

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① N° de publication : **3 107 152**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **20 01219**

⑤① Int Cl⁸ : **H 04 L 25/03** (2019.12), H 04 B 7/04

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Procédé et dispositif de détermination d'une séquence pilote, procédé d'estimation de canal et programme d'ordinateur associés.

②② Date de dépôt : 07.02.20.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 13.08.21 Bulletin 21/32.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 09.09.22 Bulletin 22/36.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *FONDATION B-COM* Fondation —
FR.

⑦② Inventeur(s) : LE MAGOAROU Luc et PAQUELET
Stéphane.

⑦③ Titulaire(s) : *FONDATION B-COM* Fondation.

⑦④ Mandataire(s) : *JACOBACCI CORALIS HARLE*.

FR 3 107 152 - B1



Description

Titre de l'invention : Procédé et dispositif de détermination d'une séquence pilote, procédé d'estimation de canal et programme d'ordinateur associés

Domaine technique de l'invention

- [0001] La présente invention concerne le domaine technique des télécommunications.
- [0002] La présente invention concerne en particulier un procédé et un dispositif de détermination d'une séquence pilote, ainsi qu'un procédé d'estimation de canal et un programme d'ordinateur associés.

Etat de la technique

- [0003] Afin d'optimiser la transmission de données dans un canal de communication, il est connu de mettre en œuvre au préalable un procédé d'estimation de canal comprenant l'émission de séquences pilotes dans le canal de communication.
- [0004] Par traitement des séquences pilotes reçues, il est possible d'avoir une meilleure connaissance de l'état courant du canal de communication et ainsi par exemple d'adapter la manière dont sont transmises les données afin d'obtenir une transmission optimale.

Présentation de l'invention

- [0005] Afin de remédier à l'inconvénient précité de l'état de la technique, la présente invention propose un procédé de détermination d'une séquence pilote comprenant une pluralité de vecteurs pilotes à émettre dans un canal de communication modélisé par un vecteur modèle comprenant au moins une fonction à valeurs complexes variable en fonction d'une pluralité de paramètres réels et descriptive d'une transmission d'une antenne d'émission à une antenne de réception à travers le canal de communication, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :
- [0006] - détermination d'une base orthogonale d'un R-espace vectoriel image d'une matrice ayant respectivement pour colonnes les dérivées partielles du vecteur modèle par rapport aux différents paramètres réels ;
- [0007] - construction des vecteurs pilotes au moyen de la base orthogonale déterminée, en regroupant les vecteurs orthogonaux de la base orthogonale par paire et en produisant, pour chaque paire comprenant un premier vecteur et un second vecteur, un vecteur pilote par somme du premier vecteur et du produit du second vecteur par un nombre imaginaire.
- [0008] Comme expliqué dans la suite, les vecteurs pilotes ainsi obtenus sont optimaux pour tout estimateur sans biais et peuvent ainsi être avantageusement utilisés pour l'estimation du canal de communication.

- [0009] Dans certains modes de réalisation, le procédé peut comprendre une étape de détermination d'au moins un des éléments de ladite matrice sur la base d'au moins une valeur préalablement déterminée d'un desdits paramètres et représentant l'état courant du canal de communication.
- [0010] Selon le mode de réalisation décrit ci-après, ladite matrice comprend un nombre de lignes égal au nombre d'éléments formant le vecteur modèle, et un nombre de colonnes égal au nombre de paramètres dans la pluralité de paramètres, et tout élément en ligne p et en colonne q dans ladite matrice est égal à la valeur prise, pour des valeurs de paramètres représentant l'état courant du canal de communication, par la dérivée partielle, par rapport au $q^{\text{ème}}$ paramètre de la pluralité de paramètres, de la fonction située en $p^{\text{ème}}$ position dans le vecteur modèle.
- [0011] En pratique, l'étape de détermination de ladite base orthogonale peut comprendre par exemple une étape de factorisation de ladite matrice sous forme du produit d'une matrice R -orthogonale U et d'une matrice triangulaire supérieure à valeurs réelles.
- [0012] L'étape de détermination de ladite base orthogonale peut alors comprendre la construction d'une matrice Q dont les colonnes forment une base de vecteurs propres pour la matrice $-\text{Im}\{U^H U\}^2$, et le calcul du produit (noté par exemple V) de la matrice U et de la matrice Q .
- [0013] La matrice V ainsi obtenue présente alors en colonnes des vecteurs formant la base orthogonale souhaitée.
- [0014] L'étape de détermination de ladite base orthogonale peut comprendre par ailleurs la détermination d'au moins un coefficient égal à la racine carrée d'une valeur propre de la matrice $-\text{Im}\{U^H U\}^2$; l'étape de construction desdits vecteurs pilotes peut alors utiliser ledit coefficient pour produire l'un desdits vecteurs pilotes; ce coefficient est ici utilisé dans le calcul du scalaire (ou nombre réel) à appliquer (par multiplication) à la somme précitée pour obtenir le vecteur pilote concerné.
- [0015] On peut prévoir en outre que l'étape de construction des vecteurs pilotes comprenne, si le nombre de vecteurs orthogonaux dans ladite base orthogonale est impair, la production d'un vecteur pilote colinéaire à un desdits vecteurs orthogonaux.
- [0016] Dans certains modes de réalisation, ladite fonction est non linéaire par rapport à au moins un paramètre parmi lesdits paramètres réels.
- [0017] Dans un exemple de mise en œuvre décrit dans la suite, le vecteur modèle est le produit d'un gain complexe et d'un vecteur de visée variable en fonction d'un angle repérant la position de l'antenne de réception relativement à l'antenne d'émission; dans cet exemple, lesdits paramètres réels sont la partie réelle du gain complexe, la partie imaginaire du gain complexe et ledit angle.
- [0018] On peut prévoir par ailleurs que les différents éléments du vecteur modèle soient différentes fonctions à valeurs complexes variables en fonction de la pluralité de pa-

ramètres réels et descriptives respectivement de transmissions entre des paires distinctes antenne d'émission - antenne de réception.

- [0019] L'invention propose également un procédé d'estimation de canal entre un émetteur et un récepteur, comprenant :
- [0020] - une étape de détermination de vecteurs pilotes conformément au procédé présent ci-dessus ; et
- [0021] - une étape d'émission des vecteurs pilotes déterminés dans le canal de communication.
- [0022] Le récepteur peut alors recevoir les vecteurs pilotes émis et déterminer des données d'état de canal sur la base des vecteurs pilotes reçus.
- [0023] Ces données d'état de canal peuvent ensuite être transmises par le récepteur à l'émetteur ; l'émetteur peut alors effectuer une estimation d'au moins une valeur d'un paramètre du modèle de canal sur la base des données d'état de canal.
- [0024] Des modules de précodage de l'émetteur peuvent être configurés en conséquence, c'est-à-dire en fonction de ladite au moins une valeur estimée du paramètre du modèle de canal.
- [0025] L'invention propose également un dispositif de détermination d'une séquence pilote comprenant une pluralité de vecteurs pilotes à émettre dans un canal de communication modélisé par un vecteur modèle comprenant au moins une fonction à valeurs complexes variable en fonction d'une pluralité de paramètres réels et descriptive d'une transmission d'une antenne d'émission à une antenne de réception à travers le canal de communication, caractérisé en ce qu'il est programmé pour :
- [0026] - déterminer une base orthogonale d'un R-espace vectoriel image d'une matrice ayant respectivement pour colonnes les dérivées partielles du vecteur modèle par rapport aux différents paramètres réels ;
- [0027] - construire les vecteurs pilotes au moyen de la base orthogonale déterminée, en regroupant les vecteurs orthogonaux de la base orthogonale par paire et en produisant, pour chaque paire comprenant un premier vecteur et un second vecteur, un vecteur pilote par somme du premier vecteur et du produit du second vecteur par un nombre imaginaire.
- [0028] L'invention propose enfin un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour la mise en œuvre d'un procédé de détermination de séquence pilote et/ou d'estimation de canal tel que proposé ci-dessus lorsque ces instructions sont exécutées par un processeur.
- [0029] Bien entendu, les différentes caractéristiques, variantes et formes de réalisation de l'invention peuvent être associées les unes avec les autres selon diverses combinaisons dans la mesure où elles ne sont pas incompatibles ou exclusives les unes des autres.

