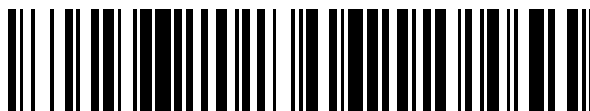


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 561 466**

51 Int. Cl.:

**H04L 25/03** (2006.01)

**H04B 7/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.02.2005** **E 05723308 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.11.2015** **EP 1721431**

54 Título: **Calibración de respuestas de canal de enlace descendente y de enlace ascendente en un sistema de comunicación inalámbrica MIMO**

30 Prioridad:

**19.02.2004 US 783175**

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

**26.02.2016**

73 Titular/es:

**QUALCOMM, INCORPORATED (100.0%)  
5775 MOREHOUSE DRIVE  
SAN DIEGO, CA 92121, US**

72 Inventor/es:

**WALLACE, MARK S.;  
KETCHUM, JOHN W.;  
WALTON, JAY RODNEY y  
HOWARD, STEVEN J.**

74 Agente/Representante:

**FORTEA LAGUNA, Juan José**

**ES 2 561 466 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

Calibración de respuestas de canal de enlace descendente y de enlace ascendente en un sistema de comunicación inalámbrica MIMO

5

## ANTECEDENTES

## Campo

10 La presente invención se refiere, en general, a la comunicación y, más específicamente, a técnicas para calibrar respuestas de canal de enlace descendente y de enlace ascendente en un sistema de comunicación inalámbrica de entradas múltiples y salidas múltiples (MIMO).

## Antecedentes

15

Un sistema MIMO emplea múltiples ( $N_T$ ) antenas transmisoras y múltiples ( $N_R$ ) antenas receptoras para la transmisión de datos. Un canal MIMO formado por las  $N_T$  antenas transmisoras y las  $N_R$  antenas receptoras puede ser descompuesto en  $N_S$  canales espaciales, donde  $N_S \leq \min \{N_T, N_R\}$ . Los  $N_S$  canales espaciales pueden ser usados para transmitir datos en paralelo, para lograr un mayor caudal global, o redundantemente, para lograr mayor fiabilidad.

20

Para lograr altas prestaciones, a menudo es necesario conocer la respuesta del canal MIMO. Por ejemplo, un punto de acceso puede necesitar conocer la respuesta de un canal de enlace descendente a fin de realizar el procesamiento espacial para una transmisión de enlace descendente a un terminal de usuario. En una técnica convencional de estimación de canal, el punto de acceso transmite una señal piloto por el enlace descendente, y el terminal de usuario estima la respuesta de canal de enlace descendente en base a la señal piloto y envía la estimación de respuesta de canal de enlace descendente de vuelta al punto de acceso. Esta técnica de estimación de canal utiliza recursos de enlace ascendente y además incurre en un retardo para enviar de vuelta la estimación de respuesta de canal, donde ambos casos son indeseables.

25

30

Un sistema de TDD usa una única banda de frecuencia tanto para el enlace descendente como para el enlace ascendente, siendo asignada al enlace descendente una parte del tiempo y siendo asignada al enlace ascendente la parte restante del tiempo. Para un sistema de TDD, se puede suponer que las respuestas de canal de enlace descendente y de enlace ascendente son recíprocas entre sí. Es decir, si  $\mathbf{H}$  representa una matriz de respuesta de canal desde la formación de antenas A a la formación de antenas B, entonces un canal recíproco implica que el acoplamiento desde la formación B a la formación A está dado por  $\mathbf{H}^T$ , donde  $\mathbf{H}^T$  indica la traspuesta de  $\mathbf{H}$ . Con un canal recíproco, la respuesta de canal para un enlace (p. ej., el enlace descendente) puede ser estimada en base a una señal piloto recibida mediante el otro enlace (p. ej., el enlace ascendente).

35

40

Esta técnica está descrita, p. ej., en el artículo de BRUHL ET AL.: "Investigación de requisitos de interfaz de usuario para sistemas MIMO que usan la pre-distorsión de enlace descendente", CONFERENCIA EUROPEA DE COMUNICACIONES MÓVILES PERSONALES, 2003, páginas 472 a 476.

45

Tanto el punto de acceso como el terminal de usuario utilizan cadenas de transmisión y recepción para la transmisión y la recepción, respectivamente. Una transmisión de enlace descendente observaría entonces una respuesta de canal de enlace descendente "efectiva", que incluye las respuestas de la cadena de transmisión en el punto de acceso y la cadena de recepción en el terminal de usuario. De forma correspondiente, una transmisión de enlace ascendente observaría una respuesta de canal de enlace ascendente efectiva que incluye las respuestas de la cadena de transmisión en el terminal de usuario y la cadena de recepción en el punto de acceso. Las respuestas de las cadenas de transmisión y recepción en el punto de acceso son habitualmente distintas a las respuestas de las cadenas de transmisión y recepción en el terminal de usuario. Como resultado, las respuestas efectivas de canal de enlace descendente y de enlace ascendente, habitualmente, no son recíprocas entre sí. Si la estimación de respuesta de canal obtenida para un enlace se usa para el procesamiento espacial para el otro enlace, entonces cualquier diferencia en las respuestas de las cadenas de transmisión / recepción en el punto de acceso y el terminal de usuario representaría un error que, si no es determinado y justificado, puede degradar las prestaciones.

50

55

Hay, por lo tanto, necesidad en la tecnología de técnicas para calibrar las respuestas de canal de enlace descendente y de enlace ascendente en un sistema MIMO de TDD.

## 5 SUMARIO

Se describen en la presente memoria las técnicas para calibrar las respuestas de canal de enlace descendente y de enlace ascendente, para dar cuenta de las diferencias en las respuestas de las cadenas de transmisión y de recepción en el punto de acceso y el terminal de usuario. Después de la calibración, puede usarse una estimación de respuesta de canal, obtenida para un enlace, como una estimación de respuesta de canal para el otro enlace. Esto puede simplificar la estimación de canal y el procesamiento espacial.

La calibración puede ser separada en dos partes: calibración inicial y calibración de seguimiento. Para la calibración inicial, el punto de acceso y el terminal de usuario transmiten señales piloto MIMO (descritas más adelante) por el enlace descendente y el enlace ascendente, respectivamente. Las señales piloto MIMO son usadas para obtener estimaciones "efectivas" de respuesta de canal de enlace descendente y de enlace ascendente,  $\hat{H}_{dn}$  y  $\hat{H}_{up}$ , que incluyen las respuestas de las cadenas aplicables de transmisión / recepción. Las estimaciones de canal  $\hat{H}_{dn}$  y  $\hat{H}_{up}$  se usan para obtener las matrices de corrección  $\hat{K}_{ap}$  y  $\hat{K}_{ut}$ , que son usadas a continuación, respectivamente, por el punto de acceso y el terminal de usuario, para dar cuenta de las respuestas de sus cadenas de transmisión / recepción, según se describe más adelante.

Para la calibración de seguimiento, una entidad (p. ej., el punto de acceso) transmite una señal piloto MIMO y una referencia guiada (descrita más adelante). La otra entidad (p. ej., el terminal de usuario) obtiene (1) una matriz  $\hat{V}_a$  de transmisión "efectiva recibida", basada en la referencia guiada y (2) una matriz  $\hat{V}_{hyp}$  de transmisión "hipotetizada", basada en la señal piloto MIMO y las matrices de error de calibración  $\hat{Q}_{ap}$  y  $\hat{Q}_{ut}$ . Las matrices  $\hat{Q}_{ap}$  y  $\hat{Q}_{ut}$  contienen conjeturas o estimaciones de los errores en las matrices de corrección  $\hat{K}_{ap}$  y  $\hat{K}_{ut}$ , respectivamente. La diferencia entre las matrices de transmisión  $\hat{V}_a$  y  $\hat{V}_{hyp}$  es indicativa de la exactitud de las estimaciones de los errores en las matrices de corrección. Las matrices  $\hat{Q}_{ap}$  y  $\hat{Q}_{ut}$  pueden ser ajustadas en base a un procedimiento adaptativo, para minimizar el error entre  $\hat{V}_a$  y  $\hat{V}_{hyp}$ . Se describen más adelante varios procedimientos adaptativos para ajustar iterativamente las matrices  $\hat{Q}_{ap}$  y  $\hat{Q}_{ut}$ . Las matrices de corrección  $\hat{K}_{ap}$  y  $\hat{K}_{ut}$  pueden ser actualizadas a continuación, respectivamente, por las matrices de error de calibración  $\hat{Q}_{ap}$  y  $\hat{Q}_{ut}$ .

Diversos aspectos y realizaciones se describen en mayor detalle más adelante, y han de ser interpretados como ejemplos usados para explicar la invención, que está definida por el ámbito de las reivindicaciones adjuntas 1 a 25.

## 40 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La **FIG. 1** muestra las partes de transmisión y recepción en el punto de acceso y el terminal de usuario en el sistema MIMO de TDD;

45 la **FIG. 2** muestra el uso de las matrices de corrección en el punto de acceso y el terminal de usuario para dar cuenta de sus cadenas de transmisión / recepción;

la **FIG. 3** muestra un proceso realizado por el punto de acceso y el terminal de usuario para la calibración inicial, el funcionamiento normal y la calibración de seguimiento;

50 la **FIG. 4** muestra un procedimiento adaptativo de mínimos errores cuadrados medios (MMSE);

la **FIG. 5** muestra un procedimiento adaptativo de la pendiente más empinada; y

55 la **FIG. 6** muestra un diagrama de bloques del punto de acceso y el terminal de usuario.

**DESCRIPCIÓN DETALLADA**

5 La palabra “ejemplar” se usa en la presente memoria para significar “que sirve como ejemplo, caso o ilustración”. Cualquier realización descrita en la presente memoria como “ejemplar” no ha de ser necesariamente interpretada como preferida o ventajosa sobre otras realizaciones.

10 Las técnicas de calibración descritas en la presente memoria pueden ser usadas para sistemas MIMO de TDD de portadora única, así como de múltiples portadoras. Para mayor claridad, estas técnicas se describen para un sistema MIMO de TDD de portadora única.

15 La **FIG. 1** muestra un diagrama de bloques de las partes de transmisión y recepción en un punto de acceso 110 y un terminal de usuario 150 en un sistema MIMO de TDD 100. Para el enlace descendente, en el punto de acceso 110, los símbolos de transmisión (indicados por un vector  $\underline{x}_{dn}$ ) son procesados por una cadena de transmisión 114 y transmitidos desde  $N_{ap}$  antenas 116 y por un canal inalámbrico MIMO que tiene una respuesta de  $\underline{H}$ . En el terminal de usuario 150, las  $N_{ap}$  señales de enlace descendente son recibidas por las  $N_{ut}$  antenas 152 y procesadas por una cadena de recepción 154, para obtener símbolos recibidos (indicados por un vector  $\underline{r}_{dn}$ ). El procesamiento por la cadena de transmisión 114 incluye habitualmente la conversión de digital a analógico, la amplificación, el filtrado, el aumento de frecuencia, etc. El procesamiento por la cadena de recepción 154 incluye habitualmente la reducción de frecuencia, la amplificación, el filtrado, la conversión de analógico a digital, etc.

20 Para el enlace ascendente, en el terminal de usuario 150, los símbolos de transmisión (indicados por un vector  $\underline{x}_{up}$ ) son procesados por una cadena de transmisión 164 y transmitidos desde las  $N_{ut}$  antenas 152 y por el canal MIMO. En el punto de acceso 110, las  $N_{ut}$  señales de enlace ascendente son recibidas por las  $N_{ap}$  antenas 116 y procesadas por una cadena de recepción 124 para obtener símbolos recibidos (indicados por un vector  $\underline{r}_{up}$ ).

30 Para el enlace descendente, el vector de recepción en el terminal de usuario puede ser expresado como:

$$\underline{r}_{dn} = \underline{R}_{ut} \underline{H} \underline{T}_{ap} \underline{x}_{dn} \text{ ,} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde  $\underline{x}_{dn}$  es el vector con  $N_{ap}$  símbolos de transmisión enviados desde  $N_{ap}$  antenas del punto de acceso;

35  $\underline{r}_{dn}$  es el vector con  $N_{ut}$  símbolos recibidos, obtenidos mediante  $N_{ut}$  antenas del terminal de usuario;  $\underline{T}_{ap}$  es una matriz diagonal de dimensiones  $N_{ap} \times N_{ap}$  con  $N_{ap}$  ganancias complejas para la cadena de transmisión del punto de acceso, una ganancia compleja para cada antena del punto de acceso;  $\underline{R}_{ut}$  es una matriz diagonal de dimensiones  $N_{ut} \times N_{ut}$  con  $N_{ut}$  ganancias complejas para la cadena de recepción del terminal de usuario, una ganancia compleja para cada antena del terminal de usuario; y  $\underline{H}$  es la matriz de respuesta de canal, de dimensiones  $N_{ut} \times N_{ap}$ , para el enlace descendente.

40 Las respuestas de las cadenas de transmisión / recepción y el canal MIMO son habitualmente una función de la frecuencia. Para mayor simplicidad, se supone un canal de desvanecimiento plano con una respuesta de frecuencia plana.

45 Para el enlace ascendente, el vector de recepción en el punto de acceso puede ser expresado como:

$$\underline{r}_{up} = \underline{R}_{ap} \underline{H}^T \underline{T}_{ut} \underline{x}_{up} \text{ ,} \quad \text{Ec. (2)}$$

50 donde  $\underline{x}_{up}$  es el vector con  $N_{ut}$  símbolos de transmisión enviados desde  $N_{ut}$  antenas del terminal de usuario;  $\underline{r}_{up}$  es el vector con  $N_{ap}$  símbolos recibidos, obtenidos mediante  $N_{ap}$  antenas del punto de acceso;  $\underline{T}_{ut}$  es una matriz diagonal de dimensiones  $N_{ut} \times N_{ut}$  con  $N_{ut}$  ganancias complejas para la cadena de transmisión del terminal de usuario, una ganancia compleja para cada antena del terminal de usuario;  $\underline{R}_{ap}$  es una matriz diagonal de dimensiones  $N_{ap} \times N_{ap}$  con  $N_{ap}$  ganancias complejas para la cadena de

recepción del punto de acceso, una ganancia compleja para cada antena del punto de acceso; y  $\underline{H}^T$  es la matriz de respuesta de canal, de dimensiones  $N_{ap} \times N_{ut}$ , para el enlace ascendente.

