



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 333 067**

51 Int. Cl.:
H04L 25/03 (2006.01)
H04L 25/49 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08151938 .1**
96 Fecha de presentación : **26.02.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **1965548**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **03.09.2008**

54 Título: **Descodificador por verosimilitud máxima para sistema multifuente con modulación por posición de impulsos.**

30 Prioridad: **27.02.2007 FR 07 53531**

73 Titular/es: **Commissariat à l'Energie Atomique
25, rue Leblanc Immeuble "Le Ponant D"
75015 París, FR**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.02.2010

72 Inventor/es: **Abou Rjeily, Chadi**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.02.2010

74 Agente: **Justo Bailey, Mario de**

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

Descodificador por verosimilitud máxima para sistema multifuente con modulación por posición de impulsos.

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere al campo de la descodificación por verosimilitud máxima, más en particular para un sistema multifuente que utiliza una modulación por posición de impulsos.

10 **Estado de la técnica anterior**

Los receptores que utilizan un criterio de verosimilitud máxima, también denominados receptores ML (Maximum Likelihood) son de sobra conocidos en el campo de las telecomunicaciones por ser óptimos cuando el canal de transmisión es gaussiano. Se encontrará una descripción de estos receptores, por ejemplo, en la obra de J. G. Proakis titulada "Digital communications", 4ª edición, páginas 242-247. Los receptores por verosimilitud máxima han sido contemplados en particular en el campo de las telecomunicaciones móviles. Con el fin de eliminar la interferencia por acceso múltiple o MAI (Multi Access Interference), se puede hacer uso de un receptor ML capaz de descodificar simultáneamente los símbolos emitidos por los distintos usuarios en el canal de transmisión (receptor ML multiusuario). Se puede mostrar que la estimación de los símbolos transmitidos por estos usuarios según el criterio de verosimilitud máxima equivale a buscar entre los puntos de una red aquél que es el más cercano a un punto representativo de la señal recibida en un espacio de dimensión M^K en el que M es la dimensionalidad de la modulación utilizada por los K usuarios. La red de puntos es generada por las constelaciones de modulación de los distintos usuarios. Este método se revela complejo rápidamente para K elevado, razón por la que como norma se recurre a una descodificación llamada "por esfera", que limita la búsqueda del vecino más cercano a los puntos de la red pertenecientes a una bola de ruido centrada en el punto recibido. Se encontrará una descripción del descodificador por esfera en el artículo de E. Viterbo y col. titulado "A universal lattice code decoder for fading channels", publicado en IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45, páginas 1639-1642, julio de 1999. La descodificación por esfera se ha aplicado a sistemas que utilizan constelaciones de modulación de tipo PAM o QAM.

Más recientemente, se ha propuesto la descodificación por esfera para la realización de receptores de sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output). Por sistema MIMO se entiende un sistema de telecomunicación en el que por lo menos un emisor transmite símbolos de información por medio de una pluralidad de antenas. El receptor puede poseer una sola antena (entonces se habla más en particular de sistema MISO, acrónimo de Multiple Input Single Output) o una pluralidad de antenas, escogiéndose en la presente el término MIMO para designar indistintamente estas dos configuraciones.

En el caso de un sistema MIMO, la red de puntos es generada por las constelaciones de modulación utilizadas para transmitir los símbolos por las distintas antenas. Se encontrará un ejemplo de realización de descodificación por esfera para un sistema MIMO en el artículo de M. O. Damen y col. titulado "On Maximum-Likelihood detection and the search for the closest lattice point", publicado en IEEE Trans. on Information Theory, vol. 49, nº 10, octubre de 2003, páginas 2389-2402. En este descodificador por esfera, sólo se contemplan modulaciones PAM y QAM.

En la continuación se designará mediante el término genérico multifuente tanto una configuración multiusuario como una configuración MIMO. Se entenderá que, en el primer caso, las fuentes representan los flujos de símbolos de o con destino a los distintos usuarios y, en el segundo caso, los flujos de símbolos emitidos por las distintas antenas. Naturalmente, ambos casos se pueden combinar cuando los terminales de los usuarios son de tipo de antena múltiple. Por otro lado, se asumirá que los flujos de símbolos son sincrónicos.

El receptor ML de descodificación por esfera será descrito para el caso de K usuarios, transmitiendo cada usuario $k \in \{1, \dots, K\}$ con la ayuda de i_k antenas con destino al receptor, o sea, un número total de $P = \sum_{k=1}^K i_k$ fuentes. La señal recibida se puede expresar en forma vectorial:

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{a} + \mathbf{n} \quad (1)$$

donde:

$\mathbf{x}$ es un vector de variables de decisión de dimensión P' , donde P' es igual al producto del número de antenas del receptor con el número de variables de decisión observadas por antena receptora, por ejemplo el número de trayectos resueltos por antenas;

$\mathbf{a}$ es un vector de dimensiones PM , obtenido mediante la concatenación de vectores $\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)}, \dots, \mathbf{a}^{(P)}$, siendo cada vector $\mathbf{a}^{(p)}$, $p \in \{1, \dots, P\}$, la representación vectorial del símbolo de información transmitido por la $p^{\text{ésima}}$ fuente y siendo de dimensión M igual a la dimensionalidad de la modulación utilizada;

ES 2 333 067 T3

H es la matriz de dimensiones $P' \times PM$ que representa el canal de transmisión, ésta describe en particular las interferencias entre usuarios y entre trayectos procedentes de las distintas antenas;

n es un vector de dimensión P' cuyas componentes son muestras de ruido blanco centrado aditivo gaussiano que afecta a la señal recibida.

El receptor por verosimilitud máxima estima el vector $\hat{a}$ reduciendo al mínimo la desviación cuadrática $\|x - Ha\|^2$ con el vector recibido, o sea:

$$\hat{a} = \arg \min_{a \in C^P} \|x - Ha\|^2 \quad (2)$$

donde C^P es la constelación producto de las constelaciones respectivas de las P fuentes.

Se puede mostrar que la expresión (2) se puede escribir de forma equivalente:

$$\hat{a} = \arg \min_{a \in C^P} \|z - Ra\|^2 \quad (3)$$

con $z = Q^T x$ y donde Q y R son respectivamente una matriz unitaria de dimensiones $P' \times P$ y una matriz triangular superior de dimensiones $P \times P$ obtenida mediante descomposición QR de la matriz H, es decir $R^T R = H^T H$.

Para constelaciones PAM o QAM, siempre es posible, por medio de una operación lineal elemental, ℓ que en adelante no se tendrá en cuenta, reducir al caso en el que los puntos de la constelación producto son elementos de Z^{MP} donde Z es el conjunto de los enteros relativos y M la dimensionalidad de las constelaciones de modulación. Los vectores Ra se pueden representar entonces como los puntos de una red Λ de matriz generatriz R.

La descodificación por esfera consiste en efectuar una búsqueda del vecino más cercano en el interior de una bola (en un espacio de dimensión MP) centrada en el punto representativo de la señal recibida z. La búsqueda se lleva a cabo entre los puntos de Λ comprendidos en el interior de esta bola.

La forma en que se selecciona (o enumera) sucesivamente a los candidatos es crucial para el rendimiento del algoritmo de descodificación. Se conocen esencialmente dos técnicas de enumeración, la primera, llamada de Pohst, y la segunda, llamada de Schnorr-Euchner.

En primer lugar se describirá una descodificación por esfera utilizando una enumeración de Pohst.

Se supondrá a efectos de ilustración que la modulación es de tipo PAM, es decir, que el espacio considerado es de dimensión P. Éste se aplica asimismo a una modulación QAM, siendo entonces la dimensión del espacio 2P.

Se lleva a cabo la búsqueda, dimensión a dimensión o, según la terminología usual, capa a capa, seleccionando en cada capa la coordenada de un punto candidato de Λ .

La contribución de la capa P a la distancia cuadrática (3) vale simplemente:

$$(z_P - r_{P,P} a_P)^2 \quad (4)$$

Asimismo, la contribución de la capa P-1 a esta distancia cuadrática se escribe:

$$(z_P - r_{P-1,P-1} a_{P-1} - r_{P-1,P} a_P)^2 \quad (5)$$

y, de forma general, la contribución de la capa i viene expresada por:

$$(z_i - r_{i,i} a_i - E_i)^2 \quad (6)$$

con E_i definido por $E_i = \sum_{j=i+1}^P r_{i,j} a_j$. Si mediante T_i se designa la contribución de las capas sucesivas $i+1, \dots, P$,

se puede obtener la misma por recurrencia descendente:

$$T_{i-1} = T_i + |z_i - E_i - r_{i,i} a_i|^2 \quad (7)$$

con $T_P = 0$.

Con las convenciones anteriores, la búsqueda en la esfera de radio cuadrático d equivale a determinar, para cada una de las capas, los valores a_i de Z que verifican:

$$(z_i - r_{i,i} a_i - E_i)^2 + T_i \leq d \text{ para } i=P, \dots, 1 \quad (8)$$

o, con carácter general:

$$\frac{z_i - E_i - \sqrt{d - T_i}}{r_{i,i}} \leq a_i \leq \frac{z_i - E_i + \sqrt{d - T_i}}{r_{i,i}} \quad (9)$$

Por último, si la constelación PAM es de orden M' , donde M' es una potencia de 2 y si la transformación lineal precitada es $\ell(m') = 2m' - 1 - M'$, para $m' \in \{1, \dots, M'\}$, la búsqueda puede quedar reducida a los enteros impares pertenecientes al intervalo $[A_i, B_i]$, donde:

$$A_i = \max \left(1 - M', \left\lceil \frac{z_i - E_i - \sqrt{d - T_i}}{r_{i,i}} \right\rceil \right) \text{ y} \\ B_i = \min \left(M' - 1, \left\lfloor \frac{z_i - E_i + \sqrt{d - T_i}}{r_{i,i}} \right\rfloor \right) \quad (10)$$

donde $\lceil x \rceil$ es el mínimo entero superior a x y $\lfloor x \rfloor$ es el máximo entero inferior a x .

