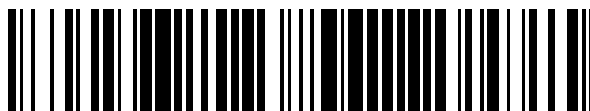


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 378 827**

51 Int. Cl.:

H04L 1/06 (2006.01)

H04L 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **05797150 .9**

96 Fecha de presentación: **17.10.2005**

97 Número de publicación de la solicitud: **1807957**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **18.07.2007**

54 Título: **Procedimiento de recepción iterativa para sistema de tipo MIMO, receptor y programa de ordenador correspondientes**

30 Prioridad:
04.11.2004 FR 0411787

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
18.04.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
18.04.2012

73 Titular/es:
**FRANCE TELECOM
6 PLACE D'ALLERAY
75015 PARIS, FR**

72 Inventor/es:
**BOUVET, Pierre-Jean;
HELARD, Maryline y
LE NIR, Vincent**

74 Agente/Representante:
Linage González, Rafael

ES 2 378 827 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

Procedimiento de recepción iterativa para sistema de tipo MIMO, receptor y programa de ordenador correspondientes

5

1. Ámbito de la invención

El ámbito de la invención es el de las comunicaciones digitales. Más concretamente, la invención se refiere a una técnica de recepción iterativa para un sistema de comunicaciones digitales que incluye, a la emisión, una codificación de canal y un multiplexado espacial, en un contexto de transmisión a varias antenas, también llamado MIMO (para "Multiple Input Multiple Output", "Entradas Múltiples Salidas Múltiples").

10

La invención se refiere más concretamente, pero no exclusivamente, a una técnica de recepción de una señal emitida según el esquema de emisión propuesto por A. M. Tonello en "Space-Time Bit-Interleaved Coded Modulation with an Iterative Decoding Strategy" (en francés "modulaciones codificadas espacio-tiempo con una estrategia de decodificación iterativa"), Proceedings of VTC Fall'00, Boston, EE.UU., septiembre de 2000. Se ilustra tal esquema de emisión, más generalmente llamado ST-BICM, en la figura 1.

15

La señal 10 que debe emitirse sufre una codificación de canal CC 11, y después un entrelazamiento π 12. Cruza a continuación un módulo "mapping" M 13, destinado a convertir elementos binarios en símbolos complejos: tal módulo asocia así a un grupo de bits a un símbolo complejo que pertenece a una constelación (de tipo QPSK, 64QAM, etc.). La serie de símbolos entregada a la salida del módulo de mapping M 13 se llama generalmente M-ésima. Se procede a continuación a una conversión serie-paralelo S/P 14, permitiendo demultiplexar cada símbolo resultante del módulo de mapping M 13 sobre las distintas antenas de emisión $15_1, 15_2$ a 15_{N_t} .

20

25

Según esta técnica de modulación ST-BICM, símbolos diferentes son por lo tanto emitidos simultáneamente sobre cada uno de las N_t antenas de emisión. A la recepción, cada una de las N_R antenas de recepción, donde $N_R \geq N_t$, recibe una combinación lineal de símbolos emitidos, afectada por las perturbaciones e interferencias vinculadas al canal de transmisión.

30

2. Soluciones de la técnica anterior

El receptor asociado a este esquema de emisión ST-BICM, propuesto por Tonello en el artículo antes citado, es iterativo, como se ilustra en la figura 2. Está alimentado por las señales recibidas sobre cada una de las N_R antenas de recepción, referenciadas como $25_1, 25_2$ a 25_{N_R} , e incluye un primer módulo de "MIMO demapping" espacio-tiempo 23 (MIMO M^{-1}) que utiliza un algoritmo de tipo máximo de probabilidad MV o ML (por "Maximum Likelihood"), que analiza, en particular, las relaciones de probabilidad LLR (del inglés "log likelihood ratio") sobre cada bit codificado. Tal módulo de "demapping" M^{-1} 23 aplica una operación sensiblemente inversa a la del módulo de "mapping" M 13, y cuenta N_t salidas, donde N_t es el número de antenas de emisión, que alimentan un módulo de conversión paralelo/serie P/S 24₁, y después un módulo de desentrelazamiento 22₁.

35

40

Las relaciones de probabilidad resultantes del módulo de MIMO demapping M^{-1} 23 se mejoran a continuación mediante un decodificador de canal CC^{-1} 21 de tipo SOVA (del inglés "Soft Output Viterbi Algorithm" para "algoritmo de Viterbi de salida flexible") y se envían de nuevo al módulo de "MIMO demapping" M^{-1} 23, después de un nuevo entrelazamiento π 22₂, y una nueva conversión serie/paralelo S/P 24₂. Este proceso se reitera con el fin de mejorar los datos decodificados.

45

Según esta técnica de recepción, se intenta pues encontrar por máximo de probabilidad qué símbolo de la constelación se emitió sobre cada una de las antenas. La utilización de tal receptor pasa por una fase previa de inicialización, en el transcurso de la cual se estima que cada uno de los canales de transmisión entre las N_t antenas de emisión y las N_R antenas de recepción emiten símbolos conocidos a priori por el receptor.

50

3. Inconvenientes de la técnica anterior

Un inconveniente de esta técnica iterativa de la técnica anterior es su complejidad de aplicación, a causa de la utilización de un algoritmo de tipo máximo de probabilidad a la recepción. En efecto, tal algoritmo consiste en calcular de manera exhaustiva todas las secuencias de símbolos recibidos posibles, y en seleccionar, entre estas secuencias, la más probable. La complejidad de tal algoritmo aumenta exponencialmente en función del número de antenas de emisión, del número de antenas de recepción y del tamaño de la constelación utilizada (o también del número de estados de la modulación).

55

60

Se conoce también la solicitud de patente US 2004/161058 (EBIKO) que describe una técnica de recepción iterativa de una señal que ha sufrido, a la emisión, una codificación espacio-tiempo. Tal técnica de recepción sólo aplica una antena de recepción y no explota pues la diversidad de antenas a la recepción en un sistema de tipo MIMO.

65

4. Objetivos de la invención

La invención tiene, en particular, por objetivo atenuar estos inconvenientes de la técnica anterior.

5 Más concretamente, un objetivo de la invención es proporcionar una técnica de recepción para un sistema de modulación codificada espacio-tiempo que sea más simple que la técnica de recepción iterativa propuesta por A. M. Tonello en "Space-Time Bit-Interleaved Coded Modulation with an Iterative Decoding Strategy " (en francés "modulaciones codificadas espacio-tiempo con una estrategia de decodificación iterativa"), Proceedings of VTC Fall'00, Boston, EE.UU., septiembre de 2000.

10 Otro objetivo de la invención es proponer una técnica tal de recepción iterativa que esté bien adaptada a las modulaciones de tipo ST-BICM y más generalmente a los sistemas de transmisión de tipo MIMO.

15 La invención tiene incluso por objetivo proporcionar una técnica tal que siga siendo de complejidad reducida (que presente por ejemplo una complejidad lineal), incluso cuando el número de antenas de emisión y/o de recepción es elevado y/o cuando el tamaño de la constelación utilizada es grande.

20 La invención tiene también por objetivo proponer una técnica tal que pueda aplicarse en receptores de arquitectura más simple que los receptores de la técnica anterior. En particular, un objetivo de la invención es proporcionar un receptor que incluya un número de módulos elementales (del tipo decodificador de canal, desentrelazador, etc.) funcionando en paralelo menor que el número de antenas de emisión que existen en el sistema.