Description détaillée de l'invention

- [0030] De plus, diverses autres caractéristiques de l'invention ressortent de la description annexée effectuée en référence aux dessins qui illustrent des formes, non limitatives, de réalisation de l'invention et où :
- [0031] [fig.1] représente un contexte possible de mise en œuvre de l'invention ;
- [0032] [fig.2] est un logigramme montrant les étapes principales d'un exemple de procédé conforme à l'invention ;
- [0033] [fig.3] représente un contexte particulier dans lequel peut être mise en œuvre l'invention ; et
- [0034] [fig.4] est un logigramme montrant les étapes principales d'un exemple de procédé mis en œuvre dans le contexte de la figure 3.
- [0035] La figure 1 représente un système de télécommunications comprenant un ensemble de N_t antennes d'émission T_1, \dots, T_{N_t} et un ensemble de N_r antennes de réception R_1, \dots, R_{N_r} .
- [0036] Chacune des antennes d'émission T_1, \dots, T_{N_t} transmet des signaux électromagnétiques (représentant généralement des données à transmettre, codées par des symboles) dans un canal de communication C , où ces signaux sont reçus par les différentes antennes de réception R_1, \dots, R_{N_r} .
- [0037] Cette situation correspond notamment au cas des systèmes dits "*MIMO*" (pour "*Multiple-Input Multiple-Output*") qui comprennent une pluralité d'antennes d'émission T_1, \dots, T_{N_t} et une pluralité d'antennes de réception R_1, \dots, R_{N_r} .
- [0038] Dans certaines applications, les différentes antennes (que ce soit en émission ou en réception) sont reliées à un même dispositif électronique.
- [0039] Dans d'autres applications en revanche, les antennes de l'un des ensembles d'antennes correspondent respectivement à différents dispositifs électroniques, c'est-à-dire à différents utilisateurs : c'est le cas par exemple des systèmes MU-MIMO (pour "*Multi User – Multiple-Input Multiple-Output*").
- [0040] On se place ici dans le cas où les antennes d'émission T_1, \dots, T_{N_t} sont reliés à une unité de commande U équipée notamment d'un processeur P et d'une mémoire M .
- [0041] Le canal de communication C est modélisé par un vecteur modèle \mathbf{h} comprenant N_d éléments, chaque élément étant une fonction $h_{i,j,k}$ à valeurs complexes ayant N_p paramètres réels et descriptive de la transmission de la $j^{\text{ème}}$ antenne d'émission T_j à la $i^{\text{ème}}$ antenne de réception R_i sur la $k^{\text{ème}}$ sous-porteuse (le système utilisant N_f sous-porteuses). On a donc : $N_d = N_t.N_r.N_f$.
- [0042] On note $\theta_1, \dots, \theta_{N_p}$ les N_p paramètres réels et $\boldsymbol{\theta}$ le N_p -uplet formés de ces paramètres réels.
- [0043] On considère ici que le vecteur modèle \mathbf{h} est différentiable par rapport à ses N_p pa-

ramètres (c'est-à-dire que chacune des fonctions $h_{i,j,k}$ est différentiable par rapport aux Np paramètres).

[0044] On peut ainsi définir une matrice $\Delta(\boldsymbol{\theta})$ (*a priori* variable en fonction des paramètres $\boldsymbol{\theta}$) comme suit :

[0045] [Math.1]

$$\Delta(\boldsymbol{\theta}) = \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \theta_1}(\boldsymbol{\theta}), \dots, \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \theta_{Np}}(\boldsymbol{\theta}) \right)$$

[0046] Autrement dit, dans cette matrice $\Delta(\boldsymbol{\theta})$, un élément $\Delta(\boldsymbol{\theta})_{p,q}$ en ligne p et en colonne q est égal à la valeur prise, pour les valeurs de paramètres $\boldsymbol{\theta}$ représentant l'état courant du canal de communication C , par la dérivée partielle, par rapport au $q^{\text{ème}}$ paramètre θ_q de la pluralité de paramètres, de la fonction h_p située en $p^{\text{ème}}$ position dans le vecteur modèle \mathbf{h} .

[0047] On s'intéresse dans la suite au R-espace vectoriel $v_{\boldsymbol{\theta}}$ défini comme suit :

[0048] [Math.2]

$$v_{\boldsymbol{\theta}} = \left\{ \Delta(\boldsymbol{\theta})X, X \in \mathbb{R}^{Np} \right\}$$

[0049] Autrement dit, $v_{\boldsymbol{\theta}}$ est le R-espace vectoriel image de la matrice $\Delta(\boldsymbol{\theta})$.

[0050] On rappelle qu'un R-espace vectoriel est un espace vectoriel sur le corps des nombres réels (c'est-à-dire un espace vectoriel construit au moyen de scalaires à valeurs réelles).

[0051] Par définition, l'espace vectoriel $v_{\boldsymbol{\theta}}$ correspond à l'ensemble des directions de variation potentielles du modèle du canal de communication C du fait de variations infinitésimales des valeurs de paramètres $\boldsymbol{\theta}$.

[0052] On décrit à présent en référence à la figure 2 un procédé de détermination et d'émission d'une séquence pilote conforme à l'invention.

[0053] Ce procédé est par exemple mis en œuvre dans le contexte de la figure 1.

[0054] Dans ce contexte, la mémoire M' mémorise des instructions de programme d'ordinateur conçues pour mettre en œuvre le procédé de la figure 2 lorsque ces instructions sont exécutées par le processeur P . Le processeur P met ainsi en œuvre chacune des étapes $E2$ à $E12$ décrites ci-dessous.

[0055] Les différentes valeurs et données manipulées (notamment la matrice $\Delta(\boldsymbol{\theta})$ déjà mentionnée et les autres matrices manipulées au cours du procédé de la figure 2) peuvent par exemple être mémorisées dans la mémoire M' .

[0056] Le procédé de la figure 2 débute par une étape $E2$ de détermination des éléments $\Delta(\boldsymbol{\theta})_{p,q}$ de la matrice $\Delta(\boldsymbol{\theta})$.

[0057] En effet, lorsqu'au moins une des fonctions $h_{i,j,k}$ est non-linéaire par rapport à au moins un des paramètres $\boldsymbol{\theta}$, l'un au moins des éléments de la matrice $\Delta(\boldsymbol{\theta})$ n'est pas

constant, mais variable en fonction des conditions de fonctionnement (c'est-à-dire en fonction des paramètres θ), et doit donc être déterminé en fonction de ces conditions de fonctionnement.

[0058] Ainsi, si une fonction h_p située en $p^{\text{ème}}$ position dans le vecteur modèle \mathbf{h} n'est pas linéaire par rapport au $q^{\text{ème}}$ paramètre réel θ_q , l'élément $\Delta(\theta)_{p,q}$ de la matrice est déterminé à l'étape E2, par exemple sur la base d'une estimation des paramètres θ (ou d'un sous-ensemble des paramètres θ) représentant l'état courant du canal de communication C. Une telle estimation peut être préalablement déterminée en fonction de mesures effectuées dans le canal de communication C et/ou d'échanges antérieurs dans le canal de communication C.

[0059] On détermine au moins dans ce cas l'élément $\Delta(\theta)_{p,q}$ comme suit :

[0060] [Math.3]

$$\Delta(\theta)_{p,q} = \frac{\partial h_p}{\partial \theta_q}(\theta)$$

[0061] Le procédé de la figure 2 se poursuit par une étape E4 de factorisation de matrice $\Delta(\theta)$ sous forme du produit d'une matrice R-orthogonale \mathbf{U} et d'une matrice triangulaire supérieure \mathbf{R} à valeurs réelles, c'est-à-dire la détermination d'une matrice \mathbf{U} à N_d lignes et N_p colonnes et d'une matrice triangulaire supérieure \mathbf{R} à valeurs réelles à N_p lignes et N_p colonnes telles que :

[0062] $\Delta(\theta) = \mathbf{UR}$.

[0063] On rappelle que la matrice \mathbf{U} est R-orthogonale si et seulement si $\text{Re}\{\mathbf{U}^H\mathbf{U}\}$ est une matrice diagonale, où $\text{Re}\{\cdot\}$ est l'opérateur partie réelle et \cdot^H est l'opérateur transposé conjugué.

[0064] Dans l'exemple décrit ici, on utilise une matrice \mathbf{U} R-orthonormale, c'est-à-dire telle que : $\text{Re}\{\mathbf{U}^H\mathbf{U}\} = \mathbf{Id}_{N_p}$, où \mathbf{Id}_{N_p} est la matrice identité à N_p lignes et N_p colonnes.

[0065] Le procédé de la figure 2 comprend alors une étape E6 de construction d'une matrice \mathbf{Q} à valeurs réelles R-orthogonale (ici R-orthonormale) et dont les colonnes forment une base de vecteurs propres pour la matrice $-\text{Im}\{\mathbf{U}^H\mathbf{U}\}^2$.