Esta reducción del intervalo de búsqueda corresponde de hecho a una intersección del intervalo según se define en (9), con la proyección de la constelación en la dimensión en cuestión.

De este modo se define un intervalo de validez para cada capa. Éste aporta la excursión máxima admisible en esta capa, habida cuenta de la elección ya realizada para los valores a_i en las capas superiores.

La figura 1 representa el principio del descodificador por esfera en el caso simple en el que $P=2$ y $M'=4$. La esfera está centrada en el punto z representado mediante una cruz. Los puntos de la constelación producto C^2 están representados por círculos llenos. El intervalo de validez $[A_2, B_2]$ de la capa 2 no es otro sino la intersección de la proyección de la esfera con la de la constelación, aquí $[A_2, B_2] = [-3, 3]$. El intervalo de validez $[A_1, B_1]$ se determina a continuación mediante la elección de un valor a_2 en $[A_2, B_2]$. Se ve de este modo en el ejemplo ilustrado que para $a_2=1$, el intervalo de validez es $[A_1, B_1] = [-3, 1]$.

La figura 2 representa un organigrama del método de descodificación por esfera utilizando una enumeración de Pohst.

En la etapa 210, se procede a la inicialización del índice de capa, de las variables intermedias y del radio de búsqueda de la esfera, o sea: $i=P$; $T_P=0$; $E_P=0$; $d=D$ donde D es el radio cuadrático inicial de la esfera de búsqueda. D se elige en función de una estimación de la potencia de ruido.

En la etapa 220, se prueba si $T_i > d$, es decir, si el intervalo se reduce al conjunto vacío. Si tal es el caso, se prueba en 223 si $i=P$ y, en caso afirmativo, el algoritmo se acaba en 225. En caso negativo, se incrementa i en 1 y se pasa a la etapa 230.

ES 2 333 067 T3

Si $T_i \leq d$, se calculan en 230 los extremos A_i y B_i conforme a (10) y se inicializa a_i por $a_i = A_i - 2$.

En la etapa 240, se incrementa a_i en 2 y se prueba en 250 si el punto correspondiente sigue estando en el intervalo, o sea $a_i \leq B_i$. En caso negativo, se vuelve a la prueba 223 y en caso afirmativo se prueba en 260 si $i=1$. Si no es así, se pasa a la etapa 263, en la que se disminuye i en 1 y se calculan los nuevos valores E_{i-1} y T_{i-1} . En cambio, si se ha alcanzado la capa más baja, $i=1$, se añade, en 270, la contribución de esta última capa para obtener la distancia

del candidato seleccionado al punto z , o sea $\hat{d} = T_i + |z_i - E_i - r_{i,1} a_i|^2$. En 280 se compara esta distancia con el

radio cuadrático en curso d . Si es inferior, se reduce consiguientemente el radio de la esfera $d = \hat{d}$ y se actualiza el mejor candidato $\hat{a} = a$. En cualquier caso, se vuelve a continuación a la etapa 240.

El algoritmo anteriormente expuesto lleva a cabo una búsqueda explorando los intervalos de validez capa a capa a partir de sus extremos inferiores hacia sus extremos superiores, llevándose a cabo la exploración más rápida en la capa más alta ($i=P$) y la más lenta, en la capa más baja ($i=1$). Con cada selección de una nueva coordenada de candidato en una capa, los extremos de los intervalos de validez de las capas superiores son calculados de nuevo. Por otro lado, en cuanto se mejora la distancia al punto recibido, se actualiza el radio de la esfera, lo que permite acelerar la búsqueda. Finalmente, el vector de salida del algoritmo es el punto de la constelación producto más cercano al punto recibido z .

La descodificación por esfera utilizando la enumeración de Pohst es bastante lenta como consecuencia de la exploración sistemática de los intervalos de validez a partir de sus extremos inferiores.

Le descodificación por esfera utilizando la enumeración de Schnorr-Euchner es sensiblemente más rápida que la anterior. Ésta parte del principio de que es más eficaz realizar una búsqueda partiendo de un punto $\hat{e}$ de la constelación producto correspondiente a una primera estimación de la señal transmitida. Más precisamente, este punto se obtiene por medio de una ecualización de tipo ZF-DFE: se resta a las capas (inferiores) siguientes la interferencia debida a una capa (un usuario), tomando el descodificador por esfera la decisión en cada capa.

A saber, empezando por la capa P :

$$\hat{e}_i = \text{round}(e_i), \text{ con } e_P = z_P / r_{P,P}$$

$$e_i = (z_i - \xi_i) / r_{i,i} \text{ y } \xi_i = \sum_{j=i+1}^P r_{i,j} \hat{e}_j \text{ para } i=P-1, \dots, 1 \quad (11)$$

donde $\text{round}(y)$ representa el entero relativo impar (con la forma anterior de transformación lineal ℓ) más cercano a y .

Cada capa i contribuye a la distancia cuadrática desde el punto a de la red al punto z recibido para $d_i = r_{i,i} \{a_i - e_i\}^2$.

La búsqueda del vecino más cercano se lleva a cabo en cada capa i considerando sucesivamente las coordenadas, $\hat{e}_i, \hat{e}_i + 2\delta_i, \hat{e}_i - 2\delta_i, \hat{e}_i + 4\delta_i, \hat{e}_i - 4\delta_i$, etc. donde $\delta_i = \text{sgn}(e_i - \hat{e}_i)$. Se entenderá que, de este modo, se parte de $\hat{e}_i$ y se progresa en zigzag a ambos lados de esta estimación asegurándose siempre de permanecer en el intervalo de validez.

La figura 3 representa un organigrama del método de descodificación por esfera utilizando una enumeración de Schnorr-Euchner.

En la etapa 310, se inicializa el índice de capa, las variables intermedias y el radio de búsqueda de la esfera, o sea: $i=P$; $\xi_P=0$; $T_P=0$; $d=D$ donde D es el radio cuadrático inicial de la esfera de búsqueda.

En la etapa 320, se procede a la ecualización ZF-DFE: $\hat{e}_i = \text{round}(e_i)$ con $e_i = (z_i - \xi_i) / r_{i,i}$, y se determina el valor de coordenada inicial $a_i = \hat{e}_i$ así como la dirección de búsqueda inicial: $\delta_i = \text{sgn}(e_i - \hat{e}_i)$.

En la etapa 330, se prueba si el punto está en la esfera, es decir, si $T_i + r_{i,i}(a_i - e_i)^2 < d$. En caso negativo, se pasa a la etapa 350. En caso afirmativo, se comprueba en 340 que efectivamente está en la constelación, es decir, que $|a_i| \leq M'-1$. Si no es así, se pasa a la etapa 380.

Si el candidato a_i está en el intervalo de validez (proyección de la intersección de la esfera y de la constelación), se prueba en 345 si se ha alcanzado la capa más baja, $i=1$. Si tal es el caso, se prosigue en 360.

En su defecto, se actualizan en 347 las variables intermedias $\xi_{i-1} = \sum_{j=i}^P r_{i-1,j} a_j$, $T_{i-1} = T_i + r_{i,i}(a_i - e_i)^2$ y se disminuye i en 1. A continuación se vuelve a la etapa 320.

En 350, se prueba si $i=P$. Si tal es el caso, el algoritmo se acaba en 355; en caso contrario, se pasa a la etapa 370 para incrementar i en 1.

En la etapa 345, si $i=1$, se ha alcanzado la capa más baja y por tanto se ha encontrado un punto candidato. Se añade la contribución de esta capa para obtener la distancia del candidato seleccionado al punto z , o sea

$\hat{d} = T_1 + r_{11}^2 (a_1 - e_1)^2$. En 360, se compara esta distancia con el radio cuadrático en curso d . Si es inferior a d , se actualiza la distancia $d=\hat{d}$ y el vecino más cercano $\hat{a}=a$ en 365. En cualquier caso, se pasa por 370 para incrementar i en 1.

Finalmente, en la etapa 380, se actualiza a_i por $a_i=a_i+\delta_i$ con $\delta_i=-\delta_i-2\text{sgn}(\delta_i)$ y se vuelve a la etapa 330.

En las figuras 4A y 4B se ha representado esquemáticamente la exploración de los puntos conforme a la enumeración de Pohst y la de Schnorr-Euchner, respectivamente. Se ha partido de la suposición de que la constelación era 4-PAM y de que el número de fuentes P era de 3. Las distintas líneas corresponden a las proyecciones según las $P=3$ dimensiones. Se han representado mediante cruces las componentes de z y mediante círculos, los puntos de las constelaciones de modulación PAM. En ambos casos, las ramas que el algoritmo recorre sucesivamente se han indicado mediante (1), (2), etc.

