

19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
**INSTITUT NATIONAL
 DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
 PARIS

11) N° de publication : **2 863 422**
 (à n'utiliser que pour les
 commandes de reproduction)

21) N° d'enregistrement national : **03 14272**

51) Int Cl⁷ : H 04 B 7/02

12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22) Date de dépôt : 04.12.03.

30) Priorité :

43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 10.06.05 Bulletin 05/23.

56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71) Demandeur(s) : *FRANCE TELECOM Société anonyme — FR.*

72) Inventeur(s) : *LE NIR VINCENT, HELARD MARYLINE et GOUPIL ALBAN.*

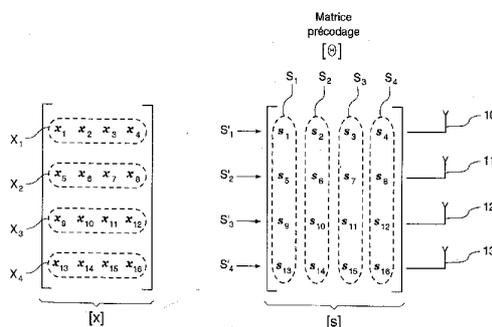
73) Titulaire(s) :

74) Mandataire(s) : *CABINET PATRICE VIDON.*

54) **PROCEDE D'EMISSION MULTI-ANTENNES D'UN SIGNAL PRECODE LINEAIREMENT, PROCEDE DE RECEPTION, SIGNAL ET DISPOSITIFS CORRESPONDANTS.**

57) L'invention concerne un procédé d'émission d'un signal formé de vecteurs comprenant chacun N symboles source à émettre, et mettant en oeuvre M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2.

Selon l'invention on réalise un précodage linéaire dudit signal, mettant en oeuvre un produit matriciel d'une matrice source, formée desdits vecteurs organisés en lignes successives, par une matrice de précodage linéaire, délivrant une matrice précodée, et on émet successivement des vecteurs précodés correspondant à des colonnes de ladite matrice précodée, les M symboles de chaque vecteur précodé étant distribués sur lesdites M antennes.



FR 2 863 422 - A1



Procédé d'émission multi-antennes d'un signal précodé linéairement, procédé de réception, signal et dispositifs correspondants.

1. Domaine de l'invention

Le domaine de l'invention est celui des communications numériques sans fil. Plus précisément, l'invention concerne l'émission/réception d'un signal, mettant en œuvre une matrice de précodage, dans le cadre d'un système multi-antennes de type MIMO (de l'anglais « Multiple Input Multiple Output » pour « Entrées Multiples Sorties Multiples »), encore appelé « BLAST » (de l'anglais « Bell Laboratories Layered Space-Time » pour « système spatio-temporel par couche des laboratoires Bell »).

L'invention trouve des applications dans le domaine des radiocommunications, notamment pour les systèmes de troisième, quatrième générations et suivantes.

2. Solutions de l'art antérieur

Plusieurs systèmes d'émission/réception, comprenant de multiples antennes sont déjà bien connus. Certains de ces systèmes utilisent un codage espace-temps, qui permet d'exploiter au mieux leur diversité spatio-temporelle. Cependant, l'efficacité spectrale de ces codes espace-temps est limitée.

Certains travaux ont alors conduit à l'étude de systèmes « spatio-temporel par couches » (ou LST de l'anglais « Layered Space-Time »), utilisant des techniques de multiplexage spatial, qui permettent d'obtenir des systèmes dont la capacité croît linéairement avec le nombre d'antennes émettrices et réceptrices.

Ainsi, Foschini, dans "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multiple Antennas" (Bell Laboratories Technical Journal, Vol.1, No.2, Autumn, 1996, pp. 41-59) a présenté un premier système à multiplexage spatial, ayant pour but d'augmenter la capacité des systèmes de transmission. Pour cela, il a décrit une architecture « BLAST » diagonale (notée « D-BLAST ») dans laquelle les symboles codés ou non et entrelacés de chaque couche sont transmis successivement par chacune des antennes d'émission.

Wolniansky, Foschini, Golden et Valenzuela, dans "V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel" (Proc. ISSSE-98, Pisa, Italy, Sept .29, 1998), ont ensuite simplifié cette technique en modifiant l'architecture du système « BLAST » initial
5 en un système vertical (« V-BLAST ») sans codage, et en utilisant en réception un algorithme d'annulation d'interférence avec un critère de forçage à zéro (ou ZF de l'anglais « Zero Forcing »). Cette architecture verticale procède tout simplement à un démultiplexage de la chaîne d'informations en sous-chaînes, chacune d'entre elles étant transmise par son antenne respective.

10 Par la suite, Baro, Bauch, Pavlic et Semmler ("Improving BLAST Performance using Space-Time Block Codes and Turbo Decoding", Globecom 2000, November 2000) ont envisagé de combiner les codes espace-temps et le turbo-décodage aux systèmes de type V-BLAST.

Enfin, Ma et Giannakis ("Full-Diversity Full-Rate Complex-Field Space-Time Coding", IEEE Transactions on Signal Processing 2003) ont présenté une
15 technique combinant un précodage linéaire avec les techniques MIMO de multiplexage spatial à l'émission. Dans cette technique, le précodage linéaire s'effectue en utilisant des matrices de précodage particulières basées sur des matrices de Vandermonde, les différents symboles à l'émission étant émis
20 cycliquement. Le décodage en réception s'effectue selon un détecteur à Maximum de Vraisemblance.

3. Inconvénients de l'art antérieur

Un premier inconvénient de la technique « BLAST » de mutliplexage spatial proposée par Foschini est sa complexité de décodage.

25 Un autre inconvénient de cette technique, ensuite transformée en « V-BLAST », est que la diversité spatiale maximale des systèmes n'est pas exploitée.

La technique envisagée par Baro, Bauch, Pavlic et Semmler et consistant à combiner les codes espace-temps avec le système V-BLAST présente quant à elle l'inconvénient que la capacité maximale du système n'est pas exploitée.

Par ailleurs, ces différentes techniques de l'art antérieur ne permettent pas de traiter des canaux corrélés.

Ces différents inconvénients sont partiellement résolus par la technique de Ma et Giannakis, qui permet d'exploiter à la fois la diversité spatio-temporelle des systèmes, grâce à un précodage linéaire, et leur capacité maximale.

Cependant un inconvénient majeur de cette technique est le récepteur utilisé, qui doit être de type Maximum de Vraisemblance, encore noté MV. Ces récepteurs MV sont complexes à mettre en œuvre, et limitent, du fait de leur complexité, la taille de la matrice de précodage au nombre d'antennes d'émission du système.

4. Objectifs de l'invention

L'invention a notamment pour objectif de pallier ces inconvénients de l'art antérieur.

Plus précisément, un objectif de l'invention est de fournir une technique d'émission et de réception multi-antennes d'un signal mettant en œuvre une matrice de précodage présentant des performances accrues par rapport aux systèmes de précodage de l'art antérieur.