A partir de las ecuaciones (1) y (2), las respuestas de canal “efectivas” de enlace descendente y de enlace ascendente,  $\underline{H}_{dn}$  y  $\underline{H}_{up}$ , que incluyen las respuestas de las cadenas aplicables de transmisión y recepción, pueden ser expresadas como:

$$\underline{H}_{dn} = \underline{R}_{ut} \underline{H} \underline{T}_{ap} \quad \text{y} \quad \underline{H}_{up} = \underline{R}_{ap} \underline{H}^T \underline{T}_{ut} \quad \text{Ec. (3)}$$

Combinando las dos ecuaciones en el conjunto de ecuaciones (3), puede obtenerse lo siguiente;

$$\underline{H}_{up}^T = \underline{T}_{ut} \underline{R}_{ut}^{-1} \underline{H}_{dn} \underline{T}_{ap}^{-1} \underline{R}_{ap} = \underline{K}_{ut}^{-1} \underline{H}_{dn} \underline{K}_{ap} \quad \text{o} \quad \underline{H}_{up} = (\underline{K}_{ut}^{-1} \underline{H}_{dn} \underline{K}_{ap})^T, \quad \text{Ec. (4)}$$

donde  $\underline{K}_{ap} = \underline{T}_{ap}^{-1} \underline{R}_{ap}$  y  $\underline{K}_{ut} = \underline{T}_{ut}^{-1} \underline{R}_{ut}$ .  $\underline{K}_{ap}$  es una matriz diagonal de dimensiones  $N_{ap} \times N_{ap}$  para el punto de acceso, y obtenida por una razón entre la respuesta  $\underline{R}_{ap}$  de la cadena de recepción y la respuesta  $\underline{T}_{ap}$  de la cadena de transmisión, donde la razón se toma elemento a elemento. De manera similar,  $\underline{K}_{ut}$  es matriz diagonal de dimensiones  $N_{ut} \times N_{ut}$  para el terminal de usuario, y obtenida por una razón entre la respuesta  $\underline{R}_{ut}$  de la cadena de recepción y la respuesta  $\underline{T}_{ut}$  de la cadena de transmisión.

La ecuación (4) también puede ser expresada como:

$$\underline{H}_{cup} = \underline{H}_{up} \underline{K}_{ut} = (\underline{H}_{dn} \underline{K}_{ap})^T = \underline{H}_{cdn}^T, \quad \text{Ec. (5)}$$

donde  $\underline{H}_{cup}$  indica la respuesta de canal calibrada para el enlace ascendente; y  $\underline{H}_{cdn}$  indica la respuesta de canal calibrada para el enlace descendente.

Las matrices  $\underline{K}_{ap}$  y  $\underline{K}_{ut}$  incluyen valores que tienen en cuenta las diferencias en las cadenas de transmisión / recepción en el punto de acceso y el terminal de usuario. La aplicación de las matrices diagonales  $\underline{K}_{ap}$  y  $\underline{K}_{ut}$  a las respuestas efectivas de canal de enlace descendente y de enlace ascendente, según se muestra en la ecuación (5), permite que la respuesta de canal calibrada para un enlace sea expresada por la respuesta de canal calibrada para el otro enlace.

La calibración inicial puede ser realizada para determinar las matrices  $\underline{K}_{ap}$  y  $\underline{K}_{ut}$ . Habitualmente, la verdadera respuesta de canal  $\underline{H}$  y las respuestas de la cadena de transmisión / recepción no son conocidas, ni pueden ser averiguadas exactamente o fácilmente. En cambio, las respuestas efectivas de canal de enlace descendente y de enlace ascendente,  $\underline{H}_{dn}$  y  $\underline{H}_{up}$ , pueden ser estimadas en base a señales piloto MIMO enviadas, respectivamente, por el enlace descendente y el enlace ascendente. Una señal piloto MIMO es una señal piloto compuesta por  $N_T$  transmisiones piloto enviadas desde  $N_T$  antenas de transmisión, donde la transmisión piloto desde cada antena de transmisión es identificable por la entidad receptora. Esto puede lograrse, por ejemplo, usando una secuencia ortogonal distinta para la transmisión piloto desde cada antena de transmisión. Las estimaciones de las matrices  $\underline{K}_{ap}$  y  $\underline{K}_{ut}$  (que se llaman matrices de corrección  $\hat{\underline{K}}_{ap}$  y  $\hat{\underline{K}}_{ut}$ ) pueden obtenerse luego en base a las estimaciones efectivas de respuesta de canal de enlace descendente y de enlace ascendente,  $\underline{H}_{dn}$  y  $\underline{H}_{up}$ , según se describe más adelante. Las matrices  $\underline{K}_{ap}$  y  $\underline{K}_{ut}$  incluyen factores de corrección que pueden dar cuenta de diferencias en las cadenas de transmisión / recepción en el punto de acceso y el terminal de usuario.

La FIG. 2 muestra el uso de las matrices de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$  en el punto de acceso 110 y el terminal de usuario 150. En el enlace descendente, el vector de transmisión  $\mathbf{x}_{dn}$  es multiplicado primero por la matriz  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ , por una unidad 112. El procesamiento posterior por la cadena de transmisión 114 y la cadena de recepción 154 para el enlace descendente es según se describe en la FIG. 1. De manera similar, en el enlace ascendente, el vector de transmisión  $\mathbf{x}_{up}$  es multiplicado primero por la matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ , por una unidad 162. El procesamiento posterior por la cadena de transmisión 164 y una cadena de recepción 124 para el enlace ascendente también es según se describe en la FIG. 1.

Para un sistema MIMO, los datos pueden ser transmitidos en  $N_S$  auto-modalidades de un canal MIMO. Estas auto-modalidades pueden ser vistas como canales espaciales ortogonales del canal MIMO. La matriz de respuesta de canal  $\mathbf{H}$  puede ser “diagonalizada” para obtener las  $N_S$  auto-modalidades del canal MIMO. Esta diagonalización puede ser lograda realizando, bien una descomposición en valores singulares de  $\mathbf{H}$ , o bien una descomposición en auto-valores de una matriz de correlación de  $\mathbf{H}$ , que es  $\mathbf{R} = \mathbf{H}^H \mathbf{H}$ , donde  $\mathbf{H}^H$  indica la conjugada traspuesta de  $\mathbf{H}$ .

La Tabla 1 muestra las respuestas de canal, efectivas y calibradas, para el enlace descendente y el enlace ascendente, así como la descomposición en valores singulares de las matrices calibradas de respuesta de canal, de enlace descendente y de enlace ascendente.

Tabla 1 – Descomposición en Valores Singulares

	Enlace descendente	Enlace ascendente
Respuesta efectiva de canal	$\mathbf{H}_{dn} = \mathbf{R}_{ut} \mathbf{H} \mathbf{T}_{ap}$	$\mathbf{H}_{up} = \mathbf{R}_{ap} \mathbf{H}^T \mathbf{T}_{ut}$
Respuesta calibrada de canal	$\mathbf{H}_{cdn} = \mathbf{H}_{dn} \mathbf{K}_{ap}$	$\mathbf{H}_{cup} = \mathbf{H}_{up} \mathbf{K}_{ut}$
Descomposición en valores singulares de la verdadera respuesta de canal	$\mathbf{H}_{cdn} = \mathbf{V}_{ut}^* \mathbf{\Sigma}^T \mathbf{U}_{ap}^T$	$\mathbf{H}_{cup} = \mathbf{U}_{ap} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}_{ut}^H$
Descomposición en valores singulares de la respuesta estimada de canal	$\hat{\mathbf{H}}_{cdn} = \hat{\mathbf{V}}_{ut}^* \hat{\mathbf{\Sigma}}^T \hat{\mathbf{U}}_{ap}^T$	$\hat{\mathbf{H}}_{cup} = \hat{\mathbf{U}}_{ap} \hat{\mathbf{\Sigma}} \hat{\mathbf{V}}_{ut}^H$
Matrices de transmisión no normalizadas	$\hat{\mathbf{V}}_{ut} \hat{\mathbf{\Sigma}}^T = \hat{\mathbf{H}}_{cdn} \hat{\mathbf{U}}_{ap}$	$\hat{\mathbf{U}}_{ap} \hat{\mathbf{\Sigma}} = \hat{\mathbf{H}}_{cup} \hat{\mathbf{V}}_{ut}$

En la Tabla 1,  $\mathbf{U}_{ap}$  es una matriz unitaria, de dimensiones  $N_{ap} \times N_{ap}$ , de auto-vectores izquierdos de  $\mathbf{H}_{cup}$ ,  $\mathbf{\Sigma}$  es una matriz diagonal, de dimensiones  $N_{ap} \times N_{ut}$ , de valores singulares de  $\mathbf{H}_{cup}$ ,  $\mathbf{V}_{ut}$  es una matriz unitaria, de dimensiones  $N_{ut} \times N_{ut}$ , de auto-vectores derechos de  $\mathbf{H}_{cup}$  y “\*” indica la conjugada compleja. Una matriz unitaria  $\mathbf{M}$  está caracterizada por la propiedad  $\mathbf{M}^H \mathbf{M} = \mathbf{I}$ , donde  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad. Las matrices  $\mathbf{V}_{ut}^*$  y  $\mathbf{U}_{ap}^*$  también son matrices de auto-vectores izquierdos y derechos, respectivamente, de  $\mathbf{H}_{cdn}$ . Las matrices  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{v}^*$ ,  $\mathbf{v}^T$  y  $\mathbf{v}^H$  son formas distintas de la matriz  $\mathbf{v}$ . Para mayor simplicidad, la referencia a las matrices  $\mathbf{U}_{ap}$  y  $\mathbf{V}_{ut}$  en la siguiente descripción también puede referirse a sus otras formas. Las matrices  $\mathbf{U}_{ap}$  y  $\mathbf{V}_{ut}$  (que también se llaman matrices de transmisión) pueden ser usadas por el punto de acceso y el terminal de usuario, respectivamente, para el procesamiento espacial, y están indicadas como tales por sus subíndices.

La descomposición en valores singulares está descrita en mayor detalle por Gilbert Strang en el libro “Álgebra lineal y sus aplicaciones”, Segunda Edición, Academic Press, 1980.

En un sistema práctico, las matrices  $\mathbf{H}_{cdn}$  y  $\mathbf{H}_{cup}$  no están disponibles. En cambio, el terminal de usuario puede estimar la respuesta calibrada de canal de enlace descendente en base a una señal piloto MIMO transmitida por el punto de acceso. El terminal de usuario puede luego realizar la descomposición en valores singulares de la estimación calibrada de respuesta de canal de enlace descendente,  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , para obtener una matriz diagonal  $\hat{\mathbf{\Sigma}}$  y una matriz  $\hat{\mathbf{V}}_{ut}^*$  de auto-vectores izquierdos de  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , donde el acento

circunflejo (“^”) sobre cada matriz indica que es una estimación de la matriz efectiva. De manera similar, el punto de acceso puede estimar la respuesta calibrada de canal de enlace ascendente en base a una señal piloto MIMO transmitida por el terminal de usuario. El punto de acceso puede luego realizar la descomposición en valores singulares de la estimación calibrada de respuesta de canal de enlace ascendente,  $\hat{\mathbf{H}}_{cup}$ , para obtener la matriz diagonal  $\hat{\Sigma}$  y una matriz  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$  de auto-vectores izquierdos de  $\hat{\mathbf{H}}_{cup}$ .

Debido al canal recíproco y a la calibración, la descomposición en valores singulares solamente necesita ser realizada por el terminal de usuario, o bien el punto de acceso, para obtener ambas matrices  $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$  y  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ . Para mayor claridad, la siguiente descripción es para una implementación, por la que el terminal de usuario obtiene la estimación calibrada de respuesta de canal de enlace descendente,  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , realiza la descomposición de  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , usa la matriz  $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$  para el procesamiento espacial y envía la matriz  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$  de vuelta al punto de acceso usando una referencia guiada, según se describe más adelante. Una referencia guiada (o señal piloto guiada) es una señal piloto que es transmitida desde todas las antenas y en las auto-modalidades del canal MIMO.

El terminal de usuario puede transmitir una referencia guiada de enlace ascendente, según lo siguiente:

$$\mathbf{x}_{up,m} = \hat{\mathbf{K}}_{ut} \hat{\mathbf{v}}_{ut,m} p_m, \quad \text{Ec. (6)}$$

donde  $p_m$  es un símbolo piloto transmitido en la auto-modalidad  $m$  para la referencia guiada;  $\mathbf{x}_{up,m}$  es un vector de transmisión para la referencia guiada de enlace ascendente para la auto-modalidad  $m$ ; y  $\hat{\mathbf{v}}_{ut,m}$  es el  $m$ -ésimo auto-vector o columna de  $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$ , donde  $\hat{\mathbf{V}}_{ut} = [\hat{\mathbf{v}}_{ut,1} \hat{\mathbf{v}}_{ut,2} \dots \hat{\mathbf{v}}_{ut,N_{ut}}]$ .

La referencia guiada de enlace ascendente recibida en el punto de acceso puede ser expresada como:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{up,m} &= \mathbf{H}_{up} \mathbf{x}_{up,m} + \mathbf{n}_{up} = \mathbf{H}_{up} \hat{\mathbf{K}}_{ut} \hat{\mathbf{v}}_{ut,m} p_m + \mathbf{n}_{up} \\ &\approx \hat{\mathbf{H}}_{cup} \hat{\mathbf{v}}_{ut,m} p_m + \mathbf{n}_{up} = \hat{\mathbf{U}}_{ap} \hat{\Sigma} \hat{\mathbf{V}}_{ut}^H \hat{\mathbf{v}}_{ut,m} p_m + \mathbf{n}_{up}, \quad \text{Ec. (7)} \\ &= \hat{\mathbf{u}}_{ap,m} \hat{\sigma}_m p_m + \mathbf{n}_{up} \end{aligned}$$

donde  $\mathbf{r}_{up,m}$  es un vector recibido para la referencia guiada de enlace ascendente para la auto-modalidad  $m$ ;

$\hat{\sigma}_m$  es el  $m$ -ésimo elemento diagonal de  $\hat{\Sigma}$ ; y

$\hat{\mathbf{u}}_{ap,m}$  es el  $m$ -ésimo auto-vector o columna de  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ ; donde  $\hat{\mathbf{u}}_{ap} = [\hat{\mathbf{u}}_{ap,1} \hat{\mathbf{u}}_{ap,2} \dots \hat{\mathbf{u}}_{ap,N_{ap}}]$ .

La ecuación (7) muestra que la referencia guiada de enlace ascendente recibida en el punto de acceso, en ausencia de ruido, es aproximadamente igual a  $\hat{\mathbf{u}}_{ap,m} \hat{\sigma}_m p_m$ . El punto de acceso puede obtener una estimación de la respuesta de canal de enlace ascendente en base a la referencia guiada enviada por el terminal de usuario, usando diversas técnicas de estimación.

