

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 507 073**

51 Int. Cl.:

**H04L 1/06** (2006.01)

**H04L 25/02** (2006.01)

**H04L 25/03** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.09.2008 E 08016204 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.09.2014 EP 2051462**

54 Título: **Dispositivo y procedimiento para la detección de señales transmitidas en una transmisión de capas múltiples**

30 Prioridad:

**15.10.2007 DE 102007049398**

**13.12.2007 DE 102007060015**

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

**14.10.2014**

73 Titular/es:

**ROHDE & SCHWARZ GMBH & CO. KG (100.0%)  
MÜHLDORFSTRASSE 15  
81671 MÜNCHEN, DE**

72 Inventor/es:

**DETERT, THORBEN**

74 Agente/Representante:

**ARPE FERNÁNDEZ, Manuel**

**ES 2 507 073 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

Dispositivo y procedimiento para la detección de señales transmitidas en una transmisión de capas múltiples

- 5 La invención se refiere a un procedimiento y un dispositivo para la detección de señales de emisión en una transmisión de capas múltiples.
- En las telecomunicaciones, las futuras aplicaciones multimedia requerirán cada vez en mayor medida un aumento de la tasa de transmisión de datos. El dominio de este gran volumen de datos se realizará en el futuro mediante sistemas de múltiples antenas, que permiten la división espacial de señales de transmisión y por lo tanto la transmisión en paralelo de varios trenes de datos en la misma banda de frecuencias o el acceso múltiple espacial al medio de transmisión (el, así llamado, Space-Division-Multiple-Access (SDMA) [Acceso Múltiple por División Espacial]).
- 10 En la transmisión en paralelo de varios trenes de datos al mismo tiempo y en la misma banda de frecuencias en un sistema de transmisión de capas múltiples – por ejemplo en el sistema de transmisión *V-Blast* (Bell-Labs-Layered-Space-Time-Vertical-Encoding [codificación-vertical-tiempo-espacio de Bells Labs) –, el volumen de datos a transmitir se divide en varios trenes de datos que se respectivamente alimentan a una de las, en total,  $N_t$  antenas emisoras. Los  $N_t$  distintos trenes de datos, respectivamente emitidos por una de las  $N_t$  antenas emisoras. Los  $N_t$  distintos trenes de datos, respectivamente emitidos por una de las  $N_t$  antenas emisoras, se superponen en los, en total,  $N_r$  trenes de datos, que son recibidos respectivamente por una de las  $N_r$  antenas receptoras.
- 15 Esta superposición de las distintas señales de emisión en cada una de las distintas señales de recepción puede compararse con la superposición temporal de símbolos de datos en una señal de recepción en canales de transmisión con interferencia entre símbolos (ISI). Análogamente a la estimación de canales y la corrección temporal construida sobre ésta por medio de un estimador secuencial en el caso de los canales de transmisión con interferencia entre símbolos (ISI), en un sistema de transmisión de capas múltiples es necesaria una estimación de los, en total,  $N_t \cdot N_r$  canales de transmisión entre las  $N_t$  antenas emisoras y las  $N_r$  antenas receptoras y una corrección espacial construida sobre la misma de los trenes de datos transmitidos respectivamente por las, en total,  $N_t$  antenas emisoras en las  $N_t$  capas.
- 20 Análogamente a la corrección temporal, el estimador de secuencia de máxima probabilidad [Maximum-Likelihood-Sequence-Estimator (MLSE)], que se describe por ejemplo en el documento EP 1 246 418 A2 y que determina la distancia euclidiana entre el vector de las señales de recepción  $\underline{r}$  y el vector de todas las posibles hipótesis  $\underline{\hat{s}}$  de las señales de emisión  $\underline{s}$  ponderado con la matriz de transferencia  $H$ , constituye actualmente el mejor detector.
- En un cálculo eficaz del estimador de secuencia de máxima probabilidad (Maximum-Likelihood-Sequence-Estimator) por medio del algoritmo de Viterbi deben calcularse con este fin, para una potencia  $|S|$  del alfabeto de modulación  $S$  utilizado, en total  $|S|^{N_t}$  ramas o distancias euclidianas en el diagrama de Trellis, así como en total  $|S|^{N_t-1}$  estados, lo que no es posible en tiempo real incluso con un pequeño número  $N_t$  de antenas emisoras.
- 30 Por lo tanto, el objetivo de la invención es crear un procedimiento y un dispositivo para la corrección espacial de varias señales de emisión superpuestas en varias señales de recepción en una transmisión de capas múltiples, que presenten un gasto de procesamiento ostensiblemente menor en relación con el estimador de secuencia de máxima probabilidad (Maximum-Likelihood-Sequence-Estimator) con la utilización del algoritmo de Viterbi, sin sufrir pérdidas importantes en la calidad del resultado de detección.
- El objetivo se logra, en relación con el procedimiento, mediante las características de la reivindicación 1 y, en relación con el dispositivo, mediante las características de la reivindicación 9. Las reivindicaciones subordinadas se refieren a perfeccionamientos ventajosos.
- 35 Con este fin, según la invención, la matriz de transferencia  $H$  de la transmisión de capas múltiples se descompone, en el marco de una descomposición  $Q \cdot R$ , en una matriz ortogonal  $Q^H$  y una matriz triangular  $R$ . Si, sobre esta base, el vector de señal de recepción  $\underline{r}$  se filtra en un filtro previo con una matriz de filtro previo, que corresponde a la matriz ortogonal  $Q^H$ , y se forma una métrica en el sentido del planteamiento de probabilidad máxima [Maximum-Likelihood] en la que se resten del vector de señal de recepción filtrado previo  $Q^H \cdot \underline{r}$  todas las posibles hipótesis  $\underline{\hat{s}}$  del vector de señal de emisión  $\underline{s}$  ponderadas con la matriz triangular  $R$  antes indicada, es posible determinar, mediante una variación del vector de señal de emisión  $\underline{s}$  que abarque todas las posibles hipótesis  $\underline{\hat{s}}$ , una métrica mínima en una hipótesis  $\underline{\hat{s}}$  del vector de señal de emisión  $\underline{s}$  que represente el mejor valor estimado  $\underline{\hat{s}}$  para el vector de señal de emisión  $\underline{s}$ .
- 40 En relación con una estimación con un filtro previo optimizado según el criterio de error cuadrático medio mínimo o el procedimiento Zero-Forcing, la estimación según la invención del vector de señal de emisión  $\underline{s}$  mediante un cálculo de métrica según la invención presenta la ventaja de que no es necesaria ninguna inversión compleja de la matriz de transferencia  $H$ , ya que las distintas filas de la métrica pueden minimizarse por separado en sí y comenzando sucesivamente con la fila inferior para la determinación de la señal de emisión  $s_{N_t}$  en la  $N_t$ -ésima capa hasta la fila superior para la determinación de la señal de emisión  $s_1$  en la primera capa.
- 45 Dado que con valores pequeños del elemento diagonal  $R_{k,k}$  en la  $k$ -ésima fila de la matriz triangular  $R$  el producto  $R_{k,k} \cdot \tilde{s}_k^{(\infty)}$  para todas las hipótesis  $\tilde{s}_k^{(\infty)}$  con  $\alpha = 1, \dots, |S|^{N_t}$  de la señal de emisión  $s_k$  en la  $k$ -ésima capa es pequeño, y por lo tanto todas las métricas de rama en el diagrama de Trellis o el dendrograma para la determinación de la señal de emisión  $s_k$  en la  $k$ -ésima capa se diferencian sólo en escasa medida, es muy fácil que un estimador de secuencia determine un camino incorrecto y con ello detecte un valor estimado  $\hat{s}_k$  incorrecto para la señal de emisión  $s_k$  en la  $k$ -ésima capa. Dado que el elemento diagonal  $R_{k,k}$  en la  $k$ -ésima fila de la matriz triangular  $R$  se

calcula según el procedimiento de Gram-Schmidt modificado para la realización de la descomposición  $Q \cdot R$  a partir de la norma  $\|\underline{h}_k\|$  del  $k$ -ésimo vector de columna  $\underline{h}_k$  de la matriz de transferencia  $H$ , como se muestra más adelante con mayor detalle, según la invención la matriz de transferencia  $H$  se amplía a una matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  con vectores de columna prolongados  $\bar{\underline{h}}_i$ , que en una de sus coordenadas de prolongación están ocupados con un factor libremente seleccionable  $\sqrt{\eta}$  y por lo tanto presentan una norma de columna  $\|\bar{\underline{h}}_i\|$  más alta en relación con los vectores de columna  $\underline{h}_i$  de la matriz de transferencia  $H$  existente hasta el momento.

En la minimización de la métrica según la invención en el diagrama de Trellis puede utilizarse preferentemente el algoritmo QRD-M, que está basado en la descomposición  $Q \cdot R$  de la matriz de transferencia  $H$  y en el algoritmo M y en el que, según la figura 1, partiendo de la capa  $N_t = 3$ , se seleccionan las, en total,  $M = 4$  hipótesis  $\tilde{s}_{N_t}^{(\infty)}$  de la señal de emisión  $s_{N_t}$  en la  $N_t$ -ésima capa como caminos de supervivencia cuyas métricas de rama son mínimas con arreglo a la métrica de fila en la  $N_t$ -ésima fila de la métrica según la invención. Los caminos de supervivencia se prolongan en la capa siguiente  $N_t - 1 = 2$ , partiendo de las, en total,  $M = 4$  hipótesis seleccionadas  $\tilde{s}_{N_t}^{(\infty)}$  de la señal de emisión  $s_{N_t}$  en la  $N_t$ -ésima capa, en la medida de las, en total,  $M = 4$  hipótesis  $\tilde{s}_{N_t-1}^{(\infty)}$  de la señal de emisión  $s_{N_t-1}$  en la  $N_t - 1$ -ésima capa cuyas métricas de rama son mínimas con arreglo a la métrica de fila en la  $N_t - 1$ -ésima fila de la métrica según la invención en suma con las métricas de rama de las, en total,  $M = 4$  hipótesis seleccionadas  $\tilde{s}_{N_t}^{(\infty)}$  de la señal de emisión  $s_{N_t}$  en la  $N_t$ -ésima capa.

De este modo se seleccionan en cada una de las siguientes capas  $i$  inferiores respectivamente  $M$  hipótesis  $\tilde{s}_i^{(\infty)}$  de la señal de emisión  $s_i$  en la  $i$ -ésima capa y se amplían las mismas a los, en total,  $M$  caminos de supervivencia con, respectivamente, una métrica de camino mínima.