Un autre objectif de l'invention est de mettre en œuvre une telle technique de moindre complexité et plus stable numériquement que les techniques de l'art antérieur. Plus particulièrement, l'invention a pour objectif de fournir une telle technique qui ne nécessite pas de codes espaces-temps.

L'invention a encore pour objectif de mettre en œuvre une telle technique qui soit adaptée aux systèmes multi-antennes de type MIMO, tant pour des modulations de type monoporteuses que multiporteuses (OFDM et MC-CDMA).

L'invention a également pour objectif de fournir une telle technique permettant d'utiliser la capacité maximale du système MIMO et la diversité maximale du système.

L'invention a aussi pour objectif de mettre en œuvre une telle technique qui présente des performances en taux d'erreur binaire améliorées par rapport à l'état de l'art, tout en proposant une solution de faible complexité en réception.

Encore un objectif de l'invention est de mettre en œuvre une telle technique qui permette de traiter des canaux multi-antennes corrélés en limitant la dégradation des performances et qui ne dépende pas de la modulation.

5. Caractéristiques essentielles de l'invention

5 Ces objectifs, ainsi que d'autres qui apparaîtront par la suite, sont atteints à l'aide d'un procédé d'émission d'un signal formé de vecteurs comprenant chacun N symboles source à émettre, et mettant en œuvre M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2.

10 Selon l'invention, on réalise un précodage linéaire dudit signal, mettant en œuvre un produit matriciel d'une matrice source, formée desdits vecteurs organisés en lignes successives, par une matrice de précodage linéaire, délivrant une matrice précodée, puis on émet successivement des vecteurs précodés correspondant à des colonnes de la matrice précodée, les M symboles de chaque vecteur précodé étant distribués sur les M antennes.

15 Ainsi, l'invention repose sur une approche tout à fait nouvelle et inventive de l'émission d'un signal, mettant en œuvre un précodage linéaire dans un système multi-antennes.

20 Plus précisément, l'invention propose d'effectuer un mapping espace-temps transposé, c'est-à-dire d'émettre sur les M antennes les symboles ayant subi le même précodage par colonne.

Cette solution diffère donc fortement de l'émission cyclique proposée par Ma et Giannakis, qui induisait une forte complexité en réception.

25 La technique de l'invention est particulièrement avantageuse puisqu'elle permet d'exploiter la capacité maximale du canal MIMO, étant donné qu'elle n'utilise pas de codes espace-temps, et la diversité spatio-temporelle maximale, grâce au précodage linéaire.

Le nombre M d'antennes à l'émission correspond au nombre de vecteurs à émettre, ces vecteurs composant les différentes lignes de la matrice source.

30 Avantageusement, la matrice de précodage d'un tel procédé d'émission est une matrice par blocs.

De façon préférentielle, la matrice de précodage est une matrice unitaire de taille supérieure ou égale à M.

Ainsi l'invention se distingue des techniques de l'art antérieur, puisque la taille de la matrice de précodage n'est pas toujours égale au nombre M d'antennes d'émission. Comme on le verra dans la suite de ce document, ceci est rendu possible, selon l'invention, grâce à la mise en œuvre d'un décodage de faible complexité, qui permet donc un décodage simple, même avec de grandes matrices de précodage.

Cette matrice de précodage appartient au groupe comprenant les matrices d'Hadamard, les matrices de type Spéciale Unitaire de taille 2x2, également noté SU(2), les matrices de Fourier, les matrices de Vandermonde, et, plus généralement, les matrices unitaires.

Dans un mode de réalisation avantageux de l'invention, la matrice de précodage est une matrice par blocs de la forme :

$$\Theta_L = \sqrt{\frac{2}{L}} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_{L/2} & \Theta_{L/2} \\ \Theta_{L/2} & -\Theta_{L/2} \end{bmatrix}^T$$

avec $\Theta_2 = \begin{bmatrix} e^{i\theta_1} \cos \eta & e^{i\theta_2} \sin \eta \\ -e^{-i\theta_2} \sin \eta & e^{-i\theta_1} \cos \eta \end{bmatrix}$

et $\eta = \frac{\pi}{4} + k \frac{\pi}{2}$, $\theta_2 = \theta_1 - \frac{\pi}{2}$, et pour $i \in [1, 2]$, $\theta_i = \frac{\pi}{4} + k' \frac{\pi}{2}$ où k, k' sont des entiers relatifs.

L'invention concerne également un procédé de réception d'un signal émis sur M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2, mettant en œuvre P antennes de réception, où P est supérieur ou égal à 2.

Selon l'invention, on reçoit sur les P antennes des vecteurs de réception que l'on répartit par colonnes dans une matrice de réception, les P symboles d'un vecteur de réception étant répartis sur les P antennes. Ensuite, le procédé met en œuvre un traitement de la matrice de réception, comprenant une étape de multiplication par une matrice de déprécodage linéaire représentative d'une matrice de précodage linéaire utilisée à l'émission, de façon à obtenir une matrice déprécodée permettant d'extraire une estimation des symboles source émis.

On notera que, pour une réception optimale, le nombre P d'antennes en réception est supérieur ou égal au nombre M d'antennes en émission.

Par « déprécodage », on entend ici, et dans toute la suite du document, une opération sensiblement inverse de l'opération de précodage réalisée à l'émission.

5 Dans un premier mode de réalisation, la matrice de déprécodage est la matrice transposée conjuguée de la matrice de précodage.

Dans ce cas, le signal émis étant véhiculé entre les M antennes d'émission et les P antennes de réception par un canal de transmission, on multiplie, lors du traitement, la matrice de réception par une matrice représentative de l'inverse du canal de transmission, de façon à obtenir une matrice de symboles émis estimés. On multiplie ensuite la matrice de symboles émis estimés par la matrice de déprécodage.

15 En effet, la mise en œuvre d'un système MIMO, comprenant une pluralité d'antennes d'émission et une pluralité d'antennes de réception, induit l'existence de différentes voies antennes d'émission/antennes de réception sur lesquelles peuvent être transmises les informations utiles, ces différentes voies pouvant être schématisées par une matrice de canal.

20 En réception, il faut inverser le codage canal estimé sur les différentes voies, pour retrouver les symboles émis. En émettant l'hypothèse que le canal est parfaitement connu du récepteur, il suffit de faire une inversion de la matrice de canal.

Le procédé de réception comprend en particulier une étape préliminaire de détection des M antennes d'émission mettant en œuvre un algorithme à annulation successive.

25 Dans un second mode de réalisation, le signal émis étant véhiculé entre les M antennes d'émission et les P antennes de réception par un canal de transmission, la matrice de déprécodage est une matrice inverse d'une matrice globale associant la matrice du canal et la matrice de précodage linéaire.

30 Dans ce mode de réalisation, le procédé de réception met en œuvre un décodage avec ordonnancement, qui permet de décoder prioritairement les canaux

de meilleur rapport signal à bruit.

Dans ce cas, la matrice de déprécodage est déterminée par mise en œuvre d'un algorithme de décomposition de Cholesky, ce qui permet d'obtenir une méthode de décodage peu coûteuse en calculs et moins complexe que les techniques de l'art antérieur.