Mientras que la descodificación por esfera ha sido objeto de numerosos estudios para las modulaciones PAM y QAM, hasta la actualidad no se había contemplado para las modulaciones PPM (Pulse Position Modulation). Se ha propuesto una descodificación por esfera para este tipo de modulación para un sistema MIMO UWB de tipo por impulsos, en el artículo de C. Abou-Rjeily y col. titulado "MIMO UWB communications using modified Hermite pulses", publicado en Proc. of the 17th Annual IEEE Internal Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications (PIRMC'06). Se recuerda que un sistema UWB por impulsos es un sistema que utiliza la transmisión en banda base de tramas de impulsos muy breves (del orden de unos picosegundos). Los símbolos transmitidos pertenecen a un alfabeto de modulación M-PPM o, con carácter más general, a una modulación híbrida M-PPM-M'-PAM. El cardinal del alfabeto de modulación es MM' . Para cada una de las M posiciones temporales, son posibles M' amplitudes de modulación. Un símbolo de este alfabeto se puede representar mediante una secuencia a_m , $m=0, \dots, M-1$ con $a_m=\delta(m-\mu)$ α , donde μ es una posición de la modulación M-PPM, α una amplitud de modulación PAM y $\delta(\cdot)$ la función de Dirac. Cada símbolo PPM o PPM-PAM modula las posiciones temporales y, si corresponde, las posiciones temporales y las amplitudes de los impulsos elementales de una trama.

Un símbolo M-PPM (resp. M-PPM-M'-PAM) se puede considerar como un vector de dimensión M , del que una única componente es igual a 1 (resp. α) y las demás son nulas. Por tanto, a diferencia de una modulación QAM, las componentes de un símbolo PPM o PPM-PAM no son independientes.

Si se supone que P fuentes transmiten símbolos PPM, el espacio de las señales que hay que considerar es de dimensión MP . En este espacio, cada fuente queda representada por una capa, compuesta a su vez de M posiciones temporales (o subcapas) de un símbolo PPM o PPM-PAM.

La descodificación por esfera que se describe en el artículo precitado propone tratar de forma conjunta M capas consecutivas debido a su interdependencia.

La relación (8) queda entonces sustituida por una restricción que relaciona M subcapas sucesivas, o sea, para la capa de orden p :

$$\sum_{m=1}^M \left| z_m^{(p)} - \sum_{j=f(p,m)}^{PM} r_{f(p,m),j} a_j \right|^2 \leq d - T_p \quad (12)$$

donde:

$z^{(p)}$ es un subvector de z , representativo de la señal recibida, en otras palabras, el vector z se forma por concatenación de P vectores $z^{(1)}, \dots, z^{(P)}$ que corresponden cada uno a una fuente, $z_m^{(p)}$ que es la m -ésima componente del símbolo PPM o PPM-PAM emitido por esa fuente;

la función f viene dada por $f(p,m)=(p-1)M+m$;

T_p es la suma de las contribuciones a la distancia cuadrática de las capas $p+1, \dots, P$.

Dado que, para cada fuente p, la transmisión no tiene lugar más que para una sola posición $c(p) \in \{1, \dots, M\}$, la expresión (12) se puede reescribir de la forma:

$$\sum_{m=1}^M \left| z_m^{(p)} - r_{f(p,m), f(p,c(p))} a_{f(p,c(p))} - E'_{p,m} \right|^2 \leq d - T_p \quad (13)$$

$$\text{con } E'_{p,m} = \sum_{j=f(p+1,1)}^{PM} r_{f(p,m), j} a_j, \text{ o incluso de la forma más compacta:}$$

$$\left\| z^{(p)} - a_{c(p)}^{(p)} R_{..c(p)}^{(p,p)} - E_{..p} \right\|^2 \leq d - T_p \quad (14)$$

donde:

el vector a, al igual que el vector z, es una concatenación de P vectores $a^{(1)}, a^{(2)}, \dots, a^{(P)}$, siendo el vector $a^{(p)}$ de componentes $a_m^{(p)} = a_{f(p,m)}$, $m=1, \dots, M$;

$R^{(i,j)}$ es una submatriz MxM de R constituida por los elementos $r_{m,m'}$ con $m=(i-1)M+1, \dots, iM$ y $m'=(j-1)M+1, \dots, jM$;

para una matriz Ω dada, $\Omega_{..k}$ designa como norma la k-ésima columna de esta matriz;

$$E_{..p} \text{ es la } p\text{-ésima columna de una matriz E y queda definida por } E_{..p} = \sum_{p'=p+1,1}^P a_{c(p')}^{(p')} R_{..c(p')}^{(p,p')}.$$

Se entenderá por la expresión (14) que las M subcapas correspondientes a la fuente p se tratan conjuntamente. De forma particular, los extremos de los intervalos de validez de cada una de las componentes $a_m^{(p)}$, $m = 1, \dots, M$ se determinan al mismo tiempo. Estos extremos dependen de los candidatos $a^{(p+1)}, \dots, a^{(P)}$ ya escogidos para las capas superiores.

La técnica de enumeración utilizada en esta descodificación por esfera puede ser considerada como una extensión de una enumeración de Pohst. Las posiciones temporales de cada capa se exploran, partiendo de sus extremos inferiores, teniendo cuidado de no seleccionar más que una posición por capa. La convergencia de la descodificación es pues relativamente lenta.

Por otro lado, la aplicación directa de una técnica de enumeración de tipo Schnorr-Euchner no tiene nada de trivial, puesto que las subcapas, es decir, las posiciones PPM de una misma capa, no son independientes.

El objetivo de la presente invención es proponer un procedimiento de descodificación por esfera para una pluralidad de fuentes PPM, que converja más rápidamente que el que se conoce por el estado de la técnica.

Exposición de la invención

La presente invención queda definida por un procedimiento de descodificación por esfera para un receptor por verosimilitud máxima destinado a recibir símbolos PPM de una pluralidad P de fuentes, emitiendo cada fuente un flujo de símbolos PPM con M posiciones de modulación, siendo representados P símbolos PPM emitidos simultáneamente por las P fuentes por un punto de la constelación de modulación producto en un espacio de las señales transmitidas de dimensión MP descompuesto en P capas, representando cada capa las M posiciones de modulación posibles de un símbolo PPM emitido por esa fuente, siendo transformada la señal recibida por dicho receptor en un punto representativo de esta señal, llamado punto recibido, en el espacio de las señales transmitidas, determinando dicho procedimiento el punto de la constelación producto más cercano al punto recibido en el interior de una esfera de radio cuadrático dado. Según dicho procedimiento, para cada capa de rango p:

(a) se lleva a cabo una ecualización ZF-DFE de la señal recibida en dicha capa habida cuenta de los símbolos PPM estimados en las P-p capas precedentes, llamadas capas superiores a la capa p;

(b) se clasifican, en una lista, los M símbolos PPM de dicha capa en función de las contribuciones que aportarían a la distancia cuadrática al punto recibido;

(c) se selecciona el símbolo PPM que realiza la menor contribución y se añade esta contribución a las obtenidas para las capas precedentes para obtener una suma de contribuciones;

repitiéndose las etapas (a), (b), (c) hasta que se alcance la capa más baja; y

se actualiza el radio cuadrático de la esfera y dicho punto más cercano si dicha suma de contribuciones es inferior al radio cuadrático de la esfera.

5 Ventajosamente, si para una capa dada y un símbolo PPM seleccionado en esa capa, dicha suma de contribuciones excede del radio cuadrático de la esfera, se pasa a la capa superior y se selecciona en esa capa el siguiente símbolo de la lista asociada a ella.

10 Si todos los símbolos de dicha lista asociada ya han sido objeto de selección, se pasa a la capa aún superior para seleccionar en esta última el siguiente símbolo en la lista asociada a ella.

15 Si se alcanza la capa más alta y, bien se han seleccionado todos los símbolos PPM de dicha capa, o bien la contribución de dicha capa calculada para el símbolo seleccionado excede del radio cuadrático de la esfera, el procedimiento de descodificación se termina proporcionando dicho punto más cercano.

De acuerdo con un ejemplo de realización, los símbolos PPM de las fuentes de rangos respectivos 1,...,P, estimados con arreglo a la verosimilitud máxima, son obtenidos como subsectores $(\hat{a}_{opt}^{(1)}, \hat{a}_{opt}^{(2)}, \dots, \hat{a}_{opt}^{(P)})$ de M componentes del vector con MP componentes que representa dicho punto más cercano ($\hat{a}_{opt}$).

La contribución d_p de una capa de rango p, $p \in \{1, \dots, P\}$, es calculada ventajosamente mediante:

$$25 \quad d_p = \|R_{..m}^{(p,p)} - E^{(p)}\|^2 \quad \text{con} \quad E^{(p)} = R^{(p,p)} \eta^p$$

donde:

30 $R^{(p,p)}$ es la $p^{\text{ésima}}$ submatriz de dimensiones MxM en la diagonal de la matriz triangular superior R de dimensiones MPxMP, obtenida mediante transformación QR de una matriz H representativa del canal de transmisión entre las P fuentes y dicho receptor;

35 η^p es el resultado de la ecualización ZF-DFE en la capa p;

$R_{..m}^{(p,p)}$ es la $m^{\text{ésima}}$ columna de la matriz $R^{(p,p)}$, donde $m \in \{1, \dots, M\}$ es la posición de modulación del símbolo PPM seleccionado en la capa p; y

$$40 \quad \|\Omega\|^2 = \Omega^T \Omega .$$

45 La clasificación de las posiciones $m \in \{1, \dots, M\}$ de los símbolos PPM de la capa p se puede realizar ordenando estos símbolos conforme a los valores:

$$50 \quad \left\{ -2(R_{..m}^{(p,p)})^T E^{(p)} + (R_{..m}^{(p,p)})^T R_{..m}^{(p,p)}; m = 1, \dots, M \right\}$$

El símbolo PPM de la capa p que realiza la menor contribución corresponde a la posición de modulación pos(p) obtenida preferentemente mediante:

$$55 \quad (\hat{a}_{opt}^{(1)}, \hat{a}_{opt}^{(2)}, \dots, \hat{a}_{opt}^{(P)})$$

60 La invención queda definida asimismo por un receptor por verosimilitud máxima destinado a recibir símbolos PPM de una pluralidad P de fuentes, que comprende un filtro adaptado al canal de transmisión entre las fuentes y el receptor y, si corresponde, a la codificación espacio-temporal utilizada con la emisión, comprendiendo además dicho receptor un descodificador por esfera que comprende medios adaptados para ejecutar las etapas del procedimiento de descodificación por esfera según una de las reivindicaciones precedentes, recibiendo en su entrada el descodificador por esfera la salida de dicho filtro adaptado.