Además de la elevación según la invención de los elementos diagonales  $R_{i,i}$  de la matriz triangular  $R$  mediante una ampliación de la matriz de transferencia  $H$  a la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  con normas de columna  $\|\bar{\underline{h}}_i\|$  de los vectores de columna  $\bar{\underline{h}}_i$  más altas, los vectores de columna  $\bar{\underline{q}}_i$  de la matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q}$  se ordenan en relación con su norma de columna  $\|\bar{\underline{q}}_i\|$  con un procedimiento de Gram-Schmidt ordenado, de tal manera que se forma una matriz ortogonal ampliada y ordenada  $\bar{Q}_s$  cuyo vector de columna más bajo  $\bar{\underline{q}}_1$  presenta la menor norma de columna y cuyo vector de columna más alto  $\bar{\underline{q}}_{N_t}$  presenta la mayor norma de columna. De este modo se garantiza

que, tras la descomposición  $Q \cdot R$ , los elementos diagonales  $\bar{R}_{k,k}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  presenten en las filas más altas  $k = N_t, N_t - 1, \dots$  los mayores valores y en las filas más bajas  $k = 1, 2, \dots$  los menores valores y, por lo tanto, un estimador de secuencia determine según un algoritmo QRD-M así ordenado valores estimados  $\hat{s}_{N_t}, \hat{s}_{N_t-1}, \dots$  para las señales de emisión  $s_{N_t}, s_{N_t-1}, \dots$  en las capas más altas con una alta calidad de detección, que ventajosamente lleva a una menor propagación de errores en la sucesiva determinación de los valores estimados  $\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots$  para las señales de emisión  $s_1, s_2, \dots$  en las capas más bajas.

La transposición, condicionada por la ordenación de la matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q}$ , del orden de los valores estimados  $\hat{s}_i$  para las distintas señales de emisión  $s_i$  en el vector de señal de emisión  $\underline{s}$  en su determinación algorítmica debe anularse al final del procedimiento según la invención mediante una permutación inversa de los valores estimados  $\hat{s}_i$  determinados para las distintas señales de emisión  $s_i$  en el vector de señal de emisión  $\underline{s}$ .

El error resultante de la ampliación de la matriz de transferencia  $H$  a la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  en la métrica a la altura del factor  $\eta \cdot \underline{s}^2$  se compensa mediante una ampliación sustractiva en la medida del factor  $\eta \cdot \underline{s}^2$  de la métrica a minimizar.

En lugar de un algoritmo QRD-M basado en la descomposición  $Q \cdot R$  y en el algoritmo M, puede también emplearse como alternativa cualquier otra combinación de una descomposición  $Q \cdot R$  con un algoritmo de detección o búsqueda en profundidad (*deep-first*) o en anchura (*breadth-first*) en el diagrama de Trellis o dendrograma, por ejemplo un algoritmo T o un algoritmo de lista.

A continuación se explica detalladamente por medio del dibujo un ejemplo de realización del procedimiento según la invención y del dispositivo según la invención para la detección de señales de emisión en una transmisión de capas múltiples. Las figuras del dibujo muestran:

- figura 1 una estructura en árbol de un detector QRD-M con  $N_t = 3, N_r = 3, M = 4$  y  $|S| = 4$ ,
- figura 2 un diagrama vectorial para la ortogonalización de dos vectores,
- figura 3 un organigrama del procedimiento según la invención para la detección de señales de emisión en una transmisión de capas múltiples,
- figura 4 un organigrama de la descomposición  $QR$  ordenada según la invención de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$ ,
- figura 5 un diagrama de bloques del dispositivo según la invención para la detección de señales de emisión en una transmisión de capas múltiples,
- figura 6 un diagrama de diferencias de métrica de camino de distintos caminos de supervivencia en función del factor  $\sqrt{\eta}$ ,
- figura 7 un diagrama de la tasa de error binario en función del factor  $\sqrt{\eta}$  para distintos algoritmos de detección y
- figura 8 un diagrama de la tasa de error binario en función de la relación señal-ruido para distintos algoritmos de detección.

Antes de describir el procedimiento según la invención y el dispositivo según la invención para la detección de señales de emisión en una transmisión de capas múltiples por medio de las figuras 3 a 5, a continuación se desarrollan las bases necesarias para la comprensión de la invención:

5 Apoyándose en la corrección temporal por medio del estimador de secuencia de máxima probabilidad [Maximum-Likelihood-Sequence-Estimator (MLSE)], el corrector espacial determina por el método MLSE, según la ecuación (1), la distancia euclidiana entre el vector de las señales de recepción  $\underline{r}(i)$  en el momento actual  $i$  y el vector de todas las posibles hipótesis  $\underline{s}$  de las señales de emisión  $\underline{s}$  ponderado con la matriz de transferencia  $H$ .

$$\underline{s} = \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S} \|\underline{r}(i) - H \cdot \underline{s}\|^2 \right\} \quad (1)$$

10 Un procedimiento de corrección espacial adecuado para la práctica se basa, según la ecuación (2), en la descomposición  $Q \cdot R$  de la matriz de transferencia  $H$ , en la que el espacio vectorial  $N_t$ -dimensional determinado por los vectores de columna  $\underline{h}_i$  de la matriz de transferencia  $N_r \cdot N_t$ -dimensional  $H$  se descompone en un espacio vectorial ortonormalizado correspondiente, determinado por los vectores  $\underline{q}_i$  ortogonales entre sí y normalizados – ortonormalizados – de una matriz  $N_r \cdot N_t$ -dimensional ortonormalizada y unitaria  $Q$ , y las proyecciones de los vectores de columna  $\underline{h}_i$  de la matriz de transferencia  $H$  en el espacio vectorial ortonormalizado, determinadas por los  
15 vectores de columna  $\underline{r}_i$  de una matriz triangular  $N_r \cdot N_t$ -dimensional  $R$ .

$$\begin{aligned} H &= [\underline{h}_1 \quad \dots \quad \underline{h}_i \quad \dots \quad \underline{h}_{N_t}] = Q \cdot R = \\ &= [\underline{q}_1 \quad \dots \quad \underline{q}_i \quad \dots \quad \underline{q}_{N_t}] \cdot [\underline{r}_1 \quad \dots \quad \underline{r}_i \quad \dots \quad \underline{r}_{N_t}] \end{aligned} \quad (2)$$

La matriz triangular  $R$  se trata, según la ecuación (3), de una matriz triangular superior.

$$R = [\underline{r}_1 \quad \dots \quad \underline{r}_i \quad \dots \quad \underline{r}_{N_t}] = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \dots & R_{1,N_t} \\ 0 & R_{2,2} & \dots & R_{2,N_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & R_{N_t-1,N_t} \\ 0 & 0 & 0 & R_{N_t,N_t} \end{bmatrix} \quad (3)$$

20 En las consideraciones siguientes se parte de un modelo del sistema de transmisión de antenas múltiples según la ecuación (4), que constituye un sistema entrada múltiple salida múltiple [Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)] con  $N_t$  antenas emisoras y  $N_r$  antenas receptoras en el que un vector de señal de emisión  $N_t$ -dimensional  $\underline{s}$ , cuya potencia media de señal  $E\{\underline{s} \cdot \underline{s}^H\}$  está normalizada al valor máximo según la ecuación (5), se pondera con una matriz de transferencia  $N_r \cdot N_t$ -dimensional  $H$  que, según la ecuación (6), se compone de factores de transferencia no correlacionados, con una distribución de Gauss compleja y con variancia uno, y que se suma con un vector de  
25 ruido  $N_r$ -dimensional  $\underline{n}$  que, según la ecuación (7), contiene un ruido aditivo gaussiano complejo con variancia  $\sigma_n^2$ , de manera que resulta un vector de recepción  $N_r$ -dimensional  $\underline{r}$ .

$$\underline{r} = H \cdot \underline{s} + \underline{n} \quad (4)$$

$$E\{\underline{s} \cdot \underline{s}^H\} = \frac{1}{N_t} \cdot I_{N_t} \quad (5)$$

$$E\{H \cdot H^H\} = I_{N_r} \quad (6)$$

$$E\{\underline{n} \cdot \underline{n}^H\} = \sigma_n^2 \cdot I_{N_r} \quad (7)$$

30 Si el modelo del sistema de transmisión de antenas múltiples según la ecuación (4) se multiplica de forma bilateral por la matriz hermitiana ortonormalizada  $Q^H$ , se obtiene un sistema de ecuaciones (8) que puede introducirse en un planteamiento de probabilidad máxima (Maximum-Likelihood), minimizando el vector de ruido  $\underline{n}$  en una métrica  $M(\underline{s})$

de acuerdo con la ecuación (1), cuya minimización según la ecuación (9) lleva a valores estimados  $\underline{\hat{s}}$  para el vector de señal de emisión  $\underline{s}$ .

$$\underline{y} = \underline{Q}^H \cdot \underline{r} = \underline{R} \cdot \underline{s} + \underline{Q}^H \cdot \underline{n} \quad (8)$$

$$\underline{\hat{s}} = \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in \mathcal{S}^{N_t}} M(\underline{s}) \right\} = \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in \mathcal{S}^{N_t}} \|\underline{y} - \underline{R} \cdot \underline{s}\|^2 \right\} \quad (9)$$

5 En virtud de la estructura triangular anterior de la matriz triangular  $R$  según la ecuación (3) es posible minimizar las distintas filas de la métrica sin realizar una inversión numérica compleja de la matriz triangular  $R$  desde la  $N_t$ -ésima capa sucesivamente hasta la primera capa, y determinar así valores estimados  $\underline{\hat{s}}$  sucesivos para las señales de emisión del vector de señal de emisión  $\underline{s}$ . La minimización de la  $k$ -ésima fila de la métrica  $\|\underline{y} - \underline{R} \cdot \underline{s}\|^2$  de la ecuación (9) se consigue por lo tanto aplicando el algoritmo QRD-M según la ecuación (10). Con ello, partiendo de uno de los, en total,  $M$  valores estimados o estados  $\hat{s}_{k+1}^{(\alpha)}$  detectados en la siguiente capa superior  $k+1$ , con