[0066] Le procédé de la figure 2 se poursuit par une étape E8 de calcul d'une matrice \mathbf{V} égale au produit de la matrice \mathbf{U} et de la matrice \mathbf{Q} : $\mathbf{V} = \mathbf{UQ}$.

[0067] Par construction, les colonnes de la matrice \mathbf{V} forment une base R-orthogonale (ici une base R-orthonormale) de l'espace vectoriel v_θ , au sein de laquelle les vecteurs peuvent être groupés par deux de sorte que deux vecteurs de deux groupes différents sont C-orthogonaux.

[0068] En effet, en utilisant le théorème référencé 8.16 dans l'ouvrage "*Linear Algebra*", de W.H. Greub, Springer Science & Business Media, 1975, vol. 23, la matrice $\text{Im}\{\mathbf{U}^H\mathbf{U}\}$

étant antisymétrique (du fait que $\mathbf{U}^H\mathbf{U}$ est hermitienne), on peut écrire :

[0069] [Math.4]

$$\mathbf{Q}^T \text{Im} \{ \mathbf{U}^H \mathbf{U} \} \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 & -c_1 & & \dots & & \\ c_1 & 0 & & & & \\ & & \ddots & & 0 & -c_k \\ & & & \ddots & c_k & 0 \end{pmatrix} = \mathbf{\Gamma}$$

[0070] où $c_1^2, c_2^2, \dots, c_k^2$ sont les valeurs propres (de multiplicité 2) de la matrice la matrice $-\text{Im}\{\mathbf{U}^H\mathbf{U}\}^2$ (déterminées à l'étape E6 lors de la construction de la matrice \mathbf{Q}) et on a donc :

[0071] $\mathbf{V}^H\mathbf{V} = \mathbf{Q}^T\mathbf{U}^H\mathbf{U}\mathbf{Q} = \mathbf{Id}_{N_p} + j\mathbf{\Gamma}$ (\cdot^T étant l'opérateur transposé).

[0072] Autrement dit, si N_p est pair, en écrivant la matrice \mathbf{V} sous la forme :

[0073] $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{v}_{N_p/2}, \mathbf{w}_{N_p/2})$,

[0074] on a : $\mathbf{v}_m^H\mathbf{v}_n = \delta_{m,n}$, $\mathbf{w}_m^H\mathbf{w}_n = \delta_{m,n}$ et $\mathbf{v}_m^H\mathbf{w}_n = -\delta_{m,n}jc_m$,

[0075] où $\delta_{m,n} = 0$ si $m \neq n$, $\delta_{m,n} = 1$ si $m = n$, et c_m est un coefficient égal à la racine carrée de la même valeur propre de la matrice $-\text{Im}\{\mathbf{U}^H\mathbf{U}\}^2$ (voir ci-dessus à l'étape E6).

[0076] Si N_p est impair, la matrice \mathbf{V} peut s'écrire sous la forme :

[0077] $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{v}_\varepsilon, \mathbf{w}_\varepsilon, \mathbf{v}_{\varepsilon+1})$,

[0078] où ε est la partie entière de $N_p/2$,

[0079] et on a dans ce cas également : $\mathbf{v}_m^H\mathbf{v}_n = \delta_{m,n}$, $\mathbf{w}_m^H\mathbf{w}_n = \delta_{m,n}$ et $\mathbf{v}_m^H\mathbf{w}_n = -\delta_{m,n}jc_m$.

[0080] Pour mémoire, deux vecteurs \mathbf{x} et \mathbf{y} sont R-orthogonaux si $\text{Re}\{\mathbf{x}^H\mathbf{y}\} = 0$ et C-orthogonaux si $\mathbf{x}^H\mathbf{y} = 0$.

[0081] Le procédé de la figure 2 peut ainsi se poursuivre par une étape E10 de construction des vecteurs pilotes $\boldsymbol{\pi}_i$ au moyen de la base orthogonale déterminée à l'étape E8, en regroupant les vecteurs orthogonaux de la base orthogonale par paire ($\mathbf{v}_i, \mathbf{w}_i$ d'après les notations ci-dessus) et en produisant, pour chaque paire comprenant un premier vecteur \mathbf{v}_i et un second vecteur \mathbf{w}_i , un vecteur pilote $\boldsymbol{\pi}_i$ par somme du premier vecteur \mathbf{v}_i et du produit du second vecteur \mathbf{w}_i par un nombre imaginaire (ici l'unité imaginaire j). Ici précisément, le vecteur pilote $\boldsymbol{\pi}_i$ est construit comme suit (pour i entier compris entre 1 et $N_p/2$) :

[0082] [Math.5]

$$\boldsymbol{\pi}_i = \left(\sqrt{\frac{P}{\gamma}} \right) \left(\frac{\mathbf{v}_i + j\mathbf{w}_i}{(1+c_i)^{\frac{3}{4}}} \right)$$

[0083] où P est la puissance de la séquence pilote émise et où

[0084] [Math.6]

$$\gamma = 2 \sum_{l=1}^{N_p/2} \frac{1}{\sqrt{1+c_l}}$$

- [0085] Lorsque N_p est impair, l'étape E10 comprend en outre la production d'un vecteur pilote additionnel $\boldsymbol{\pi}_{e+1}$ colinéaire à un vecteur \mathbf{v}_{e+1} (non regroupé avec un autre vecteur de la base orthogonale). On prend par exemple :
- [0086] $\boldsymbol{\pi}_{e+1} = \mathbf{v}_{e+1}$.
- [0087] Le procédé de la figure 2 comprend alors une étape E12 d'émission dans le canal de communication C, par l'ensemble des antennes d'émission T_1, T_{N_t} , de la séquence pilote formée des vecteurs pilotes $\boldsymbol{\pi}_i$ construits à l'étape E10 (le processeur P commandant ici en pratique l'émission de cette séquence pilote).
- [0088] Ces vecteurs pilotes $\boldsymbol{\pi}_i$ sont optimaux au sens où ils minimisent la variance de tout estimateur sans biais (exprimée par exemple par la borne de Cramér-Rao) et où la séquence pilote formée de ces vecteurs pilotes $\boldsymbol{\pi}_i$ est de longueur minimum.
- [0089] On donne ci-dessous en annexe une démonstration du caractère optimal de ces vecteurs pilotes $\boldsymbol{\pi}_i$.
- [0090] La figure 3 illustre un contexte particulier dans lequel peut être mise en œuvre l'invention.
- [0091] Il s'agit d'un cas particulier du contexte illustré sur la figure 1, dans lequel le nombre N_r d'antennes de réception est égal à 1 ($N_r = 1$). On utilise en outre une seule sous-porteuse de sorte que $N_f = 1$.
- [0092] L'ensemble des antennes d'émission T_1, \dots, T_{N_t} et de l'unité de commande U forment ici une station de base BS d'un réseau de télécommunications cellulaire.
- [0093] Dans l'exemple décrit ici, l'ensemble des antennes d'émission T_1, \dots, T_{N_t} est un réseau d'antennes linéaire uniforme (ou ULA pour "*Uniform Linear Array*")
- [0094] Un terminal mobile M est équipé de l'antenne de réception R_1 .
- [0095] Comme illustré sur la figure 3, le terminal mobile M est positionné dans une direction d formant un angle d'azimut Φ par rapport à une direction de référence z liée au centre de masse (en anglais : "*centroid*") du réseau d'antennes T_1, \dots, T_{N_t} .
- [0096] En modélisant le canal de communication C par un seul chemin physique entre le terminal mobile M et la station de base BS, le vecteur modèle $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta})$ peut s'écrire :
- [0097] $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}) = \beta \mathbf{e}(\Phi)$,
- [0098] où β est un gain complexe et $\mathbf{e}(\Phi)$ un vecteur de visée (en anglais : "*steering vector*") lié au réseau d'antennes T_1, \dots, T_{N_t} , les paramètres réels $\boldsymbol{\theta}$ du vecteur modèle étant ainsi : $(\text{Re}\{\beta\}, \text{Im}\{\beta\}, \Phi)$.
- [0099] Si on note \mathbf{a}_i le vecteur désignant la position de l'antenne i par rapport au centre de masse du réseau d'antennes et $\mathbf{u}(\Phi)$ le vecteur unitaire orienté selon la direction d susmentionnée, le vecteur de visée $\mathbf{e}(\Phi)$ s'écrit :
- [0100]