25 Un objetivo secundario de la invención es proporcionar una técnica tal que esté bien adaptada también a los canales de transmisión que solo presentan interferencias entre símbolos en los canales selectivos en frecuencia.

La invención tiene finalmente por objetivo proponer una técnica tal de recepción que presente rendimientos al menos equivalentes a los de las técnicas más complejas de la técnica anterior.

5. Características esenciales de la invención

30 Estos objetivos, así como otros que aparecerán más adelante, se logran con la ayuda de un procedimiento de recepción de una señal de datos, que aplica N_R antenas de recepción, donde N_R es superior o igual a 2, habiendo sufrido dicha señal de datos, antes de la emisión, una codificación de canal y un multiplexado espacial, y que siendo emitida sobre N_T antenas de emisión, donde N_T es superior o igual a 2, emitiendo cada una de dichas antenas una parte de dicha señal, aplicando dicho procedimiento de recepción una etapa de estimación del canal de transmisión entre dichas antenas de emisión y dichas antenas de recepción.

40 Según la invención, tal procedimiento de recepción incluye al menos una iteración de mejora de una estimación de la señal recibida, en función de dicha señal recibida y de una estimación anterior de dicha señal recibida, incluyendo dicha iteración las etapas de:

- filtrado de dicha señal recibida, entregando una señal filtrada;

45 - determinación de una interferencia que afecta a dicha señal recibida, aplicando una multiplicación de dicha estimación anterior de dicha señal recibida por una matriz representativa de interferencias debidas al canal de transmisión de dicha señal recibida, llamada matriz de interferencias J , entregando dicha determinación una interferencia estimada;

50 - sustracción de dicha interferencia estimada a dicha señal filtrada, de modo a obtener una señal mejorada;

- ecualización de dicha señal mejorada, entregando una señal ecualizada;

- estimación, a ir de dicha señal ecualizada, de la señal de datos emitida, llamada señal estimada.

55 Así pues, la invención se basa en un enfoque totalmente nuevo e inventivo de la recepción de una señal de datos que ha sufrido a la emisión una codificación de canal y un multiplexado espacial, en un sistema de comunicaciones digitales de tipo MIMO que presenta N_T antenas de emisión y N_R antenas de recepción.

60 En efecto, la invención propone una técnica de recepción mucho más simple que las técnicas de la técnica anterior puesto que no aplica una ecualización MIMO de máximo de probabilidad ML, como se propone por Tonello en el artículo antes citado, sino que se basa en una ecualización lineal a base de filtros. Gracias a esta complejidad reducida, se adapta pues mucho mejor a los sistemas MIMO que presentan un gran número de antenas de emisión y/o de recepción, y a las constelaciones de gran tamaño, que presentan un elevado número de estados de modulación.

65 Además, según la técnica de recepción de la invención, no es necesario realizar tantas decodificaciones de canal

como antenas de emisión existen, siendo suficiente una sola decodificación de canal en bloque.

Finalmente, la técnica de la invención es menos compleja que una técnica de recepción iterativa adaptada a un sistema de emisión que aplica una precodificación lineal de la señal de datos. Se tendrá en cuenta en efecto que la señal recibida según la invención no ha sufrido precodificación antes de la emisión, de modo que el procedimiento de recepción de la invención no aplica "deprecodificación" de la señal recibida (por "deprecodificación" se entiende aquí y en todo el resto del documento la operación inversa a la operación de precodificación realizada a la emisión).

La técnica de recepción de la invención se basa más concretamente en una ecualización MIMO lineal de anulación de interferencias, según la cual se reconstruyen las interferencias que afectan a la señal recibida, utilizando, en particular, la codificación de canal, para sustraerlas a continuación a la señal filtrada, de modo a obtener una señal mejorada. La estimación de la interferencia se hace de manera iterativa, teniendo en cuenta una estimación anterior de la señal recibida. La señal mejorada se ecualiza a continuación, y después se estima. Esta estimación de la señal sirve entonces para la próxima iteración de mejora.

La estimación de las interferencias aplica una matriz de interferencias que, por ejemplo, tiene en cuenta solamente la matriz representativa del canal de transmisión, en comparación con el caso en el que la señal sufriría una precodificación lineal antes de la emisión, en el cual la matriz de interferencias sería también entonces función de una matriz de deprecodificación.

La matriz representativa del canal de transmisión, también llamada matriz equivalente de canal, puede, en particular, tener en cuenta un multiplexado espacial y/o temporal aplicado a la emisión. En un sistema de tipo MIMO, tiene también en cuenta la interferencia entre símbolos debida a los distintos trayectos en el canal de propagación.

Ventajosamente, dicho filtrado de dicha señal recibida aplica una multiplicación de dicha señal recibida por una matriz transpuesta conjugada H^H de una matriz representativa de dicho canal de transmisión H .

De manera preferente, la primera iteración de mejora aplica una estimación inicial de dicha señal recibida que incluye las etapas de:

- ecualización inicial de dicha señal recibida por multiplicación de una matriz de ecualización global que tiene en cuenta al menos dicha matriz representativa de dicho canal de transmisión H , entregando una señal inicial ecualizada;

- estimación inicial de dicha señal recibida a partir de dicha señal inicial ecualizada.

Es en efecto necesario inicializar el proceso iterativo de la invención, no estando aún disponible ninguna señal M-ésima anteriormente estimada. El resultado de esta estimación inicial alimenta a continuación las iteraciones siguientes del procedimiento.

Preferentemente, cuando dicho canal de transmisión es selectivo en frecuencia, dicha señal de datos emitida sobre cada una de dichas antenas de emisión es una señal multiportadoras y dicha iteración incluye una etapa preliminar de desmodulación multiportadoras sobre cada una de dichas antenas de recepción.

En efecto, al realizar una modulación multiportadora antes de la emisión y una desmodulación multiportadora a la recepción, se obtiene un canal equivalente a un canal no selectivo en frecuencia para cada subportadora de la modulación, en el que la señal de datos no sufre pues interferencias entre símbolos o sufre pocas.

Ventajosamente, al menos una de dichas etapas de estimación de la señal recibida entrega, por una parte, una estimación binaria de dicha señal recibida y, por otra parte, una estimación ponderada de dicha señal recibida, utilizándose dicha estimación ponderada para la iteración siguiente, si esta última existe.

En función de la aplicación considerada, se puede extraer y utilizar tal estimación binaria de la señal recibida en cada iteración del procedimiento (con fines estadísticos por ejemplo, o para alimentar un bloque de tratamiento particular), o solamente en ciertos rangos de la iteración, por ejemplo al final del proceso iterativo.

Según una característica preferente, tal procedimiento de recepción incluye también una etapa de estimación de un ruido que afecta a dicho canal de transmisión y, cuando dicha ecualización es de tipo MMSE ("Minimum Mean Square Error" por "error cuadrático medio mínimo"), dicha matriz de ecualización global tiene también en cuenta dicho ruido estimado.

Según una variante ventajosa, dicha ecualización es de tipo "Zero Forcing" (ZF para "forzar a cero"), que constituye una alternativa interesante a la ecualización MMSE a causa de su menor complejidad.

De manera ventajosa, tal procedimiento de recepción incluye también al menos una etapa de control automático de ganancia (CAG) que precede a dichas etapas de ecualización, lo que permite mejorar los rendimientos del

procedimiento iterativo de la invención.

La invención se refiere también a un receptor de una señal de datos, que aplica el procedimiento de recepción iterativo descrito anteriormente. Tal receptor incluye, en particular, medios de mejora de la estimación de la señal recibida, en función de dicha señal recibida y de una estimación anterior de dicha señal recibida, incluyendo al menos dos módulos elementales gobernados sucesivamente, incluyendo cada uno de dichos módulos elementales:

- medios de filtrado de dicha señal recibida, entregando una señal filtrada;

- medios de determinación de una interferencia que afecta a dicha señal recibida, aplicando una multiplicación de dicha estimación anterior de dicha señal recibida por una matriz representativa de interferencias debidas al canal de transmisión de dicha señal recibida, llamada matriz de interferencias J, entregando dichos medios de determinación una interferencia estimada;

- medios de sustracción de dicha interferencia estimada a dicha señal filtrada, de modo a obtener una señal mejorada;

- medios de ecualización de dicha señal mejorada, entregando una señal ecualizada;

- medios de estimación, a partir de dicha señal ecualizada, de la señal de datos emitida, llamada señal estimada.

La invención se refiere también a un producto de programa de ordenador que incluye secuencias de instrucciones adaptadas a la aplicación de un procedimiento de recepción tal como se describe anteriormente cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

6. Lista de figuras

Otras características y ventajas de la invención aparecerán más claramente a la lectura de la descripción siguiente de un modo de realización preferente, dado como simple ejemplo ilustrativo y no limitativo, y de los dibujos adjuntos, entre los cuales:

- la figura 1, ya comentada en relación con la técnica anterior, presenta una sinopsis de un esquema de emisión de tipo ST-BICM, tal como se propone por Tonello en el artículo antes citado;

- la figura 2, también comentada en relación con la técnica anterior, ilustra la arquitectura de un receptor iterativo propuesto por Tonello en el artículo antes citado adaptado al esquema de emisión de la figura 1;

- la figura 3 presenta una sinopsis del principio de recepción iterativo de la invención;

- la figura 4 ilustra los distintos módulos elementales de un receptor que aplica el principio de recepción de la figura 3;

- la figura 5 presenta el módulo elemental del receptor de la figura 4 aplicado durante la primera iteración de mejora de la estimación de la señal recibida;

- la figura 6 presenta un módulo elemental del receptor de la figura 4 aplicado en una iteración de mejora siguiente;

- las figuras 7 y 8 presentan respectivamente variantes de los esquemas de emisión y de recepción en el caso de un canal selectivo en frecuencia;

- la figura 9 ilustra el concepto de canal de transmisión en un sistema de tipo MIMO;

- la figura 10 presenta los rendimientos de un receptor iterativo de la invención.

7. Descripción de un modo de realización de la invención

El principio general de la invención se basa en una recepción iterativa de una señal de datos, que ha sufrido una codificación de canal (pero no precodificación), en un sistema de tipo MIMO, aplicando una estimación iterativa de las interferencias generadas por la codificación de canal. La interferencia estimada, reconstruida a partir de una estimación anterior, es a continuación sustraída a la señal recibida, de manera a eliminar su contribución. Se procede así a una ecualización lineal de la señal recibida, que es poco compleja de implementar.

Se tendrá en cuenta que los elementos que figuran en las figuras 1 a 9 están referenciados de la siguiente manera: la primera cifra de referencia indica el número de la figura. Las cifras siguientes de la referencia designan el elemento en la figura, estando numerado generalmente un mismo elemento de la misma forma en las distintas figuras. Como ejemplo, un bloque de estimación de símbolos 36 en la figura 3 es designado por la referencia 56 en

la figura 5 y por la referencia 66 en la figura 6.

Se presenta, en relación con la figura 3, el principio de recepción iterativo de la invención.

5 Se recibe una señal r sobre N_R antenas de recepción referenciadas como 35_1 a 35_{N_R} . Tal señal ha sufrido, a la emisión, una codificación de canal y un multiplexado espacial, y ha sido emitida sobre N_t antenas de emisión, en donde $N_R \geq N_t$, como se ilustra por ejemplo en la figura 2 descrita anteriormente. Cada antena de recepción 35_1 a 35_{N_R} recibe una combinación lineal de símbolos emitidos sobre cada una de las N_t antenas de emisión.

10 Se supone en primer lugar, en el ejemplo de la figura 3, que el canal MIMO es no selectivo en frecuencia, de modo que la señal no sea afectada por interferencias entre símbolos (IES, o en inglés ISI para "Inter Symbol Interference"). Se describirá más adelante en relación con las figuras 7 y 8 una variante de realización de la invención en el caso en el que no se verifica esta hipótesis.

15 El procedimiento de recepción de la invención consiste en proceder de manera iterativa y en realizar en primer lugar una ecualización MIMO 30, y después una estimación de símbolos 36.

A la inicialización del sistema de recepción de la figura 3, se puede por ejemplo emitir sobre las N_t antenas de emisión símbolos conocidos a priori por el receptor, con el fin de estimar las funciones de transferencia de los distintos canales de transmisión entre cada uno de las N_t antenas de emisión y N_R antenas de recepción. El resultado de esta estimación de canal 37 alimenta entonces el bloque de ecualización MIMO 30. Se realiza tal estimación de canal por medio de algoritmos clásicos bien conocidos por el experto en la técnica que por lo tanto no se describen aquí con más detalle.

25 Tal bloque de ecualización MIMO 30 puede utilizar distintas técnicas de ecualización, que se describirán con más detalle en lo que sigue de este documento. Cuando la técnica aplicada en el bloque de ecualización referenciado como 30 es de tipo MMSE (por "Minimum Mean Square Error", "error cuadrático medio mínimo"), es también necesario proporcionar a este bloque de ecualización 30 una estimación del ruido 38 (en forma de relación señal a ruido (o SNR) por ejemplo). Tal estimación del ruido es también clásica y bien conocida por el experto en la técnica y el método utilizado para esta estimación no se describirá por lo tanto aquí con más detalle.

El bloque de ecualización MIMO 30 entrega a la salida una señal M-ésima ecualizada \tilde{S} . Se recuerda que por señal M-ésima se entiende una secuencia de símbolos complejos que pertenecen a una constelación (de tipo QPSK, 16QAM, etc.).

35 Esta señal ecualizada \tilde{S} alimenta a continuación un bloque de estimación de símbolos 36, en el seno del cual se somete a operaciones de "demapping" M^{-1} 33₁, de desentrelazamiento π^{-1} 32₁ y de decodificación de canal CC^{-1} 31.

A la salida de esta estimación de símbolos 36, se obtiene una señal binaria estimada \hat{d} , que puede o no explotarse, según la aplicación prevista.

40 El procedimiento que es iterativo, se hace sufrir a esta señal binaria estimada \hat{d} un nuevo entrelazamiento π 32₂ y un nuevo "mapping" M 33₂, con el fin de obtener una señal M-ésima estimada \hat{S} , que se puede volver a inyectar en el bloque 30 de ecualización MIMO para una iteración siguiente de mejora de la estimación de la señal recibida. Esta señal \hat{S} puede también extraerse para sufrir tratamientos sucesivos cuando se pone fin a las iteraciones sucesivas del procedimiento de recepción, habiéndose alcanzado una calidad de señal suficiente (por ejemplo al cabo de 5 iteraciones, como se ilustra por las curvas de simulación de la figura 10).

La figura 4 ilustra más concretamente la arquitectura de un receptor según la invención. Tal receptor es de tipo iterativo, y está constituido por p módulos elementales ($p > 1$) referenciados como I_{te1} , I_{te2} a I_{tep} .

50 Como se describe anteriormente en relación con la figura 3, se recibe una señal r sobre las N_R antenas de recepción del sistema MIMO considerado. Alimenta el primer módulo elemental I_{te1} del receptor, ilustrado en la figura 5, en el cual sufre la primera iteración ($p=1$) del procedimiento de recepción de la invención. Esta primera iteración consiste en una fase de inicialización, no estando aún disponible ninguna señal M-ésima estimada, e incluye pues las siguientes etapas:

- Se procede en primer lugar a la ecualización global 50 de la señal recibida r por multiplicación por una matriz de ecualización global $(G + \sigma^2 I)^{-1} H^H$, donde H designa la matriz representativa del canal de transmisión, $\sigma^2 = 1/SNR$ es la variación del ruido equivalente, también igual al inverso de la relación media señal a ruido observada sobre cada antena de recepción (SNR), y donde $G = H^H \cdot H$ es una matriz de ecualización global. Esta ecualización 50 entrega

una señal M-ésima ecualizada $\tilde{s}^{(1)}$. Se tendrá en cuenta que se considera aquí una ecualización de tipo MMSE, describiéndose otros tipos de ecualización más adelante en este documento.

- La señal M-ésima ecualizada $\tilde{s}^{(1)}$ alimenta a continuación un bloque de estimación 56 de la señal binaria y de la señal M-ésima que, a partir de la señal M-ésima ecualizada, entrega una señal binaria estimada $\hat{d}^{(1)}$ (que puede no ser explotada, y no está pues inevitablemente disponible a la salida) y una señal M-ésima estimada $\hat{s}^{(1)}$.

La señal M-ésima estimada $\hat{s}^{(1)}$ se inyecta a continuación en el módulo elemental siguiente lte2. La figura 6 ilustra la estructura de un módulo elemental ltep, dónde de $p>1$, que incluye un primer bloque 60 de ecualización global y un segundo bloque 66 de estimación de símbolos.

El bloque de ecualización global 60 recibe a la entrada la señal M-ésima estimada $\hat{s}^{(p-1)}$ resultante de la iteración anterior y la señal recibida r. Realiza las siguientes operaciones:

- filtrado adaptado 60₂ de la señal recibida r por aplicación de la matriz transconjugada del canal H^H entregando una señal filtrada;
- creación 60₁ de interferencias a partir de una señal M-ésima estimada anterior $\hat{s}^{(p-1)}$ por multiplicación por la izquierda de esta señal M-ésima estimada anterior por una matriz de interferencias $J = G \cdot \text{diag}(G)$; más generalmente, esta matriz de interferencias debe al menos tener en cuenta la matriz de canal H;
- sustracción de las interferencias obtenidas a la salida del bloque referenciado como 60₁ a la señal filtrada obtenida a la salida del bloque de filtrado 60₂ para obtener una señal mejorada;
- ecualización 60₃ de la señal mejorada entregando una señal M-ésima ecualizada $\tilde{s}^{(p)}$ por aplicación de la matriz $(\text{diag}(G) + \sigma^2 I)^{-1}$; más generalmente, esta matriz de ecualización debe al menos tener en cuenta la matriz de canal H.

La señal M-ésima ecualizada $\tilde{s}^{(p)}$ alimenta a continuación el bloque de estimación 66 que realiza la estimación:

- de la señal binaria emitida, llamada señal binaria estimada $\hat{d}^{(p)}$;
- de la señal M-ésima emitida llamada señal M-ésima estimada $\hat{s}^{(p)}$.

El modo de realización descrito anteriormente se basa en la aplicación de una ecualización de tipo MMSE. Sin embargo, también pueden utilizarse otros tipos de ecualización en el marco de la invención. Así pues, la ecualización ZF (para "Zero Forcing", "forzar a cero") constituye una alternativa interesante ya que es menos compleja. En ese caso, el bloque de ecualización 50 del primer módulo elemental lte1 para la primera iteración aplica la ecualización de la señal recibida r por multiplicación de una matriz de ecualización global $G^{-1}H^H$ (que tiene en cuenta pues al menos la matriz del canal H, pero más el ruido) y entrega una señal M-ésima ecualizada $\tilde{s}^{(1)}$. Del mismo modo, en los módulos elementales ltep, dónde $p>1$, el bloque de ecualización 60₃ de la señal mejorada procede en lo sucesivo a la ecualización de la señal mejorada por aplicación de la matriz $(\text{diag}(G))^{-1}$, para entregar a la salida una señal M-ésima ecualizada $\tilde{s}^{(p)}$.

Los otros bloques funcionales del receptor descrito anteriormente en el marco de una ecualización MMSE no experimentan cambios.

Se puede también prever la utilización de ecualizaciones de tipo MRC ("Maximum Ratio Combining") o EGC ("Equal Gain Combining"), que son bien conocidos en la bibliografía.

Es incluso posible mejorar los rendimientos del procedimiento iterativo de la invención aplicando un control automático de ganancia (CAG), antes de las etapas de ecualización descritas anteriormente.

El CAG tiene, en particular, por objeto normalizar la energía de la señal para volverla unitaria, y minimizar la propagación de errores en las iteraciones. En la invención, esta normalización de la energía se hace en paralelo para las señales recibidas sobre cada una de las N_R antenas de recepción.

Así pues, una señal x_k a la entrada de tal CAG se transforma en una señal y_k de la siguiente forma:

$$y_k = \alpha_k \cdot x_k$$

El coeficiente α_k puede, en particular, venir determinado por:

$$\begin{cases} G_k = G_{k-1} + \mu(1 - |y_k|^2) \\ \alpha_k = \sqrt{G_k} \end{cases}$$

5

dónde μ es el paso de adaptación, y dónde G_k es una variable temporal.

10 Como se indica anteriormente, el modo de realización descrito hasta ahora se aplicaba a un canal MIMO no selectivo en frecuencia, en el cual la señal de datos no sufría interferencias entre símbolos o sufría pocas. Se describe en lo sucesivo en relación con las figuras 7 y 8 una variante de realización de la invención en el caso en el que no se verifica esta hipótesis.

15 Cuando el canal es selectivo en frecuencia, se prevé la utilización de una modulación multiportadoras tal como el OFDM ("Orthogonal Frequency Division Multiplexing") (descrito por ejemplo por B. Le Floch, M. Alard y C. Berrou, en "Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex", Proceedings of the IEEE, vol. 83, nº 6, junio de 1995). En efecto, un canal de desaparición plana en frecuencia es equivalente a un canal multitrayectos (de desapariciones en frecuencia) para el cual se ha procedido a una modulación OFDM de la señal.

20 Se podría también utilizar cualquier otro tipo de modulación multiportadora, tal como una modulación que aplica la función prototípica IOTA, descrita por ejemplo en el documento de patente europea EP 0824812.

25 El esquema de emisión utilizado es entonces el de la figura 7. Difiere del esquema de emisión descrito anteriormente en relación con la figura 1 solamente en que después de la conversión serie/paralelo S/P 14, 74, y antes de la emisión de la señal sobre cada una de las N_t antenas de emisión 15₁ a 15_{N_t}, 75₁ a 75_{N_t}, se procede a una modulación multiportadora de tipo OFDM 79 sobre cada una de las vías de emisión. Siendo idénticos los otros bloques, no se describen aquí con más detalle.

30 Según esta variante, el receptor de la invención se modifica según el esquema de la figura 8. Difiere del receptor de la figura 3 solamente en que la señal recibida sobre cada una de las N_R antenas de emisión 85₁ a 85_{N_R}, antes de la ecualización 80, sufre una desmodulación OFDM 89, notada como OFDM⁻¹. Los otros bloques son idénticos a los de la figura 3 y no se describen pues aquí con más detalle.

35 Por ejemplo, el bloque de modulación OFDM 79 de la figura 7 toma N_{FFT} símbolos y devuelve un bloque de $N_{FFT} + \Delta$ símbolos, donde Δ designa el intervalo de guarda de la modulación OFDM. La operación dual OFDM⁻¹ 89 se efectúa a la recepción. A condición de que el intervalo de guarda Δ esté bien dimensionado (es decir, que sea superior al retraso máximo τ_{max} del canal), el canal equivalente correspondiente al conjunto constituido por el modulador OFDM 79, el canal de propagación MIMO y el desmodulador OFDM⁻¹ 89 es equivalente a un canal no selectivo en frecuencia para cada subportadora. Basta pues con aplicar el receptor iterativo propuesto para cada subportadora, como se expone con más detalle posteriormente.

40 Se utilizan las siguientes notaciones:

45 d: señal binaria

H(k): Matriz del canal para la subportadora k

G(k) = H^H(k) • H(k): matriz global

50 J(k) = G(k)-diag(G(k)): matriz de interferencias

$\tilde{S}^{(p)}$ (k): señal M-ésima ecualizada en la iteración p para la subportadora k

55 $\hat{S}^{(p)}$ (k): señal M-ésima estimada en la iteración p para la subportadora k

$\hat{d}^{(p)}$: señal binaria estimada en la iteración p

$r(k)$: señal recibida después de desmodulación OFDM sobre la subportadora k

$\sigma^2 = 1/\text{SNR}$: variación del ruido equivalente, también igual al inverso de la relación media señal a ruido observada sobre cada antena (SNR)

5 Para la primera iteración ($p=1$), puesto que no está disponible ninguna señal M-ésima estimada, se procede a una etapa de inicialización que incluye, para cada portadora k , las sub-etapas de:

10 - ecualización 50 de la señal recibida por multiplicación de una matriz de ecualización global $(G(k)+\sigma^2 I)^{-1} H^H(k)$ entregando una señal M-ésima ecualizada $\tilde{S}^{(1)}(k)$;

- estimación 56 de la señal binaria a partir de la señal M-ésima ecualizada $\tilde{S}^{(1)}(k)$ entregando una señal binaria estimada $\hat{d}^{(1)}$;

15 - estimación 56 de la señal M-ésima a partir de la señal ecualizada $\tilde{S}^{(1)}(k)$ entregando una señal M-ésima estimada $\hat{S}^{(1)}(k)$.

Para las iteraciones siguientes ($p>1$), se realiza, para cada portadora k , las etapas de:

20 - filtrado adaptado 60₂ de la señal recibida $r(k)$ por aplicación de la matriz transconjugada del canal $H^H(k)$ entregando una señal filtrada;

25 - creación 60₁ de interferencias a partir de una señal M-ésima estimada anterior $\hat{S}^{(p-1)}(k)$ por multiplicación por la izquierda de dicha señal M-ésima estimada anterior por una matriz de interferencias $J(k)$ teniendo en cuenta al menos la matriz de canal $H(k)$;

- sustracción de las interferencias a la señal filtrada entregando una señal mejorada;

30 - ecualización 60₃ de la señal mejorada entregando una señal M-ésima ecualizada $\tilde{S}^{(p)}(k)$ por aplicación de la matriz $(\text{diag}(G(k))+\sigma^2 I)^{-1}$ teniendo en cuenta al menos la matriz de canal $H(k)$;

- estimación 66 a partir de la señal M-ésima ecualizada de la señal binaria emitida llamada señal binaria estimada $\hat{d}^{(p)}$;

35 - estimación 66 a partir de la señal ecualizada de la señal M-ésima emitida llamada señal M-ésima estimada $\hat{S}^{(p)}$.

40 Se presenta en lo sucesivo, en relación con la figura 9, un ejemplo de realización del receptor de la invención adaptado a un esquema de emisión de tipo ST-BICM. Se utiliza $N_t = 4$ antenas de emisión, referenciadas como 95₁, 95₂, 95₃ y 95₄ y $N_R = 4$ antenas de recepción referenciadas como 95₅, 95₆, 95₇ y 95₈. El canal es de desaparición plana.

La matriz de canal utilizada por el sistema iterativo es la siguiente:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} & h_{41} \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} & h_{42} \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} & h_{43} \\ h_{14} & h_{24} & h_{34} & h_{44} \end{bmatrix}$$

45 en la que, como se ilustra en la figura 9, h_{ij} designa el trayecto que separa la antena de emisión de índice i de la antena de recepción de índice j .

La estimación de símbolo 36, 86 se efectúa de la siguiente forma:

50 - conversión M-ésima/binario M^{-1} 33₁, 83₁ entregando relaciones de probabilidades sobre la señal binaria codificada entrelazada;

- desentrelazamiento π^{-1} 32₁, 82₁ (idéntico al entrelazamiento π 12, 72 realizado a la emisión) entregando relaciones

de probabilidades sobre la señal binaria codificada;

- decodificación de canal CC^{-1} 31, 81 entregando una señal binaria estimada así como probabilidades a posteriori sobre la señal binaria codificada;

5 - entrelazamiento π 32₂, 82₂ de relaciones de probabilidades a posteriori sobre la señal binaria codificada entregando relaciones de probabilidades a posteriori sobre la señal binaria codificada entrelazada;

- conversión binario/M-ésima (mapping) M 33₂, 83₂ entregando una señal estimada \hat{S} .

10 La figura 10 presenta los rendimientos del procedimiento de recepción de la invención obtenidos por simulación a partir de un codificador de canal convolutivo de tipo K=7, donde K es la longitud de restricción del código, y de una constelación de tipo QPSK ("Quadrature Phase Shift Keying" para "modulación por decalaje de fase en cuadratura"). La eficacia espectral es pues de $\eta = 4$ bits/s/Hz.

15 Más concretamente, la figura 10 presenta cinco curvas referenciadas como 101 a 105 que ilustran la tasa de error binario (BER para "Bit Error Rate") en función de la relación E_b/N_0 (que corresponde a la relación entre la energía gastada por bit transmitido y la densidad espectral del ruido blanco) expresado en decibelios (dB) para las cinco primeras iteraciones del receptor de la invención. Así pues, la curva referenciada como 101 corresponde a la primera iteración, la curva referenciada como 102 corresponde a la segunda iteración y así sucesivamente hasta la curva referenciada como 105 que corresponde a la quinta iteración del receptor iterativo de la invención.

20 La curva referenciada como 106 sobre la figura 10 corresponde por su parte a la curva de rendimiento teórico óptimo para un sistema de recepción de una señal de tipo ST-BICM.

25 Como se ilustra en la figura 10, el receptor de la invención presenta rendimientos satisfactorios puesto que converge al cabo de cuatro iteraciones aproximadamente. La convergencia es por otra parte relativamente rápida. A $E_b/N_0 = 4$ dB aproximadamente, el proceso converge hacia la curva óptima 106 (lo que es ilustrado por la aproximación de las curvas referenciadas como 105 y 106), lo que muestra que el receptor de la invención es muy potente.

30 Un receptor de tipo ML (tal como se propone por Tonello por ejemplo y se ilustra en la figura 2) no puede por otra parte superar el límite de rendimientos ilustrado por la curva referenciada como 106: se deduce pues que los rendimientos del receptor de la invención a alta relación señal a ruido son equivalentes a los que daría el receptor de la técnica anterior propuesto por Tonello, y esto con una complejidad menor.

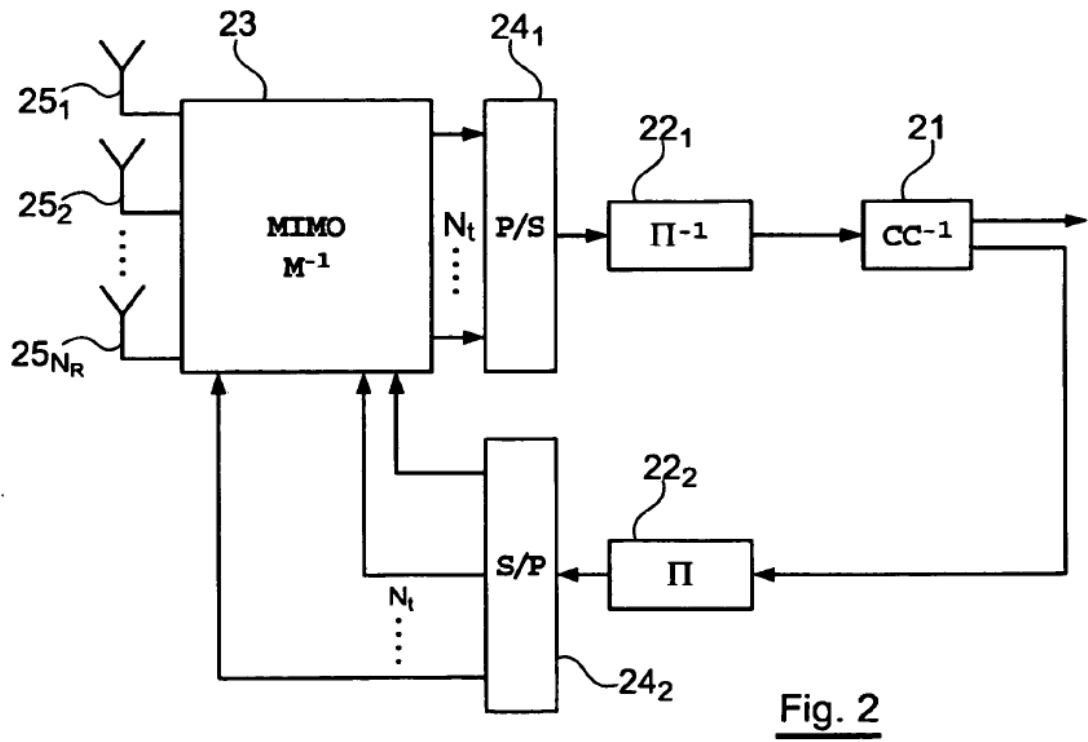
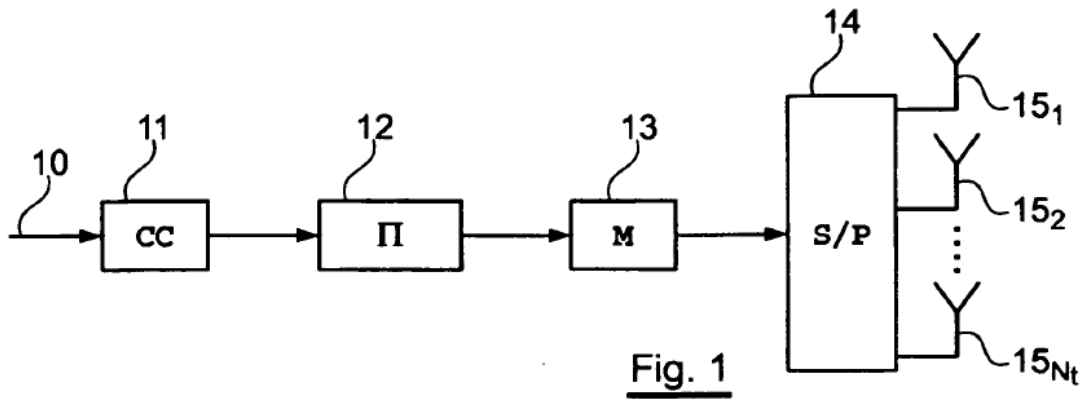
35 Se tendrá en cuenta que la invención no se limita a una implantación puramente material sino que puede también aplicarse en forma de una secuencia de instrucciones de un programa informático o cualquier forma que mezcle una parte material y una parte lógica. En caso de que la invención se implante parcial o totalmente en forma lógica, la secuencia de instrucciones correspondiente podrá almacenarse en un medio de almacenamiento amovible (tal como por ejemplo un disquete, un CD-ROM o un DVD-ROM) o no, siendo legible parcial o totalmente este medio de almacenamiento por un ordenador o un microprocesador.

40

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de recepción de una señal de datos, aplicando N_R antenas de recepción, donde N_R es superior o igual a 2, habiendo sufrido dicha señal de datos, antes de la emisión, una codificación de canal y un multiplexado espacial, y emitiéndose sobre N_T antenas de emisión, donde N_T es superior o igual a 2, emitiendo cada una de dichas antenas una parte de dicha señal, aplicando dicho procedimiento de recepción una etapa de estimación del canal de transmisión entre dichas antenas de emisión y dichas antenas de recepción, e incluyendo al menos una iteración de mejora de una estimación de la señal recibida, en función de dicha señal recibida y de una estimación anterior de dicha señal recibida, incluyendo dicha iteración las etapas de:
- filtrado de dicha señal recibida, entregando una señal filtrada;
 - determinación de una interferencia que afecta a dicha señal recibida, aplicando una multiplicación de dicha estimación anterior de dicha señal recibida por una matriz representativa de interferencias debidas al canal de transmisión de dicha señal recibida, llamada matriz de interferencias J , entregando dicha determinación una interferencia estimada;
 - sustracción de dicha interferencia estimada a dicha señal filtrada, de modo a obtener una señal mejorada;
 - ecualización de dicha señal mejorada, entregando una señal ecualizada;
 - estimación, a partir de dicha señal ecualizada, de la señal de datos emitida, llamada señal estimada.
2. Procedimiento de recepción según la reivindicación 1, caracterizado porque dicho filtrado de dicha señal recibida aplica una multiplicación de dicha señal recibida por una matriz transpuesta conjugada H^H de una matriz representativa de dicho canal de transmisión H .
3. Procedimiento de recepción según una cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, caracterizado porque la primera iteración de mejora aplica una estimación inicial de dicha señal recibida que incluye las etapas de:
- ecualización inicial de dicha señal recibida por multiplicación de una matriz de ecualización global que tiene en cuenta al menos dicha matriz representativa de dicho canal de transmisión H , entregando una señal inicial ecualizada;
 - estimación inicial de dicha señal recibida a partir de dicha señal inicial ecualizada.
4. Procedimiento de recepción según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque, cuando dicho canal de transmisión es selectivo en frecuencia, dicha señal de datos emitida sobre cada una de dichas antenas de emisión es una señal multiportadoras y porque dicha iteración incluye una etapa preliminar de desmodulación multiportadoras sobre cada una de dichas antenas de recepción.
5. Procedimiento de recepción según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque al menos una de dichas etapas de estimación de la señal recibida entrega, por una parte, una estimación binaria de dicha señal recibida y, por otra parte, una estimación ponderada de dicha señal recibida, utilizándose dicha estimación ponderada para la iteración siguiente, si esta última existe.
6. Procedimiento de recepción según una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, caracterizado porque incluye también una etapa de estimación de un ruido que afecta a dicho canal de transmisión, y porque, cuando dicha ecualización es de tipo Minimum Mean Square Error, MMSE para error cuadrático medio mínimo, dicha matriz de ecualización global tiene también en cuenta dicho ruido estimado.
7. Procedimiento de recepción según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque dicha ecualización es de tipo Zero Forcing, ZF para forzar a cero.
8. Procedimiento de recepción según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque incluye también al menos una etapa de control automático de ganancia, CAG, que precede a dichas etapas de ecualización.
9. Receptor de una señal de datos, que incluye N_R antenas de recepción (35_1 a 35_{N_R}), donde N_R es superior o igual a 2, habiendo sufrido dicha señal de datos, antes de la emisión, una codificación de canal y un multiplexado espacial, y emitiéndose sobre N_T antenas de emisión (15_1 a 15_{N_T}), donde N_T es superior o igual a 2, emitiendo cada una de dichas antenas (15_1 a 15_{N_T}) una parte de dicha señal, incluyendo dicho receptor medios de estimación de un canal de transmisión entre dichas antenas de emisión y dichas antenas de recepción, e incluyendo medios de mejora de una estimación de la señal recibida (r), en función de dicha señal recibida (r) y de una estimación anterior de dicha señal recibida (r), que incluyen al menos dos módulos elementales ($Ite1$, $Ite2$) gobernados sucesivamente, incluyendo cada uno de dichos módulos elementales ($Ite1$, $Ite2$):

- medios de filtrado (60₂) de dicha señal recibida (r), entregando una señal filtrada;
 - 5 - medios de determinación (60₁) de una interferencia que afecta a dicha señal recibida (r), aplicando una multiplicación de dicha estimación anterior de dicha señal recibida (r) por una matriz representativa de interferencias debidas al canal de transmisión de dicha señal recibida (r), llamada matriz de interferencias J, entregando dichos medios de determinación una interferencia estimada;
 - 10 - medios de sustracción de dicha interferencia estimada a dicha señal filtrada, de modo a obtener una señal mejorada;
 - medios de ecualización (60₃) de dicha señal mejorada, entregando una señal ecualizada;
 - 15 - medios de estimación (66), a partir de dicha señal ecualizada, de la señal de datos emitida, llamada señal estimada.
10. Producto de programa de ordenador caracterizado porque incluye secuencias de instrucciones adaptadas a la aplicación de un procedimiento de recepción según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.



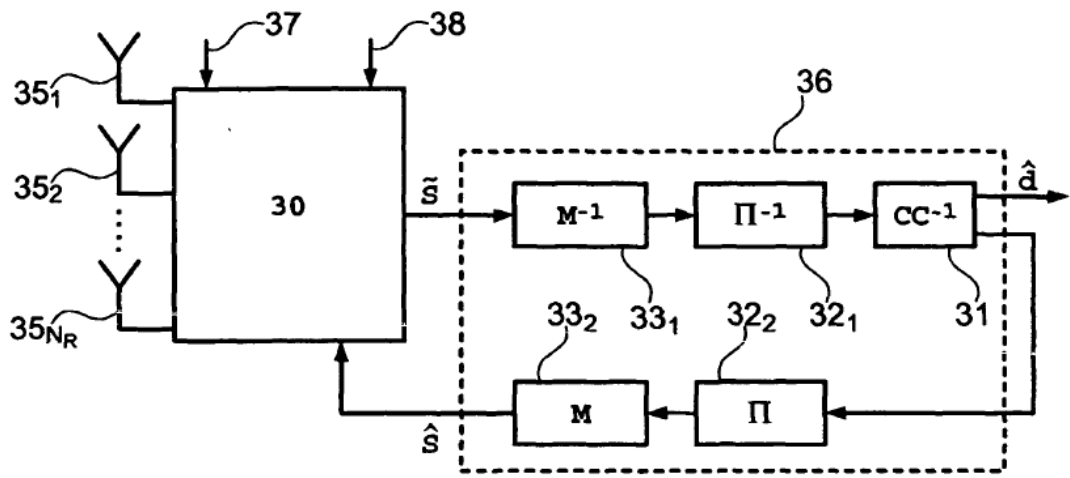


Fig. 3

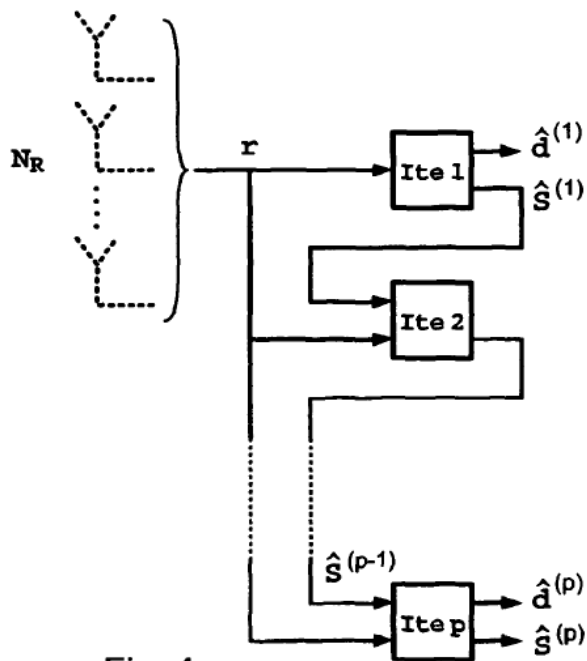


Fig. 4

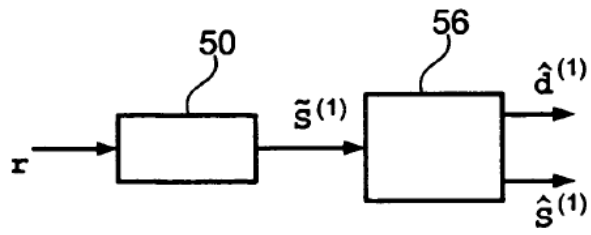


Fig. 5

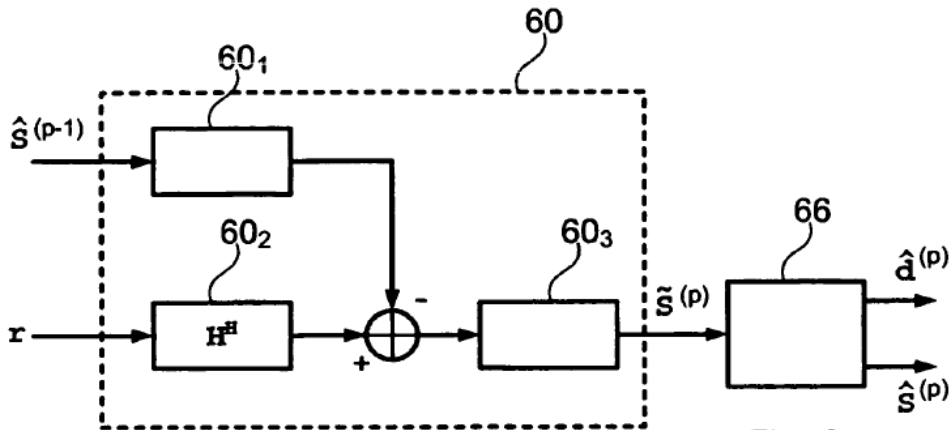


Fig. 6

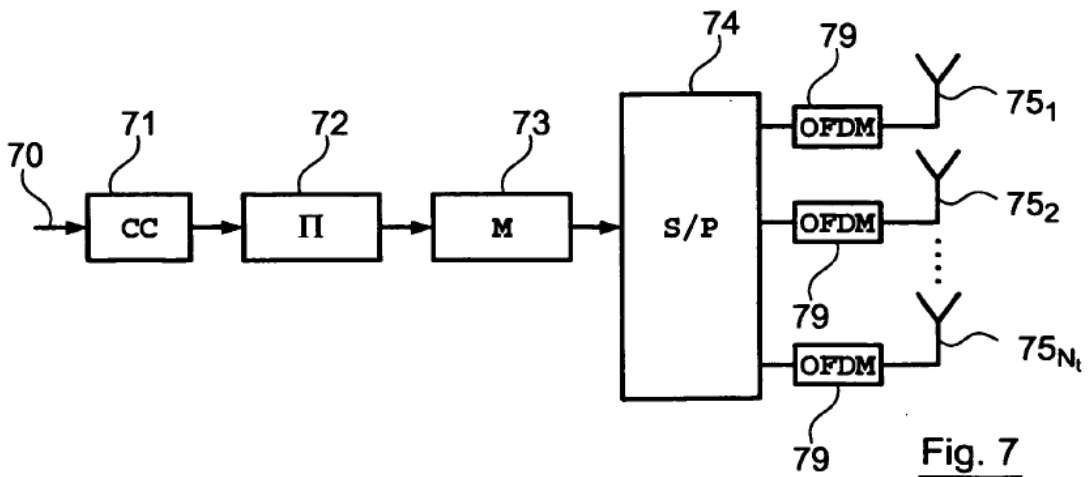


Fig. 7

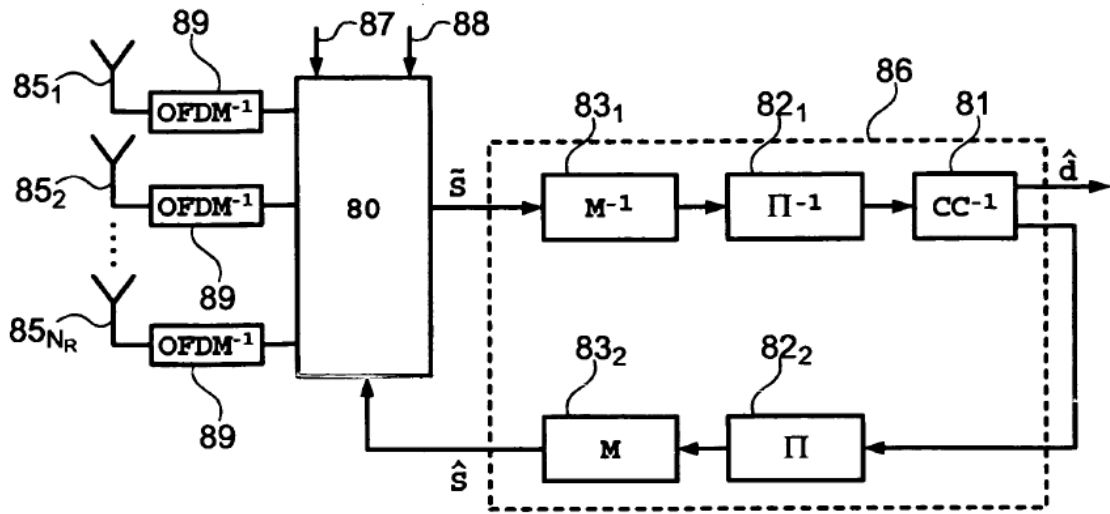


Fig. 8

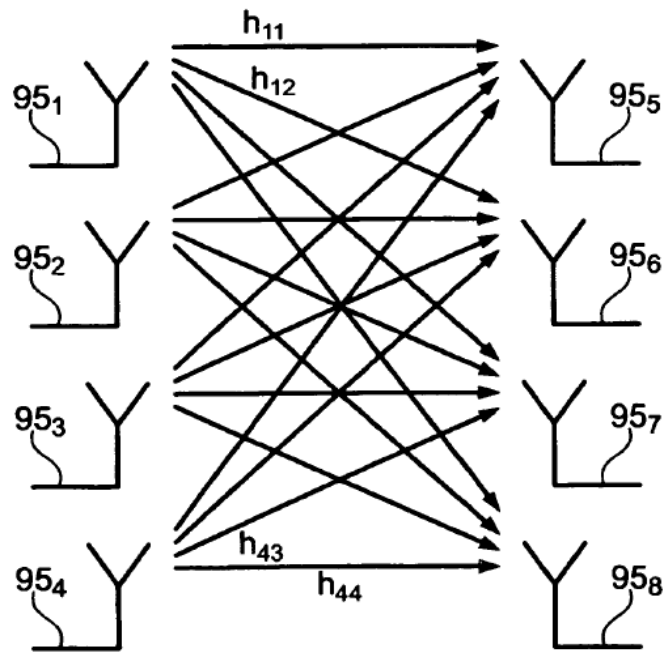


Fig. 9

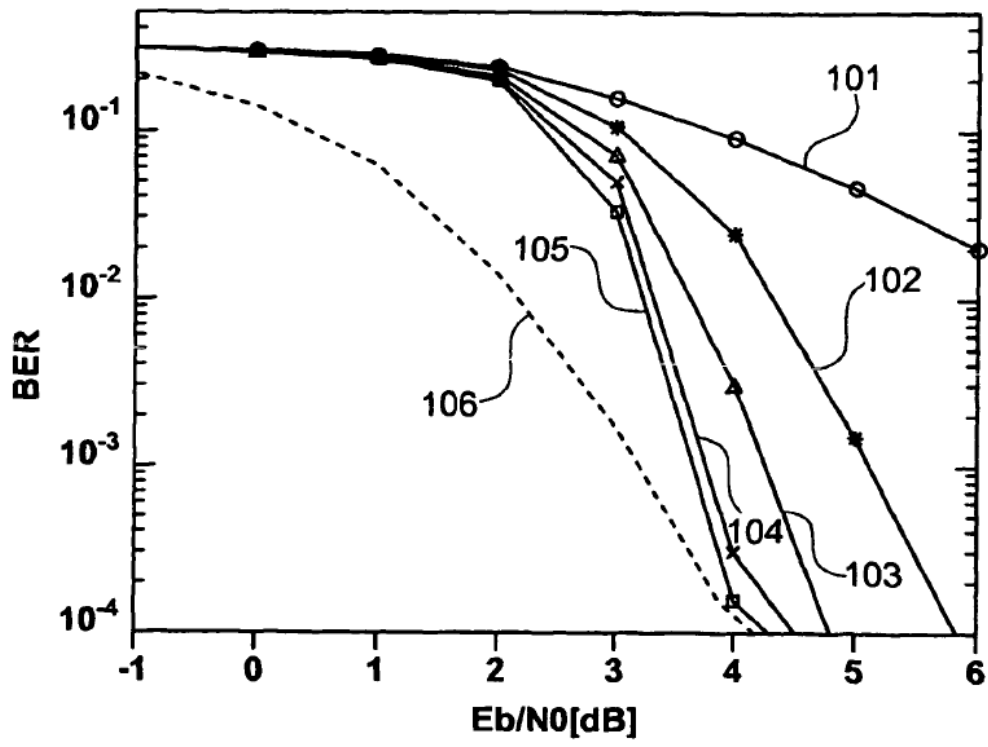


Fig. 10