10  $\alpha = 1, \dots, M$ , y su métrica de camino  $\sum_{\nu=k+1}^{N_t} R_{k,\nu} \cdot \hat{s}_{\nu}^{(\alpha)}$ , así como su historia de camino  $[\hat{s}_{k+1}^{(\alpha)} \dots \hat{s}_{N_t}^{(\alpha)}]$ , se

detecta la hipótesis o el estado  $\hat{s}_k^{(\alpha)}$  de, en total,  $|S|^{N_t}$  posibles hipótesis o estados para la señal de emisión  $s_k$  emitida por la  $k$ -ésima antena emisora cuya métrica de camino, compuesta de la métrica de rama  $R_{k,k} \cdot \hat{s}_k^{(\alpha)}$  y la

métrica de camino  $\sum_{\nu=k+1}^{N_t} R_{k,\nu} \cdot \hat{s}_{\nu}^{(\alpha)}$  del estado predecesor  $\hat{s}_{k+1}^{(\alpha)}$ , sea una de las, en total,  $M$  métricas de camino

mínimas en la capa  $k$  y constituya por lo tanto uno de los, en total,  $M$  caminos de supervivencia.

$$\hat{s}_k = \arg \left\{ \min_{\hat{s}_k \in \mathcal{S}^{N_t}} \left| y_k - R_{k,k} \cdot \hat{s}_k^{(\alpha)} - \sum_{\nu=k+1}^{N_t} R_{k,\nu} \cdot \hat{s}_{\nu}^{(\alpha)} \right|^2 \right\} \quad (10)$$

15 En el algoritmo QRD-M se calculan en la capa considerada en primer lugar  $N_t$  en total  $|S|$  métricas de camino y en todas las demás capas  $N_t - 1$  respectivamente  $M \cdot |S|$  métricas de camino. Así pues, el número total de métricas de camino a calcular se reduce de  $|S|^{N_t}$  en el algoritmo de Viterbi a un total de  $(N_t - 1) \cdot M \cdot |S| + |S|$  métricas de camino a calcular en el algoritmo QRD-M.

20 Para el desarrollo del algoritmo QRD-M ordenado se ha de recurrir al procedimiento de Gram-Schmidt modificado para la descomposición  $Q \cdot R$  de la matriz de transferencia  $H$ . Según el procedimiento de Gram-Schmidt modificado, las filas de la matriz triangular  $R$  se calculan desde la primera fila hasta la  $N_t$ -ésima fila y la matriz ortogonal  $Q$  se calcula por columnas, desde la columna izquierda hasta la columna derecha. En la primera etapa del procedimiento de Gram-Schmidt modificado se inicializa la matriz ortogonal  $Q$  según la ecuación (11) con los elementos de la

$$25 \quad Q = H = \begin{bmatrix} \underline{h}_1 & \dots & \underline{h}_{N_t} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Para cada uno de los pasos  $i = 1, \dots, N_t$  se realizan las siguientes operaciones:

30 Los elementos diagonales  $R_{i,i}$  de la matriz triangular  $R$  se ocupan según la ecuación (12) con la norma  $\|\underline{q}_i\|$  del vector de columna correspondiente  $\underline{q}_i$  de la matriz ortogonal  $Q$  a calcular, y el vector de columna  $\underline{q}_i$  de la matriz ortogonal  $Q$  a calcular se normaliza al valor uno según la ecuación (13).

$$R_{i,i} = \|\underline{q}_i\| \quad (12)$$

$$\underline{q}_i = \frac{\underline{q}_i}{R_{i,i}} \quad (13)$$

35 Los distintos vectores de columna  $\underline{q}_i$  de la matriz ortogonal  $Q$  a calcular se ortogonalizan unos con respecto a otros – como se muestra en la figura 2 en el ejemplo de un espacio vectorial bidimensional con los vectores de columna  $\underline{q}_i$  y  $\underline{q}_l$  – calculando, de todos los vectores de columna  $\underline{q}_l$  dispuestos a la derecha del vector de columna  $\underline{q}_i$  en la matriz ortogonal, la proyección  $R_{i,l}$  – como elemento de la matriz triangular  $R$  según la ecuación (3) – del vector de columna  $\underline{q}_l$  en el vector de columna  $\underline{q}_i$  según la ecuación (14) y eliminando del vector de columna  $\underline{q}_l$  la parte vectorial del

vector de columna  $\underline{q}_l$  en la dirección del vector de columna  $\underline{q}_i$  – parte del vector de columna  $\underline{q}_l$  paralela al vector de columna  $\underline{q}_i$  – según la ecuación (15) para obtener la parte del vector de columna  $\underline{q}_l$  ortogonal al vector de columna  $\underline{q}_i$ .

$$R_{i,l} = \underline{q}_i^H \cdot \underline{q}_l \quad \text{mit } l = i+1, \dots, N_t \quad (14)$$

5 A partir del procedimiento de Gram-Schmidt modificado se desarrolla a continuación el procedimiento de Gram-Schmidt ordenado, con el que los vectores de columna  $\underline{q}_i$  ortogonales entre sí de la matriz ortogonal  $Q$  se ordenan de tal manera que los elementos diagonales  $R_{i,i}$  de la matriz triangular  $R$  están dispuestos con valores crecientes desde la capa más baja 1 hasta la capa más alta  $N_t$ . Antes de realizar la descomposición  $Q \cdot R$  de la matriz de transferencia  $H$  según las ecuaciones (11) a (14), se ordenan los vectores de columna  $\underline{q}_i$  de izquierda a derecha dentro de la matriz  $Q$  determinando en vectores de columna  $\underline{q}_1, \underline{q}_2, \dots, \underline{q}_{i-1}$  ya ordenados situados a la derecha, a partir de los vectores de columna  $\underline{q}_i, \underline{q}_{i+1}, \dots, \underline{q}_{N_t}$  aún sin ordenar situados respectivamente a la izquierda, según la ecuación (16), el índice de columna  $k_i$  del vector de columna  $\underline{q}_{k_i}$  con la menor norma de columna.

$$k_i = \arg \left\{ \min_{l=i, \dots, N_t} \|\underline{q}_l\|^2 \right\} \quad (16)$$

15 A continuación se cambia dentro de la matriz  $Q$  el vector de columna  $\underline{q}_{k_i}$  con la menor norma de columna por el vector de columna  $\underline{q}_i$ . Este proceso se realiza sucesivamente para todos los vectores de columna  $\underline{q}_i$  de la matriz  $Q$  desde  $i = 1$  hasta  $i = N_t$ . Tras la ordenación, el vector de columna  $\underline{q}_i$  tiene la menor norma de columna en relación con todos los vectores de columna situados a la derecha  $\underline{q}_{i+1}, \dots, \underline{q}_{N_t}$  y lleva por lo tanto, según la ecuación (12), al menor elemento diagonal  $R_{i,i}$  de la matriz triangular  $R$  con respecto a los elementos diagonales  $R_{i+1,j+1}, R_{i+2,j+2}, \dots, R_{N_t,N_t}$  en las capas respectivamente superiores  $i + 1, i + 2, \dots, N_t$  de la matriz triangular  $R$ , así como a la menor relación señal-ruido  $SNR_i$  con respecto a las relaciones señal-ruido  $SNR_{i+1}, SNR_{i+2}, \dots, SNR_{N_t}$  en las capas respectivamente superiores  $i + 1, i + 2, \dots, N_t$ .  
 20 Tras la ortogonalización de los vectores de columna ordenados  $\underline{q}_i$  de la matriz  $Q$ , el vector de columna  $\underline{q}_i$  presenta la menor longitud en dirección ortogonal, con respecto a los vectores de columna  $\underline{q}_1, \dots, \underline{q}_{N_t}$  situados respectivamente a la izquierda en la matriz ortogonal  $Q$  y ortogonales al mismo, de todos los vectores de columna  $\underline{q}_{i+1}, \dots, \underline{q}_{N_t}$  situados a la derecha con respecto al vector de columna  $\underline{q}_i$ .

Además de la disposición de los distintos elementos diagonales  $R_{i,i}$  en valencia ascendente desde la capa más baja 1 hasta la capa más alta  $N$ , dentro de la matriz triangular  $R$ , con vistas a una gran diferenciabilidad de las distintas métricas de rama correspondientes a respectivamente una capa superior, y con ello una minimización de errores de detección en las capas superiores, así como de una propagación del o de los errores de detección a las capas inferiores, los errores de detección pueden minimizarse en todas las capas, según la invención, mediante un aumento de la norma de columna  $\|\underline{h}_i\|$  de los vectores de columna  $\underline{h}_i$  de la matriz de transferencia  $H$  y con ello, según el procedimiento de Gram-Schmidt modificado o según el procedimiento de Gram-Schmidt ordenado, mediante un aumento de la norma de columna  $\|\underline{q}_i\|$  de los vectores de columna  $\underline{q}_i$  de la matriz ortogonal  $Q$  y con ello mediante un aumento de todos los elementos diagonales  $R_{i,i}$  de la matriz triangular  $R$ .

Para ello, la matriz de transferencia  $H$  se amplía según la ecuación (17) a una matriz de transferencia ampliada  $\overline{\overline{H}}$ , cuyos vectores de columna  $\overline{\overline{h}}_i$  están prolongados con respecto a los vectores de columna  $\underline{h}_i$  y en la que respectivamente un componente de prolongación específico para el vector de columna  $\overline{\overline{h}}_i$  respectivo está ocupado con un factor libremente seleccionable  $\sqrt{\eta}$ .

$$\overline{\overline{H}} = \begin{bmatrix} \overline{\overline{h}}_1 & \dots & \overline{\overline{h}}_i & \dots & \overline{\overline{h}}_{N_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ \sqrt{\eta} \cdot I_{N_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{h}_1 & \dots & \underline{h}_i & \dots & \underline{h}_{N_t} \\ \sqrt{\eta} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \sqrt{\eta} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \sqrt{\eta} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Para compensar en el modelo del sistema de transmisión de antenas múltiples el error condicionado por la ampliación de la matriz de transferencia  $H$  a la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$ , el vector de ruido  $\underline{n}$  se amplía a un vector de ruido ampliado  $\bar{\underline{n}}$  según la ecuación (18), que incluye el vector de señal de emisión negativo  $\underline{s}$ , ponderado con el factor  $\sqrt{\eta}$ , en la prolongación del vector.

$$\bar{\underline{n}} = \begin{bmatrix} \underline{n} \\ -\sqrt{\eta} \cdot \underline{s} \end{bmatrix} \quad (18)$$

5 Por lo tanto, el modelo del sistema de transmisión de antenas múltiples según la ecuación (4) se amplía al modelo ampliado del sistema de transmisión de antenas múltiples según la ecuación (19).