En una realización, para obtener una estimación de  $\hat{\mathbf{u}}_{ap,m}$ , el vector recibido  $\mathbf{r}_{up,m}$  es multiplicado primero por el conjugado complejo del símbolo piloto, o  $p_m^*$ , y luego integrado sobre múltiples símbolos guiados recibidos para cada auto-modalidad, para obtener un vector  $\bar{\mathbf{r}}_{up,m}$ , que es una estimación de  $\hat{\mathbf{u}}_{ap,m} \hat{\sigma}_m$

para la auto-modalidad  $m$ . Dado que los auto-vectores tienen potencia unitaria, el valor singular  $\hat{\sigma}_m$  para cada auto-modalidad puede ser estimado en base a la potencia recibida de la referencia guiada de enlace ascendente para esa auto-modalidad, que es  $\hat{\sigma}_m = \sqrt{\|\hat{\mathbf{r}}_{up,m}\|^2}$ . Cada uno de los  $N_{ap}$  elementos de la estimación  $\hat{\mathbf{u}}_{ap,m}$  se obtiene dividiendo un elemento correspondiente de los  $N_{ap}$  elementos de  $\hat{\mathbf{r}}_{up,m}$  entre  $\hat{\sigma}_m$

5 En otra realización, una estimación de  $\hat{\mathbf{u}}_{ap,m}$  se obtiene en base al vector recibido  $\hat{\mathbf{r}}_{up,m}$  y usando una técnica de MMSE. Dado que los símbolos piloto  $p_m$  son conocidos, el punto de acceso puede obtener la estimación de  $\hat{\mathbf{u}}_{ap,m}$  de modo que se minimice el error cuadrado medio entre un símbolo piloto  $p_m$  recibido (que se obtiene después de realizar el filtrado apareado sobre el vector recibido  $\hat{\mathbf{r}}_{up,m}$  con  $\hat{\mathbf{v}}_{ut,m}$ ) y el símbolo piloto transmitido  $p_m$ .

15 El punto de acceso puede realizar procesamiento adicional sobre las estimaciones de  $\hat{\mathbf{u}}_{ap,m}$ , para  $m = 1 \dots N_s$ . Por ejemplo, dado que estas estimaciones se obtienen para un auto-vector a la vez, las  $N_s$  estimaciones de auto-vectores pueden no ser ortogonales entre sí, debido, por ejemplo, al ruido en la referencia guiada recibida, a cambios en la respuesta de canal MIMO, etc. El punto de acceso puede luego realizar la ortogonalización de Gram-Schmidt sobre las  $N_s$  estimaciones de auto-vectores, para obtener vectores de transmisión ortogonales. En cualquier caso, el punto de acceso obtiene una matriz de transmisión  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ , que es una estimación de  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ , que a su vez es obtenida por el terminal de usuario en base a  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ . El punto de acceso usa la matriz de transmisión  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$  para realizar el procesamiento espacial para la transmisión de enlace descendente.

### 1. Calibración de seguimiento

25 Las matrices de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ , obtenidas de la calibración inicial, pueden contener errores, debido a diversos orígenes, tales como (1) estimaciones de canal imperfectas  $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$  y  $\hat{\mathbf{H}}_{up}$ , usadas para la calibración inicial, (2) cambios en las cadenas de transmisión / recepción en el punto de acceso y el terminal de usuario, etc. Los errores en las matrices de corrección provocan errores tanto en (1) la matriz de transmisión  $\hat{\mathbf{v}}_{ut}$  usada por el terminal de usuario para el procesamiento espacial, y obtenida de  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , como en (2) la matriz de transmisión  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ , usada por el punto de acceso para el procesamiento espacial, y obtenida de la referencia guiada de enlace ascendente enviada usando  $\hat{\mathbf{v}}_{ut}$ . Las prestaciones mejoradas pueden obtenerse si los errores en las matrices de corrección pueden ser estimados y eliminados.

35 El punto de acceso y / o el terminal de usuario pueden realizar la calibración de seguimiento para estimar los errores en las matrices de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ . Para mayor claridad, la siguiente descripción es para la calibración de seguimiento por parte del terminal de usuario. Para la calibración de seguimiento por parte del terminal de usuario, el punto de acceso transmite una señal piloto MIMO por el enlace descendente usando la matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  y también transmite una referencia guiada por el enlace descendente, usando la matriz de transmisión  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$  y la matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ . La referencia guiada de enlace descendente puede ser expresada como:  $\mathbf{x}_{dn,m} = \hat{\mathbf{K}}_{ap} \hat{\mathbf{u}}_{ap,m} p_m$ , donde  $\hat{\mathbf{U}}_{ap} = [\hat{\mathbf{u}}_{ap,1} \ \hat{\mathbf{u}}_{ap,2} \ \dots \ \hat{\mathbf{u}}_{ap,N_{ap}}]$ . El terminal de usuario puede obtener una estimación de  $\mathbf{v}_{ut}^{\Sigma T}$  en base a la referencia guiada de enlace descendente recibida, de manera similar a lo descrito anteriormente para la referencia guiada de enlace ascendente. Para mayor simplicidad, la estimación de  $\mathbf{v}_{ut}^{\Sigma T}$ , obtenida de



la referencia guiada de enlace descendente, se llama una matriz de transmisión  $\tilde{\mathbf{V}}_a$  "efectiva recibida", que es una matriz no normalizada que incluye una estimación de  $\mathbf{V}_{ut}$ , así como una estimación de  $\Sigma$ . (Para mayor claridad, el "~" encima de una matriz indica que es una matriz no normalizada). El terminal de usuario también obtiene otra versión de  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$  desde la señal piloto MIMO enviada por el punto de acceso.

Los errores en las matrices de corrección  $\mathbf{K}_{ap}$  y  $\mathbf{K}_{ut}$  pueden ser representados, respectivamente, por las matrices diagonales de error de calibración  $\mathbf{Q}'_{ap}$  y  $\mathbf{Q}'_{ut}$ . Las matrices de corrección  $\mathbf{K}_{ap}$  y  $\mathbf{K}_{ut}$  pueden ser expresadas entonces como:

$$\hat{\mathbf{K}}_{ap} = \mathbf{K}_{ap} \mathbf{Q}'_{ap} \quad y \quad \hat{\mathbf{K}}_{ut} = \mathbf{K}_{ut} \mathbf{Q}'_{ut} . \quad \text{Ec. (8)}$$

Si los errores en las matrices de corrección son pequeños, entonces los elementos diagonales de  $\mathbf{Q}'_{ap}$  y  $\mathbf{Q}'_{ut}$  son valores complejos cercanos a  $1 + j0$ . La estimación calibrada de respuesta de canal de enlace descendente,  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , puede entonces ser expresada como:

$$\hat{\mathbf{H}}_{cdn} = \hat{\mathbf{H}}_{dn} \hat{\mathbf{K}}_{ap} = \hat{\mathbf{H}}_{dn} \mathbf{K}_{ap} \mathbf{Q}'_{ap} , \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\hat{\mathbf{H}}_{cdn} \mathbf{Q}'_{ap}^{-1} = \hat{\mathbf{H}}_{dn} \mathbf{K}_{ap} .$$

Las matrices  $\mathbf{Q}'_{ap}$  y  $\mathbf{Q}'_{ut}$  contienen, respectivamente, los "verdaderos" errores en  $\mathbf{K}_{ap}$  y  $\mathbf{K}_{ut}$ . Una conjetura o estimación de  $\mathbf{Q}'_{ap}$  y  $\mathbf{Q}'_{ut}$  puede ser indicada, respectivamente, como  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ . Un canal de enlace descendente "hipotetizado" puede ser definido como:

$$\mathbf{H}_{hyp} = \hat{\mathbf{H}}_{cdn} \mathbf{Q}_{ap}^{-1} . \quad \text{Ec. (10)}$$

Un canal de enlace descendente hipotetizado es una conjetura de  $\hat{\mathbf{H}}_{dn} \mathbf{K}_{ap}$ , y se obtiene bajo la hipótesis de que el error en la matriz de corrección, correcta y aplicada,  $\mathbf{K}_{ap}$ , es  $\mathbf{Q}_{ap}$ . Si  $\mathbf{Q}_{ap}$  es una conjetura perfecta de  $\mathbf{Q}'_{ap}$  en la ecuación (10) y  $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$  es una estimación perfecta de  $\mathbf{H}_{dn}$  en la ecuación (9), entonces  $\mathbf{H}_{hyp} = \mathbf{H}_{cdn}$  y  $\mathbf{H}_{hyp}^T = \mathbf{H}_{cup}$ .

El procesamiento espacial en el punto de acceso puede ser expresado como:

$$\hat{\mathbf{U}}_{ap} \hat{\Sigma} = \hat{\mathbf{H}}_{cup} \hat{\mathbf{V}}_{ut} = \hat{\mathbf{H}}_{up} \hat{\mathbf{K}}_{ut} \hat{\mathbf{V}}_{ut} = \hat{\mathbf{H}}_{up} \mathbf{K}_{ut} \mathbf{Q}'_{ut} \hat{\mathbf{V}}_{ut} , \quad \text{Ec. (11)}$$

donde  $\mathbf{V}_{ut}$  se obtiene de la descomposición en valores singulares de  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , que se obtiene de la señal piloto MIMO de enlace descendente. El terminal de usuario no tiene el valor para  $\mathbf{Q}'_{ap}$ , sino solamente su conjetura  $\mathbf{Q}_{ap}$ . El terminal de usuario calcula por tanto una matriz de transmisión no normalizada  $\tilde{\mathbf{U}}_{rx}$  que, hipotéticamente, habría sido obtenida por el punto de acceso si las matrices de errores de calibración fueran  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ , de la siguiente manera:

$$\tilde{\mathbf{U}}_{rx} = \mathbf{H}_{hyp}^T \mathbf{Q}_{ut} \hat{\mathbf{V}}_{ut} = (\hat{\mathbf{H}}_{cdn} \mathbf{Q}_{ap}^{-1})^T \mathbf{Q}_{ut} \hat{\mathbf{V}}_{ut} . \quad \text{Ec. (12)}$$

La ecuación (12) es igual a la ecuación (11) si  $\underline{Q}_{ap}$  es una conjetura perfecta de  $\underline{Q}'_{ap}$  y  $\underline{Q}_{ut}$  es una conjetura perfecta de  $\underline{Q}'_{ut}$ . Si es este el caso, entonces  $\underline{H}_{hyp} = \hat{\underline{H}}_{dn} \underline{K}_{ap}$ .

5 El terminal de usuario realiza entonces el procesamiento sobre  $\underline{U}_{rx}$  de la misma manera que el punto de acceso lo habría realizado sobre una referencia guiada de enlace ascendente recibida, y obtiene una matriz de transmisión "generada"  $\underline{U}_g$ , que es una matriz de transmisión normalizada que se parece a  $\hat{\underline{U}}_{ap}$ . Por ejemplo, el punto de acceso puede realizar la ortogonalización de Gram-Schmidt de los auto-  
 10 vectores recibidos  $\hat{\underline{u}}_{ap,m}$  a fin de mejorar las prestaciones de sus vectores de guía de transmisión. En este caso, el terminal de usuario realizaría la misma ortogonalización sobre los auto-vectores de  $\underline{U}_{rx}$ . El terminal de usuario sencillamente emula el procesamiento que es realizado normalmente tanto por el punto de acceso como por el terminal de usuario, si bien bajo una hipótesis de errores de calibración representados por  $\underline{Q}_{ap}$  y  $\underline{Q}_{ut}$ . La matriz  $\underline{U}_g$  habría sido usada por el punto de acceso para transmitir la referencia guiada de enlace descendente y para el procesamiento espacial de la transmisión de enlace descendente.

15 El procesamiento espacial en el terminal de usuario puede ser expresado como:

$$\underline{V}_g \underline{\Sigma}_g^T = \hat{\underline{H}}_{cdn} \underline{U}_g = \hat{\underline{H}}_{dn} \hat{\underline{K}}_{ap} \underline{U}_g = \hat{\underline{H}}_{dn} \underline{K}_{ap} \underline{Q}'_{ap} \underline{U}_g . \quad \text{Ec. (13)}$$

Nuevamente, el terminal de usuario no tiene  $\underline{Q}'_{ap}$ , sino solamente su conjetura  $\underline{Q}_{ap}$ . El terminal de  
 20 usuario calcula por tanto una matriz de transmisión hipotetizada  $\underline{V}_{hyp}$  por sí mismo de la siguiente manera:

$$\underline{V}_{hyp} = \underline{H}_{hyp} \underline{Q}_{ap} \underline{U}_g . \quad \text{Ec. (14)}$$

La ecuación (14) es igual a la ecuación (13) si  $\underline{H}_{hyp}$  es una conjetura perfecta de  $\hat{\underline{H}}_{dn} \underline{K}_{ap}$  y  $\underline{Q}_{ap}$  es una  
 25 conjetura perfecta de  $\underline{Q}'_{ap}$ . La matriz  $\underline{V}_{hyp}$  es una matriz no normalizada que incluye una matriz de transmisión  $\underline{V}_g$  del terminal de usuario (que corresponde a la matriz  $\underline{U}_g$  de transmisión del punto de acceso), así como una matriz diagonal  $\underline{\Sigma}_g$  (que se parece a  $\underline{\Sigma}$ ). La hipótesis es que la matriz  $\underline{V}_{hyp}$  ha sido recibida por el terminal de usuario con (1) la transmisión por el terminal de usuario de una referencia guiada de enlace ascendente, usando  $\hat{\underline{v}}_{ut}$ , (2) la transmisión por el punto de acceso de una referencia  
 30 guiada de enlace descendente, usando  $\underline{U}_g$ , (4) teniendo las matrices de corrección  $\underline{K}_{ap}$  y  $\hat{\underline{K}}_{ut}$  los errores indicados por las matrices  $\underline{Q}_{ap}$  y  $\underline{Q}_{ut}$ , respectivamente, y (5) suponiendo que no hay ningún error de estimación de canal en  $\hat{\underline{H}}_{cdn}$ , procedente de la señal piloto MIMO de enlace descendente.

Las ecuaciones (12) y (14) son correctas si las matrices de errores de calibración  $\underline{Q}_{ap}$  y  $\underline{Q}_{ut}$  indican  
 35 correctamente los verdaderos errores en las matrices de corrección  $\hat{\underline{K}}_{ap}$  y  $\hat{\underline{K}}_{ut}$ , respectivamente. La diferencia entre la matriz de transmisión efectiva recibida,  $\underline{V}_a$ , obtenida de la referencia guiada de enlace descendente, y la matriz de transmisión hipotetizada  $\underline{V}_{hyp}$ , obtenida de la señal piloto MIMO de enlace descendente, puede ser calculada de la siguiente manera:

$$\underline{E} = \underline{V}_a - \underline{V}_{hyp} , \quad \text{Ec. (15)}$$

40 donde  $\underline{E}$  es una matriz, de dimensiones  $N_{ut} \times N_{ap}$ , de errores entre  $\underline{V}_a$  y  $\underline{V}_{hyp}$ . La matriz de error  $\underline{E}$  da una indicación de la exactitud de la conjetura para  $\underline{Q}_{ap}$  y  $\underline{Q}_{ut}$ . Diversos procedimientos adaptativos

pueden ser usados para ajustar las matrices  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ , para llevar la matriz de error  $\mathbf{E}$  hacia el cero. Tales procedimientos adaptativos incluyen un procedimiento adaptativo de MMSE y un procedimiento adaptativo de la pendiente más empinada. Los elementos diagonales de  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$  pueden ser inicializados con  $1 + j0$  para los procedimientos adaptativos.