65

Breve descripción de los dibujos

Se harán manifiestas otras características y ventajas de la invención con la lectura de una forma de realización preferente de la invención, hecha con referencia a las figuras que se adjuntan, de las que:

la figura 1 ilustra el principio de una decodificación por esfera para un sistema de dos fuentes PAM;

la figura 2 representa el organigrama de un primer algoritmo de decodificación por esfera conocido del estado de la técnica;

la figura 3 representa el organigrama de un segundo algoritmo de decodificación por esfera conocido del estado de la técnica;

las figuras 4A y 4B ilustran la exploración de puntos utilizada respectivamente por el primer y el segundo algoritmo de decodificación por esfera;

la figura 5 representa el organigrama de un algoritmo de decodificación por esfera según una forma de realización de la invención;

la figura 6 representa un ejemplo de progresión a través de la constelación producto del algoritmo de decodificación por esfera según la invención.

Exposición detallada de formas de realización particulares

A continuación se contemplará un sistema que comprende P fuentes de símbolos PPM. El alfabeto de modulación comprende M posiciones temporales. Tal como se indica anteriormente, las fuentes de símbolos pueden ser flujos de símbolos emitidos por las antenas de un terminal MIMO, flujos de símbolos procedentes de o con destino a una pluralidad de usuarios, e incluso una combinación de ambas situaciones si cada terminal usuario está equipado con

una pluralidad de antenas. En el caso general $P = \sum_{k=1}^K i_k$ donde i_k es el número de antenas del terminal del usuario

k y K, el número de usuarios. Se supondrá en la continuación que los flujos de símbolos son emitidos de forma síncrona. Estos flujos de símbolos modulan ventajosamente, aunque no necesariamente, tramas de señales UWB por impulsos.

El receptor está adaptado para calcular P'M variables de decisión con $P' > P$. Por ejemplo, cada antena receptora está equipada con un receptor Rake adaptado para separar L trayectos y, para cada trayecto, las M posiciones temporales de la modulación PPM. Las variables de decisión son entonces las P'M salidas de estos receptores Rake con $P' = L \cdot P'$, donde P' es el número de antenas de recepción. Si en la emisión se utiliza una codificación espacio-temporal, en recepción se utiliza un filtrado adaptado a este código para separar los diferentes usuarios y, en tal caso, $P' = L \cdot P' \cdot P$.

En cualquier caso, la señal recibida por el receptor se puede representar mediante un vector de dimensión P'M que corresponde a los P'M valores de las variables de decisión. El vector x puede expresarse, adoptando las mismas notaciones que para la ecuación (1), en la forma $x = Ha + n$, con la diferencia de que el vector n es aquí de dimensión P'M, el vector a, de dimensión PM, y la matriz H, de dimensiones P'MxPM. El vector a se puede considerar como la concatenación de P subvectores $a^{(1)}, a^{(2)}, \dots, a^{(P)}$, concerniendo cada subvector a una fuente. La matriz H representa el canal de transmisión y toma en cuenta las interferencias multiusuario y multitrayecto.

Si R es la matriz de dimensiones PMxPM obtenida mediante transformación QR de la matriz H, $z = Q^T x$ es un resumen exhaustivo de la señal recibida perteneciente al espacio de las señales transmitidas. La decodificación por esfera consiste en buscar el punto $\hat{a}$, perteneciente a la intersección de la constelación producto y de una bola de ruido centrada en z y para la cual la distancia a z es mínima. Se llama constelación producto a la constelación generada por todas las posiciones de las constelaciones PPM elementales. El receptor determina, entre los M^P puntos de la constelación producto, es decir, entre las M^P posibles combinaciones de símbolos PPM emitidos por las P fuentes, aquella que cumple el criterio de verosimilitud máxima. Se advertirá, al igual que antes, para una matriz Ω cualquiera de dimensiones PMxPM, $\Omega^{(i,j)}$ la submatriz de dimensiones MxM de R constituida por los elementos $\omega_{m,m'}$ con $m = (i-1)M+1, \dots, iM$ y $m' = (j-1)M+1, \dots, jM$, con $1 \leq i, j \leq P$ y $\Omega_{m,m'}^{(i,j)}$ el (m,m') -ésimo elemento de la matriz $\Omega^{(i,j)}$, es decir, $\Omega_{m,m'}^{(i,j)} = \omega_{m,m'}$.

El procedimiento de decodificación utiliza una ecualización ZF-DFE de la señal transmitida. Más precisamente, en primer lugar se calcula:

$$e_p = Vz \text{ con } V = R^{-1} \quad (15)$$

o, más simple aún, puesto que se empieza por la última capa (capa de orden P), debido a la forma triangular superior de la matriz R:

$$e_p^{(P)} = V^{(p,p)} z^{(p)} \quad \text{con} \quad V^{(p,p)} = \left(R^{(p,p)} \right)^{-1} \quad (16)$$

El vector $e_p^{(P)}$ es de dimensiones M y de valores reales. Se determina el símbolo PPM $\hat{a}^{(P)}$ más cercano a $e_p^{(P)}$ con arreglo a determinada distancia que se detallará más adelante. Veremos que esta minimización de distancia equivale a buscar el índice de la primera componente del conjunto de componentes de $e_p^{(P)}$ clasificadas según una relación de orden.

Se señala $\text{pos}(P)$ el índice de esta componente. La estimación ZF-DFE de $z^{(p)}$ no es otra sino $\hat{a}^{(P)} = e_p^{(P)} = 1_{\text{pos}(P)}^M$, donde I^M es la matriz unidad de dimensiones MxM, en otras palabras, $\hat{a}^{(P)}$ es un vector de dimensión M cuyas componentes son nulas a excepción de la de índice $\text{pos}(p)$ igual a 1.

Se señala $\hat{e}_p$ el vector de dimensión MP cuyas (P-1)M primeras componentes son nulas y cuyas M últimas son iguales a las de $e_p^{(P)}$.

Se resta a las capas inferiores la interferencia debida a la capa P y a continuación se estima $\hat{a}^{(P-1)}$, más precisamente:

$$e_{p-1} = V \left(z - R \hat{e}_p \right) \quad (17)$$

O incluso, puesto que R y V son triangulares superiores:

$$e_{p-1}^{(P-1)} = V^{(p-1,p-1)} \left(z^{(p-1)} - R^{(p-1,p)} \hat{e}_p^{(p)} \right) + V^{(p-1,p)} \left(z^{(p)} - R^{(p,p)} \hat{e}_p^{(p)} \right) \quad (18)$$

y la estimación ZF-DFE no es otra sino $\hat{a}_{p-1} = e_{p-1}^{(P-1)} = 1_{\text{pos}(P-1)}^M$, donde $\text{pos}(P-1)$ es el índice de la primera componente tras la operación de clasificación, tal como se ha indicado anteriormente.

Se procede de este modo de capa en capa, eliminando a cada capa p, la interferencia debida a las P-p capas superiores. Cuando las P capas han sido sometidas a la ecualización ZF-DFE, se dispone de un vector $\hat{a}$ definido por la concatenación de los $\hat{a}^{(p)}$ para $p=1, \dots, P$.

Este vector puede quedar representado por un punto de la constelación producto. Se parte de este punto para buscar el vecino más cercano a z. La búsqueda prosigue a continuación en el seno de dicha constelación, según un método de enumeración que a continuación se expone.

Se ha visto anteriormente que, para cada capa p, se determinaba el símbolo $\hat{a}^{(p)}$ más cercano a $e_p^{(p)}$. Con el fin de simplificar las notaciones, anotaremos aquí $\alpha^p = \hat{a}^{(p)}$ y $\eta^p = e_p^{(p)}$. La contribución de esta capa a la distancia cuadrática entre z y $\hat{a}$ puede escribirse:

$$d_p = \sum_{m=1}^M \left(\sum_{m'=m}^M R_{m,m'}^{(p,p)} (\alpha_{m'}^p - \eta_{m'}^p) \right)^2 = \left\| R^{(p,p)} (\alpha^p - \eta^p) \right\|^2 \quad (19)$$

puesto que R es triangular superior. Siendo α^p un símbolo PPM, $\alpha_{m'}^p = \delta(m' - m_0)$, $m_0 \in \{1, \dots, M\}$ es decir, que se supone que la p-ésima fuente transmite un símbolo PPM en posición m_0 . Entonces, la contribución a la distancia cuadrática se expresa:

$$d_p = \left\| R^{(p,p)} (I, m_0 - \eta^p) \right\|^2 = \left\| R_{\cdot, m_0}^{(p,p)} - E^{(p)} \right\|^2 \quad (20)$$

con $E^{(p)} = R^{(p,p)} \eta^p$.