$$\bar{\underline{r}} = \begin{bmatrix} \underline{r} \\ \underline{0}_{N_s \times 1} \end{bmatrix} = \bar{H} \cdot \underline{s} + \bar{\underline{n}} = \begin{bmatrix} H \\ \sqrt{\eta} \cdot I_{N_s} \end{bmatrix} \cdot \underline{s} + \begin{bmatrix} \underline{n} \\ -\sqrt{\eta} \cdot \underline{s} \end{bmatrix} \quad (19)$$

10 La matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  puede descomponerse análogamente a la ecuación (2), mediante una descomposición  $Q \cdot R$ , en una matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q}$  y una matriz triangular ampliada  $\bar{R}$ . De acuerdo con el procedimiento de Gram-Schmidt modificado, la inicialización de los vectores de columna ampliados  $\bar{\underline{q}}_i$  de la matriz ampliada  $\bar{Q}$  se realiza sobre la base de la ecuación (11) según la ecuación (20):

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} \bar{\underline{q}}_1 & \dots & \bar{\underline{q}}_i & \dots & \bar{\underline{q}}_{N_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{h}_1 & \dots & \underline{h}_i & \dots & \underline{h}_{N_s} \\ \sqrt{\eta} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \sqrt{\eta} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \sqrt{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{q}_1 & \dots & \underline{q}_i & \dots & \underline{q}_{N_s} \\ \sqrt{\eta} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \sqrt{\eta} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \sqrt{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

con  $Q_1 = \begin{bmatrix} \underline{q}_1 & \dots & \underline{q}_i & \dots & \underline{q}_{N_s} \end{bmatrix}$

15 y  $Q_2 = \begin{bmatrix} \sqrt{\eta} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \sqrt{\eta} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \sqrt{\eta} \end{bmatrix}$

20 A partir de la ecuación (12) del procedimiento de Gram-Schmidt modificado, los elementos diagonales  $\bar{R}_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  se obtienen, según la ecuación (21), como norma de columna  $\|\bar{\underline{q}}_i\|$  de los respectivos vectores de columna ampliados  $\bar{\underline{q}}_i$  de la matriz ampliada  $\bar{Q}$  y, debido a la ampliación vectorial con respecto al vector de columna correspondiente  $\underline{q}_i$  de la matriz  $Q$ , son mayores que el elemento diagonal correspondiente  $R_{i,i}$  de la matriz triangular  $R$  en la medida del factor  $\sqrt{\eta}$ .

$$\bar{R}_{i,i} = \|\bar{q}_i\| > \|q_i\| = R_{i,i} \quad (21)$$

Mediante la normalización de los vectores de columna ampliados  $\bar{q}_i$  de la matriz ampliada  $\bar{Q}$ , a partir de la ecuación (13) del procedimiento de Gram-Schmidt modificado, con el elemento diagonal  $\bar{R}_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$ , que es mayor que el elemento diagonal  $R_{i,i}$  de la matriz triangular  $R$ , los distintos componentes de los vectores de columna ampliados  $\bar{q}_i$  presentan menores valores que los componentes correspondientes del vector de columna  $q_i$  de la matriz  $Q$ . Dado que los elementos diagonales adyacentes  $\bar{R}_{i,j}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  se determinan, basándose en la ecuación (14) del procedimiento de Gram-Schmidt modificado, como producto escalar de los dos vectores de columna ampliados  $\bar{q}_i$  y  $\bar{q}_j$  a continuación de su normalización, y dado que adicionalmente los dos vectores de columna ampliados  $\bar{q}_i$  y  $\bar{q}_j$  son ortogonales entre sí en sus prolongaciones de vector – ocupación de los vectores de columna ampliados  $\bar{q}_i$  y  $\bar{q}_j$  con el factor  $\sqrt{\eta}$  en componentes respectivamente distintos de la prolongación de vector –, los elementos diagonales adyacentes  $\bar{R}_{i,j}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  son, según la ecuación (22), menores que los elementos diagonales adyacentes correspondientes  $R_{i,j}$  de la matriz triangular  $R$ .

$$\bar{R}_{i,j} = \bar{q}_i^H \cdot \bar{q}_j < q_i^H \cdot q_j = R_{i,j} \quad (22)$$

Sobre la base de la ecuación (15) del procedimiento de Gram-Schmidt ordenado, teniendo en cuenta que los elementos diagonales adyacentes  $\bar{R}_{i,j}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  son menores que los elementos diagonales adyacentes  $R_{i,j}$  de la matriz triangular  $R$ , las normas de columna  $\|\bar{q}_i\|$  de los vectores de columna ortogonales  $\bar{q}_i$  cambian tras su ortogonalización menos que las normas de columna  $\|q_i\|$  de los vectores de columna correspondientes  $q_i$ . Así pues, sobre la base de la ecuación (12) del procedimiento de Gram-Schmidt modificado, la variancia  $\Delta \bar{R}_{i,i}$  de los elementos diagonales  $\bar{R}_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  es, debido al proceso de la ortogonalización, menor que en los elementos diagonales  $R_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $R$ , como está representado en la ecuación (23).

$$\begin{aligned} \Delta \bar{R}_{i,i} &= \Delta \|\bar{q}_i\| = \|\bar{q}_i\|_{\text{después}} - \|\bar{q}_i\|_{\text{antes}} = \|\bar{R}_{i,j} \cdot \bar{q}_j\| < \\ < \Delta R_{i,i} &= \Delta \|q_i\| = \|q_i\|_{\text{después}} - \|q_i\|_{\text{antes}} = \|R_{i,j} \cdot q_j\| \end{aligned} \quad (23)$$

A continuación, sobre la base de la ecuación (8), el modelo ampliado del sistema de transmisión de antenas múltiples según la ecuación (19) se multiplica de forma bilateral por la matriz ortogonal ampliada hermitiana  $\bar{Q}^H$  para, aplicando el planteamiento de máxima probabilidad (Maximum-Likelihood), obtener una métrica cuya minimización basándose en la ecuación (9) proporciona valores estimados  $\underline{s}$  para el vector de emisión  $\underline{s}$ . En virtud de la normalización, la ortogonalización y la ordenación de los vectores de columna  $\bar{q}_i$  de la matriz ampliada  $\bar{Q}$  sobre la base de las ecuaciones (13) a (16), la matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q}$  ya no corresponde a la matriz ampliada preinicializada  $\bar{Q}$  según la ecuación (20), sino que se describe según la ecuación (24) mediante las submatrices  $Q_1'$  y  $Q_2'$ , diferentes de las submatrices  $Q_1$  y  $Q_2$  originales.

$$\bar{Q} = [Q_1' \quad Q_2'] \quad (24)$$

La multiplicación bilateral del modelo ampliado del sistema de transmisión de antenas múltiples según la ecuación (19) por la matriz ortogonal ampliada hermitiana  $\bar{Q}^H$  según la ecuación (24) lleva a la relación matemática en la ecuación (25):

$$\underline{y} = \bar{Q}^H \cdot \underline{r} = \bar{R} \cdot \underline{s} + \bar{Q}^H \cdot \underline{n} = \bar{R} \cdot \underline{s} + Q_1'^H \cdot \underline{n} - \sqrt{\eta} \cdot Q_2'^H \cdot \underline{s} \quad (25)$$

En virtud de la normalización, la ortogonalización y la ordenación de los vectores de columna  $\bar{q}_i$  de la matriz ampliada  $\bar{Q}$ , las submatrices modificadas  $Q_1'$  y  $Q_2'$  ya no son matrices ortogonales –  $Q_1' \cdot Q_1'^H \neq I_{N_r}$  y  $Q_2' \cdot Q_2'^H \neq I_{N_t}$  –. Hasta aquí, el vector de señal de recepción  $\underline{r}$  de la ecuación (25), filtrado previo con la matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q}^H$  como matriz de filtro previo, presenta desventajosamente un vector de ruido de color adicional  $Q_1'^H \cdot \underline{n}$  con la distribución de Gauss compleja  $\mathbb{C}(0, \sigma_n^2 \cdot Q_1'^H \cdot Q_1')$  y un término de compensación (offset) adicional  $-\sqrt{\eta} \cdot Q_2'^H \cdot \underline{s}$ . Sobre la base de la ecuación (9), aplicando el planteamiento de máxima probabilidad (Maximum-Likelihood) – minimización del vector de ruido  $\underline{n}$  – se obtiene por lo tanto, partiendo del modelo ampliado del sistema de



transmisión de antenas múltiples según la ecuación (19), la métrica  $M(\underline{s})$ , a minimizar con un estimador de secuencia de máxima probabilidad (Maximum-Likelihood-Sequence-Estimator), según la ecuación (26):

$$\hat{\underline{s}} = \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} M(\underline{s}) \right\} = \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} (\| \underline{\bar{r}} - \bar{H} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2) \right\} \quad (26)$$

5 Si en la métrica según la ecuación (26) se introduce la descomposición  $Q \cdot R$  de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$ , deben, como se muestra en la ecuación (27), realizarse las siguientes operaciones de matriz:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{s}} &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} (\| \underline{\bar{r}} - \bar{H} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2) \right\} = \\ &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} (\| \underline{\bar{r}} - \bar{H} \cdot \underline{\bar{s}} + \bar{Q}^H \cdot \bar{r} - \bar{Q} \cdot \bar{r} + \bar{Q} \cdot \bar{H} \cdot \underline{\bar{s}} - \bar{Q} \cdot \bar{H} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2) \right\} \\ &\leq \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} (\| \bar{Q}^H \cdot \bar{r} - \bar{Q} \cdot \bar{H} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 + \| \bar{r} - \bar{H} \cdot \underline{\bar{s}} + \bar{Q} \cdot \bar{r} + \bar{Q} \cdot \bar{H} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2) \right\} \\ &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} (\| \underline{\bar{y}} - \bar{R} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 + \| \bar{r} - \bar{Q} \cdot \bar{r} + (\bar{Q} \cdot \bar{R} - \bar{Q} \cdot \bar{R}) \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2) \right\} \\ &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} (\| \underline{\bar{y}} - \bar{R} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 + \| \bar{r} - \bar{Q} \cdot \bar{r} + \bar{Q} \cdot \bar{R} \cdot \underline{\bar{s}} + \bar{Q} \cdot \bar{Q}^H \cdot \bar{n} - \bar{Q} \cdot \bar{Q}^H \cdot \bar{r} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2) \right\} \\ &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} (\| \underline{\bar{y}} - \bar{R} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 + \| \bar{r} - \bar{Q} \cdot \bar{Q}^H \cdot \bar{r} + \bar{Q} \cdot \bar{R} \cdot \underline{\bar{s}} + \bar{Q} \cdot \bar{Q}^H \cdot \bar{n} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2) \right\} \\ &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} (\| \underline{\bar{y}} - \bar{R} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 + \| (I_{N_t+N_r} - \bar{Q} \cdot \bar{Q}^H) \cdot \bar{r} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2) \right\} \quad (27) \end{aligned}$$

10 Para la transformación matemática de la fila 4 a la fila 5 en la ecuación (27) se ha utilizado la ecuación de sistema (8) y para la transformación matemática de la fila 6 a la fila 7 se ha utilizado la ecuación de sistema (4), teniendo en cuenta la ortogonalidad de la matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q} - \bar{Q} \cdot \bar{Q}^H = I_{N_t+N_r} -$ . La minimización de la métrica  $\| \underline{\bar{y}} - \bar{R} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 + \| (I_{N_t+N_r} - \bar{Q} \cdot \bar{Q}^H) \cdot \bar{r} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2$  en la fila 7 de la ecuación (27) lleva también forzosamente, debido al signo de no igualdad en la fila 3 de la ecuación (27), a la minimización de la métrica  $\| \bar{r} - \bar{H} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2$  en la fila 1 de la ecuación (27).