5 Para el procedimiento adaptativo de MMSE, se calculan las derivadas parciales aproximadas de los elementos de  $\mathbf{E}$  con respecto a los elementos de  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ . Si el elemento "conductor" (que es el elemento superior más a la izquierda) de  $\mathbf{K}_{ap}$  es fijado en  $1 + j0$  por la calibración inicial, entonces este elemento no necesita ser ajustado. Además, la matriz de error  $\mathbf{E}$  no es afectada por la magnitud de los  
10 elementos en  $\mathbf{Q}_{ut}$ . Por tanto,  $\mathbf{Q}_{ut}$  puede ser normalizada, por ejemplo, definiendo que el componente real del elemento conductor de  $\mathbf{Q}_{ut}$  sea 1,0. Además, un auto-vector puede ser ajustado a escala por cualquier número complejo de magnitud unitaria (o rotado en cualquier fase) sin afectar sus prestaciones. Por tanto, puede ser seleccionado un conjunto de fases para hacer que  $\mathbf{V}_{hyp}$  esté cerca de  $\mathbf{V}_a$  sin ninguna pérdida de generalidad. Esta propiedad permite el ajuste a escala de  $\mathbf{Q}_{ut}$  en un factor  
15 arbitrario de magnitud unitaria, por lo que puede definirse que el componente imaginario del elemento conductor de  $\mathbf{Q}_{ut}$  sea 0,0.

El procedimiento adaptativo de MMSE puede ser realizado de la siguiente manera. Sea  $\mathbf{q}$  un vector real de longitud  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$  y compuesto por los componentes reales e imaginarios de los elementos  
20 diagonales de  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ , excepto los elementos conductores, que son fijados en 1,0.

El vector  $\mathbf{q}$  puede ser definido como:

$$q_{2(i-2)+1} = \text{Re}\{Q_{ap}(i, i)\}, \quad \text{para } i = 2 \dots N_{ap},$$

$$q_{2(i-1)} = \text{Im}\{Q_{ap}(i, i)\}, \quad \text{para } i = 2 \dots N_{ap},$$

25

$$q_{2(i+N_{ap}-2)-1} = \text{Re}\{Q_{ut}(i, i)\}, \quad \text{para } i = 2 \dots N_{ut},$$

y

$$q_{2(i+N_{ap}-2)} = \text{Im}\{Q_{ut}(i, i)\}, \quad \text{para } i = 2 \dots N_{ut},$$

30 donde  $q_i$  es el  $i$ -ésimo elemento de  $\mathbf{q}$ ;  
 $Q_{ap}(i, i)$  es el  $i$ -ésimo elemento diagonal de  $\mathbf{Q}_{ap}$ ; y  
 $Q_{ut}(i, i)$  es el  $i$ -ésimo elemento diagonal de  $\mathbf{Q}_{ut}$ .

Los elementos de índice impar de  $\mathbf{q}$  son para el componente real de los elementos diagonales de  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  
35  $\mathbf{Q}_{ut}$ , y los elementos de índice par de  $\mathbf{q}$  son para el componente imaginario de los elementos diagonales de  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ . Los primeros  $2N_{ap} - 2$  elementos de  $\mathbf{q}$  son para los  $N_{ap} - 1$  elementos diagonales distintos al elemento conductor de  $\mathbf{Q}_{ap}$ , y los últimos  $2N_{ut} - 2$  elementos de  $\mathbf{q}$  son para los  $N_{ut} - 1$  elementos diagonales distintos al elemento conductor de  $\mathbf{Q}_{ut}$ .

40 Sea  $\mathbf{e}$  un vector real de longitud  $2N_{ap}N_{ut}$ , y compuesto por los componentes reales e imaginarios de los elementos de  $\mathbf{E}$ . El vector  $\mathbf{e}$  puede ser definido como:

$$e_{2(i+(j-1)N_{ut})-1} = \text{Re}\{E(i, j)\}, \quad \text{para } i = 1 \dots N_{ut} \text{ y } j = 1 \dots N_{ap},$$

y

45

$$e_{2(i+(j-1)N_{ut})} = \text{Im}\{E(i, j)\}, \quad \text{para } i = 1 \dots N_{ut} \text{ y } j = 1 \dots N_{ap},$$

donde  $e_i$  es el  $i$ -ésimo elemento de  $\underline{\mathbf{e}}$ ; y  $E(i, j)$  es el elemento en la  $i$ -ésima fila y la  $j$ -ésima columna de  $\underline{\mathbf{E}}$ .

5 Los elementos con índice impar de  $\underline{\mathbf{e}}$  son para el componente real de los elementos de  $\underline{\mathbf{E}}$ , y los elementos de índice par de  $\underline{\mathbf{e}}$  son para el componente imaginario de los elementos de  $\underline{\mathbf{E}}$ . El vector de errores  $\underline{\mathbf{e}}$  puede ser obtenido evaluando las ecuaciones (10), (12), (14) y (15) con el vector  $\underline{\mathbf{q}}$ .

10 Para el procedimiento adaptativo de MMSE, la derivada parcial de un componente real o imaginario de un elemento en  $\underline{\mathbf{E}}$ , con respecto a un componente real o imaginario de un elemento en  $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$  o  $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ , puede ser generada perturbando el componente del elemento en  $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$  o  $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ , y calculando la función definida por las ecuaciones (10), (12), (14) y (15). Como parte del cálculo para  $\underline{\mathbf{V}}_{hyp}$ , puede seleccionarse un único término  $e^{ix}$ , de modo que se minimice  $|\underline{\mathbf{V}}_a - e^{ix} \cdot \underline{\mathbf{V}}_{hyp}|^2$ . Esto se hace para normalizar la fase del elemento conductor de  $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ .

15 Las derivadas parciales aproximadas de los elementos de  $\underline{\mathbf{e}}$  con respecto a los elementos de  $\underline{\mathbf{q}}$  pueden ser expresadas como:

$$A_{j,i} = \frac{\partial e_j}{\partial q_i} \cong \frac{e_j(\underline{\mathbf{q}} + \underline{\Delta}_i) - e_j(\underline{\mathbf{q}})}{\delta}, \quad \begin{array}{l} \text{para } i = 1 \dots 2(N_{ap} + N_{ut} - 2) \\ \text{y } j = 1 \dots 2N_{ap}N_{ut} \end{array} \quad \text{Ec. (16)}$$

20 donde  $\underline{\Delta}_i$  es un vector de longitud  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$  y que contiene un pequeño valor real de  $\delta$  para el  $j$ -ésimo elemento y ceros en el resto; y  $A_{j,i}$  es la derivada parcial aproximada del  $j$ -ésimo elemento de  $\underline{\mathbf{e}}$  con respecto al  $i$ -ésimo elemento de  $\underline{\mathbf{q}}$ .

25 La derivada parcial aproximada  $A_{j,i}$  puede obtenerse de la siguiente manera. Un vector  $\underline{\mathbf{q}}_i$  se calcula primera como  $\underline{\mathbf{q}}_i = \underline{\mathbf{q}} + \underline{\Delta}_i$ . La función definida por las ecuaciones (10), (12) y (14) se evalúa luego para  $\underline{\mathbf{q}}_i$  (que contiene  $\underline{\mathbf{Q}}_{ap,i}$  y  $\underline{\mathbf{Q}}_{ut,i}$ ), para obtener una nueva (o "revisada") matriz de transmisión hipotetizada  $\underline{\mathbf{V}}_{hyp,i}$ ,  $\underline{\mathbf{V}}_{hyp,i}$  se resta luego de  $\underline{\mathbf{V}}_a$  para obtener una nueva matriz de errores  $\underline{\mathbf{E}}_i = \underline{\mathbf{V}}_a - \underline{\mathbf{V}}_{hyp,i}$ , que se usa para formar un nuevo vector de errores  $\underline{\mathbf{e}}_i$ . El  $j$ -ésimo elemento de  $\underline{\mathbf{e}}$ , que se indica como  $e_j(\underline{\mathbf{q}})$  en la ecuación (16), se resta luego del  $j$ -ésimo elemento de  $\underline{\mathbf{e}}_i$ , lo que se indica como  $e_j(\underline{\mathbf{q}} + \underline{\Delta}_i)$  en la ecuación (16). El resultado de la resta se divide entre  $\delta$  para obtener  $A_{j,i}$ .

30 El cálculo para las ecuaciones (10), (12), (14) y (15) se realiza para cada uno de los  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$  elementos de  $\underline{\mathbf{q}}$  para obtener un correspondiente vector nuevo de errores  $\underline{\mathbf{e}}_i$ . Para cada nuevo vector de errores  $\underline{\mathbf{e}}_i$ , los  $2N_{ap}N_{ut}$  elementos de  $\underline{\mathbf{e}}$  se restan de los  $2N_{ap}N_{ut}$  elementos de  $\underline{\mathbf{e}}_i$ , elemento por elemento, para obtener  $2N_{ap}N_{ut}$  derivadas parciales aproximadas de los  $2N_{ap}N_{ut}$  elementos de  $\underline{\mathbf{e}}$  con respecto al  $i$ -ésimo elemento de  $\underline{\mathbf{q}}$ . Una matriz  $\underline{\mathbf{A}}$  de dimensiones  $2N_{ap}N_{ut}$  por  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$  puede formarse con todas las derivadas parciales para todos los elementos de  $\underline{\mathbf{e}}$  y  $\underline{\mathbf{q}}$ . Cada columna de  $\underline{\mathbf{A}}$  contiene  $2N_{ap}N_{ut}$  derivadas parciales aproximadas para los  $2N_{ap}N_{ut}$  elementos de  $\underline{\mathbf{e}}$ , con respecto a un elemento de  $\underline{\mathbf{q}}$ . Las  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$  columnas de  $\underline{\mathbf{A}}$  son para los  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$  elementos  $\underline{\mathbf{q}}$ .

40 Si las relaciones en las ecuaciones (10), (12), (14) y (15) son aproximadamente lineales, entonces una estimación de la diferencia entre la conjetura de los errores de calibración en  $\underline{\mathbf{q}}$  y los errores de calibración efectivos puede ser expresada como:

$$\underline{\mathbf{y}} = \underline{\mathbf{A}}^{-1} \underline{\mathbf{e}}, \quad \text{Ec. (17)}$$

45 donde  $\underline{\mathbf{y}}$  es un vector de actualización para la diferencia estimada entre  $\underline{\mathbf{q}}$  y los errores de calibración efectivos. El vector de actualización  $\underline{\mathbf{y}}$  tiene el mismo formato y la misma dimensión que el vector  $\underline{\mathbf{q}}$ , que

es un vector real compuesto por los componentes reales e imaginarios de los elementos diagonales de  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ , distintos a los elementos conductores.

5 Si  $\mathbf{A}$  no es una matriz cuadrada, lo cual es el caso habitualmente, entonces no existe la inversa matricial simple. La pseudo-inversa de Moore-Penrose de  $\mathbf{A}$  puede usarse entonces para la ecuación (17). Esta pseudo-inversa es simplemente una matriz que satisface las ecuaciones  $\mathbf{AA}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{A}$  y  $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{AA}^{-1} = \mathbf{A}^{-1}$ . La pseudo-inversa puede ser generada realizando la descomposición en valores singulares de  $\mathbf{A}$ , que es  $\mathbf{A} = \mathbf{U}_a \mathbf{D} \mathbf{V}_a^H$ , y calculando la pseudo-inversa como  $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{U}_a^H \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V}_a$ , donde  $\mathbf{D}^{-1}$  es una matriz diagonal compuesta por las inversas de los correspondientes elementos diagonales no nulos de  $\mathbf{D}$ .

10 La matriz  $\mathbf{A}$  de derivadas parciales se calcula bajo una hipótesis de que la función definida por las ecuaciones (10) a (13) es aproximadamente lineal para los errores de calibración del tamaño que se está evaluando. Dado que la hipótesis de linealidad no es completamente exacta, el procedimiento puede ser iterado múltiples veces para determinar los errores de calibración correctos. Para algunos casos, el procedimiento no converge. Sin embargo, la convergencia puede lograrse generalmente, seleccionando simplemente una conjetura inicial distinta para los errores de calibración. Si no se obtiene la convergencia, el terminal de usuario también puede obtener otra versión de  $\hat{\mathbf{V}}_a$  y  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , en base a otra estimación de la referencia guiada de enlace descendente y la señal piloto MIMO de enlace descendente, y realizar el procedimiento adaptativo de MMSE usando estas nuevas matrices.

15 Si las ecuaciones (10), (12), (14) y (15) son lineales, entonces  $\mathbf{y} + \mathbf{q}$  minimizaría el cuadrado medio de los elementos de  $\mathbf{e}$ . Sin embargo, dado que estas ecuaciones no son lineales,  $\mathbf{q}$  es reemplazado por  $\mathbf{y} + \mathbf{q}$  y se repite el procedimiento. El vector de errores de calibración puede luego ser actualizado de la siguiente manera:

25

$$\mathbf{q}_{mmse}(n+1) = \mathbf{y}(n) + \mathbf{q}_{mmse}(n), \quad \text{Ec. (18)}$$

donde  $n$  es un índice para el número de iteración;

$\mathbf{q}_{mmse}(n)$  es el vector de errores de calibración para la  $n$ -ésima iteración;

$\mathbf{y}(n)$  es el vector de actualización obtenido para la  $n$ -ésima iteración; y

30  $\mathbf{q}_{mmse}(n+1)$  es el vector de errores de calibración para la  $(n+1)$ -ésima iteración.

El cálculo descrito anteriormente puede ser repetido para cualquier número de iteraciones. Cada iteración usa el vector de errores de calibración  $\mathbf{q}_{mmse}(n+1)$  actualizado, obtenido de la iteración anterior. El procedimiento puede terminar cuando el vector  $\mathbf{y}(n)$  es suficientemente pequeño. Por ejemplo, la condición de terminación puede ser  $\|\mathbf{y}(n)\|^2 = y < y_{th1}$ , donde  $y$  es la suma de los cuadrados de la magnitud de los elementos de  $\mathbf{y}(n)$  y  $y_{th1}$  es un valor de umbral. Como otro ejemplo, la condición de terminación puede ser  $y_i < y_{th2}$ , para todo  $i$ , donde  $y_i$  es el  $i$ -ésimo elemento de  $\mathbf{y}(n)$  y  $y_{th2}$  es otro valor de umbral. Después de que se han completado todas las iteraciones, las matrices para las estimaciones finales de errores de calibración se indican como  $\mathbf{Q}_{ap,final}$  y  $\mathbf{Q}_{ut,final}$ .