Les techniques de type Maximum de Vraisemblance sont bien connues et satisfaisantes, mais complexes.

Pour le décodage de systèmes MIMO, l'utilisation d'une décomposition de Cholesky avec un critère de minimisation de l'erreur quadratique moyenne (ou « MMSE » de l'anglais « Minimum Mean Square Error ») est totalement nouvelle et permet de résoudre cet inconvénient de complexité inhérent aux techniques de l'art antérieur.

Une alternative à la décomposition de Cholesky serait d'utiliser une décomposition QR avec le critère ZF. Cette technique est également peu complexe, mais elle présente de moins bons résultats.

Selon une variante de l'invention, la matrice de déprécodage étant une matrice par blocs, le procédé de réception met en œuvre une minimisation de la distance par changement de symbole dans un bloc. Ceci améliore encore le décodeur de l'invention.

L'invention concerne aussi un signal formé de vecteurs émis successivement sur M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2, les M symboles de chaque vecteur étant distribués sur les M antennes. Selon l'invention, les vecteurs sont des vecteurs précodés correspondant à des colonnes d'une matrice précodée obtenue par produit matriciel d'une matrice de précodage linéaire et d'une matrice source, formée de vecteurs source comprenant chacun N symboles source à émettre, les vecteurs source étant organisés dans ladite matrice source en lignes successives.

L'invention concerne également un dispositif d'émission d'un signal formé de vecteurs comprenant chacun N symboles source à émettre, et mettant en œuvre M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2, pour un procédé

d'émission tel que décrit précédemment.

L'invention concerne encore un dispositif de réception d'un signal émis sur M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2, le dispositif comprenant P antennes de réception, où P est supérieur ou égal à 2, pour un procédé de
5 réception tel que décrit précédemment.

6. Liste des figures

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante d'un mode de réalisation préférentiel, donné à titre de simple exemple illustratif et non limitatif, et des
10 dessins annexés, parmi lesquels :

- la figure 1 illustre un système à 4 antennes d'émission mettant en œuvre une matrice source X et une matrice de précodage Θ selon l'invention ;
- la figure 2A présente un système à 4 antennes de réception d'un signal émis selon le système de la figure 1, selon un premier mode de réalisation
15 de l'invention, dit « sans ordonnancement » ;
- la figure 2B présente un système à 4 antennes de réception d'un signal émis selon le système de la figure 1, selon un second mode de réalisation de l'invention, dit « avec ordonnancement » ;
- la figure 3 décrit les performances comparées des différents systèmes sans
20 précodage linéaire de l'art antérieur et avec un précodage linéaire selon l'invention, pour une matrice de précodage de taille 4 et une matrice de précodage de taille 256.

7. Description d'un mode de réalisation de l'invention

Le principe général de l'invention repose sur un nouveau système de
25 précodage linéaire à l'émission pour un système multi-antennes. Une matrice source, formée des vecteurs à émettre rangés en lignes successives, est multipliée par une matrice de précodage, de taille supérieure ou égale au nombre d'antennes à l'émission, pour former une matrice précodée. Chacun des symboles composant une même colonne de la matrice précodée est alors émis simultanément sur

chacune des antennes d'émission, chaque antenne émettant un symbole différent de la colonne de la matrice précodée.

On présente, en relation avec la figure 1, un système à 4 antennes d'émission mettant en œuvre une matrice source X et une matrice de précodage Θ selon l'invention.

Par souci de simplification, on se limite ici, et dans toute la suite du document, à décrire le cas particulier d'une matrice source X et d'une matrice de précodage Θ carrées.

L'Homme du Métier étendra sans difficulté cet enseignement à tous types de matrices X et Θ , étant entendu que le nombre de colonnes de X doit être égal au nombre de lignes de Θ , et que X doit compter M lignes, où M est le nombre d'antennes d'émission.

La matrice source X, qui comporte les informations à transmettre est formée de 4 vecteurs X_1, X_2, X_3, X_4 , formant les lignes de la matrice X.

Chaque vecteur X_i , pour $i=1$ à 4, est formé de 4 symboles : $X_1=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$, $X_2=[x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]$, $X_3=[x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12}]$, $X_4=[x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16}]$.

Le nombre total de symboles à émettre est donc de 16, ce qui correspond au nombre d'antennes d'émission M multiplié par le nombre L de lignes de la matrice de précodage Θ .

La matrice de précodage Θ est de taille 4x4. C'est une matrice par blocs. Selon un mode de réalisation particulier, la matrice de précodage Θ est la

$$\text{suivante : } \Theta_L = \sqrt{\frac{2}{L}} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_{L/2} & \Theta_{L/2} \\ \Theta_{L/2} & -\Theta_{L/2} \end{bmatrix}^T$$

$$\text{avec } \Theta_2 = \begin{bmatrix} e^{i\theta_1} \cos \eta & e^{i\theta_2} \sin \eta \\ -e^{-i\theta_2} \sin \eta & e^{-i\theta_1} \cos \eta \end{bmatrix}$$

et $\eta = \frac{\pi}{4} + k \frac{\pi}{2}$, $\theta_2 = \theta_1 - \frac{\pi}{2}$, et pour $i \in [1,2]$, $\theta_i = \frac{\pi}{4} + k' \frac{\pi}{2}$ où k, k' sont des

entiers relatifs.

Après multiplication de la matrice source X par la matrice de précodage Θ , une matrice précodée S est obtenue ($S=X \cdot \Theta$).

La matrice S, de taille 4x4, est composée de 4 vecteurs S_i ($i=1$ à 4) :

$$S_1=[s_1 s_5 s_9 s_{13}], S_2=[s_2 s_6 s_{10} s_{14}], S_3=[s_3 s_7 s_{11} s_{15}], S_4=[s_4 s_8 s_{12} s_{16}].$$

Ces vecteurs S_i , encore appelés vecteurs précodés, correspondent à la multiplication de la matrice source X par une même colonne de la matrice de précodage Θ . Ainsi S_1 correspond au vecteur obtenu par la multiplication de la matrice source X par la première colonne de la matrice de précodage Θ , S_2 correspond au vecteur obtenu par la multiplication de la matrice source X par la deuxième colonne de la matrice de précodage Θ , et ainsi de suite pour les 4 colonnes de la matrice Θ .

A un instant donné, chacune des 4 antennes d'émission 10, 11, 12 et 13 émet alors un des symboles du même vecteur précodé S_i dans la même salve d'envoi.

Ainsi, la première antenne 10 émet à un instant T_0 le symbole s_1 du vecteur S_1 . Sensiblement au même instant T_0 , la deuxième antenne 11 émet le symbole s_5 du vecteur S_1 , la troisième antenne 12 émet le symbole s_9 du vecteur S_1 et la quatrième antenne 13 émet le symbole s_{13} du vecteur S_1 .