Se apreciará que, en ausencia de interferencia entre las diferentes posiciones de modulación, es decir, si la respuesta a impulsos del canal de transmisión es más corta que la separación temporal entre estas posiciones, la matriz $R^{(p,p)}$ es diagonal y la distancia cuadrática d_p se confunde con la desviación cuadrática entre el símbolo PPM sometido a prueba ($m=m_0$) y la señal ecualizada por fuente.

Para cada capa, se pueden clasificar los símbolos PPM (dicho de otra forma, las posiciones PPM) a partir de las contribuciones respectivas que aportarían a la distancia cuadrática. La primera elección en la enumeración de los candidatos en cada capa se centra, como se ha visto anteriormente, en:

$$pos(p) = \arg \min_m \left(\|R_{..m}^{(p,p)} - E^{(p)}\|^2 \right) \quad (21)$$

y luego se pasa sucesivamente a las posiciones que realizan contribuciones cada vez más elevadas.

Dado que $E^{(p)}$ no depende de m , la clasificación de las distancias cuadráticas d_p es equivalente a la de los productos escalares:

$$\left\{ -2(R_{..m}^{(p,p)})^T E^{(p)} + (R_{..m}^{(p,p)})^T R_{..m}^{(p,p)}; m = 1, \dots, M \right\} \quad (22)$$

y por consiguiente:

$$pos(p) = \arg \min_m \left(-2(R_{..m}^{(p,p)})^T E^{(p)} + (R_{..m}^{(p,p)})^T R_{..m}^{(p,p)} \right) \quad (23)$$

La descodificación por esfera empieza por la última capa (capa P). Se ordena la lista de los símbolos PPM de esta capa en función de las contribuciones respectivas que aportarían a la distancia cuadrática al punto recibido. Primero se selecciona el que aportaría la menor contribución, lo que da una estimación del símbolo emitido por la fuente P. Se elimina la interferencia generada por este símbolo sobre todas las capas inferiores. A continuación se pasa a la capa inmediatamente inferior y se recommienza de este modo para cada capa.

Más precisamente, para una capa en curso dada, se ordena la lista de las posiciones PPM de esta capa en función de las contribuciones que aportarían los símbolos correspondientes a la distancia cuadrática al punto recibido. Se selecciona la que realiza la menor contribución utilizando (21) o (23). A continuación se elimina de las capas inferiores la interferencia generada por el símbolo PPM seleccionado de este modo.

Se progresa así de capa en capa; los símbolos seleccionados en las diferentes capas forman una rama. Si la suma de las contribuciones de las capas superiores y de la capa en curso es superior al radio en curso de la esfera, se abandona la rama en cuestión y se pasa a la capa superior a la capa en curso para seleccionar una nueva posición PPM. En caso contrario, se prosigue la rama hasta que se alcance la capa de rango 1. La distancia cuadrática entre el punto $\hat{a}$ de la constelación producto al punto recibido se obtiene como la suma de las contribuciones de las diferentes capas. Si la distancia es menor que el radio en curso de la esfera, se actualiza tanto el radio como el mejor punto en curso $\hat{a}_{opt}$. Más precisamente, el nuevo radio de la esfera toma el valor de dicha distancia y $\hat{a}_{opt} = \hat{a}$.

Se vuelve a continuación a la capa inmediatamente superior para seleccionar el segundo símbolo PPM de la lista. Se elimina de las capas inferiores (en el presente caso, de la capa de rango 1) la interferencia generada por este símbolo y se procede igual que anteriormente, hacia las capas inferiores.

Con cada ascenso hacia una capa superior, se seleccionan sucesivamente los diferentes símbolos de esta capa en el orden de la lista, empezando por la contribución menor. Cuando se agota la lista, es decir, cuando ya se han probado anteriormente los M símbolos de esta lista, se pasa a la siguiente capa superior.

Se progresa de este modo, por sucesivos ascensos hacia capas de rangos cada vez más elevados y con intervalos de validez cada vez más estrechos (dado que se actualiza el radio de la esfera), hasta que se haya agotado la lista de la capa raíz (capa P), en cuyo caso se detiene el algoritmo. A la salida de la descodificación, el mejor punto que aparece a la salida $\hat{a}_{opt}$ es el que realiza el mínimo de distancia a z . El punto $\hat{a}_{opt}$ proporciona la estimación ML de los símbolos

PPM transmitidos por las P fuentes, a saber, $\hat{a}_{opt}^{(1)}, \hat{a}_{opt}^{(2)}, \dots, \hat{a}_{opt}^{(P)}$.

La figura 5 representa de forma esquemática el organigrama del procedimiento de descodificación por esfera de una pluralidad de fuentes PPM según la invención.

ES 2 333 067 T3

En la etapa 510, se inicializa el índice de capa por el de la más alta, $p=P$. Se inicializan las variables intermedias, en particular el radio cuadrático d de la esfera, representando respectivamente $d=D$ y P variables la suma de las

contribuciones a la distancia cuadrática hasta las P capas respectivas $\sigma_p = \sum_{k=p}^P d_p$, o sea, $\sigma_p=0$ para $p=1, \dots, P$.

En la etapa 515, se lleva a cabo la ecualización ZF-DFE de la capa en curso p , teniendo en cuenta los símbolos

$\hat{a}^{(P)}, \hat{a}^{(P-1)}, \dots, \hat{a}^{(p+1)}$ seleccionados en las capas superiores precedentes.

En la etapa 520, se clasifican los símbolos PPM de esta capa conforme a la relación de orden (20) o (22). De este modo se dispone de una lista ordenada $L(p)$ y se escoge el primer símbolo PPM de esta lista.

En la etapa 525, se actualiza σ_p , la suma de las contribuciones de las capas $p, \dots, P$ a la distancia euclídea a z , a saber $\sigma_p = \sigma_{p+1} + d_p$.

A continuación se prueba si la suma de las contribuciones excede del radio cuadrático en curso d de la esfera.

Si tal es el caso, es inútil conservar la rama en curso $\hat{a}^{(P)}, \hat{a}^{(P-1)}, \dots, \hat{a}^{(p)}$, puesto que ésta no podrá, sean cuales sean los símbolos que se seleccionarán en las capas inferiores siguientes, conducir al vecino más cercano. Entonces se pasa a la prueba 535. Por el contrario, si σ_p es inferior a dicho radio cuadrático, se pasa a la prueba 540.

En 535, se prueba si $p=P$. Si tal es el caso, el algoritmo se detiene en 537 y el vecino más cercano a z perteneciente a la red es $\hat{a}_{opt}$.

Si $p \neq P$, en 555 se incrementa p y $\text{pos}(p)$ en 1, es decir, se pasa a la capa superior y se selecciona el símbolo PPM siguiente en la lista $L(p)$, si lo hay.

En 560 se prueba si se han agotado los símbolos de la lista $L(p)$. En caso afirmativo, ($\text{pos}(p) > M$), se vuelve a la prueba 535. En caso negativo, se actualiza el valor de d_p correspondiente al nuevo símbolo seleccionado y se vuelve a la etapa 525. En la práctica, si previamente se han calculado y almacenado los valores d_p para los diferentes valores de $m=1, \dots, M$, no es necesario volver a calcular d_p .

Si se decide conservar la rama $\hat{a}^{(P)}, \hat{a}^{(P-1)}, \dots, \hat{a}^{(p)}$ en curso en 530, se prueba en 540 si esta rama ha alcanzado la capa más baja ($p=1$), en cuyo caso se dispone de un punto de la red que mejora la distancia en curso a z y se pasa a la etapa 550. Si en cambio no es así ($p \neq 1$), se pasa a la capa inferior siguiente en 545 y luego se vuelve a la etapa de ecualización ZF-DFE.

En la etapa 550, se actualiza el radio de la esfera, o sea $d = \sigma_1$, y el mejor candidato, $\hat{a}_{opt} = \hat{a}$, y luego se prosigue la búsqueda incrementando p en la etapa 555.

$$\hat{a}_{opt}^{(1)}, \hat{a}_{opt}^{(2)}, \dots, \hat{a}_{opt}^{(P)}$$

El mejor candidato da una estimación ML conjunta, de los símbolos PPM emitidos por las P fuentes.

Se ha ilustrado, en la figura 6, la progresión de la descodificación por esfera en el seno de la constelación producto. El espacio de los símbolos transmitidos está dividido en P capas, siendo cada una de dimensión M . En ordenadas se ha representado, para cada una de las posiciones PPM de cada capa p , las M componentes de $c_p^{(P)}$, obtenidas como se ha visto por ecualización ZF-DFE.

La rama de notación (1) es la primera rama sometida a prueba. En el presente caso, la rama progresa hasta la capa más baja y mejora la distancia cuadrática a z . Entonces se actualiza el radio cuadrático d de la esfera. Se pasa a la capa 2 y a la prueba de una nueva rama (2). Dado que se ha seleccionado un nuevo candidato en la capa (2), previamente se procede a una nueva ecualización de la capa 1.