15 De la ecuación (27) se desprende que el término  $(I_{N_t+N_r} - \bar{Q} \cdot \bar{Q}^H) \cdot \bar{r}$  es independiente de las hipótesis  $\underline{\bar{s}}$  del vector de señal de emisión  $\underline{\bar{s}}$  a estimar y, por lo tanto, no se debe tener en cuenta en la minimización de métrica según la ecuación (28).

$$\begin{aligned} \hat{\underline{s}} &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} M(\underline{s}) \right\} = \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} (\| \underline{\bar{y}} - \bar{R} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 - \eta \| \underline{\bar{s}} \|^2) \right\} \\ &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} \left( \sum_{k=1}^{N_r} \left| y_k - \sum_{l=1}^k \bar{R}_{k,l} \cdot \bar{s}_l \right|^2 - \eta \cdot |\bar{s}_k|^2 \right) \right\} \quad (28A) \end{aligned}$$

Si se desprecia el término  $\eta \cdot |\bar{s}_k|^2$  en la minimización de métrica, se obtiene el valor estimado  $\hat{\underline{s}}$  para el vector de señal de emisión  $\underline{\bar{s}}$  según la ecuación (28B).

$$\begin{aligned} \hat{\underline{s}} &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} M(\underline{s}) \right\} = \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} \| \underline{\bar{y}} - \bar{R} \cdot \underline{\bar{s}} \|^2 \right\} \\ &= \arg \left\{ \min_{\underline{s} \in S^{N_r}} \sum_{k=1}^{N_r} \left| y_k - \sum_{l=1}^k \bar{R}_{k,l} \cdot \bar{s}_l \right|^2 \right\} \quad (28B) \end{aligned}$$

20 Sobre la base de estos fundamentos matemáticos, a continuación se explica detalladamente por medio del organigrama de la figura 3 el procedimiento según la invención para la detección de señales de emisión en una transmisión de capas múltiples.

En la primera etapa S10 del procedimiento según la invención se determina sobre la base de la matriz de transferencia  $H$ , para todos los  $N_t \cdot N_r$  canales de transmisión entre las  $N_t$  antenas emisoras y las  $N_r$  antenas receptoras, cuyos coeficientes se determinan con un procedimiento de estimación de canal adecuado, y un factor libremente seleccionable  $\sqrt{\eta}$ , la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  según la ecuación (17).

5 Con este fin, el factor  $\sqrt{\eta}$  debe determinarse mediante estudios de parámetros en el caso de aplicación concreto. Los estudios de parámetros del factor  $\sqrt{\eta}$  a modo de ejemplo según la figura 6 han mostrado que con el aumento del factor  $\eta$  la diferencia entre la menor métrica de camino y la segunda, tercera o cuarta menor métrica de camino disminuye, de manera que con el aumento del factor  $\eta$  aumenta la sensibilidad al ruido y por tanto la probabilidad de una elección de camino incorrecta y con ello una detección incorrecta de las señales de emisión  $\underline{s}$ . En cambio, si el factor  $\eta$  se elige demasiado pequeño desaparece la ventaja de una ponderación mayor de los elementos diagonales  $\bar{R}_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  con respecto a los elementos diagonales  $R_{i,i}$  no ponderados en mayor medida de una matriz triangular no ampliada  $R$ . A partir de los estudios de parámetros de la figura 7, en los que se determinó la tasa de error binario [Bit-Error-Rate (BER)] en función del factor  $\eta$  en un detector QRD-M ordenado con una mayor ponderación de los elementos diagonales  $\bar{R}_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  – algoritmo LSQRD-M – en comparación con un detector QRD-M ordenado con un filtro previo optimizado según el criterio error cuadrático medio mínimo [Minimum-Mean-Square-Error (MMSE)]– algoritmo MSQRD-M –, se desprende que un valor óptimo para el factor  $\eta$  es 0,01.

En la siguiente etapa S20 del procedimiento se realiza la descomposición  $QR$  ordenada de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  en la matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q}$  y en la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  mediante el procedimiento de Gram-Schmidt ordenado según la figura 4, que se describe con mayor detalle más adelante.

A partir de la matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q}$  obtenida mediante descomposición  $QR$  ordenada de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  en la etapa S20 del procedimiento, se determina en la siguiente etapa S30 del procedimiento, mediante transposición y conjugación de los elementos de matriz, la matriz ortogonal ampliada hermitiana  $\bar{Q}^H$ , que se utiliza como matriz de filtro previo para filtrado previo de un vector de señal de recepción ampliado  $\bar{r}$  definido según la ecuación (19).

En la siguiente etapa S40 del procedimiento, una vez ponderadas todas las hipótesis  $\underline{\hat{s}}$  del vector de señal de emisión  $\underline{s}$  por una parte con la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$ , obtenida mediante una descomposición  $QR$  ordenada de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  en la etapa S20 del procedimiento, y por otra parte con el factor  $\eta$ , se realiza el cálculo de las métricas correspondientes  $M(\underline{\hat{s}})$  según la ecuación (28A) y la determinación de la métrica respectiva mínima, cuya hipótesis  $\underline{\hat{s}}$  correspondiente representa el valor estimado  $\underline{\hat{s}}$  para el vector de señal de emisión  $\underline{s}$  a estimar. Si se desprecia el término  $\eta \cdot |\hat{s}_k|^2$  en una segunda forma de realización de la métrica  $M(\underline{\hat{s}})$  según la invención, se llega a una minimización de la métrica y una determinación del valor estimado  $\underline{\hat{s}}$  para el vector de señal de emisión  $\underline{s}$  a estimar según la ecuación (28B). En ambas formas de realización de la métrica  $M(\underline{\hat{s}})$  según la invención puede utilizarse un estimador de secuencia de máxima probabilidad [Maximum-Likelihood (MLSE)] convencional en el diagrama de Trellis o dendrograma, tal y como se emplea según el estado actual de la técnica para la corrección temporal y la detección de secuencias de símbolos.

En la etapa final S50 del procedimiento se realiza por último una permutación de los valores estimados  $\underline{\hat{s}}$  determinados del vector de señal de emisión  $\underline{s}$  – desplazamiento de orden de los distintos valores estimados  $\hat{s}_i$  en el vector de valor estimado  $\underline{\hat{s}}$  – de acuerdo con el desplazamiento de orden inverso en la ordenación de los distintos vectores de columna  $\bar{q}_i$  de la matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q}$  en la descomposición  $QR$  ordenada realizada en la etapa S20 del procedimiento.

La descomposición  $QR$  ordenada según la invención de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  a realizar en el paso S20 del procedimiento según la invención mediante el procedimiento de Gram-Schmidt ordenado se desprende del organigrama de la figura 4.

45 En la primera etapa S100 del procedimiento de descomposición  $QR$  ordenada según la invención de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  se realiza, en una inicialización, la ocupación previa de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  con elementos cero, la ocupación previa de la matriz ortogonal ampliada  $\bar{Q}$  con el coeficiente de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$ , así como la ocupación previa de la variable de control  $i$  para la capa a determinar de la transmisión de capas múltiples con el valor uno.

50 En la siguiente etapa S110 del procedimiento se determina si ya se han procesado todas las capas de la transmisión de capas múltiples de la descomposición  $QR$  comprobando si la variable de control  $i$  para la capa a determinar sobrepasa el valor de la capa más alta –  $N_t$  –. Si la variable de control  $i$  para la capa a determinar es mayor que el valor de la capa más alta y, por lo tanto, se han procesado ya todas las capas en la descomposición  $QR$ , ha concluido la descomposición  $QR$  ordenada según la invención de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$ .

55 En caso contrario se realiza, en la siguiente etapa S120 del procedimiento, la ordenación de los vectores de columna  $\bar{q}_i$  dentro de la matriz ampliada  $\bar{Q}$  en orden ascendente de la norma de columna  $\|\bar{q}_i\|$ , desde la columna izquierda hasta la columna derecha. Con este fin, para determinar el vector de columna  $\bar{q}_i$  en la  $i$ -ésima columna de la matriz ampliada ordenada  $\bar{Q}_s$ , una vez que la ordenación en las columnas situadas a la izquierda de la  $i$ -ésima columna – columnas  $1, \dots, i - 1$  – ha determinado ya los vectores de columna  $\bar{q}_i$  con las normas de columna  $\|\bar{q}_i\|$

respectivamente menores, se identifica según la ecuación (16), a partir de todas las columnas aún sin ordenar situadas a la derecha de la  $i$ -ésima columna – columnas  $i + 1, \dots, N_t$  –, el vector de columna  $\underline{\bar{q}}_{ki}$  que presenta la menor norma de columna  $\|\underline{\bar{q}}_{ki}\|$  de todos los vectores de columna situados a la derecha. Tras la identificación se cambia el vector de columna  $\underline{\bar{q}}_{ki}$  de la  $k_i$ -ésima columna por el vector de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  de la  $i$ -ésima columna.

5 En la siguiente etapa S130 del procedimiento se determinan los elementos diagonales  $\bar{R}_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$ , sobre la base de la ecuación (12), como valor de la norma de columna  $\|\underline{\bar{q}}_i\|$  del correspondiente vector de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  de la matriz ampliada ordenada  $\bar{Q}_s$ .