40 Para el procedimiento adaptativo de la pendiente más empinada, un error conjunto puede ser definido como:

$$z = \|\mathbf{E}\|^2 = \|\tilde{\mathbf{V}}_a - \tilde{\mathbf{V}}_{hyp}\|^2. \quad \text{Ec. (19)}$$

45 El error conjunto,  $z$ , se obtiene sumando los cuadrados de la magnitud de los elementos de  $\mathbf{E}$ . Las derivadas parciales de  $z$  con respecto a los elementos de  $\mathbf{q}$  pueden ser calculadas de la siguiente manera:

$$g_i = \frac{\partial z}{\partial q_i} \cong \frac{z(\mathbf{q} + \Delta_i) - z(\mathbf{q})}{\delta}, \quad \text{para } i = 1 \dots 2(N_{ap} + N_{ut} - 2), \quad \text{Ec. (20)}$$

donde  $g_i$  es la derivada parcial aproximada de  $z$  con respecto al  $i$ -ésimo elemento de  $\mathbf{q}$  y  $\Delta_i$  es un vector de longitud  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$ , y que contiene un valor real pequeño de  $\delta$  para el  $i$ -ésimo elemento y ceros en el resto. La derivada parcial aproximada  $g_i$  puede ser obtenida de la siguiente manera. Se calcula primero un vector  $\mathbf{q}_i$  como  $\mathbf{q}_i = \mathbf{q} + \Delta_i$ . La función definida por las ecuaciones (10), (12), (14) y (15) se evalúa para  $\mathbf{q}_i$ , para obtener un nuevo vector de errores  $\mathbf{e}_i$ . El error conjunto  $z_i$  se calcula entonces para el nuevo vector de errores  $\mathbf{e}_i$  según se muestra en la ecuación (19). El error conjunto  $z$  obtenido con  $\mathbf{q}$ , que se indica como  $z(\mathbf{q})$  en la ecuación (20), se resta luego del error conjunto  $z_i$  obtenido con  $\mathbf{q}_i$ , lo que se indica como  $z(\mathbf{q} + \Delta_i)$  en la ecuación (20). El resultado de la resta se divide entre  $\delta$  para obtener  $g_i$ . El cálculo se repite para cada uno de los  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$  elementos de  $\mathbf{q}$ . Un vector  $\mathbf{g}$  de dimensión  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$  puede formarse con las derivadas parciales aproximadas obtenidas para los  $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$  elementos de  $\mathbf{q}$ . Cada elemento de  $\mathbf{g}$  es la pendiente del error conjunto, evaluada en un correspondiente elemento de  $\mathbf{q}$ .

El vector de errores de calibración puede luego ser actualizado de la siguiente manera:

$$\mathbf{q}_{sd}(n+1) = \mathbf{q}_{sd}(n) - \delta \mathbf{g}(n) , \quad \text{Ec. (21)}$$

donde  $g(n)$  es el vector de pendientes obtenido para la  $n$ -ésima iteración, y  $\mathbf{q}_{sd}(n)$  y  $\mathbf{q}_{sd}(n+1)$  son los vectores de errores de calibración, respectivamente, para las iteraciones  $n$ -ésima y  $(n+1)$ -ésima, para el procedimiento de la pendiente más empinada. El cálculo descrito anteriormente puede ser repetido para cualquier número de iteraciones. Cada iteración usa el vector de errores de calibración actualizado  $\mathbf{q}_{sd}(n+1)$ , obtenido de la iteración anterior. El procedimiento puede terminar cuando el error conjunto  $z$  es suficientemente pequeño, p. ej., menor que un valor  $z_{th}$  de umbral.

Se han descrito dos procedimientos adaptativos en lo que antecede, para obtener estimaciones de los errores de calibración efectivos. También pueden usarse otros procedimientos, adaptativos y no adaptativos.

El terminal de usuario puede actualizar su matriz de corrección para dar cuenta de los errores de calibración, según lo siguiente:

$$\hat{\mathbf{K}}_{ut,new} = \hat{\mathbf{K}}_{ut} \mathbf{Q}_{ut,final}^{-1} . \quad \text{Ec. (22)}$$

El terminal de usuario usa la nueva matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ut,nueva}$ , en lugar de la anterior matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ , para el procesamiento espacial para la transmisión de enlace ascendente, según se muestra en la FIG. 2. El terminal de usuario puede enviar la matriz de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap,final}$  al punto de acceso, que puede luego actualizar su matriz de corrección como  $\hat{\mathbf{K}}_{ap,nueva} = \hat{\mathbf{K}}_{ap} \mathbf{Q}_{ap,final}^{-1}$ . Para reducir la cantidad de señalización, el terminal de usuario puede enviar de vuelta solamente la matriz de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap,final}$  si la matriz satisface algún umbral predeterminado.

La FIG. 3 muestra un proceso 300 realizado por el punto de acceso y el terminal de usuario para la calibración inicial, el funcionamiento normal y la calibración de seguimiento. El punto de acceso y el terminal de usuario realizan la calibración inicial para calibrar sus cadenas de transmisión y recepción, y obtener las matrices de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$  (bloque 310). La calibración inicial se describe más adelante.

A continuación, para el funcionamiento normal, el punto de acceso transmite una señal piloto MIMO de enlace descendente, usando su matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  (bloque 322). El terminal de usuario obtiene una estimación calibrada de respuesta de canal de enlace descendente,  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , en base a la señal piloto MIMO de enlace descendente (bloque 324) y realiza la descomposición en valores singulares de  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ ,

para obtener su matriz de transmisión  $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$  (bloque 326). El terminal de usuario transmite luego una referencia guiada de enlace ascendente usando  $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ , según se muestra en la ecuación (6) (bloque 328). El punto de acceso recibe la referencia guiada de enlace ascendente y obtiene su matriz de transmisión  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ , según lo descrito anteriormente (bloque 330). El punto de acceso y el terminal de usuario usan las matrices de transmisión  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$ , respectivamente, para el procesamiento espacial.

Para la calibración de seguimiento, el punto de acceso transmite una referencia guiada de enlace descendente, usando  $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ , y transmite además una señal piloto MIMO de enlace descendente usando  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  (bloque 342). El terminal de usuario obtiene la matriz efectiva de transmisión no normalizada  $\hat{\mathbf{V}}_a$  en base a la referencia guiada de enlace descendente, según lo descrito anteriormente (bloque 344). El terminal de usuario también calcula la matriz de transmisión no normalizada  $\hat{\mathbf{U}}_{rx}$  en base a su matriz de transmisión  $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$ , la estimación calibrada de respuesta de canal de enlace descendente  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$  y las matrices de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ , según se muestra en las ecuaciones (10) y (12),

$$\hat{\mathbf{U}}_{rx} = (\hat{\mathbf{H}}_{cdn} \mathbf{Q}_{ap}^{-1})^T \mathbf{Q}_{ut} \hat{\mathbf{V}}_{ut}$$
 (bloque 346). El terminal de usuario procesa además  $\hat{\mathbf{U}}_{rx}$  de la misma forma en que habría sido realizado por el punto de acceso (p. ej., realizando ortogonalización) para obtener la matriz de transmisión normalizada  $\hat{\mathbf{U}}_g$  (bloque 348). El terminal de usuario calcula luego la matriz hipotetizada de transmisión no normalizada  $\hat{\mathbf{V}}_{hyp}$  en base a la matriz de transmisión  $\hat{\mathbf{U}}_g$  y la estimación calibrada de respuesta de canal de enlace descendente  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ , según se muestra en las ecuaciones (10) y (14), que es  $\hat{\mathbf{V}}_{hyp} = \hat{\mathbf{H}}_{cdn} \hat{\mathbf{U}}_g$  (bloque 350). La matriz  $\hat{\mathbf{V}}_{hyp}$  es la matriz de transmisión no normalizada que el terminal de usuario habría recibido si el punto de acceso transmite una referencia guiada de enlace descendente usando  $\hat{\mathbf{U}}_g$ . El terminal de usuario revisa luego las matrices de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$  en base a las matrices de transmisión  $\hat{\mathbf{V}}_a$  y  $\hat{\mathbf{V}}_{hyp}$  (bloque 352). Los bloques 346 a 352 pueden ser realizados usando un procedimiento adaptativo. El terminal de usuario puede a continuación actualizar su matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$  con la matriz de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ut}$  (bloque 354) y el punto de acceso puede a continuación actualizar su matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  con la matriz de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap}$  (bloque 356).

La FIG. 4 muestra un procedimiento adaptativo de MMSE 400, que puede ser usado para los bloques 346 a 352 en la FIG. 3. La matriz de transmisión hipotetizada  $\hat{\mathbf{V}}_{hyp}$  se calcula primero en base a  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$  y  $\hat{\mathbf{U}}_g$  (bloque 410). El bloque 410 corresponde a los bloques 346 a 350 en la FIG. 3. La matriz de errores  $\mathbf{E}$  se calcula luego como la diferencia entre las matrices de transmisión  $\hat{\mathbf{V}}_a$  y  $\hat{\mathbf{V}}_{hyp}$ , según se muestra en la ecuación (15) (bloque 412). Las derivadas parciales de los elementos en la matriz de errores  $\mathbf{E}$ , con respecto a cada uno de los elementos seleccionados (p. ej., todos los elementos diagonales excepto los elementos conductores) en las matrices de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$  se obtienen luego, según se muestra en la ecuación (16) (bloque 414). La matriz  $\mathbf{E}$  y las matrices  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$  pueden ser dispuestas en forma de vectores para facilitar el cálculo, según lo descrito anteriormente. Las derivadas parciales pueden ser obtenidas por separado para los componentes reales e imaginarios de los elementos en las matrices, como también se ha descrito anteriormente. El vector de actualización  $\mathbf{y}$  se calcula luego en base a la matriz  $\mathbf{A}$  de derivadas parciales y la matriz de errores  $\mathbf{E}$ , según se muestra en la ecuación (17) (bloque 416). Las matrices de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$  se actualizan luego con el vector de actualización  $\mathbf{y}$ , según se muestra en la ecuación (18) (bloque 418). Se toma luego una determinación en cuanto a si el vector de actualización  $\mathbf{y}$  satisface o no una condición de terminación (bloque 420). Si la respuesta es 'sí', entonces el proceso 400 termina. En otro caso, el proceso vuelve al bloque 410 y realiza otra iteración.

La FIG. 5 muestra un procedimiento adaptativo de la pendiente más empinada 500, que también puede usarse para los bloques 346 a 352 en la FIG. 3. La matriz de transmisión hipotetizada  $\mathbf{V}_{hyp}$  se calcula primero sobre  $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$  y  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ . (bloque 510). Se calcula luego el error conjunto  $z$  como  $z = \|\mathbf{V}_a - \hat{\mathbf{V}}_{hyp}\|^2$ , según se muestra en la ecuación (19) (bloque 512). Se obtienen luego las derivadas parciales para el error conjunto, con respecto a cada uno de los elementos seleccionados en las matrices de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ , según se muestra en la ecuación (20) (bloque 514). Las matrices  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$  pueden ser dispuestas en forma de vector, y las derivadas parciales pueden ser obtenidas por separado para los componentes reales e imaginarios de los elementos en las matrices. Las matrices de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$  son actualizadas luego con las derivadas parciales, según se muestra en la ecuación (21) (bloque 516). Se toma luego una determinación en cuanto a si el error conjunto  $z$  satisface o no una condición de terminación (bloque 518). Si la respuesta es 'sí', entonces el proceso 500 termina. En caso contrario, el proceso vuelve al bloque 510 y realiza otra iteración.

En la descripción anterior, el terminal de usuario estima los errores de calibración en ambas matrices de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ . Para simplificar la calibración de seguimiento, el terminal de usuario puede suponer que la matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  no contiene errores, y estimar solamente los errores en la matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ . Esto es equivalente a establecer la matriz de errores de calibración  $\mathbf{Q}_{ap}$  como la matriz identidad. Al omitir  $\mathbf{Q}_{ap}$ , las dimensiones de los vectores  $\mathbf{g}$ ,  $\mathbf{y}$  y  $\mathbf{g}$ , y de la matriz  $\mathbf{A}$ , se reducen, lo que puede luego reducir en gran medida el cálculo.

Para mayor claridad, la descripción anterior es para el caso en que el terminal de usuario realiza calibración de seguimiento. El punto de acceso también puede realizar la calibración de seguimiento. En este caso, el punto de acceso y el terminal de usuario intercambian roles en la FIG. 3. El terminal de usuario transmitirá luego una referencia guiada de enlace ascendente y una señal piloto MIMO de enlace ascendente, y el punto de acceso realizará el cálculo para obtener  $\mathbf{Q}_{ap}$  y  $\mathbf{Q}_{ut}$ .

También para mayor claridad, la calibración de seguimiento se describe para un sistema MIMO de portadora única. La calibración de seguimiento también puede ser realizada para un sistema MIMO de múltiples portadoras, que puede utilizar el multiplexado por división ortogonal de frecuencia (OFDM) o alguna otra técnica de modulación de múltiples portadoras. El OFDM divide efectivamente el ancho de banda global del sistema en múltiples ( $N_F$ ) sub-bandas ortogonales, que también se llaman tonos, sub-portadoras, contenedores y canales de frecuencia. Con el OFDM, cada sub-banda está asociada a una respectiva sub-portadora que puede ser modulada con datos. Para un sistema MIMO que utiliza el OFDM (un sistema MIMO-OFDM), el cálculo descrito anteriormente puede ser realizado para cada una de las múltiples sub-bandas. Dado que puede existir un alto grado de correlación entre sub-bandas cercanas, la calibración puede ser realizada de manera que aproveche esta correlación, por ejemplo, para reducir el número de sub-bandas para realizar la calibración de seguimiento, para acelerar la convergencia, etc.

## 2. Calibración inicial

Para la calibración inicial para obtener las matrices de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ , una entidad (ya sea el terminal de usuario o el punto de acceso) obtiene tanto la estimación efectiva de respuesta de canal de enlace descendente,  $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$ , como la estimación efectiva de respuesta de canal de enlace ascendente,  $\hat{\mathbf{H}}_{up}$ . Las estimaciones de canal  $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$  y  $\hat{\mathbf{H}}_{up}$  pueden ser obtenidas, respectivamente, en base a señales piloto MIMO de enlace descendente y de enlace ascendente. Las matrices de corrección pueden ser calculadas a partir de  $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$  y  $\hat{\mathbf{H}}_{up}$ , y usando el cálculo de razón matricial o el cálculo de MMSE.

Para el cálculo de razón matricial, se calcula primero una matriz  $\mathbf{C}$  de dimensiones  $N_{ut} \times N_{ap}$ , como:



$$\underline{\mathbf{C}} = \frac{\hat{\mathbf{H}}_{up}^T}{\hat{\mathbf{H}}_{dn}}, \quad \text{Ec. (23)}$$

donde la razón se toma elemento a elemento.