Les autres vecteurs précodés S_2 , S_3 et S_4 sont respectivement émis dans trois salves d'envoi correspondant aux temps T_1 , T_2 et T_3 .

Chacun des symboles d'un même vecteur précodé correspondant à la multiplication d'une matrice source X par une même colonne d'une matrice de précodage Θ est alors émis sur chacune des antennes d'émission, chaque antenne émettant un symbole différent du vecteur précodé.

Autrement dit, si on considère que la matrice S est formée de 4 vecteurs S_1' , S_2' , S_3' , S_4' organisés en lignes successives, c'est-à-dire $S_1'=[s_1 s_2 s_3 s_4]$, $S_2'=[s_5 s_6 s_7 s_8]$, $S_3'=[s_9 s_{10} s_{11} s_{12}]$, $S_4'=[s_{13} s_{14} s_{15} s_{16}]$, alors :

- 25 - les premiers symboles de chaque vecteur S_i' (pour $i=1$ à 4) sont envoyés sur les différentes antennes d'émission simultanément, s_1 sur la première antenne et s_{13} sur la dernière antenne ;
- les deuxièmes symboles de chaque vecteur S_i' sont envoyés sur les différentes antennes d'émission simultanément, s_2 sur la première antenne et s_{14} sur la dernière antenne ;

- cette opération est répétée jusqu'aux derniers symboles de chaque vecteur S_i' .

Finalement, le système transmet d'abord $[s_1 s_5 s_9 s_{13}]$ à un instant T_0 , puis $[s_2 s_6 s_{10} s_{14}]$ à T_1 , puis $[s_3 s_7 s_{11} s_{15}]$ à T_2 , et finalement $[s_4 s_8 s_{12} s_{16}]$ à T_3 .

5 On présente en relation avec les figures 2A et 2B un système à 4 antennes de réception.

Après transmission dans le canal MIMO, les signaux reçus sont constitués de vecteurs R_i (pour $i=1$ à 4) organisés en colonnes successives dans une matrice de réception R , où $R_1 = [r_1 r_5 r_9 r_{13}]$, $R_2 = [r_2 r_6 r_{10} r_{14}]$, $R_3 = [r_3 r_7 r_{11} r_{15}]$, $R_4 = [r_4 r_8 r_{12} r_{16}]$.

Ainsi la matrice de réception R est formée des symboles $[r_1 r_5 r_9 r_{13}]$ reçus sensiblement au même instant T_0' , en fonction des longueurs des trajets sur chacune des voies antennes d'émission/antennes de réception, sur les 4 antennes de réception (r_1 sur la première antenne 20, r_5 sur la deuxième antenne 21, r_9 sur la troisième antenne 22 et r_{13} sur la quatrième antenne 23), des symboles $[r_2 r_6 r_{10} r_{14}]$ reçus sensiblement au même instant T_1' sur les 4 antennes de réception comme décrit précédemment, ainsi que des symboles $[r_3 r_7 r_{11} r_{15}]$ et $[r_4 r_8 r_{12} r_{16}]$ reçus aux temps T_2' et T_3' .

Selon un premier mode de réalisation illustré en figure 2A, on procède selon une technique dite « sans ordonnancement » (de l'anglais « ordering »). On commence tout d'abord par inverser le codage canal estimé sur les différentes voies antennes d'émission / antennes de réception, de façon à retrouver les symboles émis estimés.

Ainsi un algorithme à annulation successive est mis en œuvre pour détecter les différentes antennes d'émission.

Cet algorithme est le suivant :

$$\begin{aligned}
 r &= sH \\
 R_r &= HH^H + \sigma^2 I \\
 a &= rH^H \\
 b &= R_r^{-1} a = \frac{sHH^H}{HH^H + \sigma^2 I}
 \end{aligned}$$

avec :

- r correspond aux symboles reçus sur les P antennes de réception, soit à la matrice de réception R ;
- H est le canal de taille $(M \times P)$;
- σ^2 le rapport signal sur bruit moyen des antennes de réception ;
- 5 - R_r la matrice d'autocorrélation ;
- a correspond à différents vecteurs de taille M selon l'équation décrite ci-dessus ;
- b correspond d'abord aux estimées des différents vecteurs de symboles émis $[s_1 s_5 s_9 s_{13}]$, puis aux estimées des symboles émis $[s_2$
10 $s_6 s_{10} s_{14}]$, ensuite aux estimées des symboles émis $[s_3 s_7 s_{11} s_{15}]$, et finalement aux estimées des symboles émis $[s_4 s_8 s_{12} s_{16}]$,
- l'exposant H signifie transposée conjuguée.

Cet algorithme s'apparente à un décodage V-BLAST comme décrit dans "Improving BLAST Performance using Space-Time Block Codes and Turbo
15 Decoding", Globecom 2000, November 2000 (Baro, Bauch, Pavlic et Semmler) au sens de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE) permettant de retrouver les estimées \hat{S}_i des vecteurs S_i émis, pour i allant de 1 à 4.

Il revient à multiplier la matrice de réception R par une matrice représentative de l'inverse du canal de transmission.

20 Les vecteurs reçus sont ensuite réordonnés de manière à retrouver les estimées des vecteurs émis S_1, S_2, S_3, S_4 ou encore S_1', S_2', S_3', S_4' , ces vecteurs estimés étant nommés $\hat{S}_1 = [\hat{s}_1 \hat{s}_2 \hat{s}_3 \hat{s}_4]$, $\hat{S}_2 = [\hat{s}_5 \hat{s}_6 \hat{s}_7 \hat{s}_8]$, $\hat{S}_3 = [\hat{s}_9 \hat{s}_{10} \hat{s}_{11} \hat{s}_{12}]$ et $\hat{S}_4 = [\hat{s}_{13} \hat{s}_{14} \hat{s}_{15} \hat{s}_{16}]$ et étant organisés en lignes successives dans une matrice appelée matrice de symboles estimés.

25 Le récepteur multiplie alors la matrice de symboles estimés obtenue \hat{S} par une matrice de déprécodage, cette matrice de déprécodage correspondant à la transposée conjuguée de la matrice de précodage Θ utilisée à l'émission (notée Θ^H en figure 2A), pour former une matrice déprécodée \hat{X} permettant d'extraire une estimation des symboles source émis.

La matrice de précodage Θ étant unitaire, la multiplication de la matrice de symboles estimés obtenue \hat{S} par la matrice de précodage transposée et conjuguée Θ^H revient à la multiplication de la matrice \hat{S} par la matrice Θ^{-1} inverse de la matrice de précodage Θ : $\hat{X} = \hat{S}\Theta^H = \hat{S}\Theta^{-1}$.

5 L'étape de déprécodage $\Theta^H = \Theta^{-1}$ est donc effectuée au niveau de chaque itération V-BLAST.

Selon un deuxième mode de réalisation illustré en figure 2B, l'inversion du codage canal et l'opération de déprécodage sont effectuées conjointement, en mettant en œuvre un algorithme de décomposition Cholesky, un tel algorithme
10 étant notamment décrit dans "Modified Decorrelating Decision-Feedback Detection of BLAST Space-Time System" (ICC 2002 ,Vol. 1, pp. 335-339, Apr-May 2002) de Wei Zha et Steven D. Blostein. Cette technique est dite « avec ordonnancement ».