Se ha representado mediante (ℓ) una rama en curso de prueba. Se advierte que, cuando esta rama alcanza la capa p , la suma σ_p de las contribuciones de las capas superiores y de la capa en curso $P, P-1, \dots, p$, excede del radio cuadrático en curso d de la esfera. La búsqueda prosigue pasando a la capa superior $p+1$ y seleccionando en esta capa el símbolo PPM siguiente de la lista $L(p+1)$ (cf. etapa 555 de la figura 5). Entonces se actualiza la suma de las contribuciones, σ_{p+1} . Si esta suma es inferior a d , se prosigue con la nueva rama ($\ell+1$); en caso contrario, se asciende una capa.

Cuando se alcanza la capa más alta (cf. etapa 535 de la figura 5) y o bien se han agotado los símbolos de la lista $L(P)$ o bien la contribución de la capa P excede de d , el algoritmo de descodificación se termina proporcionando $\hat{a}_{opt}$.

ES 2 333 067 T3

En anexo se ha dado el pseudocódigo del método de decodificación por esfera según una realización posible de la invención. Se han adoptado las siguientes notaciones:

0_M es el vector nulo de dimensión M;

ρ es un vector de dimensión M;

e y E son matrices de dimensiones MPxP, las columnas de e dan el resultado de la ecualización ZF-DFE;

A, matriz de dimensiones MxP, cuyas columnas son los símbolos PPM seleccionados para las diferentes capas;

Order, matriz de dimensiones MxP, cuyas columnas dan las listas de índices L(p) precitadas para cada una de las capas;

Diag(Ω) es la matriz diagonal compuesta de los elementos diagonales de la matriz Ω ;

sort(ω) es un vector constituido por las componentes del vector ω ordenadas por orden creciente.

El método de decodificación por esfera anteriormente expuesto está destinado para su implementación, gracias a medios de equipo lógico o físico, en un receptor ML que opera en un sistema multifuente, por ejemplo un sistema MIMO y/o un sistema multiusuario. Ventajosamente, los símbolos PPM de una fuente sirven para modular una señal por impulsos del tipo TH-UWB (Time Hopped UWB), DS-UWB (Direct Spread UWB) o TH-DS-UWB. Las señales así moduladas son transmitidas, por ejemplo, gracias a antenas UWB convencionales o diodos láser.

ANEXO

Decodificación por esfera (input: z, R, P, M, D; output: $\hat{a}_{opt}$)

Step 1 (Inicialización):

Set $k=P+1$; $dist(k)=0$; $V=R^{-1}$; $\rho=0_M$; $bestdist=D$

Step 2: $newdist=dist(k)+\rho^T \rho$;

if ($newdist < bestdist$) & ($k \neq 1$) go to Step 3 else go to Step 4 endif

Step 3: if $k=P+1$, $e_{:,k-1}=Vz$ else

For $i=1, \dots, k-1$, $e_{:,k-1}^{(i)} = e_{:,k-1}^{(i)} - V^{(i,k)} p$ endfor endif

$k=k-1$, $dist(k)=newdist$

$E_{:,k}^{(k)} = R^{(k,k)} e_{:,k}^{(k)}$

$Order_{:,k} = sort \left[-2 \left(R^{(k,k)} \right)^T E_{:,k}^{(k)} + Diag \left(\left(R^{(k,k)} \right)^T R^{(k,k)} \right) \right]$

$step(k)=1$, $pos(k)=Order_{step(k),k}$, $A_{:,k}=I_{:,pos(k)}$

$\rho = E_{:,k}^{(k)} - R_{:,pos(k)}^{(k,k)}$, go to Step 2

Step 4: if $newdist < bestdist$, $bestdist=newdist$

for $i=1, \dots, P$, $\hat{a}_{opt}^{(i)} = A_{:,i}$ endfor

else if $k=P$, terminate else $k=k+1$ endif

$step(k)=step(k)+1$

if $step(k) > M$, go to Step 4 endif

$pos(k)=Order_{step(k),k}$, $A_{:,k}=I_{:,pos(k)}$

$\rho = E_{:,k}^{(k)} - R_{:,pos(k)}^{(k,k)}$, go to Step 2

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de decodificación por esfera para un receptor por verosimilitud máxima destinado a recibir
5 símbolos PPM de una pluralidad P de fuentes, emitiendo cada fuente un flujo de símbolos PPM con M posiciones
de modulación, siendo representados P símbolos PPM emitidos simultáneamente por las P fuentes por un punto (a)
de la constelación de modulación producto en un espacio de las señales transmitidas de dimensión MP descompuesto
en P capas, representando cada capa las M posiciones de modulación posibles de un símbolo PPM emitido por esa
fuente, siendo transformada la señal recibida (x) por dicho receptor en un punto representativo (z) de esta señal,
10 llamado punto recibido, en el espacio de las señales transmitidas, determinando dicho procedimiento el punto de
la constelación producto más cercano ($\hat{a}_{opt}$) al punto recibido en el interior de una esfera de radio cuadrático dado,
caracterizado porque, para cada capa de rango p:

(a) se lleva a cabo una ecualización ZF-DFE de la señal recibida en dicha capa, habida cuenta de los símbolos PPM
15 estimados en las P-p capas precedentes, llamadas capas superiores a la capa p;

(b) se clasifican, en una lista, los M símbolos PPM de dicha capa en función de las contribuciones que aportarían
a la distancia cuadrática al punto recibido;

20 (c) se selecciona el símbolo PPM que realiza la menor contribución (d_p) y se añade esta contribución a las obtenidas
para las capas precedentes para obtener una suma de contribuciones (σ_p);

repetiéndose las etapas (a), (b), (c) hasta que se alcance la capa más baja; y

25 se actualiza el radio cuadrático de la esfera y dicho punto más cercano si dicha suma de contribuciones es inferior
al radio cuadrático de la esfera.

2. Procedimiento de decodificación por esfera según la reivindicación 1, **caracterizado** porque, si para una capa
dada y un símbolo PPM seleccionado en esa capa, dicha suma de contribuciones excede del radio cuadrático de la
30 esfera, se pasa a la capa superior y se selecciona en esa capa el siguiente símbolo de la lista asociada a ella.

3. Procedimiento de decodificación por esfera según la reivindicación 2, **caracterizado** porque si todos los sím-
bolos de dicha lista asociada ya han sido objeto de selección, se pasa a la capa aún superior para seleccionar en esta
última el siguiente símbolo en la lista asociada a ella.

35 4. Procedimiento de decodificación por esfera según la reivindicación 2 ó 3, **caracterizado** porque si se alcanza la
capa más alta y, bien se han seleccionado todos los símbolos PPM de dicha capa, o bien la contribución de dicha capa
calculada para el símbolo seleccionado excede del radio cuadrático de la esfera, el procedimiento de decodificación
se termina proporcionando dicho punto más cercano ($\hat{a}_{opt}$).

40 5. Procedimiento de decodificación por esfera según la reivindicación 4, **caracterizado** porque los símbolos PPM
de las fuentes de rangos respectivos 1,...,P, estimados con arreglo a la verosimilitud máxima, son obtenidos como

45 subvectores $(\overset{\wedge (1)}{a_{opt}}, \overset{\wedge (2)}{a_{opt}}, \dots, \overset{\wedge (P)}{a_{opt}})$ de M componentes del vector con MP componentes que representa dicho
punto más cercano ($\hat{a}_{opt}$).

6. Procedimiento de decodificación por esfera según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado** por-
que la contribución d_p de una capa de rango p, $p \in \{1, \dots, P\}$, se calcula por:

$$d_p = \|R_{..m}^{(p,p)} - E^{(p)}\|^2 \quad \text{con} \quad E^{(p)} = R^{(p,p)} \eta^p$$

55 donde:

$R^{(p,p)}$ es la $p^{\text{ésima}}$ submatriz de dimensiones MxM en la diagonal de la matriz triangular superior R de dimensiones
MPxMP, obtenida mediante transformación QR de una matriz H representativa del canal de transmisión entre las P
fuentes y dicho receptor;

60 η^p es el resultado de la ecualización ZF-DFE en la capa p;

$R_{..m}^{(p,p)}$ es la $m^{\text{ésima}}$ columna de la matriz $R^{(p,p)}$, donde $m \in \{1, \dots, M\}$ es la posición de modulación del símbolo PPM
seleccionado en la capa p; y

$$\|\Omega\|^2 = \Omega^T \Omega.$$

7. Procedimiento de descodificación por esfera según la reivindicación 6, **caracterizado** porque la clasificación de las posiciones $m \in \{1, \dots, M\}$ de los símbolos PPM de la capa p se realiza ordenando estos símbolos según los valores:

$$\left\{ -2 \left(R_{..m}^{(p,p)} \right)^T E^{(p)} + \left(R_{..m}^{(p,p)} \right)^T R_{..m}^{(p,p)} ; m = 1, \dots, M \right\}$$

8. Procedimiento de descodificación por esfera según la reivindicación 7, **caracterizado** porque el símbolo PPM de la capa p que realiza la menor contribución corresponde a la posición de modulación $pos(p)$ obtenida por:

$$pos(p) = \arg \min_m \left(-2 \left(R_{..m}^{(p,p)} \right)^T E^{(p)} + \left(R_{..m}^{(p,p)} \right)^T R_{..m}^{(p,p)} \right)$$

9. Receptor por verosimilitud máxima destinado a recibir símbolos PPM de una pluralidad P de fuentes, que comprende un filtro adaptado al canal de transmisión entre las fuentes y el receptor y, si corresponde, a la codificación espacio-temporal utilizada con la emisión, **caracterizado** porque comprende además un descodificador por esfera que comprende medios adaptados para ejecutar las etapas del procedimiento de descodificación por esfera según una de las reivindicaciones precedentes, recibiendo en su entrada el descodificador por esfera la salida de dicho filtro adaptado.