5 Los elementos diagonales en la matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  para el punto de acceso se fijan iguales a la media de las filas normalizadas de  $\underline{\mathbf{C}}$ . Cada fila de  $\underline{\mathbf{C}}$  se normaliza primero ajustando a escala cada uno de los  $N_{ap}$  elementos en esa fila con el primer elemento en la fila. La media de las filas normalizadas (indicada por un vector  $\bar{\mathbf{c}}_{fila}$ ) se calcula luego como la suma de las  $N_{ut}$  filas normalizadas, dividida entre  $N_{ut}$ . Los  $N_{ap}$  elementos diagonales de  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  se fijan luego iguales a los  $N_{ap}$  elementos de  $\bar{\mathbf{c}}_{fila}$ . Debido a la normalización, el elemento conductor de  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  es igual a la unidad.

10 Los elementos diagonales en la matriz de corrección  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$  para el terminal de usuario se fijan iguales a la media de las inversas de las columnas normalizadas de  $\underline{\mathbf{C}}$ . La  $j$ -ésima columna de  $\underline{\mathbf{C}}$ , para  $j = 1 \dots N_{ap}$ , se normaliza primero ajustando a escala cada elemento en esa columna con el  $j$ -ésimo elemento diagonal de  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ . La media de las inversas de las columnas normalizadas (indicada por un vector  $\bar{\mathbf{c}}_{col}$ ) se calcula luego (1) tomando la inversa de cada columna normalizada, donde la inversión se realiza elemento a elemento, (2) sumando las  $N_{ap}$  columnas normalizadas inversas y (3) dividiendo cada elemento en la columna resultante entre  $N_{ap}$ , para obtener  $\bar{\mathbf{c}}_{col}$ . Los  $N_{ut}$  elementos diagonales de  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$  se fijan iguales a los  $N_{ut}$  elementos de  $\bar{\mathbf{c}}_{col}$ .

20 Para el cálculo de MMSE, las matrices de corrección  $\mathbf{K}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$  se obtienen de las estimaciones efectivas de respuesta de canal de enlace descendente y de enlace ascendente,  $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$  y  $\hat{\mathbf{H}}_{up}$ , de modo que se minimice el error cuadrado medio (MSE) entre las respuestas de canal calibradas de enlace descendente y de enlace ascendente. Esta condición puede ser expresada como:

$$\min \left| (\hat{\mathbf{H}}_{dn} \hat{\mathbf{K}}_{ap})^T - \hat{\mathbf{H}}_{up} \hat{\mathbf{K}}_{ut} \right|^2, \quad \text{Ec. (24)}$$

25 que también puede ser escrita como:

$$\min \left| \hat{\mathbf{K}}_{ap} \hat{\mathbf{H}}_{dn}^T - \hat{\mathbf{H}}_{up} \hat{\mathbf{K}}_{ut} \right|^2,$$

30 donde  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}^T = \hat{\mathbf{K}}_{ap}$ , ya que  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  es una matriz diagonal.

La ecuación (24) está sujeta a la restricción de que el elemento conductor de  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  se fija igual a la unidad. Sin esta restricción, la solución trivial se obtendría con todos los elementos de las matrices  $\mathbf{K}_{ap}$  y  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$  fijados iguales a cero. En la ecuación (24), se obtiene primero una matriz  $\mathbf{Y}$  como  $\mathbf{Y} = \hat{\mathbf{K}}_{ap} \hat{\mathbf{H}}_{dn}^T - \hat{\mathbf{H}}_{up} \hat{\mathbf{K}}_{ut}$ . El cuadrado del valor absoluto se obtiene luego para cada uno de los  $N_{ap} N_{ut}$  elementos de  $\mathbf{Y}$ . El error cuadrado medio (o el error cuadrado, ya que se omite una división por  $N_{ap} N_{ut}$ ) es entonces igual a la suma de todos los valores al cuadrado.

40 El cálculo de MMSE se realiza de la siguiente manera. Para mayor simplicidad, los elementos de  $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$  se indican como  $\{a_{ij}\}$ , los elementos de  $\hat{\mathbf{H}}_{up}$  se indican como  $\{b_{ij}\}$ , los elementos diagonales de  $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$  se

indican como  $\{u_i\}$  y los elementos diagonales de  $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$  se indican como  $\{v_j\}$ , donde  $i = 1 \dots N_{ap}$  y  $j = 1 \dots N_{ut}$ . El error cuadrado medio puede ser re-escrito a partir de la ecuación (24), según lo siguiente:

$$MSE = \sum_{j=1}^{N_{ut}} \sum_{i=1}^{N_{ap}} |a_{ij}u_i - b_{ij}v_j|^2, \quad \text{Ec. (26)}$$

5 nuevamente sujeto a la restricción  $u_1 = 1$ . El mínimo error cuadrado medio puede ser obtenido tomando las derivadas parciales de la ecuación (25) con respecto a  $u$  y  $v$ , y fijando las derivadas parciales en cero. Los resultados de estas operaciones son las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{j=1}^{N_{ut}} (a_{ij}u_i - b_{ij}v_j) \cdot a_{ij}^* = 0, \quad \text{para } i = 2 \dots N_{ap}, \text{ y} \quad \text{Ec. (26a)}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{ap}} (a_{ij}u_i - b_{ij}v_j) \cdot b_{ij}^* = 0, \quad \text{para } j = 1 \dots N_{ut}, \quad \text{Ec. (26b)}$$

10 En la ecuación (26a),  $u_1 = 1$ , por lo que no hay ninguna derivada parcial para este caso, y el índice  $i$  varía entre 2 y  $N_{ap}$ .

15 El conjunto de  $N_{ap} + N_{ut} - 1$  ecuaciones en los conjuntos de ecuaciones (26a) y (26b) pueden ser expresadas más cómodamente en forma matricial, según lo siguiente:

$$\mathbf{Bk} = \mathbf{z}, \quad \text{Ec. (27)}$$

donde

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N_{ut}} |a_{2j}|^2 & 0 & \dots & 0 & -b_{21}a_{21}^* & \dots & -b_{2N_{ap}}a_{2N_{ut}}^* \\ 0 & \sum_{j=1}^{N_{ut}} |a_{3j}|^2 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \sum_{j=1}^{N_{ut}} |a_{N_{ap}j}|^2 & -b_{N_{ap}1}a_{N_{ap}1}^* & \dots & -b_{N_{ap}N_{ut}}a_{N_{ap}N_{ut}}^* \\ -a_{21}b_{21}^* & \dots & \dots & -a_{N_{ap}1}b_{N_{ap}1}^* & \sum_{i=1}^{N_{ap}} |b_{i1}|^2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \sum_{i=1}^{N_{ap}} |b_{i2}|^2 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 \\ -a_{2N_{ut}}b_{2N_{ut}}^* & \dots & \dots & -a_{N_{ap}N_{ut}}b_{N_{ap}N_{ut}}^* & 0 & \dots & 0 & \sum_{i=1}^{N_{ap}} |b_{iN_{ut}}|^2 \end{bmatrix}$$

20

$$\underline{\mathbf{k}} = \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ \dots \\ u_{N_{ap}} \\ v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_{N_{ut}} \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \underline{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ a_{11}b_{11}^* \\ a_{12}b_{12}^* \\ \dots \\ a_{1N_{ut}}b_{1N_{ut}}^* \end{bmatrix} .$$

La matriz  $\underline{\mathbf{B}}$  incluye  $N_{ap} + N_{ut} - 1$  filas, con las primeras  $N_{ap} - 1$  filas correspondientes a las  $N_{ap} - 1$  ecuaciones procedentes del conjunto de ecuaciones (26a) y las últimas  $N_{ut}$  filas correspondientes a las  $N_{ut}$  ecuaciones procedentes del conjunto de ecuaciones (26b). Los elementos de la matriz  $\underline{\mathbf{B}}$  y del vector  $\underline{\mathbf{z}}$  pueden obtenerse en base a los elementos de  $\underline{\mathbf{H}}_{dn}$  y  $\underline{\hat{\mathbf{H}}}_{up}$ . Los elementos diagonales de  $\underline{\mathbf{K}}_{ap}$  y  $\underline{\hat{\mathbf{K}}}_{ut}$  están incluidos en el vector  $\underline{\mathbf{k}}$ , que puede obtenerse como:

$$\underline{\mathbf{k}} = \underline{\mathbf{B}}^{-1} \underline{\mathbf{z}} . \tag{Ec. (28)}$$

Los resultados del cálculo de MMSE son las matrices de corrección  $\underline{\hat{\mathbf{K}}}_{ap}$  y  $\underline{\hat{\mathbf{K}}}_{ut}$  que minimizan el error cuadrado medio en las respuestas de canal calibradas de enlace descendente y de enlace ascendente, según se muestra en la ecuación (24).

### 3. Procesamiento espacial

La Tabla 2 resume el procesamiento espacial realizado por el terminal de usuario y el punto de acceso para la transmisión y recepción de datos en las auto-modalidades del canal MIMO.

Tabla 2

	Enlace ascendente	Enlace descendente
<b>Terminal de usuario</b>	Transmisión: $\underline{\mathbf{x}}_{up} = \underline{\mathbf{K}}_{ut} \underline{\hat{\mathbf{V}}}_{ut} \underline{\mathbf{s}}_{up}$	Recepción: $\underline{\hat{\mathbf{s}}}_{dn} = \underline{\hat{\Sigma}}^{-1} \underline{\hat{\mathbf{V}}}_{ut}^T \underline{\mathbf{r}}_{dn}$
<b>Punto de acceso</b>	Recepción: $\underline{\hat{\mathbf{s}}}_{up} = \underline{\hat{\Sigma}}^{-1} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_{ap}^H \underline{\mathbf{r}}_{up}$	Transmisión: $\underline{\mathbf{x}}_{dn} = \underline{\hat{\mathbf{K}}}_{ap} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_{ap}^* \underline{\mathbf{s}}_{dn}$

Para la realización mostrada en la FIG. 2 y la Tabla 2, las matrices de corrección  $\underline{\hat{\mathbf{K}}}_{ap}$  y  $\underline{\hat{\mathbf{K}}}_{ut}$  están aplicadas, respectivamente, en el sector de transmisión en el punto de acceso y en el terminal de usuario.

### 4. Sistema

La FIG. 6 muestra un diagrama de bloques de una realización del punto de acceso 110 y del terminal de usuario 150 en el sistema MIMO de TDD 100. En el enlace descendente, en el punto de acceso 110, un procesador de datos de transmisión (TX) 610 recibe datos de tráfico (es decir, bits de información) desde un origen de datos 608 y señalización y otros datos desde un controlador 630. El procesador de datos de TX 610 formatea, codifica, intercala y modula (o correlaciona con símbolos) los distintos tipos de datos y proporciona símbolos de datos. Según se usa en la presente memoria, un "símbolo de datos" es un símbolo de modulación para datos, y un "símbolo piloto" es un símbolo de modulación para señales

piloto. Los símbolos piloto son conocidos *a priori* tanto por el punto de acceso como por el terminal de usuario. Un procesador espacial de TX 620 recibe los símbolos de datos desde el procesador de datos de TX 610, realiza el procesamiento espacial sobre los símbolos de datos, multiplexa en símbolos piloto según convenga (p. ej., para la estimación de canal, la calibración, etc.) y proporciona  $N_{ap}$  flujos de símbolos de transmisión a  $N_{ap}$  moduladores (MOD) 622a a 622ap. Cada modulador 622 recibe y procesa un respectivo flujo de símbolos de transmisión para obtener un correspondiente flujo de símbolos de OFDM, que es adicionalmente procesado por una cadena de transmisión dentro del modulador, para obtener una correspondiente señal modulada de enlace descendente.  $N_{ap}$  señales moduladas de enlace descendente, desde el modulador 622a al 622ap, son luego transmitidas, respectivamente, desde las  $N_{ap}$  antenas 624a a 624ap.

En el terminal de usuario 150, las  $N_{ut}$  antenas 652a a 652ut reciben las señales moduladas de enlace descendente transmitidas, y cada antena proporciona una señal recibida a un respectivo demodulador (DEMOD) 654. Cada demodulador 654 (que incluye una cadena de recepción) realiza un procesamiento complementario para el realizado en el modulador 622 y proporciona símbolos recibidos. Un procesador espacial de recepción (RX) 660 realiza luego el procesamiento espacial sobre los símbolos recibidos desde todos los  $N_{ut}$  demoduladores 654, para obtener símbolos detectados, que son estimaciones de los símbolos de datos enviados por el punto de acceso. Para la calibración de seguimiento, el procesador espacial de RX 660 proporciona (1) una estimación calibrada de respuesta de canal de enlace descendente,  $\hat{H}_{cdn}$ , obtenida a partir de una señal piloto MIMO de enlace descendente, transmitida por el punto de acceso, y (2) símbolos recibidos para una referencia guiada de enlace descendente, transmitida por el punto de acceso. Un procesador de datos de RX 670 procesa (p. ej., decorrelaciona símbolos, desintercala y descodifica) los símbolos detectados y proporciona datos descodificados. Los datos descodificados pueden incluir datos de tráfico recuperados, señalización, etc., que son proporcionados a un sumidero de datos 672 para su almacenamiento y / o a un controlador 680 para su procesamiento adicional.

El procesamiento para el enlace ascendente puede ser el mismo que el procesamiento para el enlace descendente, o uno distinto. Los datos y la señalización son procesados (p. ej., codificados, intercalados y modulados) por un procesador de datos de TX 690, y además procesados espacialmente y multiplexados con símbolos piloto por el procesador espacial de TX 692, para obtener símbolos de transmisión. Los símbolos de transmisión son adicionalmente procesados por los moduladores 654a a 654ut, para obtener  $N_{ut}$  señales moduladas de enlace ascendente, que son luego transmitidas mediante las  $N_{ut}$  antenas 652a a 652ut al punto de acceso. El terminal de usuario 150 envía de vuelta la  $\hat{K}_{ap}$  de corrección para la calibración inicial, y puede enviar de vuelta la matriz de errores de calibración  $Q_{ap,final}$  para la calibración de seguimiento, para la implementación descrita anteriormente. En el punto de acceso 110, las señales moduladas de enlace ascendente son recibidas por las antenas 624, desmoduladas por los demoduladores 622 y procesadas por un procesador espacial de RX 640 y un procesador de datos de RX 642, en forma complementaria para la realizada en el terminal de usuario. El procesador de datos de RX 642 proporciona las matrices  $\hat{K}_{ap}$  y  $Q_{ap,final}$  al controlador 630.