[Math.7]

$$\mathbf{e}(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{N_t}} \left(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{u}(\Phi)}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{a}_{N_t} \cdot \mathbf{u}(\Phi)} \right)^T = \frac{1}{\sqrt{N_t}} \left(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{a}_1)_y \sin\Phi}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{a}_{N_t})_y \sin\Phi} \right)^T$$

- [0101] où λ est la longueur d'onde de l'onde électromagnétique utilisée et où $(\mathbf{a}_i)_y$ est la composante du vecteur \mathbf{a}_i selon l'axe y (axe vertical sur la figure 3), l'angle d'azimut Φ étant défini dans le plan comprenant les axes z et y précités.
- [0102] On décrit à présent en référence à la figure 4 un exemple de procédé d'estimation de canal qui peut être mis en œuvre dans le contexte de la figure 3.
- [0103] On considère par ailleurs que le système de communication utilisé (comprenant ici la station de base BS et le terminal mobile M) utilise une technique de communication duplex à fréquences distinctes (ou FDD pour "*Frequency Division Duplex*") selon laquelle la voie montante et la voie descendante utilisent des porteuses de fréquences différentes.
- [0104] On procède dans ce cas à une estimation de canal pour la voie montante et à une estimation de canal pour la voie descendante, comme expliqué à présent.
- [0105] Le procédé de la figure 4 débute à l'étape E20 à laquelle une séquence pilote prédéterminée est transmise dans le canal de communication C sur la voie montante, c'est-à-dire ici émise par le terminal mobile M à destination de la station de base BS.
- [0106] On remarque que, dans l'exemple de réalisation décrit ici, la séquence pilote transmise à l'étape E20 n'est pas déterminée conformément aux enseignements de l'invention, mais selon des techniques classiques dans la littérature.
- [0107] En variante, la séquence pilote prédéterminée pourrait être émise à l'étape E20 par un autre dispositif de télécommunication que le terminal mobile M (par exemple par un dispositif dédié à l'estimation de canal).
- [0108] La station de base BS reçoit ainsi une suite de symboles correspondant à la séquence pilote prédéterminée et peut alors effectuer à l'étape E22 une estimation du canal en voie montante.
- [0109] En utilisant un modèle de canal pour la voie montante, cette étape E22 d'estimation de canal comprend la détermination de valeurs de paramètres de ce modèle de canal qui correspondent le mieux aux symboles reçus (sur la base d'un critère de maximum de vraisemblance), c'est-à-dire qui maximisent la probabilité d'obtenir les symboles reçus après transmission de la séquence pilote prédéterminée.
- [0110] Si on modélise le canal en voie montante à l'aide d'un modèle du type :
- [0111] $\mathbf{g}(\Phi, \alpha) = \alpha \mathbf{e}(\Phi)^*$
- [0112] dans le cas de la figure 3,
- [0113] où α est un gain complexe, $\mathbf{e}(\Phi)$ le vecteur de visée déjà mentionné et $*$ l'opérateur conjugué, l'étape E22 d'estimation de canal permet de déterminer une estimation des paramètres α et Φ .

[0114] Le procédé de la figure 4 peut alors réaliser une estimation du canal en voie descendante conforme aux enseignements de l'invention, comme décrit à présent.

[0115] La station de base BS (jouant dans la suite le rôle d'émetteur) détermine ainsi à l'étape E24 une base orthogonale du R-espace vectoriel v_{θ} image de la matrice $\Delta(\theta)$.

[0116] Le vecteur modèle s'écrivant ici : $\mathbf{h}(\theta) = \beta \mathbf{e}(\Phi)$ comme déjà indiqué, avec pour paramètres réels : $\text{Re}\{\beta\}$, $\text{Im}\{\beta\}$ et Φ , on a dans le cas présent :

[0117] [Math.8]

$$\Delta(\theta) = \left(\mathbf{e}(\Phi), j\mathbf{e}(\Phi), \beta \frac{\partial \mathbf{e}(\Phi)}{\partial \Phi} \right),$$

[0118] Du fait de l'utilisation du centre de masse du réseau d'antennes comme référence, on a :

[0119] [Math.9]

$$\mathbf{e}(\Phi) \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{e}(\Phi)}{\partial \Phi} = 0$$

[0120] (c'est-à-dire que ces vecteurs sont C-orthogonaux entre eux et donc *a fortiori* R-orthogonaux entre eux).

[0121] La base orthogonale du R-espace vectoriel v_{θ} déterminée par la station de base BS peut donc être de la forme

[0122] [Math.10]

$$\left(\mathbf{v}_1, \mathbf{w}_1, \mathbf{v}_2 \right) = \left(\mathbf{e}(\Phi), -j\mathbf{e}(\Phi), \frac{\partial \mathbf{e}(\Phi)}{\partial \Phi} \right)$$

[0123] où

[0124] [Math.11]

$$\frac{\partial \mathbf{e}(\Phi)}{\partial \Phi}$$

[0125] est le vecteur de norme 1 et colinéaire à

[0126] [Math.12]

$$\frac{\partial \mathbf{e}(\Phi)}{\partial \Phi} = \frac{-j2\pi}{\lambda \sqrt{N_t}} \cos \Phi \left((\mathbf{a}_1)_y e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{a}_1)_y \sin \Phi}, \dots, (\mathbf{a}_{N_t})_y e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{a}_{N_t})_y \sin \Phi} \right)^T$$

[0127] Ces vecteurs \mathbf{v}_1 , \mathbf{w}_1 , \mathbf{v}_2 peuvent être déterminés en pratique au moyen de la valeur du paramètre Φ estimée à l'étape E22 grâce à l'estimation de canal en voie montante.

[0128] La station de base BS peut alors construire à l'étape E26 des vecteurs pilotes en regroupant les vecteurs \mathbf{v}_1 et \mathbf{w}_1 , et en produisant :

[0129] - un premier vecteur $\boldsymbol{\pi}_1$ obtenu par somme du vecteur \mathbf{v}_1 et du produit du vecteur \mathbf{w}_1 par l'unité imaginaire j , précisément :

[0130]

[Math.13]

$$\boldsymbol{\pi}_1 = \left(\sqrt{\frac{P}{\sqrt{2}+1}} \right) \left(\frac{\mathbf{v}_1 + j\mathbf{w}_1}{2^{\frac{3}{4}}} \right) = \left(\sqrt{\frac{P}{\sqrt{2}+1}} \right) \left(2^{\frac{1}{4}} \mathbf{e}(\Phi) \right)$$

[0131] - un second vecteur $\boldsymbol{\pi}_2$ colinéaire au vecteur \mathbf{v}_2 , précisément

[0132] [Math.14]

$$\boldsymbol{\pi}_2 = \left(\sqrt{\frac{P}{\sqrt{2}+1}} \right) \mathbf{v}_2 = \left(\sqrt{\frac{P}{\sqrt{2}+1}} \right) \frac{\partial \mathbf{e}(\Phi)}{\partial \Phi}$$

[0133] où P est comme déjà indiqué la puissance totale de la séquence pilote formée de ces vecteurs pilotes $\boldsymbol{\pi}_1, \boldsymbol{\pi}_2$.

[0134] Comme déjà indiqué, la séquence pilote formée de ces vecteurs pilotes $\boldsymbol{\pi}_1, \boldsymbol{\pi}_2$ est optimale en termes d'estimation (variance minimale) et de longueur (longueur minimale).

[0135] Les vecteurs pilotes $\boldsymbol{\pi}_1, \boldsymbol{\pi}_2$ peuvent alors être émis dans le canal de communication C, ici par les antennes d'émission T_1, \dots, T_{N_t} , comme décrit à présent.

[0136] Pour chaque antenne d'émission T_k , l'unité de commande U de la station de base BS effectue à l'étape E28 une modulation les symboles pilotes $\pi_{1,k}, \pi_{2,k}$ (c'est-à-dire les éléments respectivement situés en $k^{\text{ème}}$ position dans les vecteurs pilotes $\boldsymbol{\pi}_1, \boldsymbol{\pi}_2$) afin d'obtenir des signaux S_k à émettre. En pratique, une telle modulation est par exemple obtenue, pour chaque symbole pilote $\pi_{1,k}, \pi_{2,k}$, en appliquant le symbole pilote concerné à une porteuse, précisément en appliquant à cette porteuse un gain correspondant (ou égal) au module du symbole pilote concerné et un déphasage correspond (ou égal) à l'argument du symbole pilote concerné.

[0137] Dans certains modes de réalisation, des symboles de données (représentant des données à transmettre) peuvent être multiplexés avec les symboles pilotes avant l'étape de modulation E28.