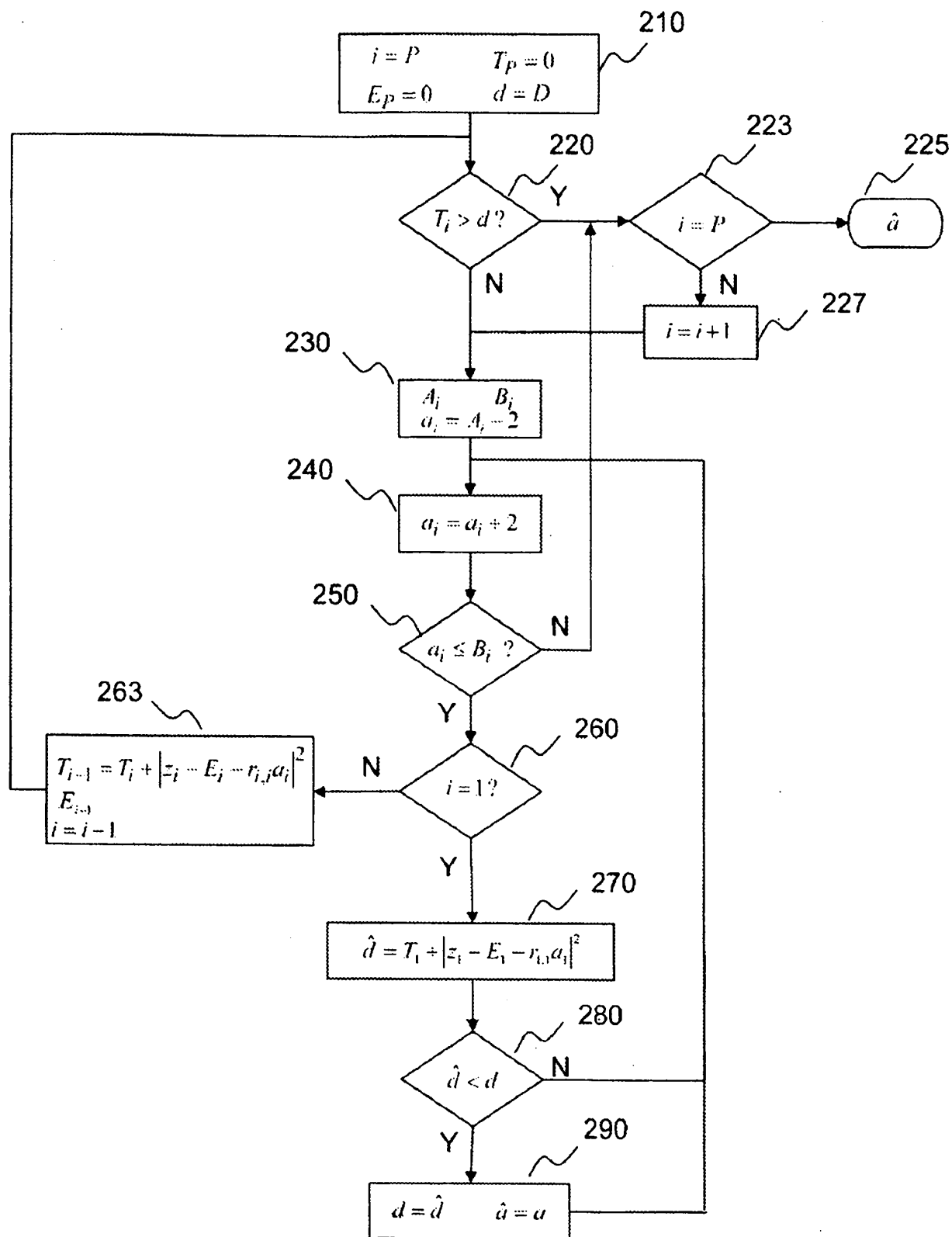
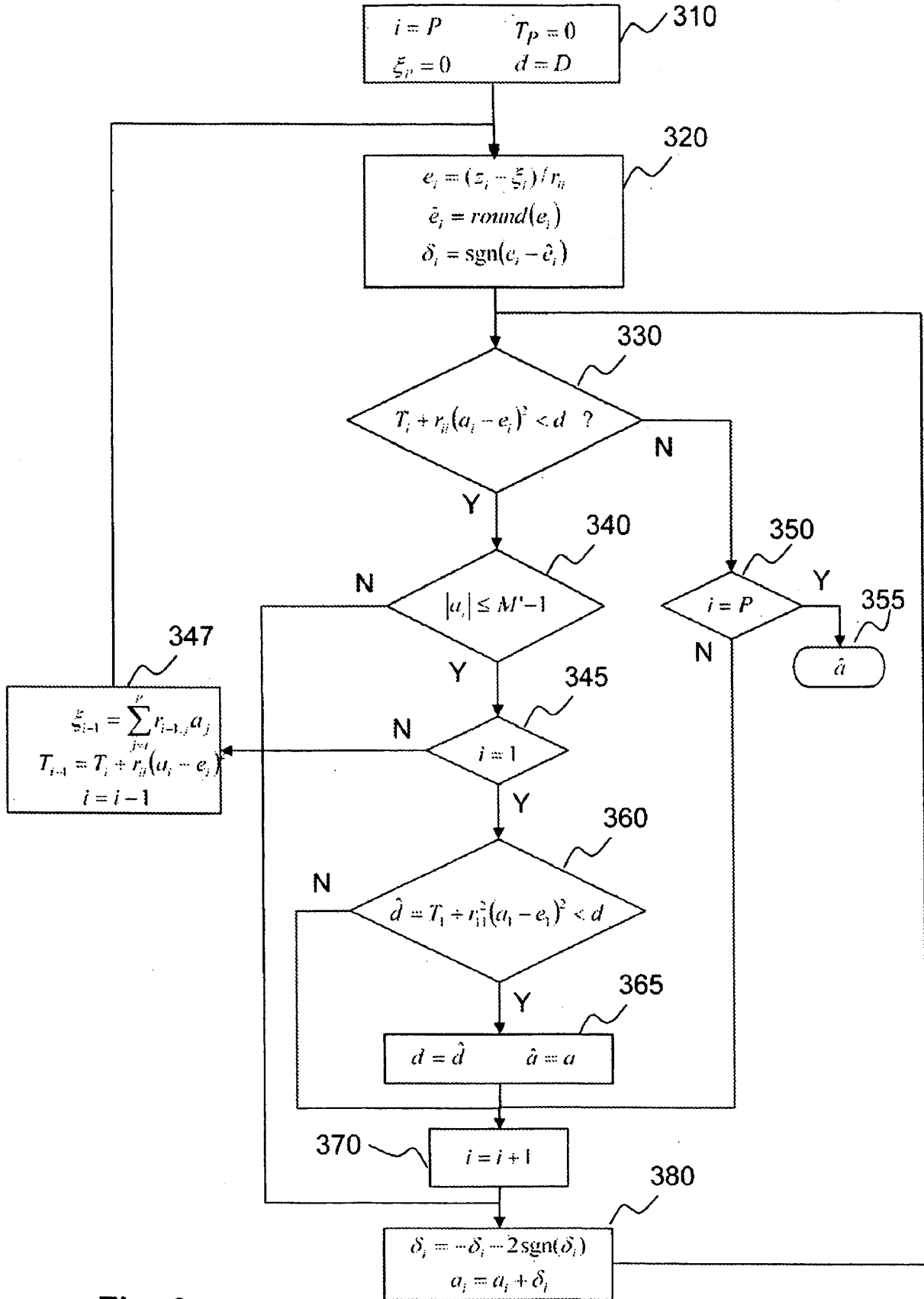