Para la calibración inicial, el punto de acceso y el terminal de usuario transmiten señales piloto MIMO por el enlace descendente y el enlace ascendente, respectivamente. Cada entidad obtiene la estimación efectiva de respuesta de canal para su enlace. Una entidad (p. ej., el punto de acceso) envía la estimación de canal a la otra entidad (p. ej., el terminal de usuario) para el cálculo de las matrices de corrección  $\hat{K}_{ap}$  y  $\hat{K}_{ut}$  para ambas entidades. La entidad que obtiene las matrices de corrección usa su matriz de corrección y envía la otra matriz de corrección de vuelta a la otra entidad. Para la calibración de seguimiento, una entidad (p. ej., el punto de acceso) transmite tanto la referencia guiada como la señal piloto MIMO. La otra obtiene las matrices de errores de calibración  $Q_{ap,final}$  y  $Q_{ut,final}$  para ambas entidades, en base a las señales piloto recibidas, según lo descrito anteriormente. La entidad que obtiene las matrices de errores de calibración usa su matriz de errores de calibración y puede enviar la otra matriz de errores de calibración de vuelta a la otra entidad (p. ej., si los errores son suficientemente grandes).

Los controladores 630 y 680 controlan el funcionamiento de diversas unidades de procesamiento en el punto de acceso y el terminal de usuario, respectivamente. Los controladores 630 y / o 680 también

pueden realizar el procesamiento para la calibración inicial y de seguimiento (p. ej., el cálculo de las matrices de corrección  $K_{ap}$  y  $K_{ut}$  y de las matrices de errores de calibración  $Q_{ap,final}$  y  $Q_{ut,final}$ ). Las unidades de memoria 632 y 682 almacenan datos y códigos de programa usados, respectivamente, por los controladores 630 y 680.

5 Las técnicas de calibración descritas en la presente memoria pueden ser implementadas por diversos medios. Por ejemplo, estas técnicas pueden ser implementadas en hardware, software o una combinación de los mismos. Para una implementación en hardware, las unidades de procesamiento para realizar la calibración inicial y / o de seguimiento pueden ser implementadas dentro de uno o más  
10 circuitos integrados específicos de la aplicación (ASIC), procesadores de señales digitales (DSP), dispositivos de procesamiento de señales digitales (DSPD), dispositivos lógicos programables (PLD), formaciones de compuertas programables en el terreno (FPGA), procesadores, controladores, micro-controladores, microprocesadores, otras unidades electrónicas diseñadas para realizar las funciones descritas en la presente memoria, o una combinación de los mismos.

15 Para una implementación en software, las técnicas de calibración pueden ser implementadas con módulos (p. ej., procedimientos, funciones, etc.) que realicen las funciones descritas en la presente memoria. Los códigos de software pueden ser almacenados en una unidad de memoria (p. ej., la unidad de memoria 632 o 683 en la FIG. 6) y ejecutados por un procesador (p. ej., el controlador 630 o 680). La  
20 unidad de memoria puede ser implementada dentro del procesador, o ser externa al procesador, en cuyo caso puede estar comunicativamente acoplada con el procesador mediante diversos medios, tal como se conoce en la técnica.

25 Los encabezamientos están incluidos en la presente memoria para referencia y para ayudar a localizar ciertas secciones. Estos encabezamientos no están concebidos para limitar el ámbito de los conceptos descritos bajo los mismos en la presente memoria, y estos conceptos pueden tener aplicabilidad en otras secciones en toda la extensión de la especificación completa.

30 La descripción previa de las realizaciones divulgadas se proporciona para permitir a cualquier persona experta en la técnica comprender la presente invención, que está definida y limitada por el ámbito de las reivindicaciones adjuntas 1 a 25.

**REIVINDICACIONES**

1. Un procedimiento de calibración de canales de enlace descendente y de enlace ascendente en un sistema de comunicación inalámbrica de entradas múltiples y salidas múltiples, MIMO, que comprende:
  - 5 obtener una primera matriz de transmisión en base a una primera señal piloto recibida mediante un canal MIMO entre una entidad transmisora y una entidad receptora;
  - 10 estando dicho procedimiento **caracterizado por** obtener una segunda matriz de transmisión en base a una estimación de respuesta de canal MIMO y a matrices de errores de calibración, primera y segunda, siendo la estimación de respuesta de canal MIMO una estimación de una respuesta del canal MIMO y obtenida en base a una segunda señal piloto recibida mediante el canal MIMO, conteniendo la primera matriz de errores de calibración estimaciones de errores en una primera matriz de corrección usada para dar cuenta de las respuestas de cadenas de transmisión y recepción en la entidad transmisora, y conteniendo la segunda matriz de errores de calibración estimaciones de errores en una segunda matriz de corrección usada para dar cuenta de las respuestas de cadenas de transmisión y recepción en la entidad receptora; y
  - 20 revisar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, en base a las matrices de transmisión primera y segunda.
2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la primera señal piloto es una señal piloto guiada recibida mediante una pluralidad de auto-modalidades del canal MIMO.
3. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la segunda señal piloto es una señal piloto MIMO que comprende una pluralidad de transmisiones de señales piloto enviadas desde una pluralidad de antenas de transmisión en la entidad transmisora, donde la transmisión de señales piloto desde cada antena de transmisión es identificable por la entidad receptora.
4. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la etapa de obtener una segunda matriz de transmisión comprende
  - 35 descomponer la estimación de respuesta de canal MIMO para obtener una primera matriz de auto-vectores para el canal MIMO,
  - 40 calcular una segunda matriz de auto-vectores para el canal MIMO, en base a la estimación de respuesta de canal MIMO y a las matrices de errores de calibración, primera y segunda, y
  - calcular la segunda matriz de transmisión en base a la segunda matriz de auto-vectores y a la estimación de respuesta de canal MIMO.
5. El procedimiento de la reivindicación 4, en el que la etapa de obtener la segunda matriz de transmisión comprende además
  - 45 procesar la segunda matriz de auto-vectores para obtener una tercera matriz de auto-vectores, en donde el procesamiento de la segunda matriz coincide con el procesamiento realizado por la entidad transmisora para generar una matriz de transmisión en base a una señal piloto guiada, recibida por la entidad transmisora desde la entidad receptora, y en donde la segunda matriz transmitida se calcula en base a la tercera matriz de auto-vectores y a la estimación de respuesta de canal MIMO.
6. El procedimiento de la reivindicación 5, en el que la etapa de procesamiento de la segunda matriz de auto-vectores comprende realizar la ortogonalización sobre los auto-vectores en la segunda matriz, para obtener auto-vectores ortogonales para la tercera matriz.
7. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que las matrices de errores de calibración, primera y segunda, son revisadas en base a un procedimiento adaptativo de mínimos errores cuadrados medios, MMSE.

8. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la etapa de  
 5 revisar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, comprende  
 calcular una matriz de errores como una diferencia entre las matrices de transmisión primera y  
 segunda,  
 obtener derivadas parciales para elementos en la matriz de errores, con respecto a elementos  
 seleccionados en las matrices de errores de calibración, primera y segunda,  
 calcular un vector de actualización en base a las derivadas parciales y a la matriz de errores, y  
 10 actualizar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, con el vector de  
 actualización.
9. El procedimiento de la reivindicación 8, en el que la etapa de obtener derivadas parciales  
 comprende  
 15 obtener una segunda matriz de transmisión revisada, en base a la estimación de respuesta de  
 canal MIMO, las matrices de errores de calibración, primera y segunda, y un vector de errores,  
 calcular una matriz de errores revisada como una diferencia entre la primera matriz de transmisión  
 y la segunda matriz de transmisión revisada, y  
 calcular las derivadas parciales en base a la matriz de errores y a la matriz de errores revisada.
- 20 10. El procedimiento de la reivindicación 8, en el que la matriz de errores y las matrices de errores de  
 calibración, primera y segunda, contienen elementos de valores complejos, teniendo cada  
 elemento de valor complejo un componente real y un componente imaginario, y en el que las  
 derivadas parciales se obtienen por separado para los componentes reales e imaginarios.
- 25 11. El procedimiento de la reivindicación 8, en el que la etapa de  
 revisar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, comprende además  
 formar una matriz con las derivadas parciales y en el que el vector de actualización se calcula en  
 base a la matriz de errores y a una inversa de la matriz de derivadas parciales.
- 30 12. El procedimiento de la reivindicación 8, en el que los elementos seleccionados en las matrices de  
 errores de calibración, primera y segunda, incluyen a todos los elementos diagonales, excepto los  
 elementos superiores más a la izquierda, en las matrices de errores de calibración, primera y  
 segunda.
- 35 13. El procedimiento de la reivindicación 8, en el que la etapa de  
 revisar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, comprende además  
 repetir el cálculo de una matriz de errores, la obtención de derivadas parciales, el cálculo de un  
 vector de actualización y la actualización de las matrices de errores de calibración, primera y  
 40 segunda, una pluralidad de veces, hasta que el vector de actualización satisfaga una condición de  
 terminación.
14. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que las matrices de errores de calibración, primera y  
 segunda, son revisadas en base a un procedimiento adaptativo de la pendiente más empinada.
- 45 15. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la etapa de  
 revisar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, comprende  
 calcular una matriz de errores como una diferencia entre las matrices de transmisión primera y  
 segunda,  
 50 calcular un error conjunto en base a la matriz de errores, obtener derivadas parciales para el error  
 conjunto con respecto a elementos seleccionados en las matrices de errores de calibración,  
 primera y segunda, y  
 actualizar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, con las derivadas parciales.
16. El procedimiento de la reivindicación 15, en el que el error conjunto se calcula como una suma de  
 55 cuadrados de la magnitud de elementos en la matriz de errores.
17. El procedimiento de la reivindicación 15, en el que la etapa de  
 revisar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, comprende además

repetir las etapas de cálculo de una matriz de errores, cálculo de un error conjunto, obtención de derivadas parciales y actualización de las matrices de errores de calibración, primera y segunda, una pluralidad de veces, hasta que el error conjunto satisfaga una condición de terminación.

- 5 18. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende además:
- actualizar la segunda matriz de corrección con la segunda matriz de errores de calibración.
- 10 19. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la primera matriz de corrección es actualizada con la primera matriz de errores de calibración.
20. Un aparato en un sistema de comunicación inalámbrica de entradas múltiples y salidas múltiples, MIMO, que comprende:
- 15 medios para obtener una primera matriz de transmisión en base a una primera señal piloto recibida mediante un canal MIMO entre una entidad transmisora y una entidad receptora;
- estando dicho aparato **caracterizado porque** comprende adicionalmente
- 20 medios para obtener una segunda matriz de transmisión en base a una estimación de respuesta de canal MIMO y a matrices de errores de calibración, primera y segunda, siendo la estimación de respuesta de canal MIMO una estimación de una respuesta del canal MIMO y obtenida en base a una segunda señal piloto recibida mediante el canal MIMO
- 25 conteniendo la primera matriz de errores de calibración estimaciones de errores en una primera matriz de corrección usada para dar cuenta de las respuestas de cadenas de transmisión y recepción en la entidad transmisora, y conteniendo la segunda matriz de errores de calibración estimaciones de errores en una segunda matriz de corrección usada para dar cuenta de las respuestas de cadenas de transmisión y recepción en la entidad receptora; y
- 30 medios para revisar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, en base a las matrices de transmisión primera y segunda.
- 35 21. El aparato de la reivindicación 20, en el que la primera señal piloto es una señal piloto guiada recibida mediante una pluralidad de auto-modalidades del canal MIMO, y en el que la segunda señal piloto es una señal piloto MIMO que comprende una pluralidad de transmisiones de señales piloto enviadas desde una pluralidad de antenas de transmisión en la entidad transmisora, donde la transmisión de señales piloto desde cada antena de transmisión es identificable por la entidad receptora.
- 40 22. El aparato de la reivindicación 20, que comprende además:
- medios para descomponer la estimación de respuesta de canal MIMO para obtener una primera matriz de auto-vectores para el canal MIMO,
- 45 medios para calcular una segunda matriz de auto-vectores para el canal MIMO, en base a la estimación de respuesta de canal MIMO y a las matrices de errores de calibración, primera y segunda, y
- 50 medios para calcular la segunda matriz de transmisión en base a la segunda matriz de auto-vectores y a la estimación de respuesta de canal MIMO.
23. El aparato de la reivindicación 20, que comprende además:
- 55 medios para calcular una matriz de errores como una diferencia entre las matrices de transmisión primera y segunda;



medios para obtener derivadas parciales para elementos en la matriz de errores, con respecto a elementos seleccionados en las matrices de errores de calibración, primera y segunda;

5 medios para calcular un vector de actualización en base a las derivadas parciales y a la matriz de errores;

medios para actualizar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, con el vector de actualización; y

10 medios para repetir el cálculo de la matriz de errores, la obtención de las derivadas parciales, el cálculo del vector de actualización y la actualización de las matrices de errores de calibración, primera y segunda, una pluralidad de veces, hasta que el vector de actualización satisfaga una condición de terminación.

15 24. El aparato de la reivindicación 20, que comprende además:

medios para calcular una matriz de errores como una diferencia entre las matrices de transmisión primera y segunda;

20 medios para calcular un error conjunto en base a la matriz de errores;

medios para obtener derivadas parciales para el error conjunto, con respecto a elementos seleccionados en las matrices de errores de calibración, primera y segunda;

25 medios para actualizar las matrices de errores de calibración, primera y segunda, con las derivadas parciales; y

30 medios para repetir el cálculo de la matriz de errores, el cálculo del error conjunto, la obtención de las derivadas parciales y la actualización de las matrices de errores de calibración, primera y segunda, una pluralidad de veces, hasta que el error conjunto satisfaga una condición de terminación.

35 25. Un medio legible por ordenador que comprende código de programa adaptado para realizar el procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 19 cuando es ejecutado en un ordenador.