La siguiente etapa S140 del procedimiento incluye la normalización de los vectores de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  ordenados de la matriz ampliada ordenada  $\bar{Q}_s$ , sobre la base de la ecuación (13), con el correspondiente elemento diagonal  $\bar{R}_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  determinado en la anterior etapa S130 del procedimiento.

10 En la siguiente etapa S150 del procedimiento se determinan todos los elementos diagonales adyacentes  $\bar{R}_{i,l}$  de la  $i$ -ésima capa situados a la derecha del elemento diagonal  $\bar{R}_{i,i}$  en la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$ , sobre la base de la ecuación (14), como proyección del vector de columna  $\underline{\bar{q}}_l$  ordenado en el vector de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  ordenado mediante una determinación del producto escalar  $q_i^H \cdot q_l$ .

15 Por último, en la siguiente etapa S160 del procedimiento, se ortogonalizan con respecto al vector de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  todos los vectores de columna  $\underline{\bar{q}}_{i+1}, \dots, \underline{\bar{q}}_{N_t}$  de la  $i$ -ésima capa situados a la derecha del vector de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  en la matriz ampliada ordenada  $\bar{Q}_s$ , eliminando del vector de columna  $\underline{\bar{q}}_l$  a ortogonalizar respectivamente, sobre la base de la ecuación (15), mediante sustracción, la parte vectorial  $R_{i,l} \cdot q_i$  del vector de columna  $\underline{\bar{q}}_l$  a ortogonalizar respectivamente paralela al vector de columna  $\underline{\bar{q}}_i$ . De este modo, el vector de columna  $\underline{\bar{q}}_l$  remanente contiene ya sólo la parte vectorial ortogonal al vector de columna  $\underline{\bar{q}}_i$ . Si la ortogonalización con respecto al vector de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  de los vectores de columna  $\underline{\bar{q}}_l$  situados respectivamente a la derecha del vector de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  respectivo se realiza en sucesión con respecto a todos los vectores de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  de la matriz ampliada ordenada  $\bar{Q}_s$ , se obtiene una matriz ortogonal ampliada ordenada  $\bar{Q}_s$ , que abarca un espacio vectorial  $N_t + N_r$ -dimensional ortogonal. Los elementos diagonales  $\bar{R}_{i,i}$  determinados en la etapa S130 del procedimiento y los elementos diagonales adyacentes  $\bar{R}_{i,j}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  determinados en la etapa S150 del procedimiento forman las proyecciones de los distintos vectores de columna  $\underline{h}_i$  de la matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  en el espacio vectorial  $N_t + N_r$ -dimensional ortogonal formado por la matriz ortogonal ampliada ordenada  $\bar{Q}_s$ .

20 Por último, en la etapa final S170 del procedimiento, se incrementa la variable de control  $i$  para la capa a determinar y se salta a la etapa S110 del procedimiento, para determinar el elemento diagonal  $\bar{R}_{i+1,i+1}$  y los elementos diagonales adyacentes  $\bar{R}_{i+1,j}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  en la capa siguiente  $i + 1$ , determinar en una ordenación los vectores de columna  $\underline{\bar{q}}_{ki+1}$  con la menor norma de columna  $\|\underline{\bar{q}}_{ki+1}\|$  de todos los vectores de columna  $\underline{\bar{q}}_i$  situados a la derecha de la siguiente columna  $i + 1$  en la matriz ampliada  $\bar{Q}$ , normalizar el vector de columna  $\underline{\bar{q}}_{i+1}$  situado en la siguiente columna  $i + 1$  tras la ordenación y ortogonalizar con respecto al vector de columna  $\underline{\bar{q}}_{i+1}$  de la siguiente columna  $i + 1$  todos los vectores de columna  $\underline{\bar{q}}_{i+2}, \dots, \underline{\bar{q}}_{N_t}$  situados a la derecha de la siguiente columna  $i + 1$ .

35 En la figura 5 está representado el dispositivo según la invención para la detección de señales de emisión en una transmisión de capas múltiples.

En las  $N_r = 3$  antenas receptoras  $1_1, 1_2$  y  $1_3$  se reciben las señales de recepción  $r_1, r_2$  y  $r_3$ , que están compuestas respectivamente de, en total,  $N_t$  señales de emisión  $\underline{s}$  superpuestas y se alimentan al filtro previo 2, en el que se realiza un filtrado previo de las señales de recepción  $\bar{r} = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ 0_{N_r \times 1}]$  con la matriz ortogonal ampliada ordenada  $\bar{Q}_s^H$  como matriz de filtro previo.

40 Las señales de recepción previamente filtradas  $\bar{Q}_s^H \cdot \bar{r}$  se alimentan a un estimador de secuencia de máxima probabilidad (Maximum-Likelihood) 3, que calcula en el diagrama de Trellis o dendrograma respectivamente una métrica  $M(\hat{\underline{s}})$  a partir del cuadrado del valor de la diferencia entre las señales de recepción previamente filtradas  $\bar{Q}_s^H \cdot \bar{r}$  y a partir de cada hipótesis  $\hat{\underline{s}}$  del vector de señal de emisión  $\underline{s}$  ponderada con la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$ , y opcionalmente menos cada hipótesis al cuadrado  $\hat{\underline{s}}^2$  del vector de señal de emisión  $\underline{s}$  ponderada con el factor  $\eta$ , y calcula así la menor métrica de todas las métricas  $M(\hat{\underline{s}})$  calculadas cuya correspondiente hipótesis  $\hat{\underline{s}}$  del vector de señal de emisión  $\underline{s}$  representa el valor estimado  $\hat{\underline{s}}$  buscado del vector de señal de emisión  $\underline{s}$ .

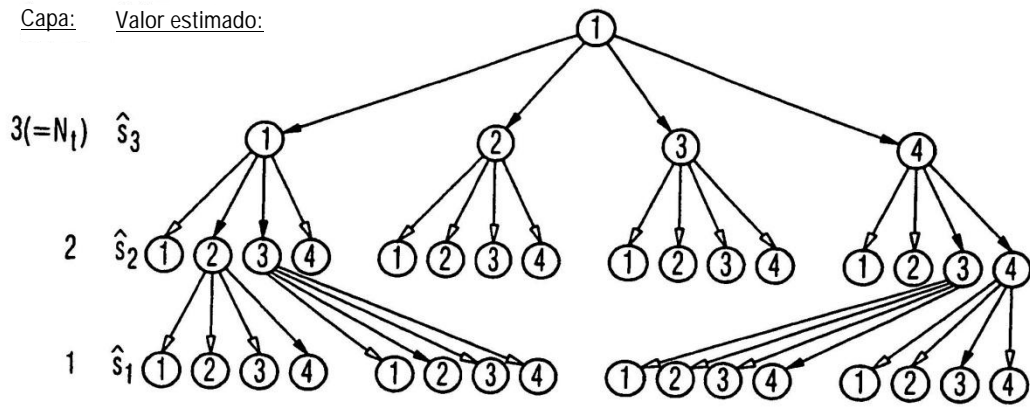
45 En la figura 8 está representada la tasa de error binario – BER – en función de la relación señal-ruido para distintos algoritmos de detección y para un número diferente de estados – 4 estados: por ejemplo señales de transmisión moduladas por QPSK, 8 estados: por ejemplo señales de transmisión moduladas por 8-PSK, 16 estados: por ejemplo señales de transmisión moduladas por 16QAM. Un algoritmo M puro con descomposición QR integrada – algoritmo QRD-M – presenta los peores resultados de detección. Pueden lograrse mejoras con un algoritmo M con descomposición QR ordenada – algoritmo SQRD-M –. Con un algoritmo M con descomposición QR integrada y un filtro previo optimizado según el criterio de error cuadrático medio mínimo [Minimum-Mean-Square-Error (MMSE)] –

- algoritmo MQRD-M – pueden conseguirse resultados de detección similares. Pueden realizarse de nuevo mejoras mediante una descomposición  $QR$  ordenada – algoritmo MSQRD-M –. En general, la ordenación en la descomposición  $QR$  lleva a mejores resultados que el filtrado previo MMSE. Los mejores resultados pueden conseguirse con el algoritmo M según la invención con descomposición  $QR$  ordenada y una mayor ponderación de los elementos diagonales  $\bar{R}_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  – un así llamado acondicionamiento previo de relleno diagonal [Diagonal-Loading-Preconditioning (DLP)] en el algoritmo LSQRD-M .
- 5 La invención no está limitada a las formas de realización representadas del procedimiento según la invención y del dispositivo según la invención para la detección de señales de emisión en una transmisión de capas múltiples. El estimador de secuencia de máxima probabilidad (Maximum-Likelihood) según la invención, con una mayor
- 10 ponderación de los elementos diagonales  $\bar{R}_{i,i}$  de la matriz triangular ampliada  $\bar{R}$  puede, según la invención, combinarse también con un filtro previo optimizado según el criterio de error cuadrático medio mínimo [Minimum-Mean-Square-Error], en el que se recurre a una matriz de transferencia ampliada  $\bar{H}$  con  $\eta = \sigma_n^2$ .