[0138] L'unité de commande U commande alors l'émission, par chaque antenne de communication T_k , des signaux correspondants S_k déterminés à l'étape E30.

[0139] Les signaux transmis S_k sont reçus (avec des modifications dues à la transmission dans le canal de communication C) par le terminal mobile M (jouant ici le rôle de récepteur) via l'antenne de réception R_1 à l'étape E32.

[0140] Le terminal mobile M émet alors en retour (c'est-à-dire à destination de la station de base BS, ici à l'étape E34) des données d'état de canal D (ou CSI pour "*Channel State Information*") déterminées (par traitement au sein du terminal mobile M) sur la base des signaux reçus (en pratique : sur la base des symboles pilotes reçus, obtenus par démodulation des signaux reçus).

[0141] La station de base BS reçoit les données d'état de canal D et peut ainsi effectuer à l'étape E36 une estimation du canal en voie descendante, c'est-à-dire déterminer les

valeurs des paramètres du modèle de canal (représenté ici par le vecteur modèle $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta})$) qui correspondent le mieux aux données d'état de canal D (sur la base d'un critère de maximum de vraisemblance), c'est-à-dire qui maximisent la probabilité d'obtenir les données d'état de canal D après transmission de la séquence pilote à l'étape E30. On utilise par exemple pour ce faire un algorithme basé sur une représentation parcimonieuse du canal, tel que décrit par exemple dans l'article "*Compressed channel sensing: A new approach to estimating sparse multipath channels*", de Bajwa, W. U., Haupt, J., Sayeed, A. M., & Nowak, R. *in* Proceedings of the IEEE, 98(6), 1058-1076 (2010).

[0142] On obtient ainsi dans le cas décrit ici les valeurs courantes des paramètres β et Φ . On remarque que la valeur courante du paramètre Φ est une mise à jour de la valeur du même paramètre déterminé à l'étape E22. Cette mise à jour permet de suivre en temps réel l'évolution de ce paramètre et d'obtenir ainsi une estimation plus pertinente de ce paramètre.

[0143] L'unité de commande U de la station de base BS peut alors configurer à l'étape E38 un module de précodage (équipant la station de base BS) en fonction des valeurs des paramètres déterminées à l'étape E36. On pourra se référer à ce sujet à l'article "*Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems*", de El Ayach, O., Rajagopal, S., Abu-Surra, S., Pi, Z., & Heath, R. W. *in* IEEE transactions on wireless communications, 13(3), 1499-1513 (2014).

[0144] La station de base BS procède ainsi à l'émission de données à destination du terminal mobile M (au moyen de ses antennes d'émission T_1, \dots, T_{N_t}) après traitement de ces données par le module de précodage (configuré à l'étape E38). Cette transmission est optimisée grâce à l'estimation de canal effectuée comme expliqué ci-dessus.

[0145] ANNEXE : PREUVE DU CARACTÈRE OPTIMAL

[0146] On démontre ci-dessous le caractère optimal de la séquence pilote $\boldsymbol{\pi}_1, \dots, \boldsymbol{\pi}_{N_p/2}$ proposée ci-dessus dans le cas où le nombre N_p de paramètres est pair (la démonstration dans le cas où le nombre N_p est impair étant similaire.)

[0147] On utilise la matrice d'information de Fisher $\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M})$ donnée (en présence de bruit gaussien de variance σ^2) par la formule de Slepian-Bangs :

[0148] [Math.15]

$$\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M}) = \frac{2}{\sigma^2} \text{Re} \left\{ \frac{\partial \mathbf{h}^H}{\partial \boldsymbol{\theta}} \mathbf{M} \mathbf{M}^H \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right\} = \frac{2}{\sigma^2} \text{Re} \left\{ \boldsymbol{\Delta}(\boldsymbol{\theta})^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \boldsymbol{\Delta}(\boldsymbol{\theta}) \right\}$$

[0149] où \mathbf{M} est la matrice d'observation dont les colonnes correspondent aux vecteurs émis dans le canal de communication C (la seconde formulation reprenant seulement la forme $\boldsymbol{\Delta}(\boldsymbol{\theta})$ donnée plus haut pour la matrice concernée).

[0150] La matrice d'information de Fisher $\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M})$ quantifie la quantité d'informations sur les paramètres $\boldsymbol{\theta}$ que l'on peut obtenir à réception des vecteurs définis par les colonnes

de la matrice d'observation \mathbf{M} .

[0151] On pourra se référer à ce sujet à l'article "*On the Fisher information matrix for multivariate elliptically contoured distributions*", de O. Besson et Y.I Abramovich, in IEEE Signal Processing Letters, vol. 20, n° 11, pp. 1130-1133, 2013.

[0152] La matrice \mathbf{R} définie plus haut étant à valeurs réelles, on peut écrire :

[0153] [Math.16]

$$\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M}) = \frac{2}{\sigma^2} \mathbf{R}^T \text{Re} \{ \mathbf{U}^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \mathbf{U} \} \mathbf{R}$$

[0154] La borne de Cramér-Rao a alors pour expression (voir par exemple l'article "*A Cramér-Rao lower bound for complex parameters*", de A. Van den Bos in IEEE Transactions on Signal Processing, 42(10), 1994) :

[0155] [Math.17]

$$CRB(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M}) = \text{Tr}[\boldsymbol{\Delta}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M})^{-1} \boldsymbol{\Delta}(\boldsymbol{\theta})^H]$$

[0156] soit, en remplaçant par l'expression de la matrice d'information de Fisher $\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M})$ donnée plus haut et en simplifiant :

[0157] [Math.18]

$$CRB(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M}) = \frac{\sigma^2}{2} \text{Tr}[\text{Re}\{\mathbf{U}^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \mathbf{U}\}^{-1}]$$

[0158] Du fait que la matrice \mathbf{Q} définie plus haut est à valeurs réelles et R-orthogonale et que $\mathbf{V} = \mathbf{U}\mathbf{Q}$, on peut exprimer la borne de Cramér-Rao comme :

[0159] [Math.19]

$$CRB(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M}) = \frac{\sigma^2}{2} \text{Tr}[\text{Re}\{\mathbf{V}^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \mathbf{V}\}^{-1}]$$

[0160] Du fait que pour toute matrice symétrique semi-définie positive \mathbf{A} , on a :

[0161] $(\mathbf{A}^{-1})_{i,i} \geq 1/a_{i,i}$ (où $a_{i,i}$ est l'élément diagonal en ligne i et colonne i de la matrice \mathbf{A}),

[0162] on peut écrire :

[0163] [Math.20]

$$\text{Tr} \left[\text{Re} \{ \mathbf{V}^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \mathbf{V} \}^{-1} \right] \geq \sum_{k=1}^{\frac{N_P}{2}} \frac{1}{\|\mathbf{M}^H \mathbf{v}_k\|_2^2} + \frac{1}{\|\mathbf{M}^H \mathbf{w}_k\|_2^2}$$

[0164] avec une égalité si et seulement si la matrice $\text{Re}\{\mathbf{V}^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \mathbf{V}\}$ est diagonale.

[0165] Pour poursuivre, on définit :

[0166]

[Math.21]

$$\tilde{\mathbf{u}}_k^+ = \frac{1}{\sqrt{2(1+c_k)}} (\mathbf{v}_k + j\mathbf{w}_k)$$

[0167] et

[0168] [Math.22]

$$\tilde{\mathbf{u}}_k^- = \frac{1}{\sqrt{2(1-c_k)}} (\mathbf{v}_k - j\mathbf{w}_k)$$

[0169] qui sont des vecteurs unitaires et, pour k donné, C-orthogonaux entre eux.