40

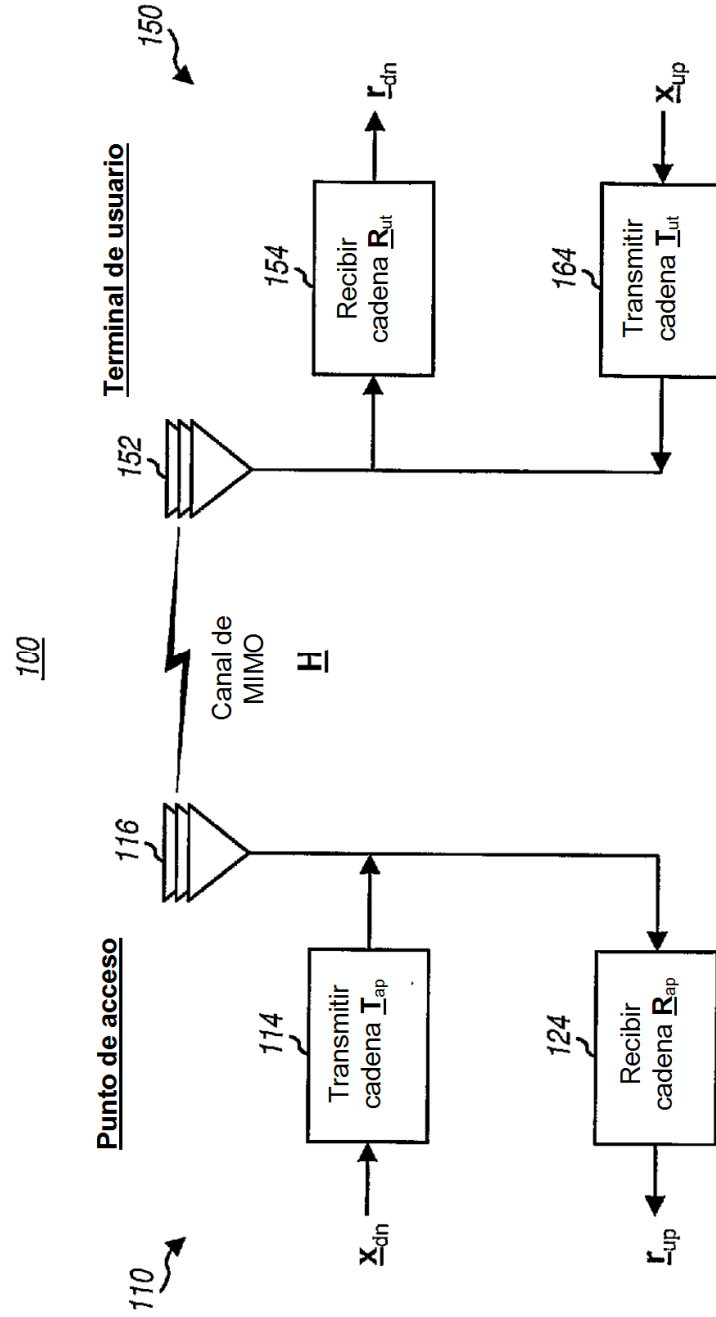


FIG. 1

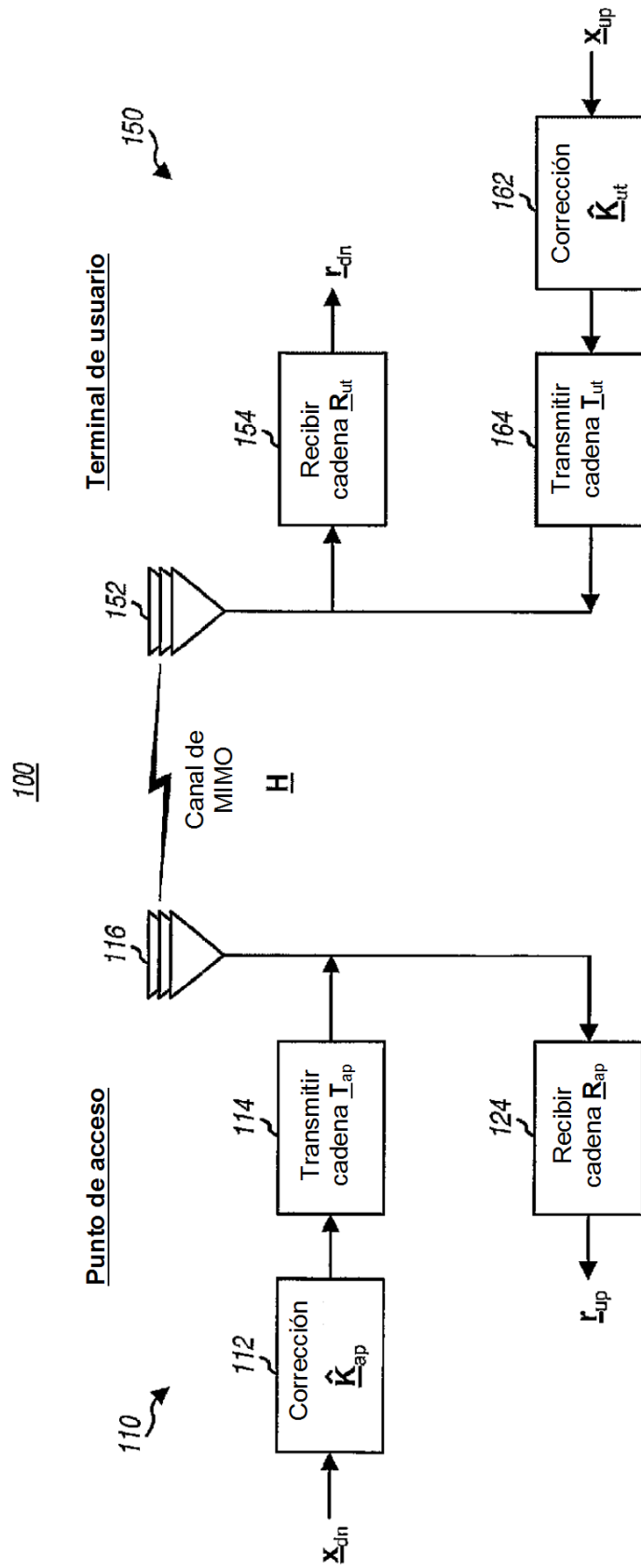


FIG. 2



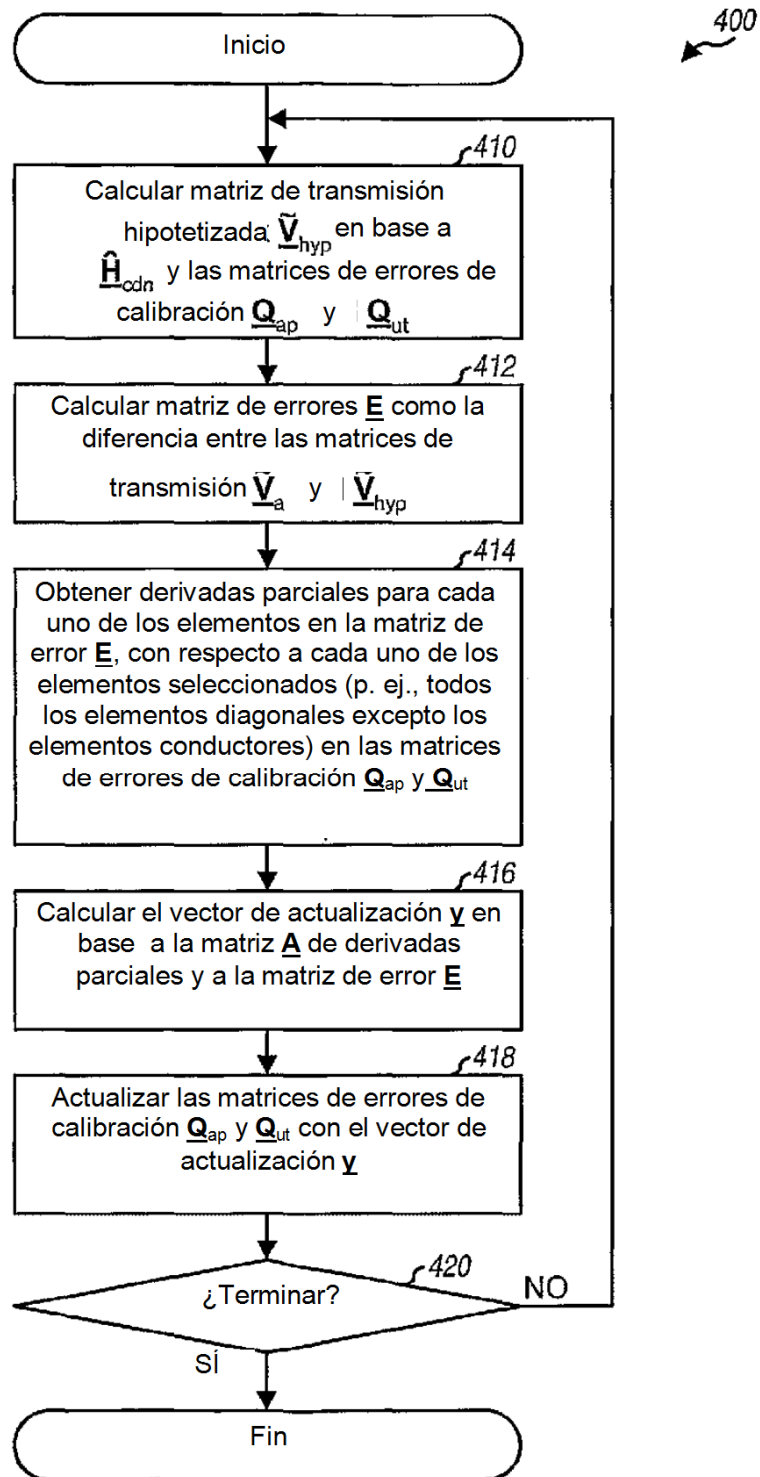
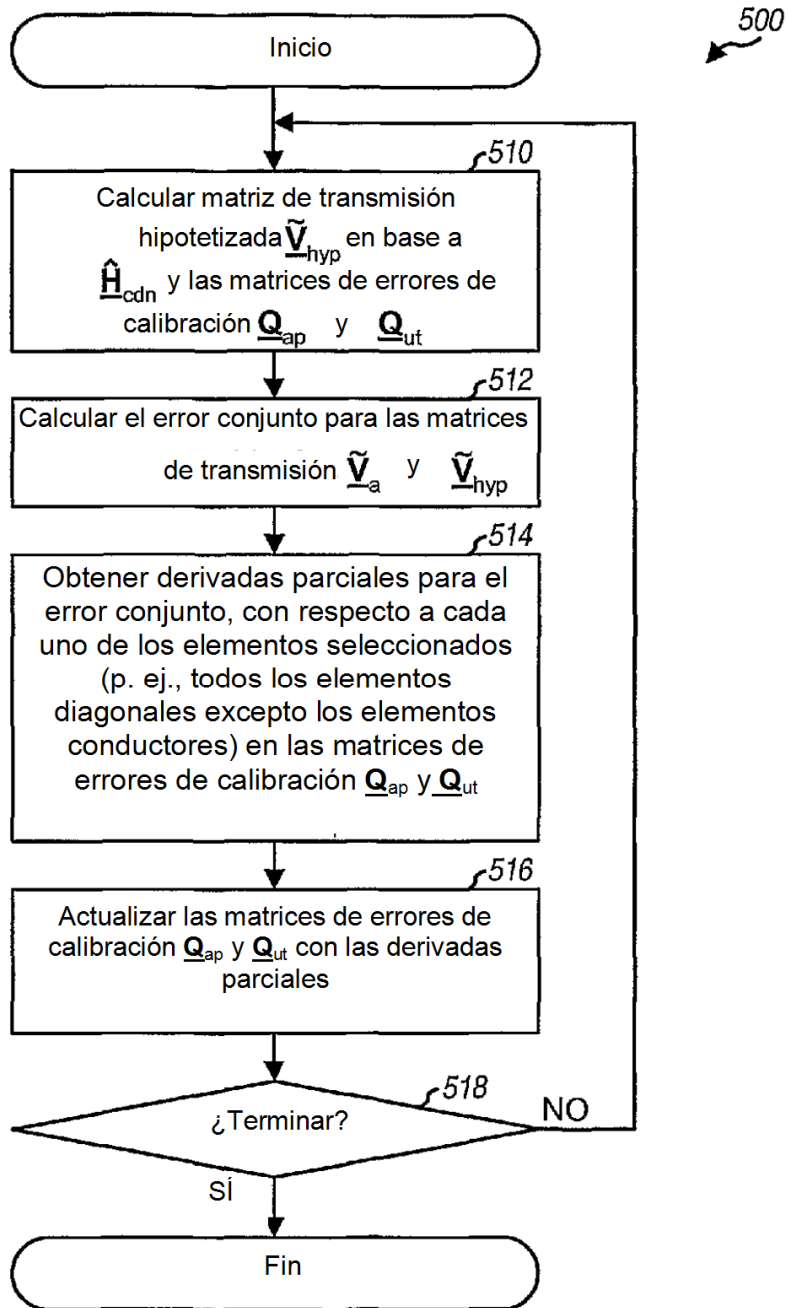


FIG. 4



**FIG. 5**

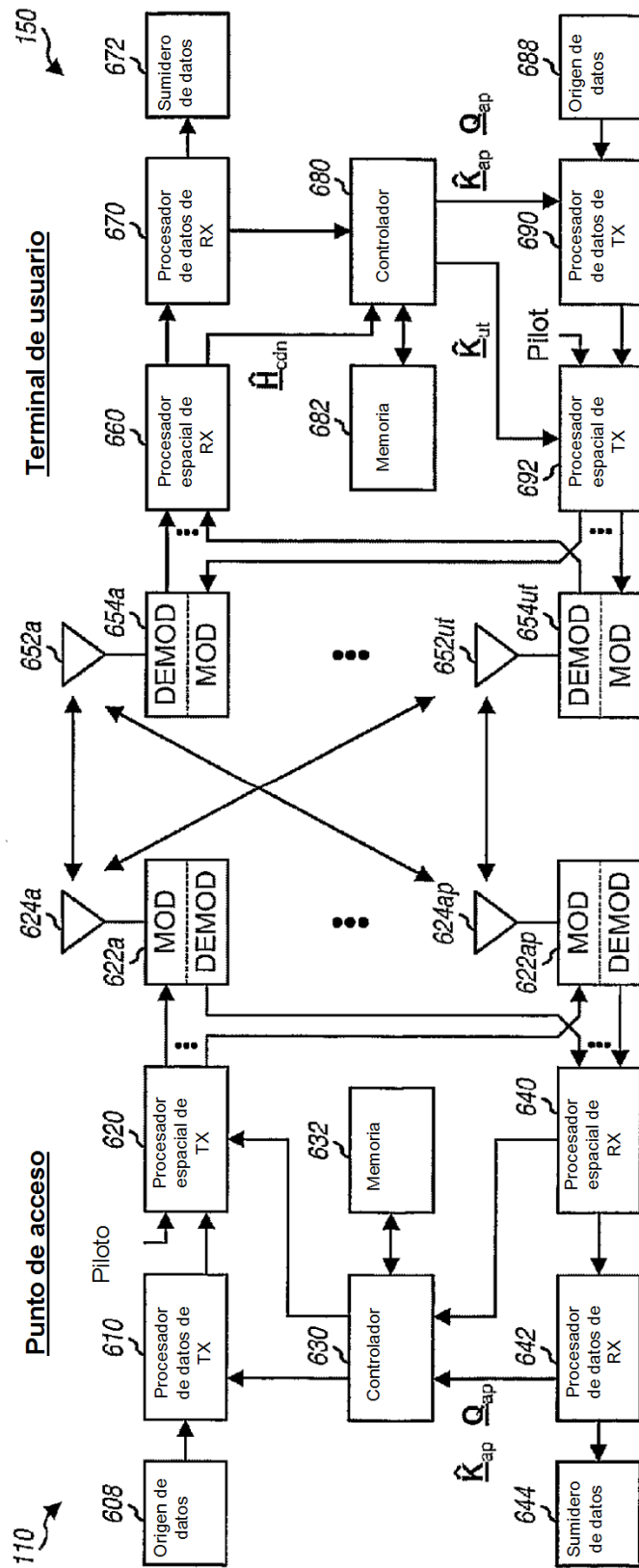


FIG. 6