Dans ce mode de réalisation, le récepteur multiplie la matrice de réception
15 R formée des vecteurs $R_1=[r_1 r_5 r_9 r_{13}]$, $R_2=[r_2 r_6 r_{10} r_{14}]$, $R_3=[r_3 r_7 r_{11} r_{15}]$, $R_4=[r_4 r_8 r_{12} r_{16}]$ organisés en colonnes successives, par l'inverse d'une matrice globale G , la matrice G correspondant à l'association de la matrice de canal et de la matrice de précodage Θ .

L'inverse de la matrice globale G , encore appelée matrice de déprécodage,
20 est effectuée en mettant en œuvre une décomposition de Cholesky, à l'intérieur de laquelle une opération d'ordonnancement est réalisée.

L'opération d'ordonnancement permet de prendre une décision d'abord sur le symbole ayant la plus forte puissance de la matrice globale G . Les symboles sont ainsi traités dans un ordre de puissance décroissant.

25 L'algorithme de Cholesky avec ordonnancement est le suivant :

$$R = X\Theta H$$

$$R_r = P_p(\Theta H H^H \Theta^H + \sigma^2 I) P_p^H$$

$$R_r = L L^H$$

$$R_r^{-1} = (L^H)^{-1} L^{-1}$$

30 $x = R H^H \Theta^H P_p^H$

$$y = x(L^H)^{-1}$$

$$z = P_p y L^{-1} = \frac{P_p X \Theta H H^H \Theta^H P_p^H}{P_p (\Theta H H^H \Theta^H + \sigma^2 I) P_p^H}$$

avec :

- 5 - r correspond aux symboles reçus sur les P antennes de réception, soit à la matrice de réception R ;
- X correspond à la matrice source émise ;
- Θ est la matrice de précodage de taille 4×4 ;
- H la matrice de canal de taille 4×4 ;
- σ^2 le rapport signal sur bruit moyen des antennes de réception ;
- 10 - R_r la matrice d'autocorrélation ;
- L la matrice triangulaire inférieure de la matrice d'autocorrélation R_r ;
- P_p la matrice de permutation selon un critère de maximum de puissance du symbole voulu sur l'interférence de cette matrice d'autocorrélation ;
- 15 - x et y sont des vecteurs de taille 16 (le nombre d'antennes d'émission multiplié par le nombre de lignes de la matrice de précodage Θ).

20 A la réception, l'algorithme de décomposition de Cholesky permet au récepteur d'obtenir directement un vecteur z de taille 16 (nombre d'antennes d'émission multiplié par le nombre de lignes de la matrice de précodage Θ) correspondant à l'estimation des symboles émis de la matrice source X dans une matrice déprécodée \hat{X} .

25 La décomposition de Cholesky est une décomposition très stable numériquement.

Dans ce mode de réalisation, l'avantage du précodage est de décorréler les canaux s'ils sont corrélés.

La matrice de déprécodage étant une matrice par blocs, le système de réception peut encore être amélioré en utilisant une technique de minimisation de la distance par changement de symbole dans un bloc.

On présente désormais, en relation avec la figure 3, les performances
5 obtenues, selon l'invention, en utilisant une matrice de précodage de taille 4x4 et une matrice de précodage de taille 256x256.

Plus précisément, la figure 3 illustre les performances de l'invention selon le premier mode de réalisation sans ordonnancement, c'est-à-dire lorsque la matrice de déprécodage correspond à la transposée conjuguée de la matrice de
10 précodage, des systèmes utilisant un précodage linéaire selon l'invention étant comparés à un système sans précodage de l'art antérieur.

On peut observer un gain de 16.0 dB entre la courbe de référence, qui correspond à un système sans précodage, et la courbe avec précodage 256, qui correspond à un système utilisant une matrice de précodage de taille 256x256,
15 lorsque le taux d'erreur binaire (TEB) est de 10^{-4} , avec une efficacité spectrale de 8 bps/Hz, lorsqu'on utilise en réception des égaliseurs de type MMSE.

Ainsi l'invention améliore les performances à fort rapport signal à bruit, tout en conservant une complexité en $O(L^3)$, où L est la taille de la matrice de précodage, ou encore le nombre de lignes de la matrice de précodage si celle-ci
20 n'est pas carrée.

L'approche de Ma et Giannakis ("Full-Diversity Full-Rate Complex-Field Space-Time Coding", IEEE Transactions on Signal Processing 2003) de l'art antérieur, qui utilise également des matrices de précodage, ne permet pas quant à elle d'avoir une matrice de précodage de taille 256, car la méthode serait beaucoup
25 trop coûteuse en calcul. En effet, la complexité de cette approche est un facteur exponentiel en $O(M^L)$, où M correspond à la taille de la modulation.

Les performances de l'invention sont encore améliorées lorsque le second mode de réalisation avec ordonnancement est mis en œuvre en réception.

En effet, lorsque ce mode de réalisation avec ordonnancement est mis en
30 œuvre, on obtient avec une matrice de précodage de taille 4x4 des résultats

sensiblement identiques à ceux obtenus avec une matrice de précodage de taille 256 dans le mode de réalisation sans ordonnancement, c'est-à-dire un gain proche de 16.0 dB par rapport à une courbe de référence, qui correspond à un système sans précodage, lorsque le taux d'erreur binaire (TEB) est de 10^{-4} , avec une
5 efficacité spectrale de 8 bps/Hz.

Les performances du système s'améliorant lorsque la taille de la matrice de précodage augmente, on obtient de très bons résultats pour un système avec ordonnancement et une matrice de précodage de taille 256x256.

Ainsi, l'invention proposée permet un décodage moins complexe et moins
10 coûteux que les techniques de l'art antérieur, tout en présentant des performances améliorées.

Par ailleurs, la technique de l'invention est aussi bien adaptée pour les systèmes à modulations de type monoporteuse que pour les systèmes à modulations de type multi-porteuses (OFDM ou MC-CDMA par exemple).