[0170] Ces vecteurs permettent d'écrire :

[0171] [Math.23]

$$\begin{aligned} \|\mathbf{M}^H \mathbf{v}_k\|_2^2 &= \frac{1}{2} \left[(1+c_k) \|\mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^+\|_2^2 + (1-c_k) \|\mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^-\|_2^2 \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{1-c_k^2} \Re\{(\tilde{\mathbf{u}}_k^+)^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^-\} \right], \end{aligned}$$

[0172] et

[0173] [Math.24]

$$\begin{aligned} \|\mathbf{M}^H \mathbf{w}_k\|_2^2 &= \frac{1}{2} \left[(1+c_k) \|\mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^+\|_2^2 + (1-c_k) \|\mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^-\|_2^2 \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{1-c_k^2} \Re\{(\tilde{\mathbf{u}}_k^+)^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^-\} \right]. \end{aligned}$$

[0174] Pour simplifier les expressions on définit encore :

[0175] [Math.25]

$$P_k^+ \triangleq \|\mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^+\|_2^2$$

[0176] [Math.26]

$$P_k^- \triangleq \|\mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^-\|_2^2$$

[0177] [Math.27]

$$d_k \triangleq \sqrt{1-c_k^2} \Re\{(\tilde{\mathbf{u}}_k^+)^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^-\}$$

[0178] ce qui permet d'écrire :

[0179]

[Math.28]

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{\frac{N_p}{2}} \frac{1}{\|\mathbf{M}^H \mathbf{v}_k\|_2^2} + \frac{1}{\|\mathbf{M}^H \mathbf{w}_k\|_2^2} \\
&= \sum_{k=1}^{\frac{N_p}{2}} \frac{2}{(1+c_k)P_k^+ + (1-c_k)P_k^- + d_k} \\
&\quad + \frac{2}{(1-c_k)P_k^- + (1+c_k)P_k^+ - d_k} \\
&\geq \sum_{k=1}^{\frac{N_p}{2}} \frac{4}{(1-c_k)P_k^- + (1+c_k)P_k^+},
\end{aligned}$$

[0180] (la dernière inégalité venant du fait que $1/(a+b)+1/(a-b) \geq 2/a$ par convexité de la fonction inverse sur l'ensemble des réels positifs).

[0181] La dernière inégalité devient une égalité si et seulement si la valeur d_k (définie ci-dessus) est nulle.

[0182] En résumé on a :

[0183] [Math.29]

$$\text{CRB}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{M}) = \frac{\sigma^2}{2} \sum_{k=1}^{\frac{N_p}{2}} \frac{4}{(1-c_k)P_k^- + (1+c_k)P_k^+}$$

[0184] si et seulement si $\text{Re}\{\mathbf{V}^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \mathbf{V}\}$ est diagonale et, pour tout k ,

[0185] [Math.30]

$$\Re\{(\tilde{\mathbf{u}}_k^+)^H \mathbf{M} \mathbf{M}^H \tilde{\mathbf{u}}_k^-\} = 0$$

[0186] On a par ailleurs

[0187] [Math.31]

$$\|\mathbf{M}\|_F^2 = \text{Tr}[\mathbf{M} \mathbf{M}^H] \geq \sum_{k=1}^{\frac{N_p}{2}} P_k^+ + P_k^-$$

[0188] avec une égalité si et seulement si le C-espace vectoriel image de la matrice \mathbf{M} est inclus dans le C-espace vectoriel engendré par l'ensemble des vecteurs

[0189]

[Math.32]

$$\{\bar{\mathbf{u}}_k^+, \bar{\mathbf{u}}_k^-\}_{k=1}^{\frac{N_p}{2}}$$

[0190] Le problème d'optimisation que l'on cherche à résoudre est donc borné par le bas par le problème plus simple suivant

[0191] [Math.33]

$$\text{minimiser}_{P_k^+, P_k^-, k=1, \dots, \frac{N_p}{2}} \sum_{k=1}^{\frac{N_p}{2}} \frac{4}{(1 - c_k)P_k^- + (1 + c_k)P_k^+}$$

[0192] en respectant la condition sur la puissance :

[0193] [Math.34]

$$\sum_{k=1}^{\frac{N_p}{2}} P_k^+ + P_k^- = P.$$

[0194] Vu la forme des termes de la somme à minimiser, l'optimum est atteint lorsque, pour tout k , P_k^- est nul. On cherche donc en fait résoudre le problème ci-dessus avec, pour tout k ,

[0195] [Math.35]

$$P_k^- = 0$$

[0196] En utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange, on obtient les puissances optimales suivantes :

[0197] [Math.36]

$$(P_k^+)_{\text{opt}} = \frac{P}{\sqrt{1 + c_k} \sum_{j=1}^{\frac{N_p}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 + c_j}}}$$

[0198] et la valeur optimale du problème d'optimisation est :

[0199] [Math.37]

$$\sum_{k=1}^{\frac{N_p}{2}} \frac{4}{(1 + c_k)(P_k^+)_{\text{opt}}} = \frac{4}{P} \left(\sum_{k=1}^{\frac{N_p}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 + c_k}} \right)^2$$

[0200] Elle est atteinte pour la matrice d'observation \mathbf{M}_{opt} définie par :

[0201] [Math.38]

$$\mathbf{M}_{\text{opt}} = \left(\sqrt{(P_1^+)_{\text{opt}}} \tilde{\mathbf{u}}_1^+, \dots, \sqrt{\left(P_{\frac{N_p}{2}}^+\right)_{\text{opt}}} \tilde{\mathbf{u}}_{\frac{N_p}{2}}^+ \right)$$

[0202] pour laquelle on a bien :

[0203] d_k nul pour tout k

[0204] $\text{Re}\{\mathbf{V}^H \mathbf{M}_{\text{opt}} \mathbf{M}_{\text{opt}}^H \mathbf{V}\}$ est diagonale

[0205] [Math.39]

$$P_k^+ = (P_k^+)_{\text{opt}}$$

pour tout k

[0206] [Math.40]

$$\|\mathbf{M}_{\text{opt}}\|_F^2 = P$$

Revendications

- [Revendication 1] Procédé de détermination d'une séquence pilote comprenant une pluralité de vecteurs pilotes à émettre dans un canal de communication (C) modélisé par un vecteur modèle comprenant au moins une fonction à valeurs complexes variable en fonction d'une pluralité de paramètres réels et descriptive d'une transmission d'une antenne d'émission ($T_1 ; T_{N_t}$) à une antenne de réception ($R_1 ; R_{N_r}$) à travers le canal de communication (C), le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :
- détermination (E4, E6, E8 ; E24) d'une base orthogonale d'un R-espace vectoriel image d'une matrice ayant respectivement pour colonnes les dérivées partielles du vecteur modèle par rapport aux différents paramètres réels ;
 - construction (E10 ; E26) des vecteurs pilotes au moyen de la base orthogonale déterminée, en regroupant les vecteurs orthogonaux de la base orthogonale par paire et en produisant, pour chaque paire comprenant un premier vecteur et un second vecteur, un vecteur pilote par somme du premier vecteur et du produit du second vecteur par un nombre imaginaire.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, comprenant une étape de détermination d'au moins un des éléments de ladite matrice sur la base d'au moins une valeur préalablement déterminée d'un desdits paramètres et représentant l'état courant du canal de communication.
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 1 ou 2, dans lequel ladite matrice comprend un nombre de lignes égal au nombre d'éléments formant le vecteur modèle, et un nombre de colonnes égal au nombre de paramètres dans la pluralité de paramètres, et dans lequel tout élément en ligne p et en colonne q dans ladite matrice est égal à la valeur prise, pour des valeurs de paramètres représentant l'état courant du canal de communication, par la dérivée partielle, par rapport au q^{ème} paramètre de la pluralité de paramètres, de la fonction située en p^{ème} position dans le vecteur modèle.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel l'étape de détermination de ladite base orthogonale comprend une étape (E4) de factorisation de ladite matrice sous forme du produit d'une matrice R-orthogonale U et d'une matrice triangulaire supérieure à valeurs réelles.
- [Revendication 5] Procédé selon la revendication 4, dans lequel l'étape de détermination

de ladite base orthogonale comprend la construction (E6) d'une matrice Q dont les colonnes forment une base de vecteurs propres pour la matrice $-\text{Im}\{U^H U\}^2$ et le calcul (E8) du produit de la matrice U et de la matrice Q .