Fig. 2



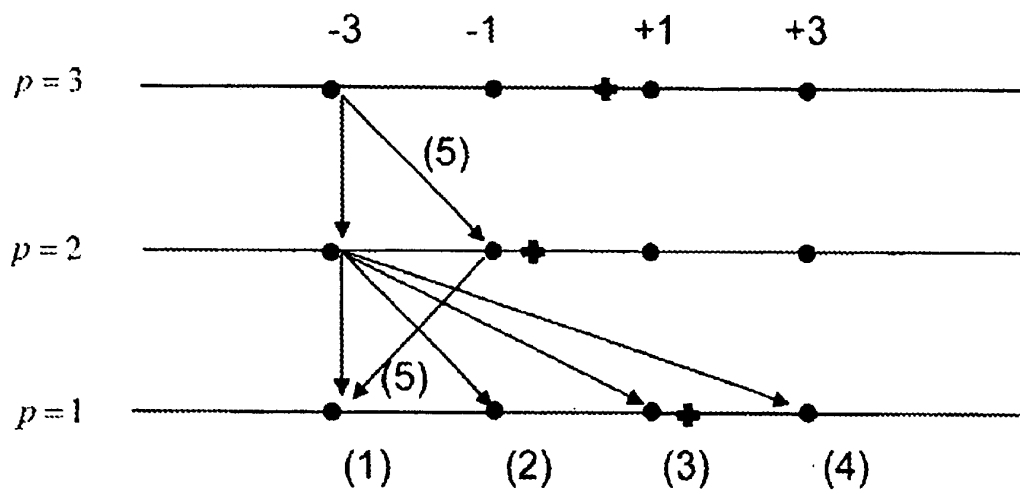


Fig. 4A

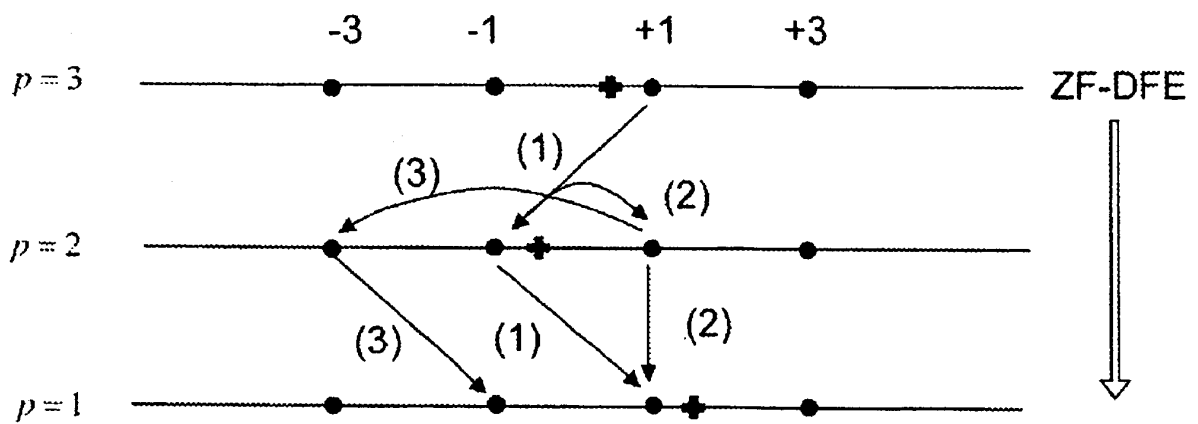
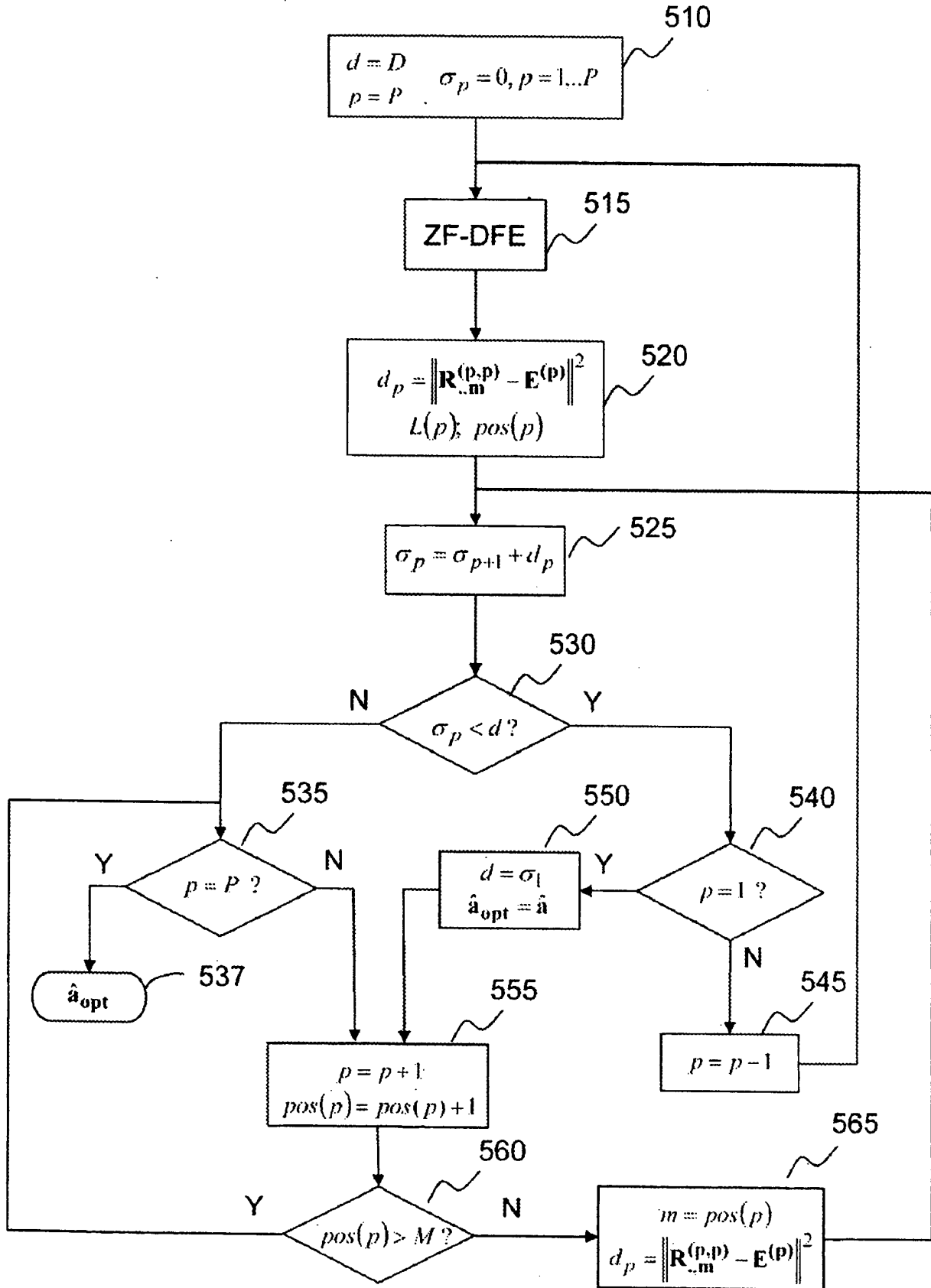


Fig. 4B

**Fig. 5**

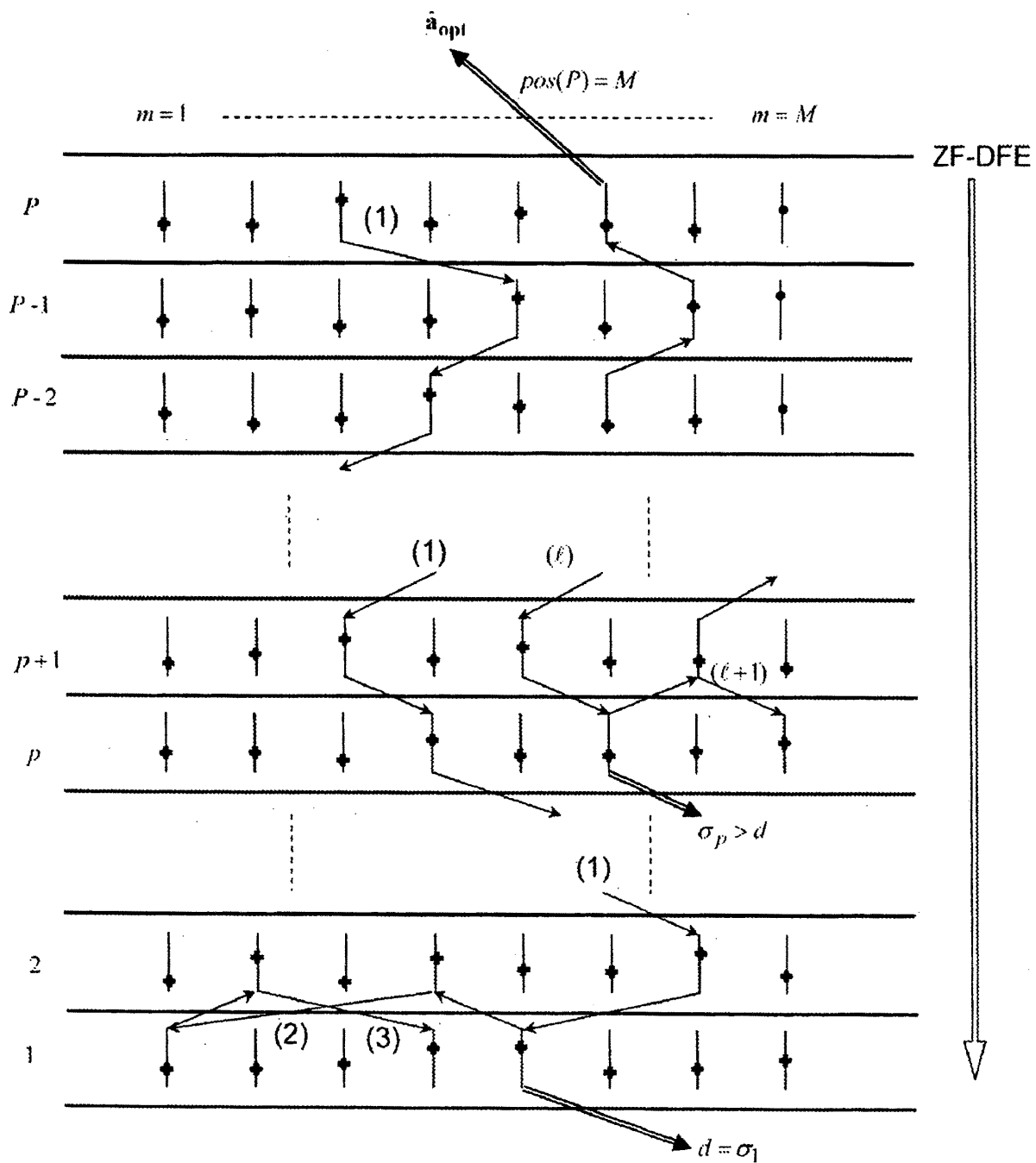


Fig. 6