15 Elle peut s'appliquer à tout système multi-antennes privilégiant l'exploitation de la capacité, et ce, même si les canaux multi-antennes sont corrélés.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'émission d'un signal formé de vecteurs comprenant chacun N symboles source à émettre, et mettant en œuvre M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2,
- 5 caractérisé en ce qu'on réalise un précodage linéaire dudit signal, mettant en œuvre un produit matriciel d'une matrice source, formée desdits vecteurs organisés en lignes successives, par une matrice de précodage linéaire, délivrant une matrice précodée,
- et en ce qu'on émet successivement des vecteurs précodés correspondant à des colonnes de ladite matrice précodée, les M symboles de chaque vecteur précodé étant distribués sur lesdites M antennes.
- 10 2. Procédé d'émission selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite matrice de précodage est une matrice par blocs.
3. Procédé d'émission selon l'une quelconque des revendications 1 et 2,
- 15 caractérisé en ce que ladite matrice de précodage est une matrice unitaire de taille supérieure ou égale à M.
4. Procédé d'émission selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que ladite matrice de précodage est de la forme :

$$\Theta_L = \sqrt{\frac{2}{L}} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_{L/2} & \Theta_{L/2} \\ \Theta_{L/2} & -\Theta_{L/2} \end{bmatrix}^T$$

20 avec $\Theta_2 = \begin{bmatrix} e^{i\theta_1} \cos \eta & e^{i\theta_2} \sin \eta \\ -e^{-i\theta_2} \sin \eta & e^{-i\theta_1} \cos \eta \end{bmatrix}$

et $\eta = \frac{\pi}{4} + k \frac{\pi}{2}$, $\theta_2 = \theta_1 - \frac{\pi}{2}$, et pour $i \in [1, 2]$, $\theta_i = \frac{\pi}{4} + k' \frac{\pi}{2}$ où k, k' sont des entiers relatifs.

5. Procédé de réception d'un signal émis sur M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2, ledit procédé mettant en œuvre P antennes de réception, où
- 25 P est supérieur ou égal à 2,
- caractérisé en ce qu'on reçoit sur lesdites P antennes des vecteurs de réception que l'on répartit par colonnes dans une matrice de réception, les P symboles d'un vecteur de réception étant répartis sur lesdites P antennes,

- en ce qu'il met en œuvre un traitement de ladite matrice de réception comprenant une étape de multiplication par une matrice de déprécodage linéaire représentative d'une matrice de précodage linéaire utilisée à l'émission,
de façon à obtenir une matrice déprécodée permettant d'extraire une estimation
5 des symboles source émis.
6. Procédé de réception selon la revendication 5, caractérisé en ce que ladite matrice de déprécodage est la matrice transposée conjuguée de ladite matrice de précodage.
7. Procédé de réception selon la revendication 6, caractérisé en ce que, ledit
10 signal émis étant véhiculé entre lesdites M antennes d'émission et lesdites P antennes de réception par un canal de transmission, on multiplie, lors dudit traitement, ladite matrice de réception par une matrice représentative de l'inverse dudit canal de transmission, de façon à obtenir une matrice de symboles émis estimés,
15 et en ce qu'on multiplie ensuite ladite matrice de symboles émis estimés par ladite matrice de déprécodage.
8. Procédé de réception selon l'une quelconque des revendications 6 et 7, caractérisé en ce qu'il comprend une étape préliminaire de détection desdites M antennes d'émission mettant en œuvre un algorithme à annulation successive.
- 20 9. Procédé de réception selon la revendication 5, caractérisé en ce que, ledit signal émis étant véhiculé entre lesdites M antennes d'émission et lesdites P antennes de réception par un canal de transmission, ladite matrice de déprécodage est une matrice inverse d'une matrice globale associant la matrice dudit canal et ladite matrice de précodage linéaire.
- 25 10. Procédé de réception selon la revendication 9, caractérisé en ce que ladite matrice de déprécodage est déterminée par mise en œuvre d'un algorithme de décomposition de Cholesky.
11. Signal formé de vecteurs émis successivement sur M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2, les M symboles de chaque vecteur étant distribués
30 sur lesdites M antennes,

caractérisé en ce que lesdits vecteurs sont des vecteurs précodés correspondant à des colonnes d'une matrice précodée obtenue par produit matriciel d'une matrice de précodage linéaire et d'une matrice source, formée de vecteurs source comprenant chacun N symboles source à émettre, lesdits vecteurs source étant
5 organisés dans ladite matrice source en lignes successives.

12. Dispositif d'émission d'un signal formé de vecteurs comprenant chacun N symboles source à émettre, et mettant en œuvre M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2,
caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de précodage linéaire dudit signal,
10 mettant en œuvre un produit matriciel d'une matrice source, formée desdits vecteurs organisés en lignes successives, par une matrice de précodage linéaire, délivrant une matrice précodée,
et des moyens d'émission successive des vecteurs précodés correspondant à des colonnes de ladite matrice précodée, les M symboles de chaque vecteur précodé
15 étant distribués sur lesdites M antennes.

13. Dispositif de réception d'un signal émis sur M antennes d'émission, où M est supérieur ou égal à 2, ledit dispositif comprenant P antennes de réception, où P est supérieur ou égal à 2,
caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de réception, sur lesdites P antennes,
20 de vecteurs de réception, et des moyens de répartition par colonnes desdits vecteurs de réception dans une matrice de réception, les P symboles d'un vecteur de réception étant répartis sur lesdites P antennes,
et en ce qu'il comprend des moyens de traitement de ladite matrice de réception comprenant des moyens de multiplication par une matrice de déprécodage linéaire
25 représentative d'une matrice de précodage linéaire utilisée à l'émission,
de façon à obtenir une matrice déprécodée permettant d'extraire une estimation des symboles source émis.

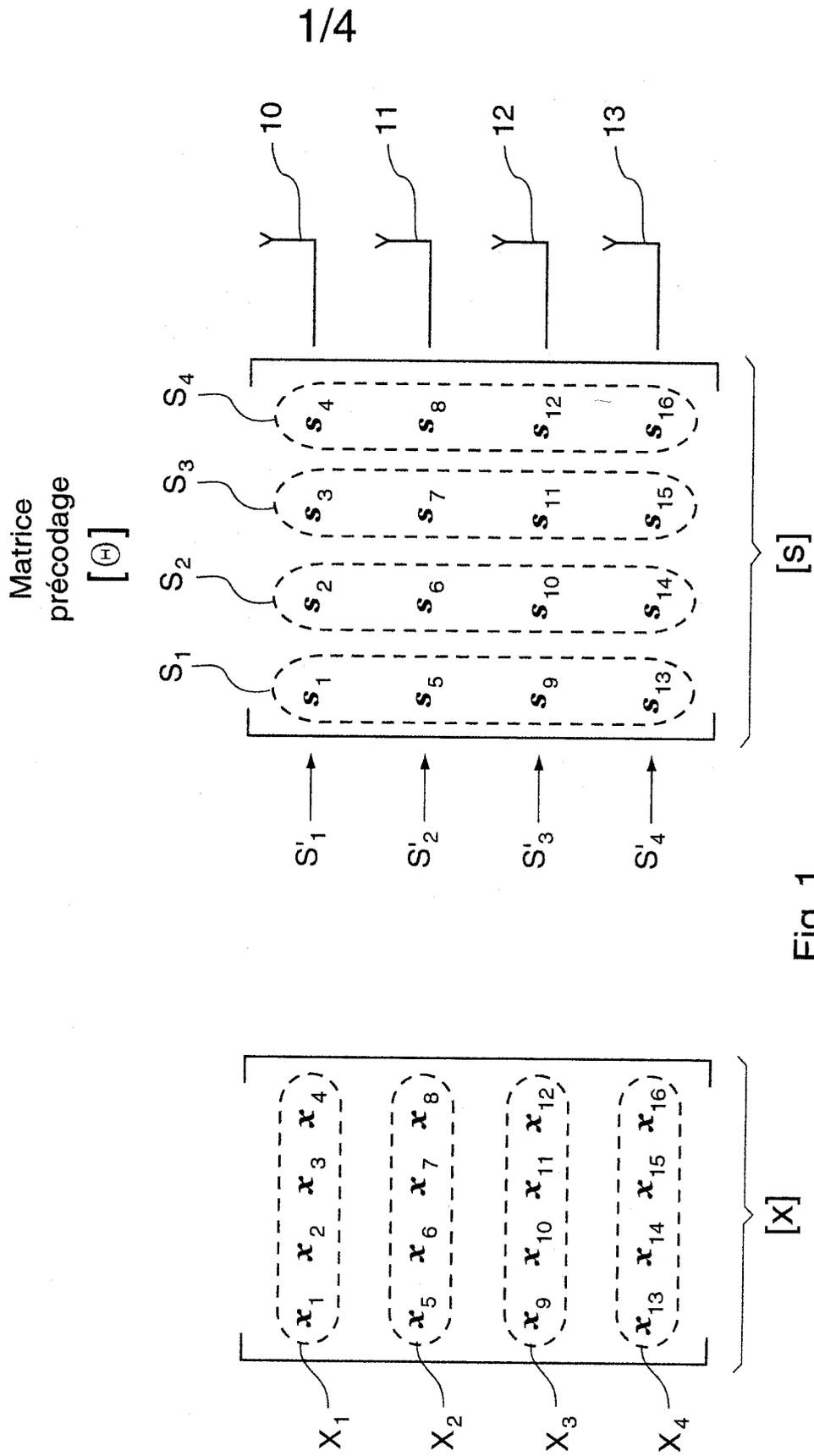


Fig. 1

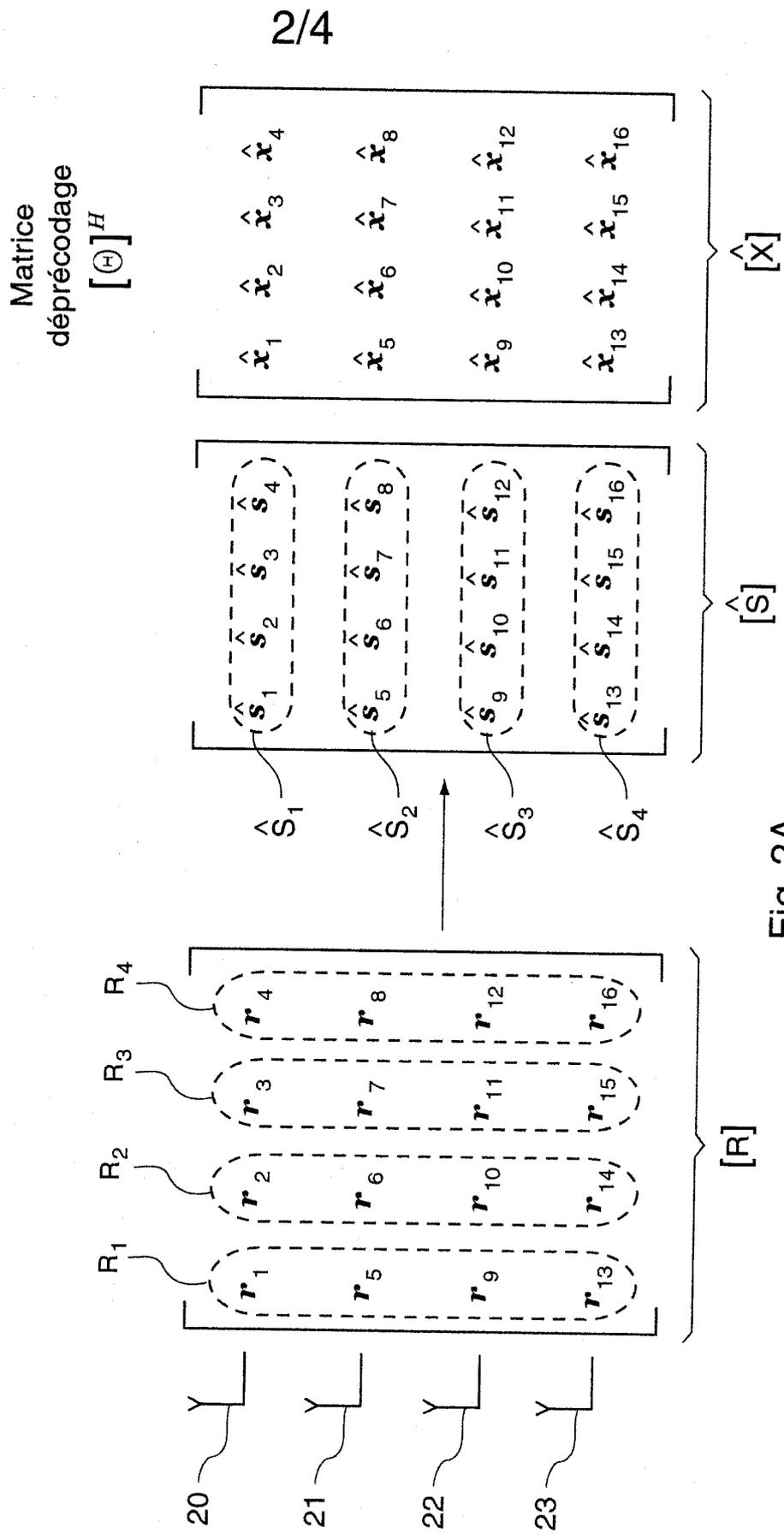


Fig. 2A

3/4

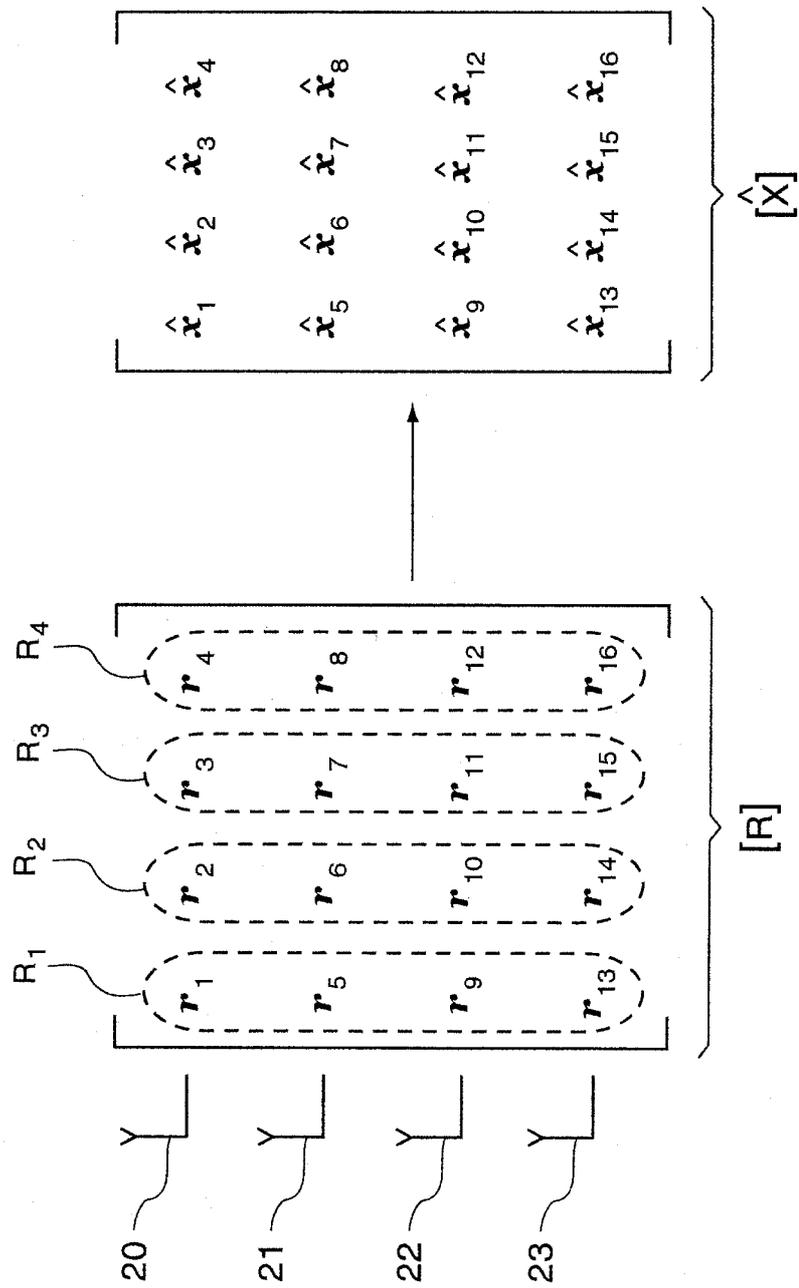


Fig. 2B

4/4

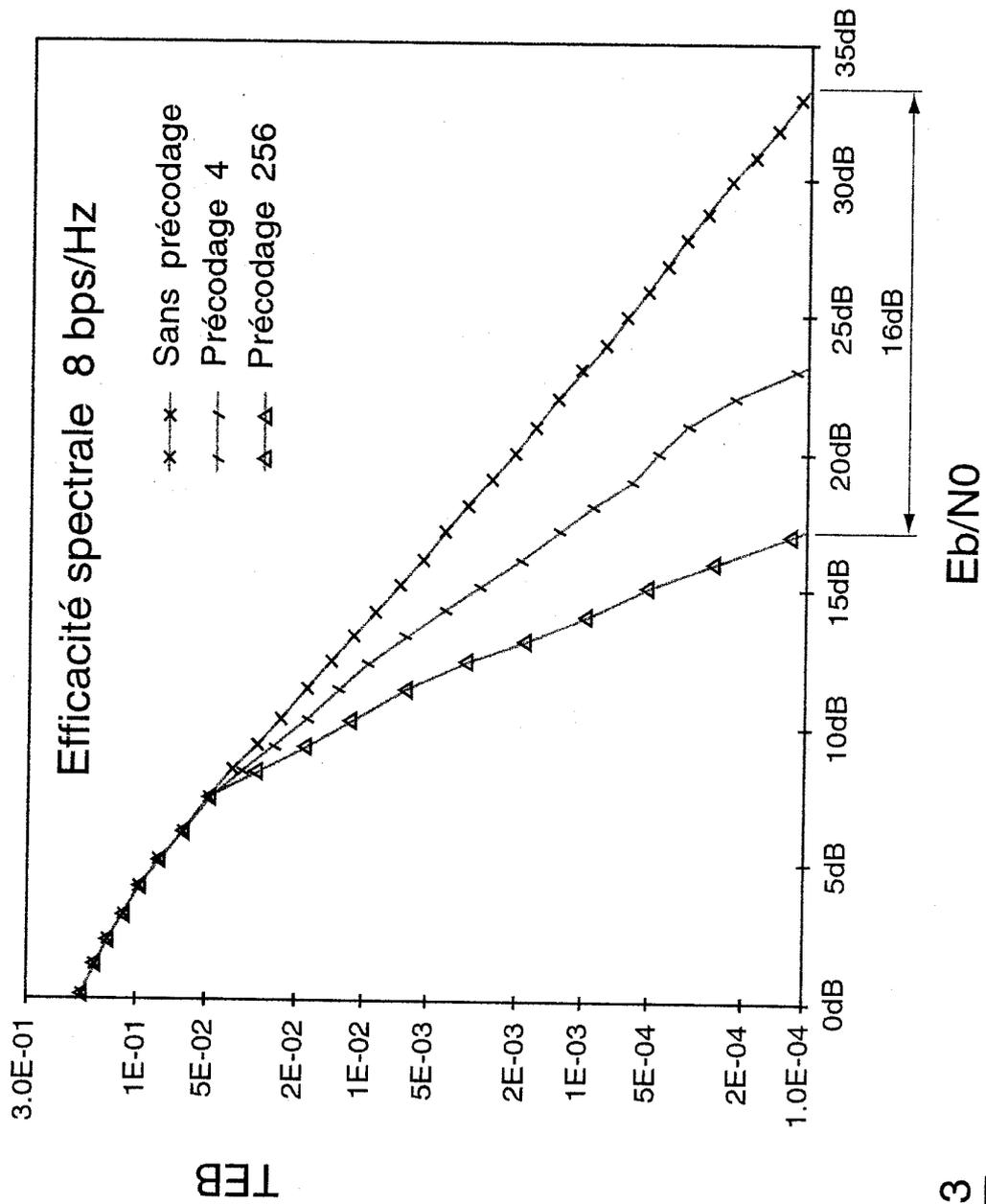


Fig. 3



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 642322
FR 0314272

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	US 2003/185310 A1 (BJERKE BJORN A ET AL) 2 octobre 2003 (2003-10-02) * page 1, alinéas 6,7 * * page 4, alinéa 52 - page 5, alinéa 65 * * figure 2 *	1-13	H04B7/02
Y	----- LE NIR V ET AL: "Reduced-complexity space-time block coding and decoding schemes with block linear precoding" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, vol. 39, no. 14, 10 juillet 2003 (2003-07-10), pages 1066-1068, XP006020635 ISSN: 0013-5194 * le document en entier *	1-13	
A	----- LIU Z ET AL: "Space-time coding for broadband wireless communications" WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING, XX, XX, vol. 1, no. 1, janvier 2001 (2001-01), pages 35-53, XP002210873 * page 41, colonne 2, dernier alinéa - page 44, colonne 2, alinéa 1 *	1-13	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
			H04B H04L
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		16 juillet 2004	Yang, Y
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0314272 FA 642322**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 16-07-2004

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2003185310 A1	02-10-2003	W0 03084092 A2	09-10-2003