- [Revendication 6] Procédé selon la revendication 4 ou 5, dans lequel l'étape de détermination de ladite base orthogonale comprend la détermination d'au moins un coefficient égal à la racine carrée d'une valeur propre de la matrice $-\text{Im}\{U^H U\}^2$ et dans lequel l'étape de construction desdits vecteurs pilotes utilise ledit coefficient pour produire l'un desdits vecteurs pilotes.
- [Revendication 7] Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel l'étape de construction des vecteurs pilotes comprend, si le nombre de vecteurs orthogonaux dans ladite base orthogonale est impair, la production d'un vecteur pilote colinéaire à un desdits vecteurs orthogonaux.
- [Revendication 8] Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel ladite fonction est non linéaire par rapport à au moins un paramètre parmi lesdits paramètres réels.
- [Revendication 9] Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, dans lequel le vecteur modèle est le produit d'un gain complexe et d'un vecteur de visée variable en fonction d'un angle repérant la position de l'antenne de réception (R_i) relativement à l'antenne d'émission ($T_1 ; T_{Nt}$), lesdits paramètres réels étant la partie réelle du gain complexe, la partie imaginaire du gain complexe et ledit angle.
- [Revendication 10] Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel les différents éléments du vecteur modèle sont différentes fonctions à valeurs complexes variables en fonction de la pluralité de paramètres réels et descriptives respectivement de transmissions entre des paires distinctes antenne d'émission - antenne de réception.
- [Revendication 11] Procédé d'estimation de canal entre un émetteur (BS) et un récepteur (M), comprenant :
- une étape de détermination de vecteurs pilotes conformément au procédé selon l'une des revendications 1 à 7 ; et
 - une étape d'émission des vecteurs pilotes déterminés dans le canal de communication (C).
- [Revendication 12] Procédé d'estimation selon la revendication 11, dans lequel le récepteur (M) reçoit les vecteurs pilotes émis et détermine des données d'état de canal (D) sur la base des vecteurs pilotes reçus.
- [Revendication 13] Procédé d'estimation selon la revendication 12, dans lequel les données

d'état de canal (D) sont transmises par le récepteur (M) à l'émetteur (BS) et dans lequel l'émetteur (BS) effectue une estimation d'au moins une valeur d'un paramètre du modèle de canal sur la base des données d'état de canal (D).

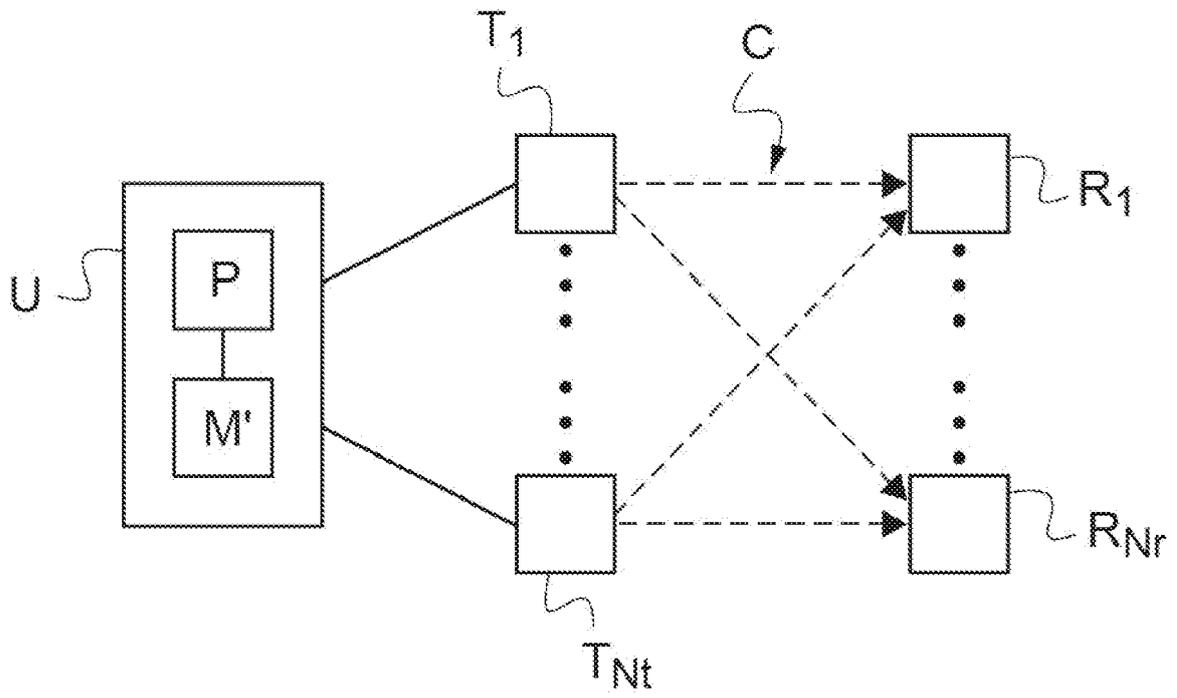
[Revendication 14] Procédé selon la revendication 13, dans lequel des modules de précodage de l'émetteur (BS) sont configurés en fonction de ladite au moins une valeur estimée du paramètre du modèle de canal.

[Revendication 15] Dispositif de détermination d'une séquence pilote comprenant une pluralité de vecteurs pilotes à émettre dans un canal de communication modélisé par un vecteur modèle comprenant au moins une fonction à valeurs complexes variable en fonction d'une pluralité de paramètres réels et descriptive d'une transmission d'une antenne d'émission ($T_1 ; T_{N_t}$) à une antenne de réception ($R_1 ; R_{N_r}$) à travers le canal de communication (C), caractérisé en ce qu'il est programmé pour :

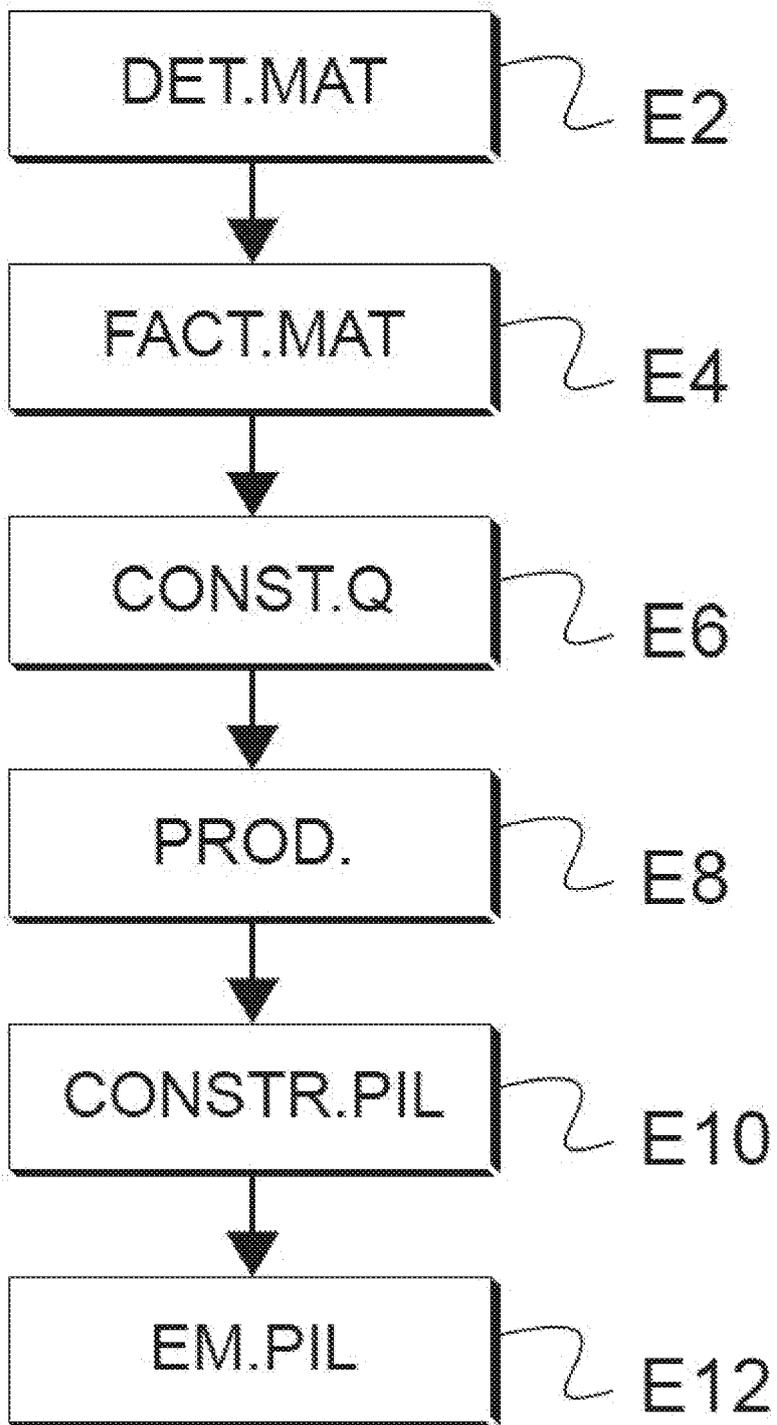
- déterminer une base orthogonale d'un R-espace vectoriel image d'une matrice ayant respectivement pour colonnes les dérivées partielles du vecteur modèle par rapport aux différents paramètres réels ;
- construire les vecteurs pilotes au moyen de la base orthogonale déterminée, en regroupant les vecteurs orthogonaux de la base orthogonale par paire et en produisant, pour chaque paire comprenant un premier vecteur et un second vecteur, un vecteur pilote par somme du premier vecteur et du produit du second vecteur par un nombre imaginaire.

