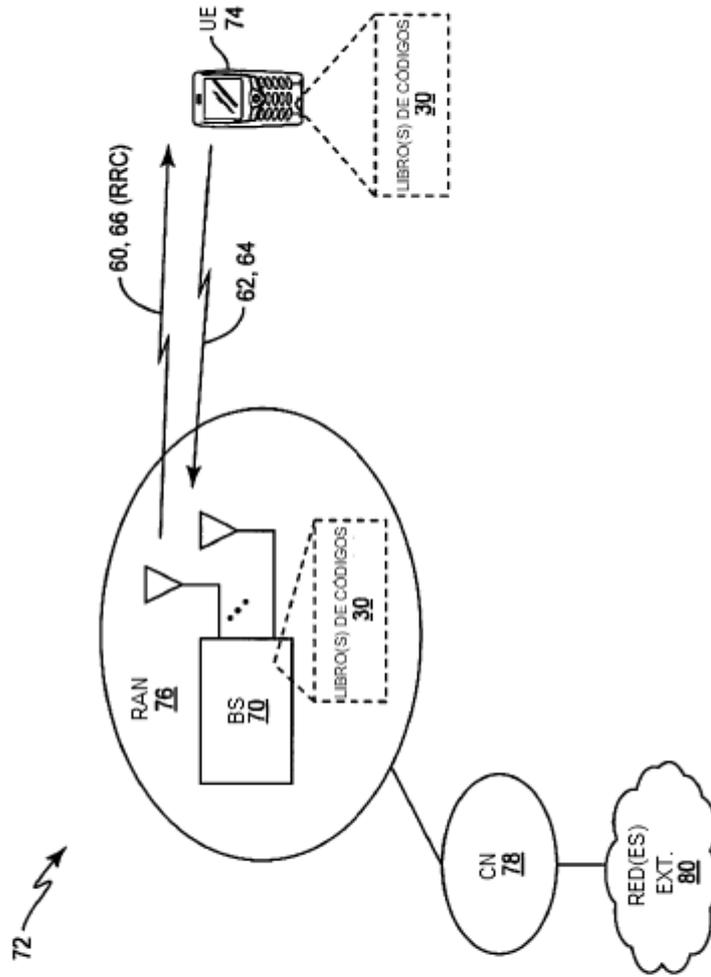


FIG. 3



FIG. 4

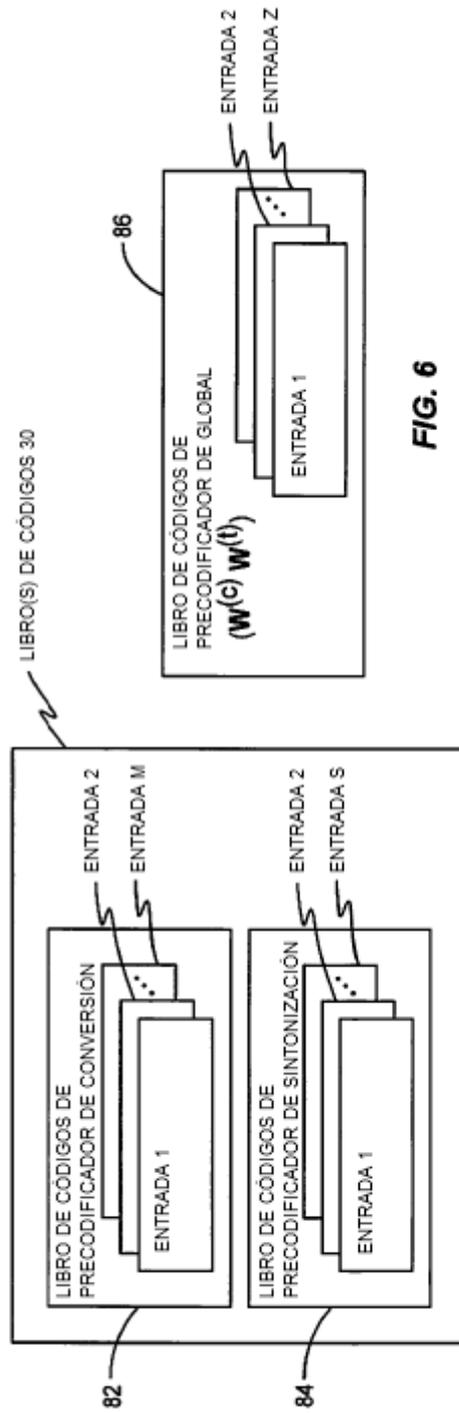


FIG. 5

FIG. 6

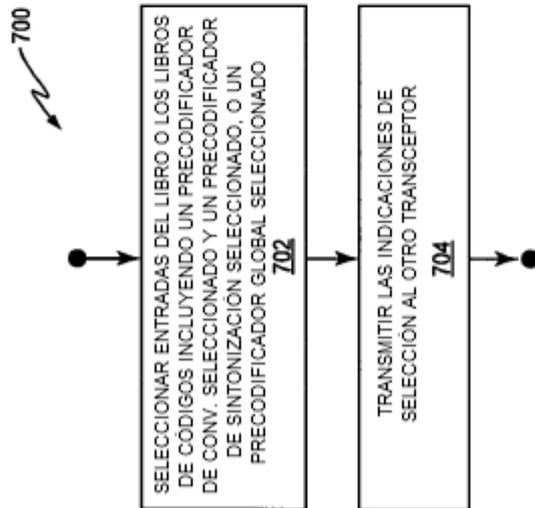


FIG. 7

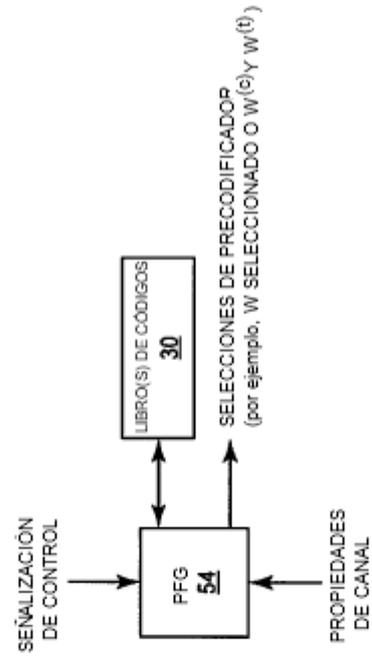


FIG. 8

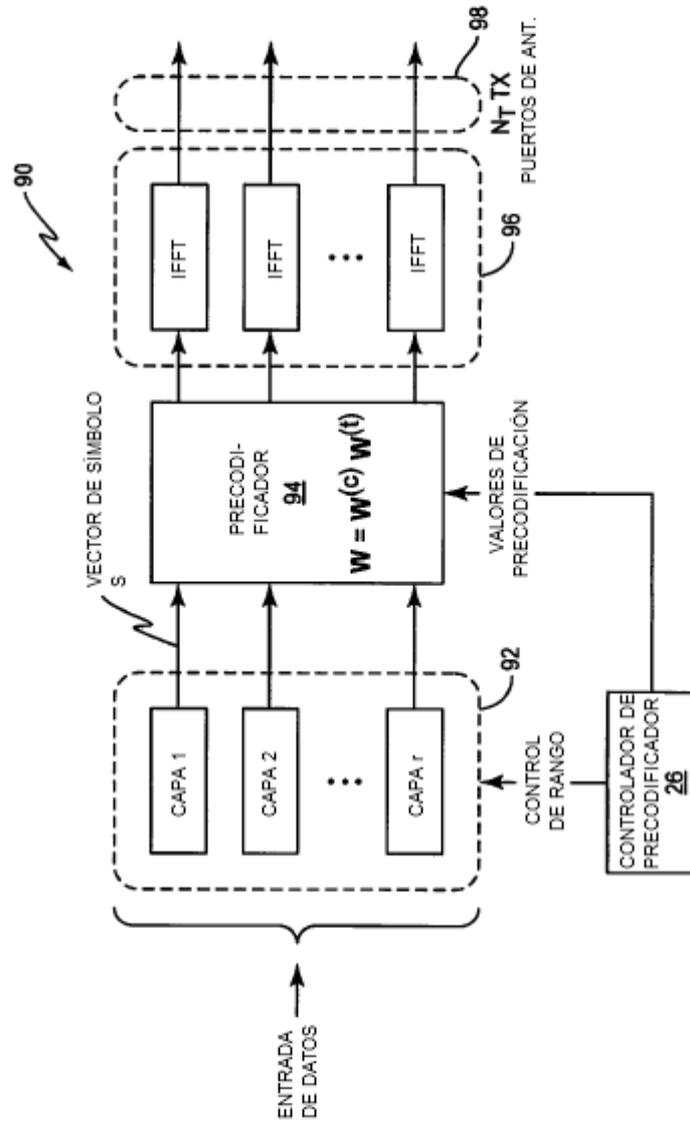


FIG. 11