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la detección de varias señales de emisión ( $\underline{s}$ ), emitidas por una respectiva antena emisora, a partir de varias señales de recepción ( $\underline{\bar{r}}$ ), recibidas en una respectiva antena receptora, con las siguientes etapas de procedimiento:
- 5 - descomposición ( $Q \cdot R$ ) de una matriz de canal de transferencia ( $\bar{H}$ ) en una matriz ortogonal ( $\bar{Q}^H$ ) y una matriz triangular ( $\bar{R}$ ), presentando la matriz de canal de transferencia ( $\bar{H}$ ) vectores de columna ( $\bar{h}_i$ ) ocupados con un respectivo factor ( $\sqrt{\eta}$ ) y prolongados entre las distintas antenas emisoras y receptoras en relación con una matriz de canal de transferencia ( $H$ ),
- 10 - determinación de una métrica ( $M(\underline{\hat{s}})$ ) a partir del cuadrado del valor de la diferencia ( $\|\bar{Q}^H \cdot \underline{\bar{r}} - \bar{R} \cdot \underline{\hat{s}}\|^2$ ) entre las señales de recepción ( $\bar{Q}^H \cdot \underline{\bar{r}}$ ) previamente filtradas con la matriz ortogonal ( $\bar{Q}^H$ ) y las hipótesis ( $\underline{\hat{s}}$ ) ponderadas con la matriz triangular ( $\bar{R}$ ) y respectivamente correspondientes a las distintas señales de emisión ( $\underline{s}$ ) y
- 15 - determinación de valores estimados ( $\underline{\hat{s}}$ ) de las señales de emisión ( $\underline{s}$ ) mediante una minimización de la métrica ( $M(\underline{\hat{s}})$ ).
2. Procedimiento para la detección según la reivindicación 1, **caracterizado porque** la estimación de las señales de emisión ( $\underline{s}$ ) se realiza con un algoritmo QRD-M.
3. Procedimiento para la detección según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado porque** antes de determinar la métrica ( $M(\underline{\hat{s}})$ ), se forma una matriz ortogonal ordenada ( $\bar{Q}_s$ ) mediante una ordenación de los vectores de columna ( $\bar{q}_i$ ) de la matriz ortogonal ( $\bar{Q}$ ) según la altura de su norma de columna ( $\|\bar{q}_i\|$ ).
4. Procedimiento para la detección según la reivindicación 3, **caracterizado porque** para la ordenación de los vectores de columna ( $\bar{q}_i$ ) de la matriz ortogonal ( $\bar{Q}$ ) se utiliza un procedimiento de Gram-Schmidt ordenado.
5. Procedimiento para la detección según la reivindicación 3 o 4, **caracterizado porque** la determinación de los valores estimados ( $\underline{\hat{s}}$ ) de las señales de emisión ( $\underline{s}$ ) se realiza con un algoritmo QRD-M ordenado.
6. Procedimiento para la detección según una de las reivindicaciones 3 a 5, **caracterizado porque** la ordenación de los valores estimados ( $\underline{\hat{s}}$ ) de las señales de emisión ( $\underline{s}$ ) condicionada por la ordenación de los vectores de columna ( $\bar{q}_i$ ) de la matriz ortogonal ( $\bar{Q}$ ) en la matriz ortogonal ordenada ( $\bar{Q}_s$ ) se anula mediante una correspondiente permutación inversa de valores estimados ( $\underline{\hat{s}}$ ) de las señales de emisión ( $\underline{s}$ ).
7. Procedimiento para la detección según una de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado porque** la métrica ( $M(\underline{\hat{s}})$ ) se amplía de manera sustractiva en la medida del cuadrado de las señales de emisión ( $\underline{s}$ ) multiplicadas por el factor ( $\eta$ ).
8. Procedimiento para la detección según una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado porque** para la estimación de las señales de emisión ( $\underline{s}$ ) se utiliza un algoritmo T o un algoritmo de lista.
9. Dispositivo para la detección de varias señales de emisión ( $\underline{s}$ ), emitidas respectivamente por una antena emisora, a partir de varias señales de recepción ( $\underline{\bar{r}}$ ), recibidas respectivamente en una antena receptora, con un filtro previo (2) para filtrar previamente las señales de recepción ( $\underline{\bar{r}}$ ) con una matriz de filtro previo y un estimador de secuencia subsiguiente (3) para estimar las señales de emisión ( $\underline{s}$ ) mediante una minimización de una métrica ( $M$ ),
- 45 siendo la matriz de filtro previo una matriz ortogonal ( $\bar{Q}^H$ ) determinada a partir de una descomposición ( $Q \cdot R$ ) de una matriz de canal de transferencia ( $\bar{H}$ ),
- 50 siendo la métrica ( $M(\underline{\hat{s}})$ ) el cuadrado del valor de una diferencia ( $\|\bar{Q}^H \cdot \underline{\bar{r}} - \bar{R} \cdot \underline{\hat{s}}\|^2$ ) entre las señales de recepción ( $\bar{Q}^H \cdot \underline{\bar{r}}$ ) filtradas previamente con la matriz ortogonal ( $\bar{Q}^H$ ) y las hipótesis ( $\underline{\hat{s}}$ ) ponderadas con una matriz triangular ( $\bar{R}$ ) determinada a partir de la descomposición ( $Q \cdot R$ ) de la matriz de canal de transferencia ( $\bar{H}$ ) y correspondientes respectivamente a las distintas señales de emisión ( $\underline{s}$ ) y
- presentando la matriz de canal de transferencia ( $\bar{H}$ ) vectores de columna ( $\bar{h}_i$ ) ocupados con un respectivo factor ( $\sqrt{\eta}$ ) y prolongados entre las distintas antenas emisoras y receptoras en relación con una matriz de canal de transferencia ( $H$ ).

55



Leyenda:

- $\rightarrow$  : rama potencial
- $\rightarrow$  : rama detectada
- ② : estado / hipótesis

Fig. 1

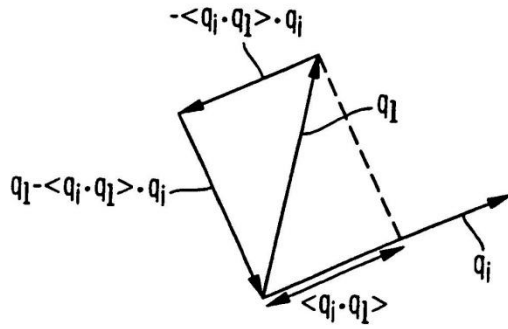


Fig. 2

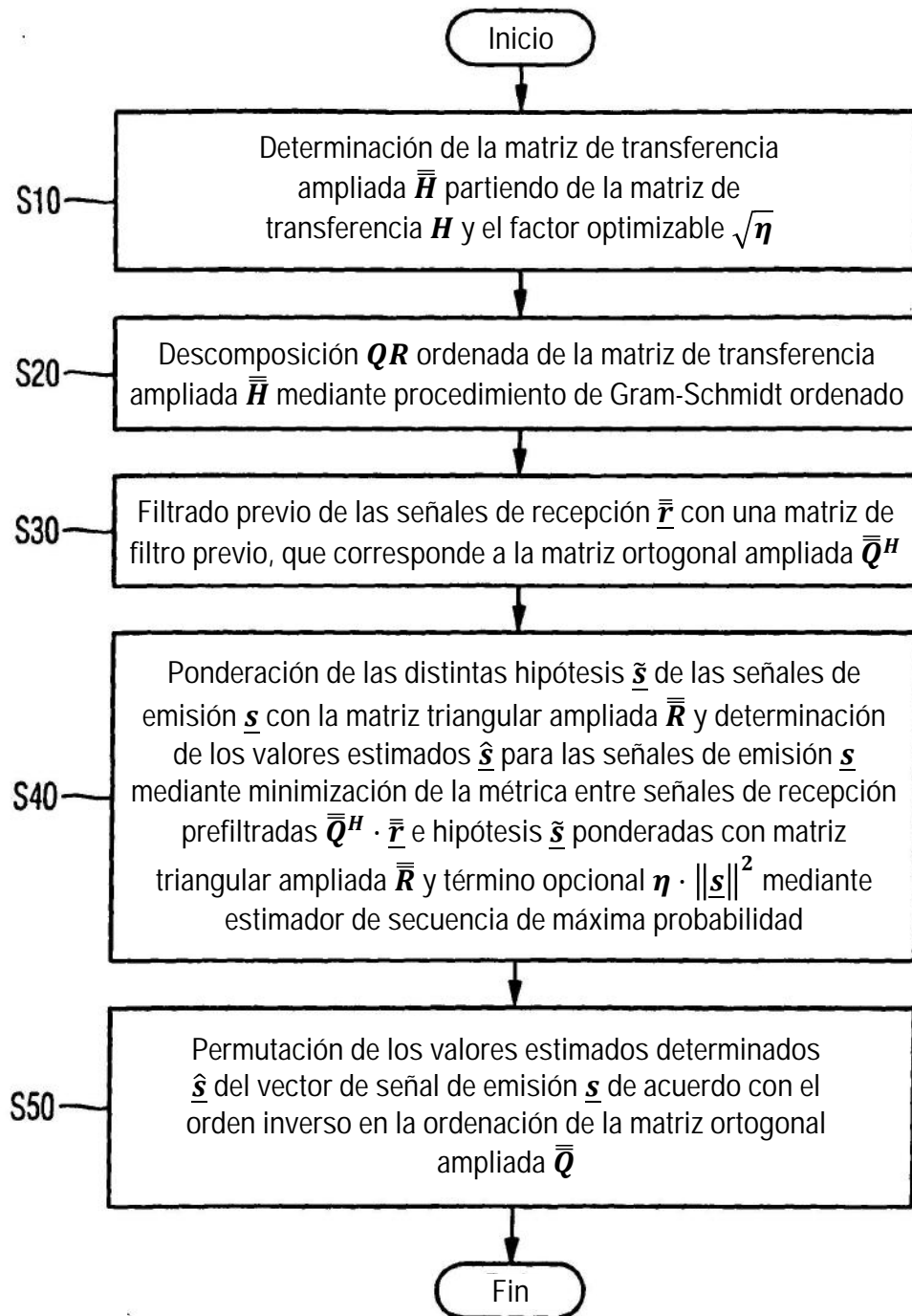


Fig. 3

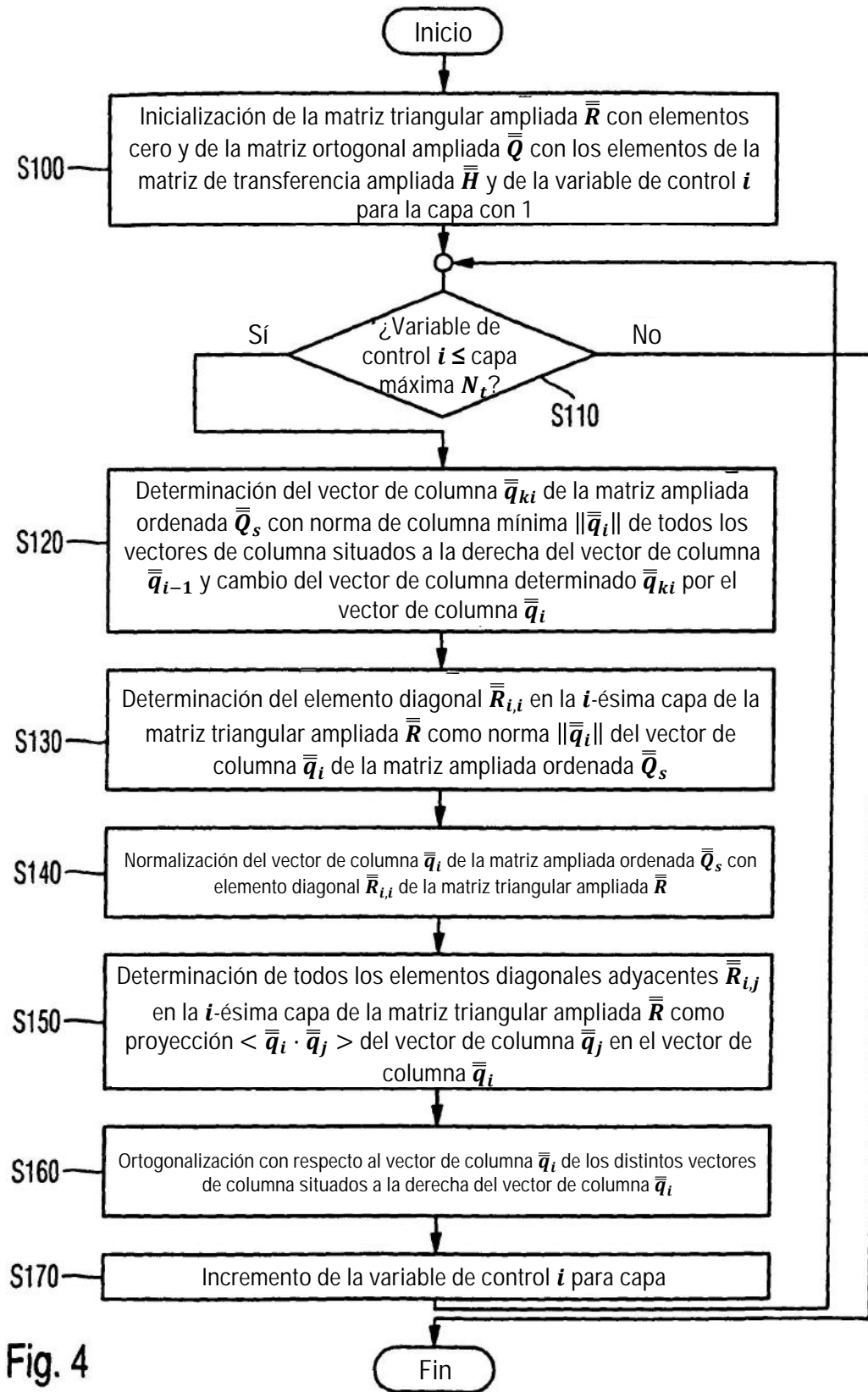


Fig. 4



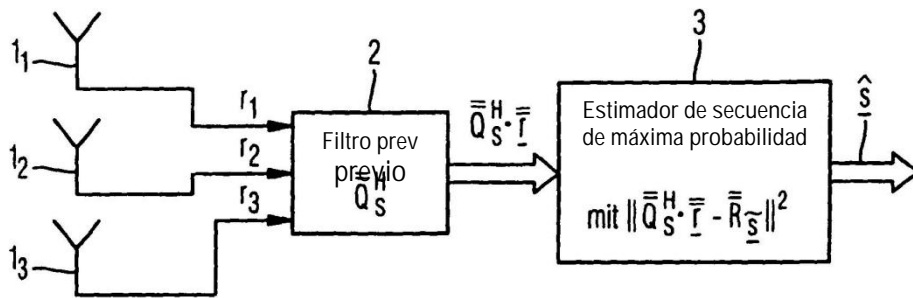


Fig. 5

Diferencia media de métrica de camino

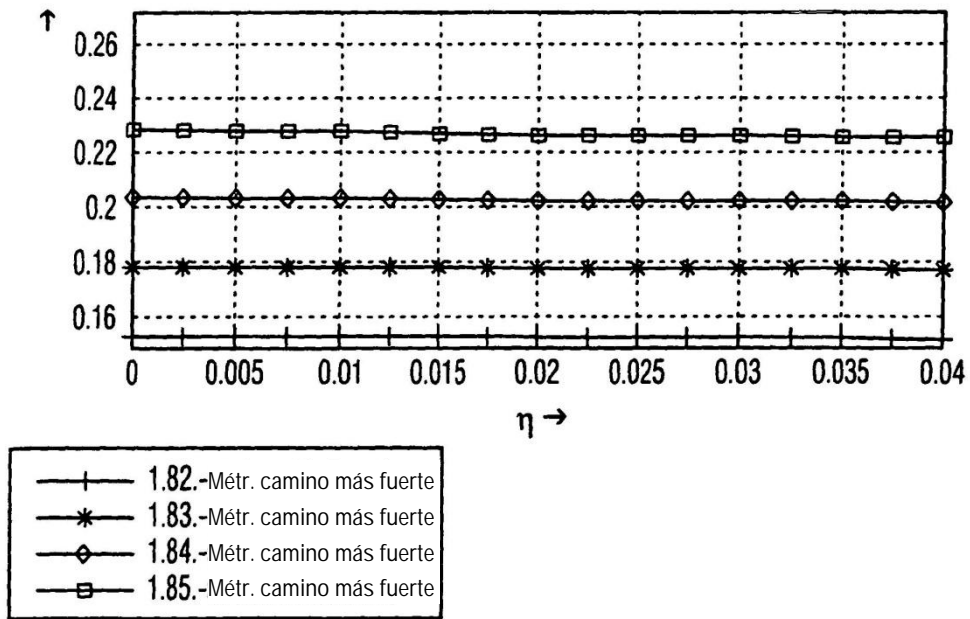
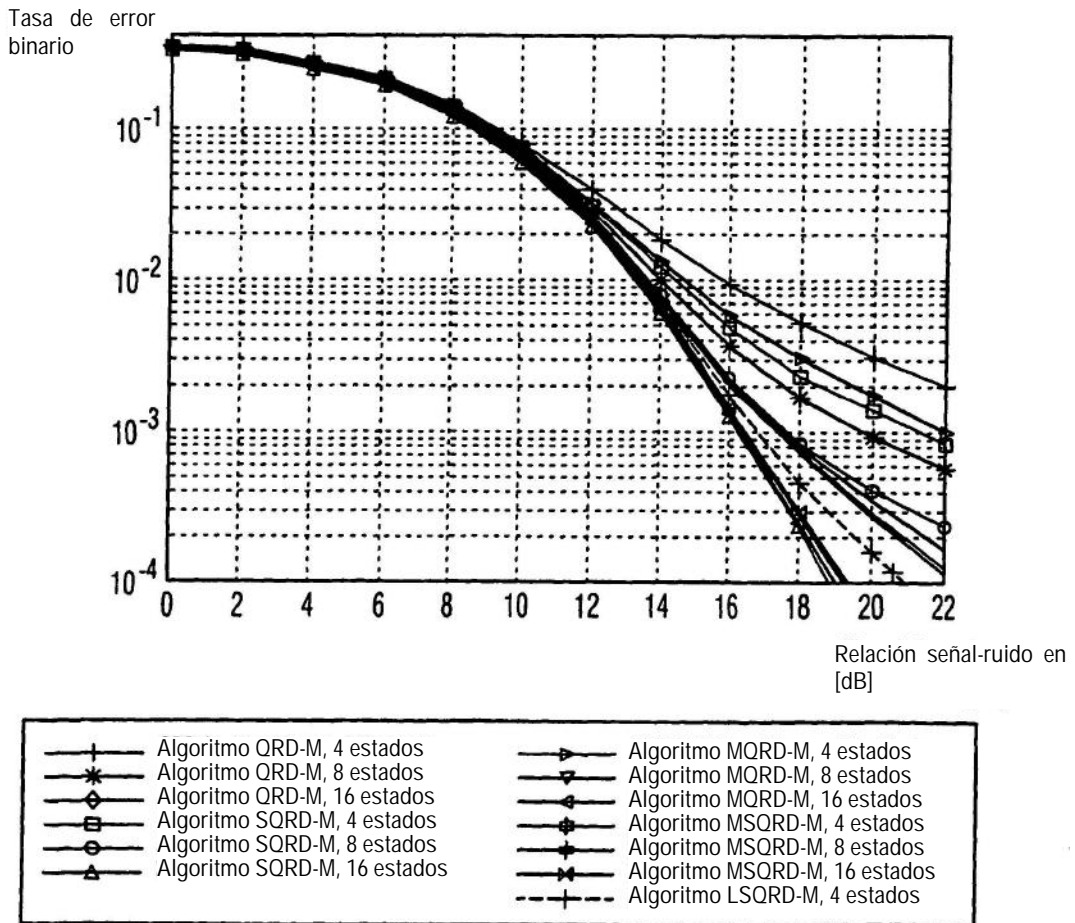
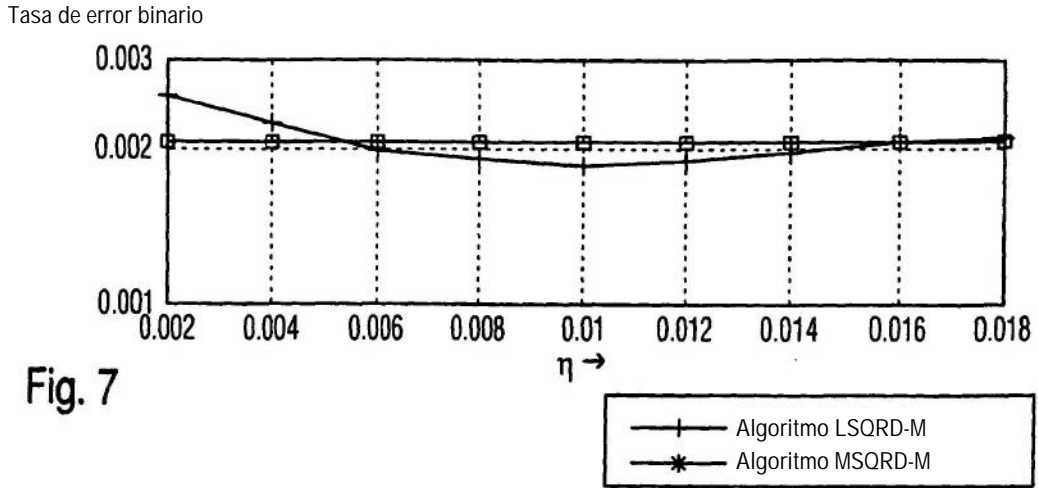


Fig. 6



**REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN**

5 La lista de referencias citada por el solicitante lo es solamente para utilidad del lector, no formando parte de los documentos de patente europeos. Aún cuando las referencias han sido cuidadosamente recopiladas, no pueden excluirse errores u omisiones y la OEP rechaza toda responsabilidad a este respecto.

**Documentos de patente citados en la descripción**

- EP 1246418 A2 [0005]

10