[Revendication 16] Programme d'ordinateur comprenant des instructions pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'une des revendications 1 à 14 lorsque ces instructions sont exécutées par un processeur.

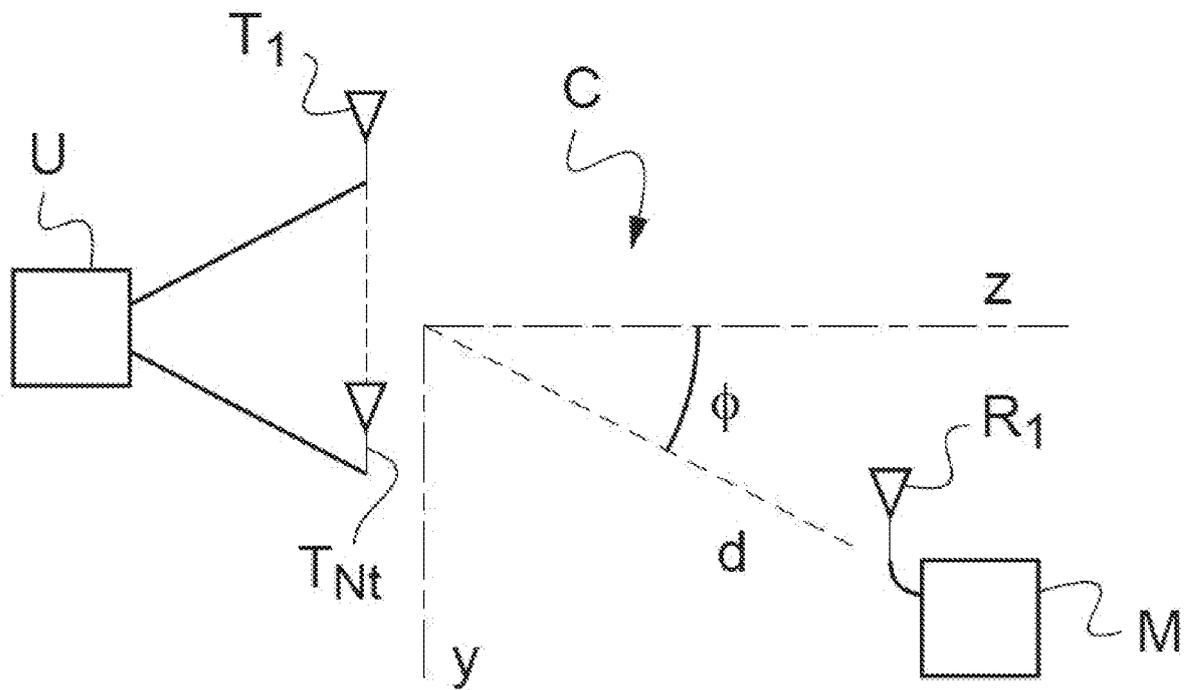
[Fig. 1]



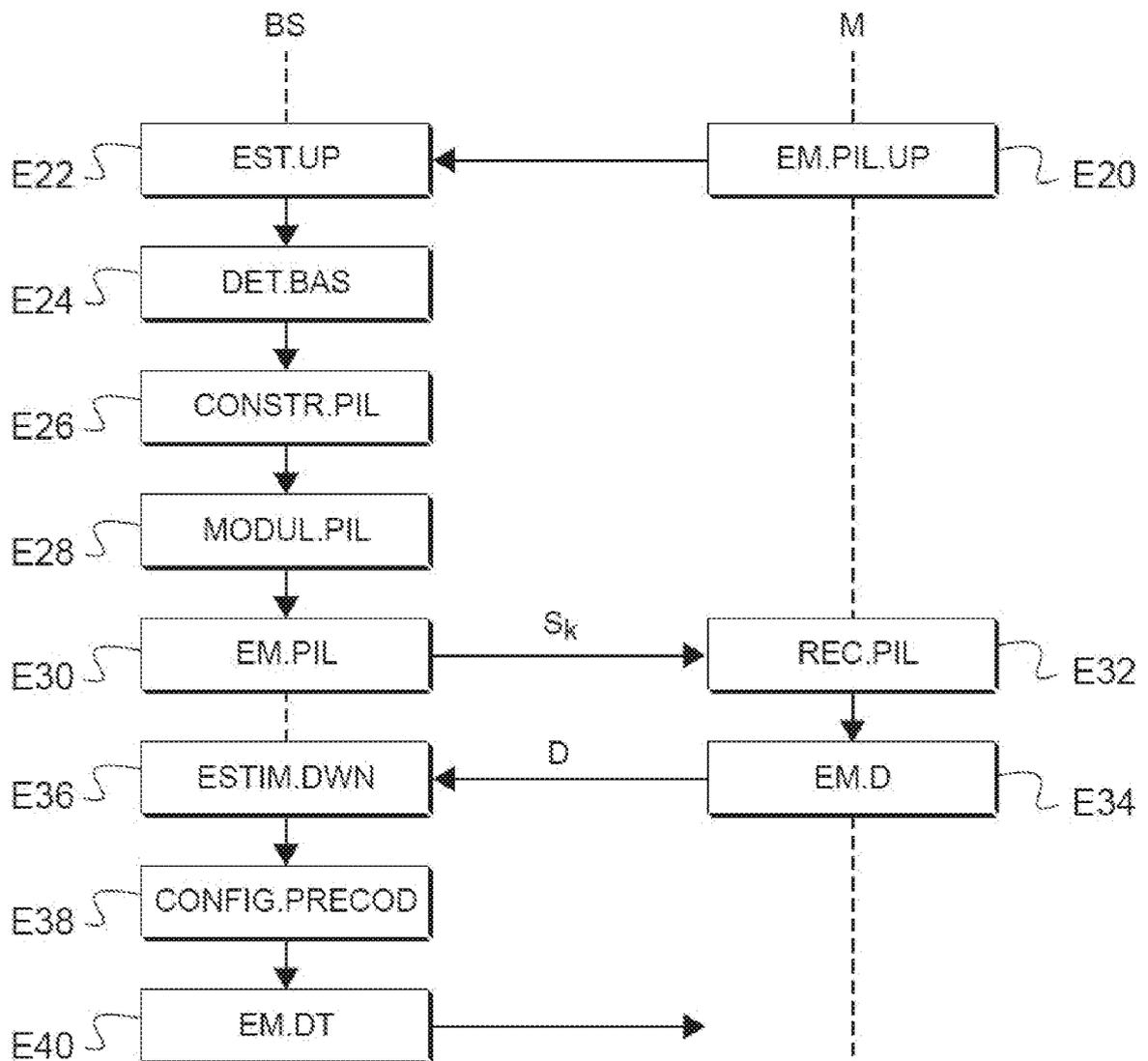
[Fig. 2]



[Fig. 3]



[Fig. 4]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

MINN H ET AL: "Optimal periodic training signal for frequency offset estimation in frequency selective fading channels",
2004 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS ; ICC 2004 ; 20 - 24 JUNE 2004, PARIS, IEEE OPERATIONS CENTER, PISCATAWAY, NJ, USA,
vol. 1, 20 juin 2004 (2004-06-20), pages 488-492, XP010710394,
DOI: 10.1109/ICC.2004.1312537
ISBN: 978-0-7803-8533-7

ZHOU WEN ET AL: "Optimal Pilot Design for MIMO Broadcasting Systems Based on the Positive Definite Matrix Manifold",
IEEE ACCESS,
vol. 7, 2 août 2019 (2019-08-02), pages 99589-99601, XP011738056,
DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2929584
[extrait le 2019-08-02]

ELNAKEEB AMR ET AL: "On Training Sequence Optimization for Leaked MIMO OFDM Channels",
2019 IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE (GLOBECOM), IEEE,
9 décembre 2019 (2019-12-09), pages 1-6,
XP033722825,
DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014125
[extrait le 2020-02-25]

SEZGINER S ET AL: "CramÉR-Rao Bound and Training Sequence Selection for Mimo-Ofdma Transmissions Impaired by Frequency Offsets",
ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PROCESSING, 2006. ICASSP 2006 PROCEEDINGS . 2006 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TOULOUSE, FRANCE 14-19 MAY 2006, PISCATAWAY, NJ, USA, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA,
1 janvier 2006 (2006-01-01), pages IV-IV,
XP031101150,
ISBN: 978-1-4244-0469-8

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND

DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT