

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 131 008

21 N° d'enregistrement national : 21 13624

51 Int Cl⁸ : G 01 S 5/00 (2022.01)

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 17.12.21.

30 Priorité :

71 Demandeur(s) : Safran Electronics & Defense Société
par actions simplifiée (SAS) — FR.

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 23.06.23 Bulletin 23/25.

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

72 Inventeur(s) : GARCIA Pierre-Antoine, LILBERT
Arnaud et CHIODINI Alain Michel.

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

73 Titulaire(s) : Safran Electronics & Defense Société par
actions simplifiée (SAS).

○ Demande(s) d'extension :

74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

54 procédé d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes.

57 Procédé d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes (2), comprenant des étapes de : estimation (202) d'une matrice de covariance de signaux acquis par le réseau d'antennes (2) ; calcul (204) d'un vecteur propre normalisé de la matrice de covariance ; corrélation (205) du vecteur propre normalisé avec une première table de référence de sorte à produire un premier spectre de corrélation comprenant des indices de corrélation respectivement associés à différentes directions d'arrivée ; corrélation (206) du vecteur propre normalisé avec une deuxième table de référence de sorte à produire un deuxième spectre de corrélation comprenant des indices de corrélation respectivement associés à différentes directions d'arrivée ; construction (312) d'une troisième table de référence par combinaison linéaire de la première table de référence et de la deuxième table de référence avec respectivement une composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la première direction et une composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la deuxième direction ; corrélation (314) du vecteur propre normalisé avec la troisième table de référence de sorte à produire un troisième spectre de corrélation comprenant des indices de corrélation associés à différentes directions d'arrivée ; identification (316) d'une direction

d'arrivée associée à un indice de corrélation maximal du troisième spectre de corrélation.

Figure pour l'abrégé: Fig. 3

FR 3 131 008 - A1



Description

Titre de l'invention : procédé d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention concerne un procédé d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes.

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0002] On connaît de l'état de la technique des procédés d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes.

[0003] Certains de ces procédés sont associés à un réseau d'antennes toutes polarisées verticalement ou horizontalement. Or, lorsque la polarisation de l'onde incidente diffère des polarisations verticales ou horizontales, l'estimation de la direction d'arrivée est biaisée, ce qui est d'autant plus vrai lorsque la composante de polarisation croisée des antennes de réception ne peut être maîtrisée, lors notamment d'une intégration sur porteur. Le choix d'un procédé dépend donc de la capacité du réseau antennaire à fonctionner sur l'ensemble des polarisations linéaires voire elliptiques.

[0004] En particulier, le document EP2435847 décrit un procédé d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes polarisées différemment, qui comprend des étapes conduisant à l'élaboration d'une fonction de coût $C(X_j)$. Cette fonction de coût est le résultat de la somme de deux termes au carré. Cette fonction peut être représentée par une courbe, avec X_j en abscisse et $C(X_j)$ en ordonnée. Il est identifié une valeur X_0 associée à un maximum de cette courbe, la valeur X_0 constituant une estimée de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique. Toutefois, ce procédé n'estime pas conjointement la direction d'arrivée et la polarisation de l'onde incidente.

Exposé de l'invention

[0005] Un but de la présente divulgation est d'obtenir une estimée plus précise de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes.

[0006] Il est à cet effet proposé, selon un premier aspect, un procédé d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes mis en œuvre par ordinateur, le procédé comprenant des étapes de :

- estimation d'une matrice de covariance de signaux acquis par le réseau d'antennes, les signaux étant issus de l'onde électromagnétique,
- calcul d'un vecteur propre normalisé de la matrice de covariance, le vecteur propre étant associé à une valeur propre de la matrice de covariance,
- corrélation du vecteur propre normalisé avec une première table de référence A_V de

sorte à produire un premier spectre de corrélation comprenant des indices de corrélation respectivement associés à différentes directions d'arrivée, la première table de référence comprenant des réponses normalisées du réseau d'antennes à une première onde électromagnétique de référence polarisée dans une première direction respectivement associées à différentes directions d'arrivée de la première onde électromagnétique de référence,

- corrélation du vecteur propre normalisé avec une deuxième table de référence de sorte à produire un deuxième spectre de corrélation comprenant des indices de corrélation respectivement associés à différentes directions d'arrivée, la deuxième table de référence comprenant des réponses normalisées du réseau d'antennes à une deuxième onde électromagnétique de référence polarisée dans une deuxième direction respectivement associées à différentes directions d'arrivée de la deuxième onde électromagnétique de référence, la deuxième direction étant différente de la première direction,
- construction d'une troisième table de référence par combinaison linéaire de la première table de référence et de la deuxième table de référence avec respectivement une composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la première direction et une composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la deuxième direction,
- corrélation du vecteur propre normalisé avec la troisième table de référence de sorte à produire un troisième spectre de corrélation comprenant des indices de corrélation associés à différentes directions d'arrivée,
- identification d'une direction d'arrivée associée à un indice de corrélation maximal du troisième spectre de corrélation.

[0007] Un avantage du procédé proposé et qu'il propose conjointement d'estimer conjointement la direction d'arrivée ainsi que la polarisation de l'onde incidente, ce qui permet, avec le choix du réseau d'antennes adéquat, une intégration de ce dernier très près du véhicule porteur.

[0008] Le procédé selon le premier aspect peut comprendre également les caractéristiques suivantes, prises seules ou en combinaison lorsque cela est techniquement possible.

[0009] De préférence, le procédé selon le premier aspect comprend en outre des étapes de :

- sélection d'une direction d'arrivée associée à un indice de corrélation maximal du premier spectre de corrélation ou du deuxième spectre de corrélation,
- construction d'une table de recherche en polarisation à partir d'une première réponse normalisée du réseau d'antennes à la première onde électromagnétique de référence, la première réponse normalisée étant associée dans la première table de référence à la direction d'arrivée sélectionnée, et à partir d'une deuxième réponse normalisée du réseau d'antennes à la deuxième onde électromagnétique de référence, la deuxième réponse normalisée étant associée dans la deuxième table de référence à la

direction d'arrivée sélectionnée,

- corrélation du vecteur propre normalisé avec la table de recherche en polarisation, de sorte à obtenir un quatrième spectre de corrélation comprenant des indices de corrélation associés à différentes valeurs complexes,

- ajustement de la composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la deuxième direction à une valeur complexe associée à un indice de corrélation maximal du quatrième spectre de corrélation, puis normalisation d'un vecteur de polarisation formé par les composantes de polarisation de l'onde électromagnétique dans la première direction et la composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la deuxième direction,

la construction de la troisième table de référence étant mise en œuvre après la normalisation du vecteur de polarisation.

[0010] De préférence, le premier spectre de corrélation comprend un premier indice de corrélation maximal et deuxième spectre de corrélation comprend un deuxième indice de corrélation maximal, et la direction d'arrivée sélectionnée à l'étape de sélection est :

- une direction d'arrivée associée au premier indice de corrélation maximal dans le premier spectre de corrélation, lorsque le premier indice de corrélation maximal est supérieur au deuxième indice de corrélation maximal,

- une direction d'arrivée associée au deuxième indice de corrélation maximal dans le deuxième spectre de corrélation, lorsque le premier indice de corrélation maximal n'est pas supérieur au deuxième indice de corrélation maximal.

[0011] De préférence, le procédé selon le premier aspect comprend la création d'un espace de recherche comprenant différentes valeurs pour une variable complexe, et dans lequel la construction de la table de recherche en polarisation comprend une combinaison linéaire de la première réponse et de la deuxième réponse avec respectivement la composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la première direction et un poids dépendant du module de la deuxième composante de polarisation de l'onde électromagnétique et d'une des différentes valeurs pour la variable complexe, la combinaison linéaire étant répétée pour chacune des différentes valeurs.

[0012] De préférence, le procédé selon le premier aspect comprend des étapes de :

- mise à jour de la direction d'arrivée sélectionnée à la valeur de la direction d'arrivée identifiée,

- mise à jour de l'espace de recherche en un nouvel espace de recherche incluant la composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la deuxième direction du vecteur de polarisation obtenue à l'issue de l'étape de normalisation, puis

- répétition des étapes de sélection, construction d'une table de recherche en polarisation, corrélation du vecteur propre normalisé avec la table de recherche en polarisation, ajustement, construction d'une troisième table de référence, corrélation du

vecteur propre normalisé avec la troisième table de référence, et identification d'une direction d'arrivée.

- [0013] De préférence, l'espace de recherche forme une spirale dans le plan complexe, et la mise à jour de l'espace de recherche comprend une dilatation de la spirale, de sorte que le nouvel espace de recherche forme une nouvelle spirale dans le plan complexe qui est dilatée par rapport à la spirale.
- [0014] De préférence, le procédé selon le premier aspect comprend en outre une comparaison entre l'indice de corrélation maximal du troisième spectre de corrélation S_{pp} et un seuil prédéfini, ladite répétition n'étant mise en œuvre que si l'indice de corrélation maximal du troisième spectre de corrélation est inférieur au seuil prédéfini.
- [0015] De préférence, la première direction et la deuxième direction sont orthogonales.
- [0016] Il est également proposé, selon un deuxième aspect, une mémoire lisible par ordinateur stockant des instructions exécutables par l'ordinateur pour l'exécution des étapes du procédé selon le premier aspect.
- [0017] Il est également proposé, selon un troisième aspect, un dispositif d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes, le dispositif d'estimation comprenant au moins un processeur configuré pour mettre en œuvre le procédé selon le premier aspect.
- [0018] Il est également proposé, selon un quatrième aspect, un système comprenant :
 - un réseau d'antennes configuré pour acquérir des signaux issus d'une onde électromagnétique,
 - un dispositif d'estimation de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique au réseau d'antennes sur la base des signaux, le dispositif d'estimation étant conforme au troisième aspect.
- [0019] Il est également proposé un porteur mobile, tel qu'un aéronef, comprenant un système selon le quatrième aspect.

DESCRIPTION DES FIGURES

- [0020] D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la description qui suit, qui est purement illustrative et non limitative, et qui doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :
- [0021] La [Fig.1] illustre de façon schématique un système selon un mode de réalisation.
- [0022] La [Fig.2] est un organigramme d'étapes d'un procédé susceptible d'être mis en œuvre par le système de la [Fig.1].
- [0023] La [Fig.3] est un organigramme d'étapes d'un procédé d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes, selon un mode de réalisation.
- [0024] La [Fig.4] est un diagramme représentant des valeurs propres et des indices associés,

ces valeurs propres étant impliquées dans le procédé de la [Fig.3].

[0025] La figure 5 représente deux courbes formées par des spectres de corrélation S_{PV} , S_{PH} calculés au cours d'une mise en œuvre du procédé de la [Fig.3].

[0026] La [Fig.6] est un organigramme détaillant un mode de réalisation d'une étape du procédé de la [Fig.3].

[0027] La [Fig.7] représente un espace de recherche pour une variable complexe p , dans le plan complexe.

[0028] La figure 8a représente une courbe formée par un spectre S_p calculé au cours d'une itération du procédé de la [Fig.3], ce spectre étant fonction de la variable complexe p .

[0029] La figure 8b représente les deux courbes de la figure 5 ainsi qu'une courbe formée par une autre spectre de corrélation S_{pp} calculés au cours d'une itération du procédé de la [Fig.3].

[0030] La figure 9a représente une courbe formée par un spectre S_p calculé au cours d'une autre itération du procédé de la [Fig.3], ce spectre étant fonction de la variable complexe p .

[0031] La figure 9b représente les deux courbes de la figure 5 ainsi qu'une courbe formée par une autre spectre de corrélation S_{pp} calculé au cours d'une autre itération du procédé de la [Fig.3].

[0032] Sur l'ensemble des figures, les éléments similaires portent des références identiques.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0033] En référence à la [Fig.1], un système 1 comprend un réseau d'antennes 2, une pluralité de voies 3 et un dispositif 4 d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique au réseau d'antennes 2.

[0034] Le réseau d'antennes 2 comprend une pluralité d'éléments antennaires radio A1-A4 (quatre éléments antennaires dans l'exemple non limitatif illustré). Le nombre d'antennes est quelconque.

[0035] Chaque élément antenne du réseau d'antennes 2 est relié au dispositif d'estimation par une des voies faisant partie de la pluralité de voies 3. Chaque voie peut comprendre des composants connus de l'homme du métier qui appliquent des traitements à des signaux acquis par l'élément antenne correspondant. Ces composants comprennent typiquement un bloc d'entrée RF (RF front end en anglais), et un convertisseur analogique numérique-analogique en aval du bloc d'entrée RF. On a représenté sur la [Fig.1] sur chaque voie un bloc d'entrée RF, ces blocs étant désignés par les références RF1 à RF4.

[0036] Le dispositif d'estimation est agencé pour recevoir des signaux ayant transité par la pluralité de voies 3.

[0037] Le dispositif 4 d'estimation comprend au moins un processeur 6 et une mémoire 8.

- [0038] Le ou chaque processeur 6 est configuré pour exécuter un programme d'estimation de direction d'arrivée, comprend des instructions de code. Lors de cette exécution, le processeur met en œuvre un procédé d'estimation de direction d'arrivée qui sera décrit plus loin.
- [0039] La mémoire 8 est lisible par le ou chaque processeur, et stocke le programme d'estimation de direction d'arrivée.
- [0040] Sont par ailleurs stockées dans la mémoire une première table de référence A_V , et une deuxième table de référence A_H .
- [0041] La première table de référence A_V comprend des réponses normalisées du réseau d'antennes 2 à une première onde électromagnétique de référence polarisée dans une première direction de polarisation, les réponses étant respectivement associées à différentes directions d'arrivée de la première onde électromagnétique de référence.
- [0042] Dans la présente divulgation, une direction d'arrivée se réfère implicitement à une orientation dans l'espace, c'est-à-dire des données angulaires. Par exemple, une direction d'arrivée peut se caractériser par un angle d'azimut et un angle d'élévation.
- [0043] La première table de référence A_V est obtenue par un procédé de calibration comprenant les étapes suivantes. Un émetteur est placé à une certaine distance du réseau d'antennes 2, dans une position prédéterminée. L'émetteur émet la première onde électromagnétique de référence discutée précédemment, c'est-à-dire une onde polarisée dans la première direction de polarisation. Cette onde est reçue par le réseau d'antennes 2 selon une certaine direction d'arrivée. Des signaux sont acquis par le réseau d'antennes 2 sur la base de cette onde, et ces signaux sont traités de sorte à obtenir un vecteur constituant une réponse normalisée du réseau d'antennes 2 à la première onde de référence, ce vecteur étant associé à la direction d'arrivée de l'onde. Ensuite, l'émetteur est placé dans une nouvelle position, par rotation de l'émetteur autour du réseau d'antennes 2 selon un certain pas angulaire. Les étapes qui précèdent sont répétées alors que l'émetteur est dans cette nouvelle position de sorte à obtenir un nouveau vecteur associé à une nouvelle direction d'arrivée de la première onde de référence. En répétant ces étapes pour différentes positions de l'émetteur autour du réseau d'antennes 2, on obtient une pluralité de vecteurs qui forment la table de référence A_V .
- [0044] Similairement, la deuxième table de référence A_H comprend des réponses normalisées du réseau d'antennes 2 à une deuxième onde électromagnétique de référence polarisée dans une deuxième direction de polarisation, les réponses étant respectivement associées à différentes directions d'arrivée de la deuxième onde électromagnétique de référence.
- [0045] La deuxième onde électromagnétique de référence diffère de la première onde électromagnétique de référence. En effet, la deuxième direction de polarisation est

différente de la première direction de polarisation. En outre, la deuxième onde de référence peut présenter une polarisation d'inclinaison et/ou d'ellipticité différente de la première onde électromagnétique de référence.

- [0046] La deuxième table de référence A_H est obtenu au moyen du même procédé de calibration que celui utilisé pour obtenir la première table de référence A_V , à ceci près que l'onde de référence émise par l'émetteur est polarisée dans la deuxième direction, et non dans la première direction.
- [0047] Dans ce qui suit, on supposera que la deuxième direction de polarisation est perpendiculaire à la première direction de polarisation, étant entendu qu'il s'agit d'un exemple non limitatif. Dans ce qui suit, la première direction de polarisation sera appelée « direction verticale », et la deuxième direction de polarisation sera appelée « direction horizontale ».
- [0048] Le système 1 peut avantageusement être utilisé pour recevoir des signaux émanant de satellites de positionnement (GNSS). Dans cette application particulière, estimer la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique est utile pour détecter des brouillages ou des leurrage.
- [0049] Le système 1 peut typiquement être embarqué dans un porteur mobile, tel qu'un aéronef.
- [0050] On va maintenant décrire un procédé mis en œuvre par le système 1 en relation avec la [Fig.2]. Ce procédé comprend les étapes suivantes.
- [0051] Dans une étape d'acquisition 100, le réseau d'antennes 2 reçoit une au moins une onde électromagnétique s'étant propagée dans une certaine direction, cette onde transportant un signal utile. Par convention, on appelle direction d'arrivée d'une onde la direction de propagation d'une telle onde au moment où l'onde parvient au réseau d'antennes 2. Cette direction d'arrivée n'est pas connue *a priori* par le système 1.
- [0052] Chaque onde électromagnétique reçue par le réseau d'antennes 2 est polarisée dans une certaine direction, appelée dans la suite direction de polarisation. Cette direction de polarisation n'est pas connue *a priori*, mais peut être exprimée sous la forme d'un vecteur de polarisation P , appelé vecteur de Jones dans la littérature. Le vecteur de polarisation P comprend une composante de polarisation dans la première direction P_1 (composante verticale) et une composante P_2 dans la deuxième direction (composante horizontale). Ainsi, la détermination de ces deux composantes P_1 , P_2 permettrait de connaître la direction de polarisation de l'onde électromagnétique.
- [0053] Une onde électromagnétique peut par exemple avoir été émise par un satellite de positionnement faisant partie d'une constellation de satellites GNSS (GPS, GALILEO, GLONASS, etc.).
- [0054] Le réseau d'antennes 2 produit des signaux analogiques issus de l'onde électromagnétique. Plus précisément, chaque élément antenne du réseau d'antennes 2 produit

un signal électrique analogique sur la base de l'onde l'électromagnétique reçue.

[0055] Dans une étape de prétraitement 102, les N signaux analogiques sont traités par les voies 3. En particulier, les N signaux analogiques sont convertis en N signaux numériques, chaque signal numérique comprenant T échantillons.

[0056] Les signaux analogiques forment une matrice d'acquisition X comprenant N lignes et T colonnes. Cette matrice d'acquisition X contient un signal utile S bruité. La matrice d'acquisition X peut se décomposer comme suit :

$$[0057] \quad X = AS + B$$

[0058] où A est une matrice représentative de la réponse du système 1 (en particulier la réponse du réseau d'antennes 2 et de la pluralité de voies 3), et où B est un bruit.

[0059] Dans une étape 104, le dispositif d'estimation 4 met en œuvre un procédé estimant la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue par le réseau d'antennes 2. En référence à la [Fig.3], ce procédé d'estimation 104 comprend les étapes suivantes.

[0060] Dans une étape 202, le dispositif d'estimation 4 calcule une estimée $\hat{R}_{xx}$ de la matrice de covariance des signaux numériques. Pour cela, le dispositif d'estimation 4 applique le calcul suivant :

$$[0061] \quad \hat{R}_{xx} = \frac{1}{T} XX^H$$

[0062] Ici, l'opérateur H désigne la transposition d'une matrice et la conjugaison des valeurs de cette matrice transposée (opérateur « transposé-conjugué »).

[0063] Dans une étape 204, le dispositif d'estimation 4 calcule au moins un vecteur propre normalisé E_{norm} de la matrice de covariance, le vecteur propre étant associé à une valeur propre de la matrice de covariance.

[0064] Lorsqu'une seule onde a été reçue par le réseau d'antennes 2 lors de l'étape d'acquisition 100, un seul vecteur E_{norm} est calculée à l'étape 204.

[0065] Dans ce cas, le vecteur E_{norm} peut être obtenu en exploitant et en normalisant une colonne de la matrice de covariance, par exemple sa première colonne. Dans ce cas, le dispositif d'estimation 4 effectue les calculs suivants :

$$[0066] \quad E = \hat{R}_{xx}(:, 1)$$

$$[0067] \quad E_{norm} = \frac{E}{\sqrt{E^H E}}$$

[0068] Lorsque plusieurs ondes ont été reçues simultanément par le réseau d'antennes 2 lors de l'étape d'acquisition 100, un ou plusieurs vecteurs E_{norm} peuvent être calculée à l'étape 204, chaque vecteur calculé étant associé à une onde électromagnétique reçue.

[0069] Dans ce cas, les différents vecteurs E_{norm} sont calculés à l'étape 204 de la manière suivante.

[0070] Le dispositif d'estimation 4 décompose l'estimée de la matrice de covariance $\hat{R}_{xx}$ en valeurs singulières (cette décomposition étant généralement abrégée dans la littérature

en SVD, pour « singular value decomposition »). Les propriétés de $\hat{R}_{xx}$ sont telles que :

[0071] $\hat{R}_{xx} = U \Sigma V^H$

[0072] ou :

- [0073] • U désigne la matrice contenant les vecteurs propres dits « gauches »
 • Σ désigne la matrice contenant les valeurs propres
 • V^H désigne la matrice contenant les vecteurs propres dits « droits »

[0074] L'analyse des valeurs propres contenues sur la diagonale de la matrice Σ permet de décider combien de vecteurs propres (vecteurs colonnes de la matrice U) peuvent être affectés à un vecteur E_{norm} . Cette étape d'analyse s'appelle le « dénombrement ». Pour toute valeur propre $\Sigma(N,N)$ supérieure à un seuil, le vecteur propre associé $U(:,N)$ est associé à un vecteur E_{norm} (l'étape de normalisation est naturelle lors de la décomposition en valeurs singulières). La **figure 4** illustre un exemple de dénombrement dans lequel on a quatre valeurs propres. Dans cet exemple, seul le premier vecteur propre est affecté à un vecteur E_{norm} , soit :

[0075] $E_{norm} = U(:, 1)$

[0076] Dans la suite, sont détaillés des traitements qui sont appliqués à un vecteur E_{norm} calculé à l'étape 204. Il est entendu que ces traitements peuvent être répétés pour chaque vecteur E_{norm} calculé à l'étape 204, s'il y en a plusieurs.

[0077] Dans une étape de corrélation 205, le dispositif corrèle le vecteur E_{norm} avec la première table de référence A_V de sorte à produire un premier spectre de corrélation S_{PV} comprenant des indices de corrélation respectivement associés à différentes directions d'arrivée.

[0078] Dans une étape de corrélation 206, le dispositif d'estimation 4 corrèle le vecteur E_{norm} avec la deuxième table de référence A_H de sorte à produire un deuxième spectre de corrélation S_{PH} comprenant des indices de corrélation respectivement associés à différentes directions d'arrivée.

[0079] Ces corrélations 205, 206 peuvent être réalisées via les calculs suivants :

[0080] $S_{PV} = \left(\text{abs}(A_V^H E_{norm}) \right)^2$

[0081] $S_{PH} = \left(\text{abs}(A_H^H E_{norm}) \right)^2$

[0082] Dans ces expressions, « abs » désigne une valeur absolue.

[0083] Les corrélations 205, 206 peuvent être mises en œuvre en parallèle ou séquentiellement.

[0084] Sont illustrées en **figure 5** deux courbes représentatives d'exemples de spectres S_{PV} et S_{PH} obtenus à partir d'une onde électromagnétique de référence dont la direction d'arrivée était connue à l'avance. Les indices de corrélations sont en ordonnée, et les directions d'arrivée associées sont exprimées en abscisse comme des angles en degrés.

On constate que les courbes représentatives des spectres S_{PV} et S_{PH} présentent des maxima assez proches de la vraie direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue par le réseau d'antennes 2 à l'étape d'acquisition. Toutefois, ces deux maxima sont différents, et ne correspondent pas précisément à la vraie direction d'arrivée de cette onde.

- [0085] Le but des étapes suivantes du procédé est justement d'estimer de manière précise la vraie direction d'arrivée, à partir des deux spectres de corrélations S_{PV} et S_{PH} .
- [0086] Dans une étape 207, le dispositif d'estimation 4 identifie l'indice de corrélation maximal du premier spectre de corrélation.
- [0087] Dans une étape 208, le dispositif d'estimation 4 identifie l'indice de corrélation maximal du deuxième spectre de corrélation.
- [0088] Dans une étape 210, le dispositif d'estimation 4 sélectionne une direction d'arrivée associée à un indice de corrélation maximal du premier spectre de corrélation ou du deuxième spectre de corrélation.
- [0089] Avantagusement, au cours de l'étape 210, le dispositif d'estimation 4 compare l'indice de corrélation maximal du spectre S_{PV} avec l'indice de corrélation maximal du spectre S_{PH} , et sélectionne le plus grand des deux. La direction sélectionnée est celle associée au plus grand des deux maxima. Cette sélection particulière permet de converger plus rapidement vers une estimation précise de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue.
- [0090] Dans une étape 212, le dispositif d'estimation 4 recherche une estimée plus précise de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue par le réseau d'antenne.
- [0091] En référence à la [Fig.6], cette recherche 212 comprend une étape d'initialisation 300.
- [0092] Lors de l'étape d'initialisation 300, le dispositif d'estimation 4 initialise une variable DOA destinée à contenir une estimée de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue. Cette variable DOA est initialisée à l'aide de la direction d'arrivée sélectionnée lors de l'étape 210.
- [0093] Par ailleurs, à l'étape d'initialisation 300, le dispositif d'estimation 4 initialise un vecteur de polarisation $P = [p_1 \ p_2]$ de l'onde. Plus précisément, la composante en polarisation verticale P_1 et la composante en polarisation horizontale P_2 de ce vecteur P sont initialisées à des valeurs initiales. A ce stade, on ne connaît pas la polarisation de l'onde électromagnétique reçue ; les valeurs initiales du vecteur de polarisation P de cette onde ne reflètent donc pas la réalité.
- [0094] La recherche 212 comprend, après l'initialisation 300, une boucle itérative. Comme on le verra par la suite, cette boucle itérative fournit non seulement une estimée précise de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue par le réseau d'antenne, mais fournit également une estimation précise de la direction de la polarisation de cette

onde.

- [0095] De manière générale, une itération de la boucle prend en entrée la variable DOA et le vecteur de polarisation P.
- [0096] En particulier, la première itération de la boucle itérative prend en entrée la direction d'arrivée sélectionnée précédemment à l'étape 210 (et qui, comme on l'a vu, demande à être affinée) et le vecteur de polarisation P tel qu'initialisé (et qui ne constitue donc pas une bonne estimation de la direction de polarisation de l'onde électromagnétique reçue).
- [0097] La première itération (itération d'indice 1) comprend les étapes suivantes.
- [0098] Dans une étape 302, le dispositif d'estimation 4 crée un espace de recherche pour une variable complexe p. Cet espace de recherche inclut la valeur initiale de la composante P2 (considérée comme un nombre complexe) qui a été obtenue à l'issue de l'initialisation 300.
- [0099] Avantagusement, l'espace de recherche forme une spirale dans le plan complexe, comme dans l'exemple de la [Fig.7]. Autrement dit, l'espace de recherche comprend une pluralité de valeurs pour la variable complexe p, cette pluralité de valeurs pouvant être représentée comme une pluralité de points qui se trouvent sur une telle spirale (la partie réelle d'une valeur est en abscisse et la partie imaginaire de cette valeur est en ordonnée dans le plan complexe).
- [0100] La spirale est caractérisée par deux paramètres : une plage d'angles de parcours de la spirale (paramètre variable qui va influencer sur le nombre de tours parcourus par la spirale), et un coefficient de normalisation de la taille de la spirale (paramètre fixe). Le rayon maximal de p est de 1.
- [0101] Dans une étape 304, le dispositif d'estimation 4 construit ensuite une table de recherche en polarisation.
- [0102] Pour construire cette table de recherche en polarisation à l'étape 304, le dispositif d'estimation 4 détermine une première réponse normalisée du réseau d'antennes 2 à la première onde électromagnétique de référence (polarisée verticalement), la première réponse normalisée étant associée, dans la première table de référence A_V , à la direction d'arrivée contenue dans la variable DOA (cette direction d'arrivée étant celle ayant été sélectionnée avant la boucle itérative dans le cas de la première itération de la boucle).
- [0103] On a vu précédemment que la première table de référence A_V comprend des réponses normalisées du réseau d'antennes 2 à la première onde électromagnétique de référence (polarisée verticalement), ces réponses normalisées étant associées à différentes directions d'arrivée de la première onde électromagnétique de référence. La première réponse normalisée est le vecteur qui est associé spécifiquement à la direction d'arrivée ayant été sélectionnée auparavant. Cette première réponse peut constituer une colonne

de la première table de référence A_V , ou bien être calculée sur la base du contenu de cette table. En quelque sorte, la première table de référence A_V peut être vue comme une fonction $Table1()$ qui indique comme évolue une réponse normalisée en fonction d'une direction d'arrivée. C'est pourquoi on note la première réponse normalisée $Table1(DOA)$.

- [0104] Par ailleurs, pour construire la table de recherche en polarisation à l'étape 304, le dispositif d'estimation 4 détermine deuxième réponse normalisée du réseau d'antennes 2 à la deuxième onde électromagnétique de référence, la deuxième réponse normalisée étant associée dans la deuxième table de référence A_H à la direction d'arrivée contenue dans la variable DOA. On note cette deuxième réponse normalisée $Table2(DOA)$.
- [0105] La table de recherche en polarisation est calculée à partir de la première réponse normalisée $Table1(DOA)$, de la deuxième réponse normalisée $Table2(DOA)$, du paramètre R, et de la variable complexe p.
- [0106] Plus précisément, la table de recherche en polarisation résulte du calcul suivant mis en œuvre par le dispositif d'estimation 4, pour chaque valeur de la variable complexe p faisant partie de l'espace de recherche créé à l'étape 302 :
- [0107] $P1 * Table1(DOA) + R * p * |P2| * Table2(DOA)$
- [0108] Dans cette équation, l'étoile * désigne une multiplication, $|P2|$ désigne le module de P2, considéré être un nombre complexe, et R désigne un coefficient de dilatation de la spirale discutée précédemment. R vaut 1 à la première mise en œuvre de l'étape 304.
- [0109] Dans une étape de corrélation 306, le dispositif d'estimation 4 corrèle le vecteur propre normalisé E_{norm} avec la table de recherche en polarisation ainsi construite, de sorte à obtenir un spectre de corrélation S_P comprenant des indices de corrélation associés à différentes valeurs complexes de la variable p. Ce spectre de corrélation S_p , dont un exemple est représenté en **figure 8a**, n'est pas de même nature que les spectres S_{PV} et S_{PH} , car il représente une corrélation en fonction d'une variable p de polarisation, et non en fonction d'une direction d'arrivée.
- [0110] Dans une étape 308, le dispositif d'estimation 4 identifie un indice de corrélation maximal du spectre de corrélation S_p , ainsi que la valeur complexe p2 associée.
- [0111] Dans une étape d'ajustement 310, le dispositif d'estimation 4 ajuste le vecteur P de la manière suivante : la composante P2 est ajustée à la valeur complexe p2 associée à l'indice de corrélation maximal du spectre de corrélation S_p , puis le vecteur ainsi obtenu est normalisé. Au cours de cette normalisation, les composante P1 et P2 sont ajustées de telle sorte que la norme du vecteur soit égale à 1.
- [0112] Le vecteur P ainsi obtenu après cette étape d'ajustement 310 constitue une estimée plus précise (c'est-à-dire plus proche de la véritable direction de polarisation de l'onde électromagnétique reçue) que le vecteur P avant son ajustement.

- [0113] Dans une étape de construction 312, le dispositif d'estimation 4 construit une troisième table de référence A_P par combinaison linéaire de la première table de référence A_V et de la deuxième table de référence A_H avec respectivement la composante P1 et la composante P2, après que le vecteur de polarisation P a été ajusté à l'étape 310.
- [0114] Cette combinaison linéaire s'exprime ainsi :
- [0115] $A_P = P1 * A_V + P2 * A_H$
- [0116] ou, si l'on reprend les notations Table1 et Table2 pour désigner les deux tables de référence précitées :
- [0117] $A_P = P1 * Table1 + P2 * Table2$
- [0118] Comme cela sera illustré dans la suite, la table A_P résultant de cette combinaison linéaire constitue une base plus fiable que les tables de références A_V et A_H , pour estimer de manière plus précise la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue.
- [0119] Dans une étape de corrélation 314, le dispositif d'estimation 4 corrèle le vecteur propre normalisé E_{norm} avec la table de référence A_P de sorte à produire un spectre de corrélation S_{PP} comprenant des indices de corrélation associés à différentes directions d'arrivée. Cette étape de corrélation 316 est similaire aux étapes 205 et 206.
- [0120] Sont illustrées en **figure 8b** les courbes représentatives des spectres S_{PV} et S_{PH} de la figure 4 superposées avec une courbe représentative du spectre de corrélation S_{PP} calculée au cours de la première mise en œuvre de l'étape 314. On constate que la courbe représentative du spectre S_{PP} présente un maximum beaucoup plus proche de la vraie direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue par le réseau d'antennes 2 que les maxima des spectres S_{PV} et S_{PH} .
- [0121] Dans une étape 316, le dispositif d'estimation 4 identifie un indice de corrélation maximal du spectre de corrélation S_{PP} . La variable DOA est ajustée à la direction d'arrivée associée à cet indice maximal.
- [0122] La direction d'arrivée associée à l'indice de corrélation maximal du spectre de corrélation S_{PP} constitue une nouvelle estimation de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue, affinée par rapport à la direction d'arrivée sélectionnée dans l'une des spectres S_{PV} et S_{PH} à l'étape 210.
- [0123] Dans une étape 318, le dispositif d'estimation 4 compare la variable DOA mise à jour avec un seuil prédéfini.
- [0124] Si la variable DOA mise à jour (contenant l'indice de corrélation maximal du spectre de corrélation S_{PP}) s'avère supérieure au seuil, alors la boucle itérative est terminée. Dans ce cas, il est en effet considéré que le maximum du spectre de corrélation S_{PP} identifié à l'étape 318 constitue une estimée suffisamment précise de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue.

- [0125] Si au contraire la variable DOA mise à jour (contenant l'indice de corrélation maximal du spectre de corrélation S_{PP}) n'est pas supérieure au seuil, alors une nouvelle itération de la boucle itérative est mise en œuvre (itération d'indice 1).
- [0126] L'itération d'indice 1 prend en entrée la variable DOA et le vecteur de polarisation P tels qu'ajustés au cours de la première itération. Dans cette nouvelle itération, les étapes 302, 304, 306, 308, 310, 312, 314, 316 et 318 sont à nouveau mise en œuvre, comme dans l'itération précédente.
- [0127] Un nouvel espace de recherche est créé lors de la nouvelle la mise en œuvre de l'étape 302, par mise à jour de l'espace de recherche précédemment créé. Ce nouvel espace de recherche inclut la composante P_2 (considérée comme un nombre complexe) qui a été obtenue à l'issue de la précédente mise en œuvre de l'étape 310.
- [0128] De préférence, le nouvel espace de recherche forme une nouvelle spirale passant par le point P_2 dans le plan complexe, la nouvelle spirale étant dilatée par rapport à la précédente spirale. Par « dilatée », on entend que la distance radiale entre deux spires successives de la nouvelle spirale est supérieure à la distance radiale entre deux spires successives de la précédente spirale. Cette dilatation peut être caractérisée par un coefficient de dilatation $R > 1$. C'est cette nouvelle valeur de R qui est utilisée ensuite lors du calcul d'une nouvelle table de recherche en polarisation, au cours de l'étape 304.
- [0129] La figure **9a** illustré un nouveau spectre de corrélation S_P obtenue lors d'une itération d'indice 8, tandis que la figure **9b** illustre les spectres S_{PV} et S_{PH} obtenues lors de cette itération d'indice 8. Il s'agit de la dernière itération dans cet exemple de réalisation (itération au cours de laquelle le seuil prédéfini est atteint à l'étape 318. On constate qu'à l'issue de cette itération d'indice 8 le maximum du spectre de corrélation S_{PP} est extrêmement proche de la vraie direction d'arrivée de l'onde, signe de la très grande précision du procédé mis en œuvre.
- [0130] Un avantage du procédé décrit précédemment est qu'il permet non seulement d'obtenir une estimée plus précise pour la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique au niveau du réseau d'antenne, mais il permet d'obtenir au passage d'obtenir une estimée de la direction de polarisation de l'onde électromagnétique.
- [0131] Le procédé tel que décrit précédemment peut toutefois faire l'objet de variantes. Bien que cela est très avantageux, la mise en œuvre d'une boucle itérative n'est pas strictement nécessaire. Une mise en œuvre des étapes faisant partie d'une itération de la boucle présentée précédemment peut suffire pour obtenir une estimée affinée de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique reçue.
- [0132] Par ailleurs, dans le procédé tel que décrit précédemment, les tables de référence A_V et A_H sont mises à contribution pour affiner les valeurs des composantes P_1 et P_2 du vecteur de polarisation, ce qui est très avantageux. Toutefois, il est parfaitement

possible de calculer la table de référence A_p sur la base de composantes P1 et P2 estimées d'une autre manière.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé d'estimation de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes (2) mis en œuvre par ordinateur, le procédé comprenant des étapes de :

- estimation (202) d'une matrice de covariance de signaux acquis par le réseau d'antennes (2), les signaux étant issus de l'onde électromagnétique,
- calcul (204) d'un vecteur propre normalisé (E_{norm}) de la matrice de covariance, le vecteur propre étant associé à une valeur propre de la matrice de covariance,
- corrélation (205) du vecteur propre normalisé (E_{norm}) avec une première table de référence (A_V) de sorte à produire un premier spectre de corrélation (S_{PV}) comprenant des indices de corrélation respectivement associés à différentes directions d'arrivée, la première table de référence (A_V) comprenant des réponses normalisées du réseau d'antennes (2) à une première onde électromagnétique de référence polarisée dans une première direction respectivement associées à différentes directions d'arrivée de la première onde électromagnétique de référence,
- corrélation (206) du vecteur propre normalisé (E_{norm}) avec une deuxième table de référence (A_H) de sorte à produire un deuxième spectre de corrélation (S_{PH}) comprenant des indices de corrélation respectivement associés à différentes directions d'arrivée, la deuxième table de référence (A_H) comprenant des réponses normalisées du réseau d'antennes (2) à une deuxième onde électromagnétique de référence polarisée dans une deuxième direction respectivement associées à différentes directions d'arrivée de la deuxième onde électromagnétique de référence, la deuxième direction étant différente de la première direction,
- construction (312) d'une troisième table de référence (A_P) par combinaison linéaire de la première table de référence (A_V) et de la deuxième table de référence (A_H) avec respectivement une composante de polarisation (P1) de l'onde électromagnétique dans la première direction et une composante de polarisation (P2) de l'onde électromagnétique dans la deuxième direction,
- corrélation (314) du vecteur propre normalisé (E_{norm}) avec la troisième table de référence (A_P) de sorte à produire un troisième

spectre de corrélation (S_{PP}) comprenant des indices de corrélation associés à différentes directions d'arrivée,

- identification (316) d'une direction d'arrivée associée à un indice de corrélation maximal du troisième spectre de corrélation (S_{PP}).

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre des étapes de :

- sélection (210) d'une direction d'arrivée associée à un indice de corrélation maximal du premier spectre de corrélation (S_{PV}) ou du deuxième spectre de corrélation (S_{PH}),

- construction (304) d'une table de recherche en polarisation à partir d'une première réponse normalisée du réseau d'antennes (2) à la première onde électromagnétique de référence, la première réponse normalisée étant associée dans la première table de référence (A_V) à la direction d'arrivée sélectionnée, et à partir d'une deuxième réponse normalisée du réseau d'antennes (2) à la deuxième onde électromagnétique de référence, la deuxième réponse normalisée étant associée dans la deuxième table de référence (A_H) à la direction d'arrivée sélectionnée,

- corrélation (306) du vecteur propre normalisé (E_{norm}) avec la table de recherche en polarisation, de sorte à obtenir un quatrième spectre de corrélation (S_P) comprenant des indices de corrélation associés à différentes valeurs d'une variable complexe,

- ajustement (310) de la composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la deuxième direction (P2) à une valeur complexe (p2) associée à un indice de corrélation maximal du quatrième spectre de corrélation (S_P), puis normalisation d'un vecteur de polarisation formé par les composantes de polarisation (P1) de l'onde électromagnétique dans la première direction et la composante de polarisation (P2) de l'onde électromagnétique dans la deuxième direction,

la construction (312) de la troisième table de référence (A_P) étant mise en œuvre après la normalisation du vecteur de polarisation.

[Revendication 3]

Procédé selon la revendication 2, dans lequel le premier spectre de corrélation (S_{PV}) comprend un premier indice de corrélation maximal et deuxième spectre de corrélation (S_{PH}) comprend un deuxième indice de corrélation maximal, et dans lequel la direction d'arrivée sélectionnée à l'étape de sélection (210) est :

- une direction d'arrivée associée au premier indice de corrélation maximal dans le premier spectre de corrélation (S_{PV}), lorsque le premier indice de corrélation maximal est supérieur au deuxième indice de cor-

rélation maximal,

- une direction d'arrivée associée au deuxième indice de corrélation maximal dans le deuxième spectre de corrélation (S_{PV}), lorsque le premier indice de corrélation maximal n'est pas supérieur au deuxième indice de corrélation maximal.

[Revendication 4]

Procédé selon l'une des revendications 2 et 3, comprenant la création (302) d'un espace de recherche comprenant différentes valeurs pour la variable complexe, et dans lequel la construction (304) de la table de recherche en polarisation comprend une combinaison linéaire de la première réponse et de la deuxième réponse avec respectivement la composante de polarisation de l'onde électromagnétique dans la première direction et un poids dépendant du module de la deuxième composante de polarisation de l'onde électromagnétique et d'une des différentes valeurs pour la variable complexe, la combinaison linéaire étant répétée pour chacune des différentes valeurs.

[Revendication 5]

Procédé selon la revendication 4, comprenant les étapes de :

- mise à jour de la direction d'arrivée sélectionnée à la valeur de la direction d'arrivée identifiée,
- mise à jour de l'espace de recherche en un nouvel espace de recherche incluant la composante de polarisation (P2) de l'onde électromagnétique dans la deuxième direction du vecteur de polarisation obtenue à l'issue de l'étape de normalisation, puis
- répétition des étapes de sélection (303), construction (304) d'une table de recherche en polarisation, corrélation (306) du vecteur propre normalisé (E_{norm}) la table de recherche en polarisation, ajustement (310), construction (312) d'une troisième table de référence A_P , corrélation (314) du vecteur propre normalisé (E_{norm}) avec la troisième table de référence (A_P), et identification (316) d'une direction d'arrivée.

[Revendication 6]

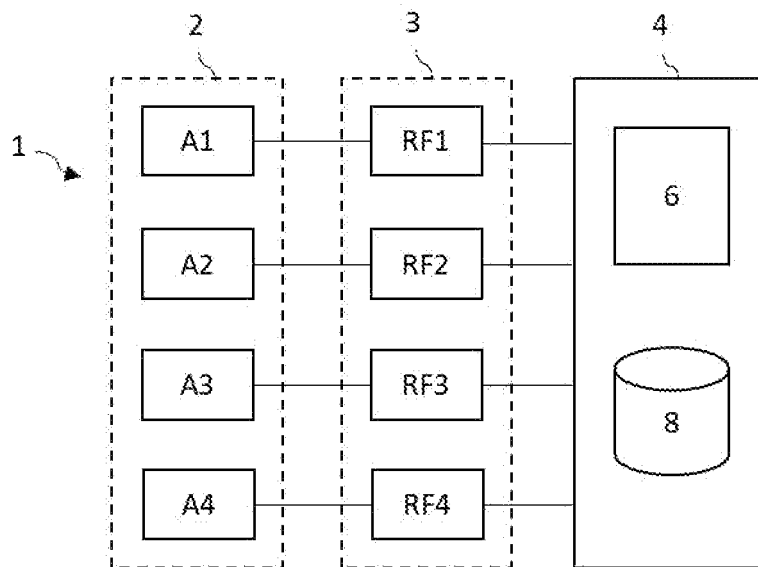
Procédé selon la revendication 5, dans lequel l'espace de recherche forme une spirale dans le plan complexe, et la mise à jour de l'espace de recherche comprend une dilatation de la spirale, de sorte que le nouvel espace de recherche forme une nouvelle spirale dans le plan complexe qui est dilatée par rapport à la spirale.

[Revendication 7]

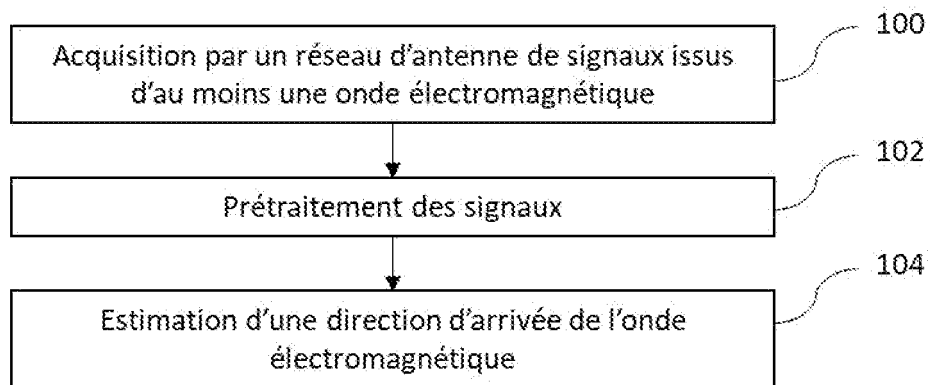
Procédé selon l'une des revendications 5 et 6, comprenant en outre une comparaison entre l'indice de corrélation maximal du troisième spectre de corrélation S_{PP} et un seuil prédéfini, ladite répétition n'étant mise en œuvre que si l'indice de corrélation maximal du troisième spectre de corrélation est inférieur au seuil prédéfini.

- [Revendication 8] Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la première direction et la deuxième direction sont orthogonales.
- [Revendication 9] Mémoire (8) lisible par ordinateur stockant des instructions exécutables par l'ordinateur pour l'exécution des étapes du procédé selon l'une des revendications précédentes.
- [Revendication 10] Dispositif d'estimation (4) de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique à un réseau d'antennes (2), le dispositif d'estimation (4) comprenant au moins un processeur (6) configuré pour mettre en œuvre le procédé selon l'une des revendications 1 à 8.
- [Revendication 11] Système (1) comprenant :
- un réseau d'antennes (2) configuré pour acquérir des signaux issus d'une onde électromagnétique,
- un dispositif d'estimation (4) de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique au réseau d'antennes (2) sur la base des signaux, le dispositif d'estimation (4) étant conforme à la revendication 10.
- [Revendication 12] Porteur mobile, tel qu'un aéronef, comprenant un système (1) selon la revendication 11.

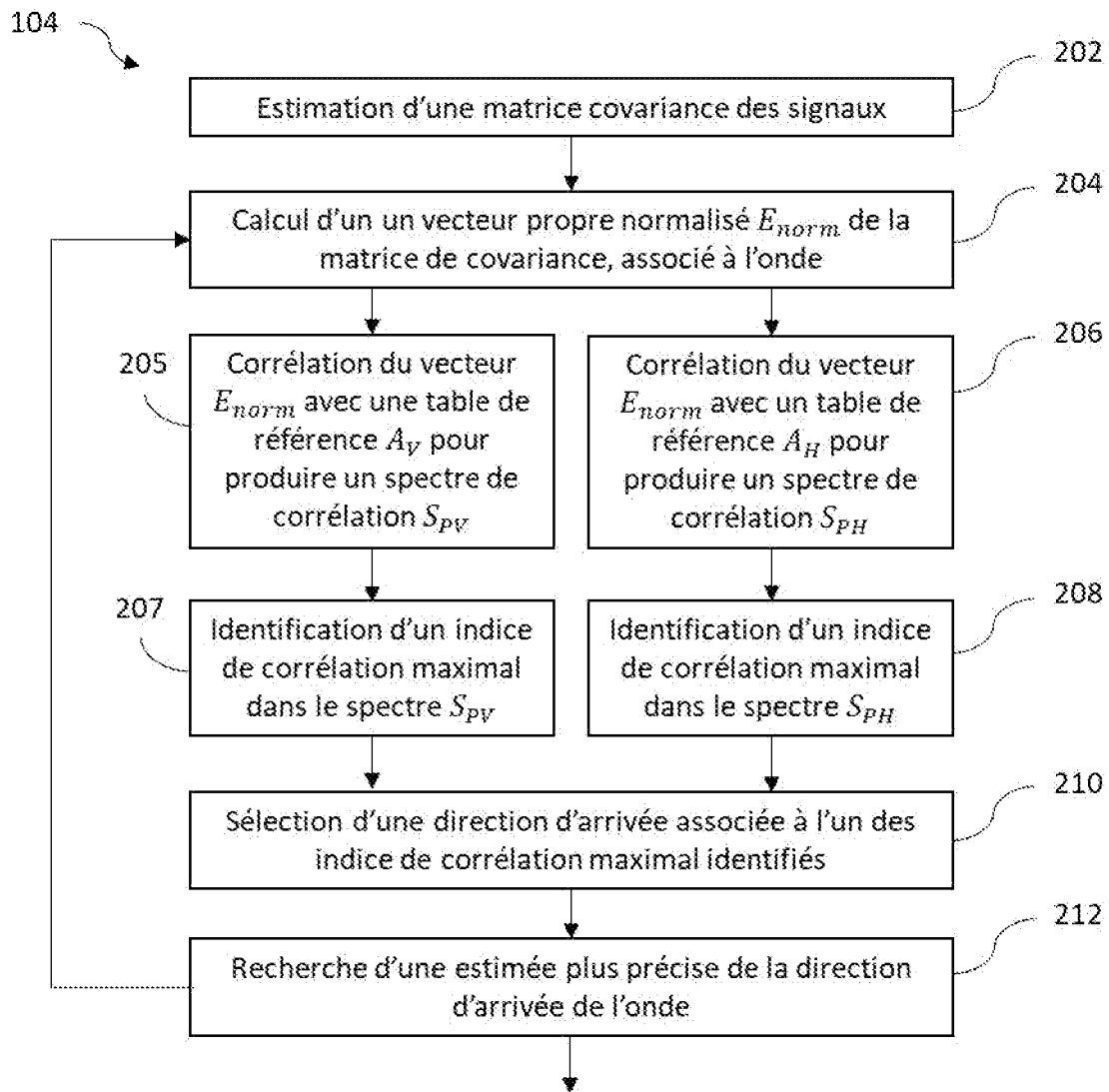
[Fig. 1]



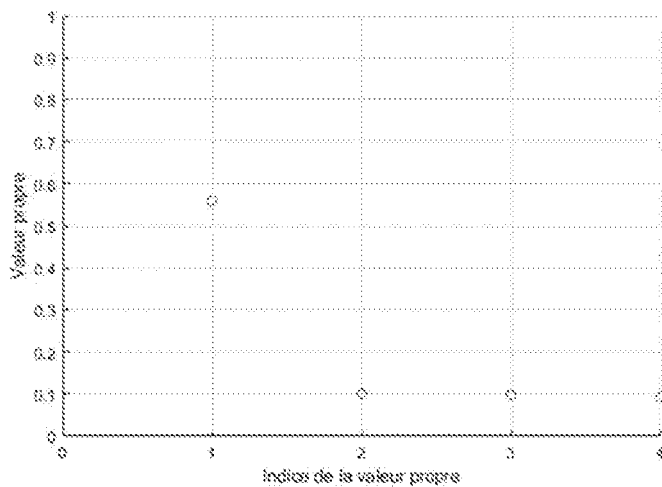
[Fig. 2]



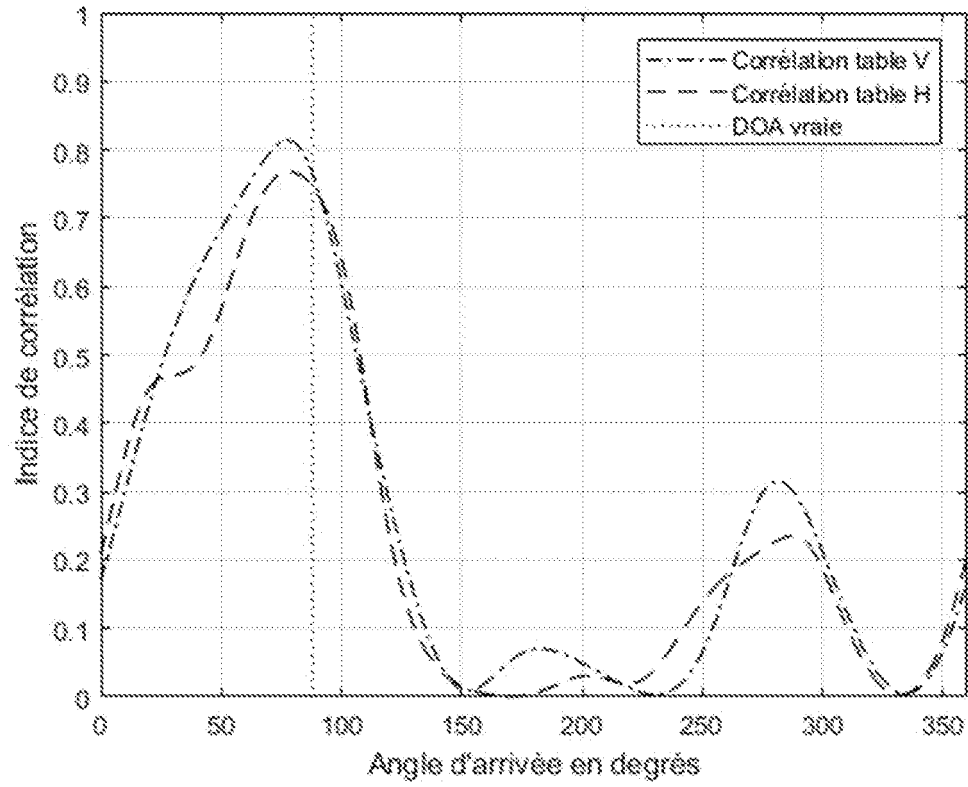
[Fig. 3]



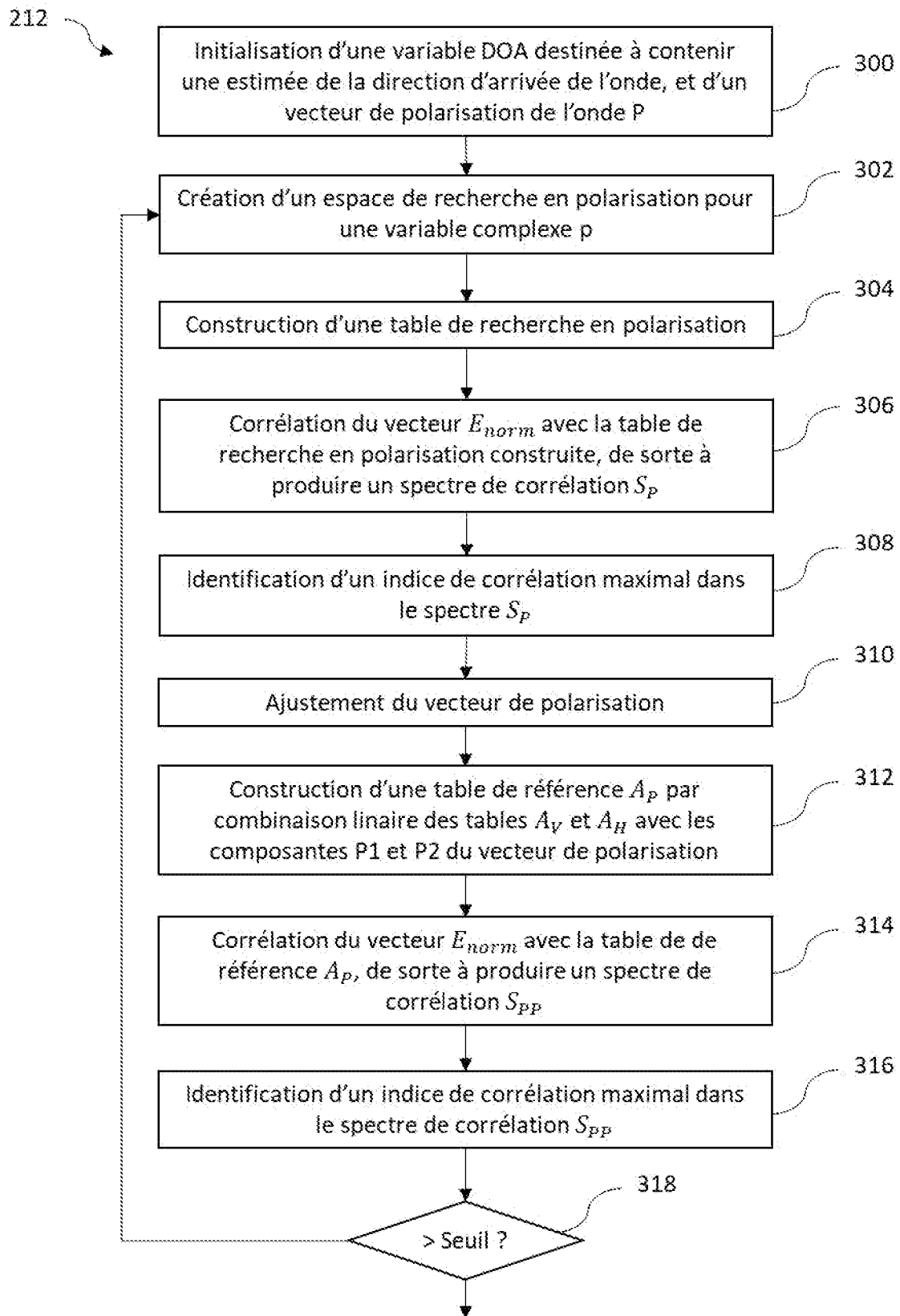
[Fig. 4]



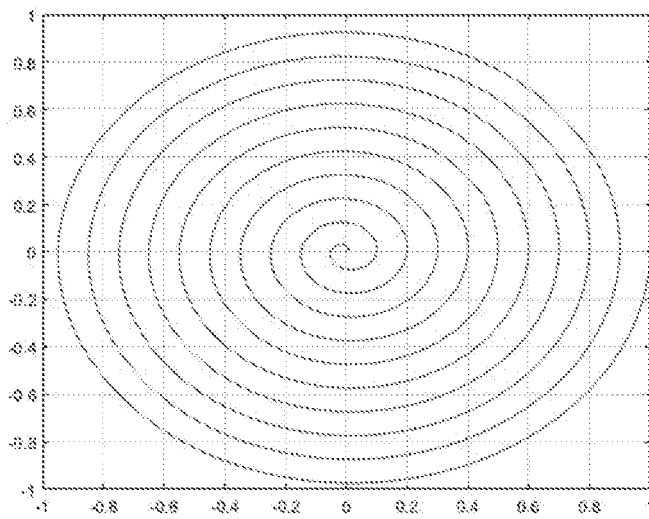
[Fig. 5]



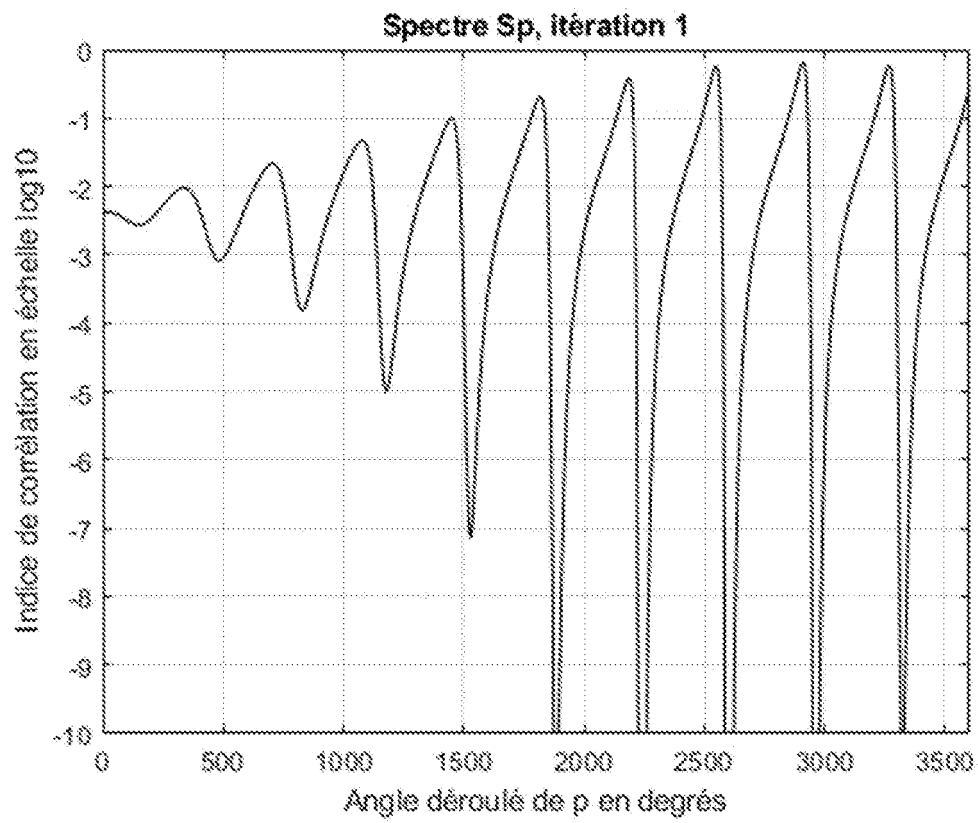
[Fig. 6]



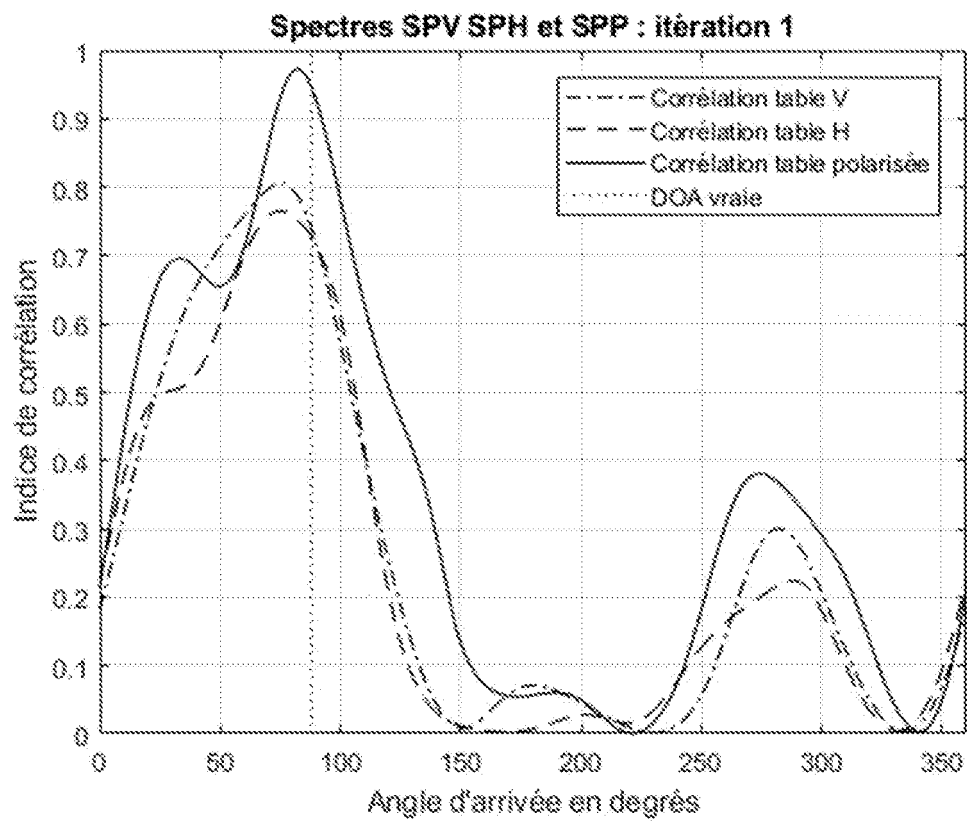
[Fig. 7]



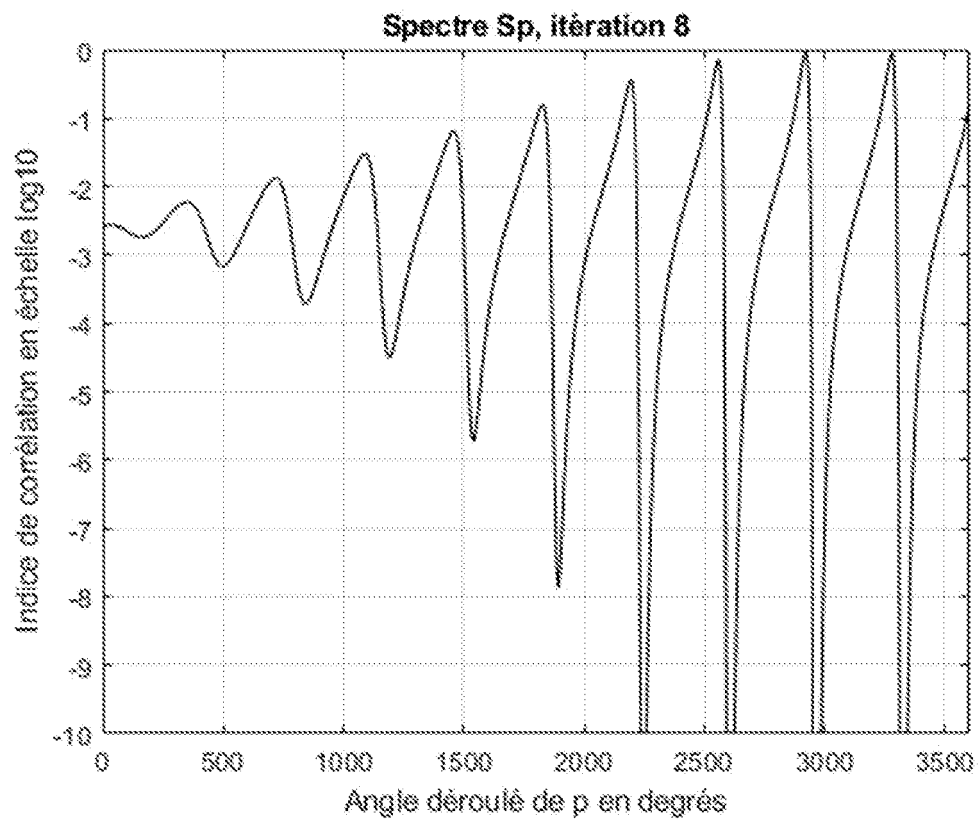
[Fig. 8a]



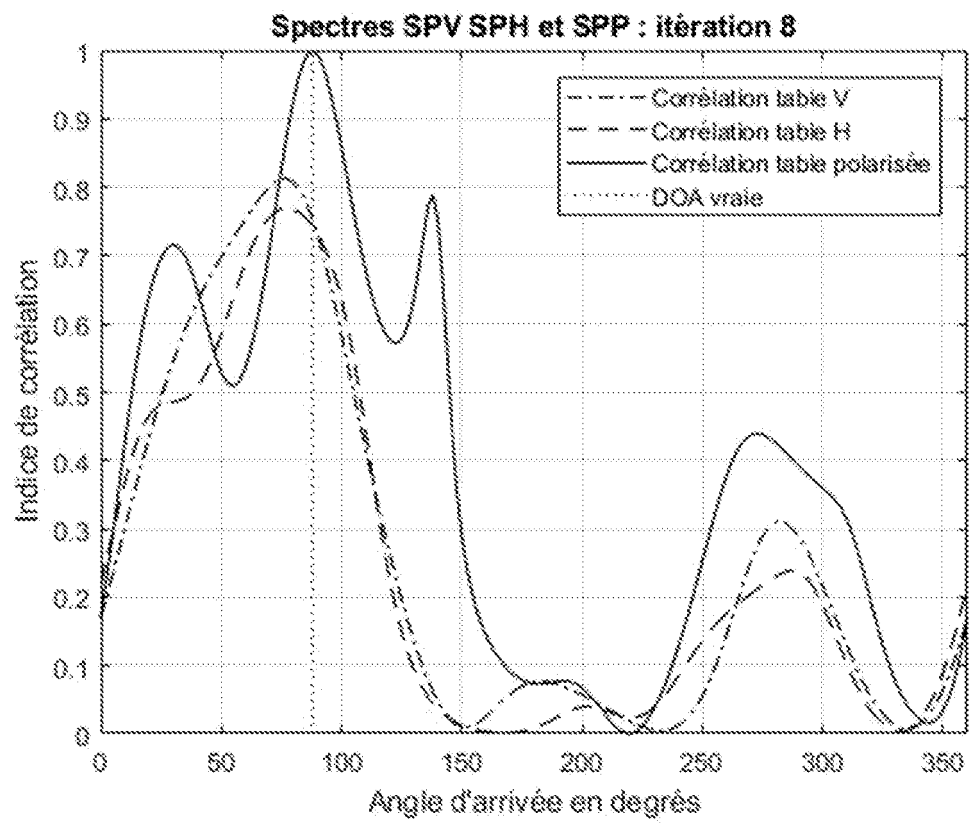
[Fig. 8b]



[Fig. 9a]



[Fig. 9b]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 904346

FR 2113624

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		
X	EP 2 435 847 B1 (THALES SA [FR]) 12 mars 2014 (2014-03-12)	1, 8-12	G01S5/00
A	* alinéa [0003] - alinéa [0010] * * alinéa [0020] - alinéa [0027] * * figures 1-3 * * abrégé *	2-7	
A	US 2012/086605 A1 (LECCA ARNAUD [FR] ET AL) 12 avril 2012 (2012-04-12) * alinéa [0012] - alinéa [0020] * * alinéa [0045] - alinéa [0061] * * figures 1-4 * * abrégé *	1-12	
A	US 7 015 857 B1 (POZGAY JEROME H [US]) 21 mars 2006 (2006-03-21) * colonne 4 - colonne 7 * * figures 1-3 * * abrégé *	1-12	
A	US 10 969 458 B1 (CLYMER RICHARD E [US] ET AL) 6 avril 2021 (2021-04-06) * colonne 7 - colonne 8 * * figures 1-4 * * abrégé *	1-12	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G01S H01Q
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
31 août 2022		Galmiche, Aurélien	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS 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		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	

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2113624 FA 904346**

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 **31-08-2022**
 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
EP 2435847	B1	12-03-2014	EP 2435847 A1	04-04-2012
			FR 2946151 A1	03-12-2010
			WO 2010136409 A1	02-12-2010

US 2012086605	A1	12-04-2012	EP 2344902 A1	20-07-2011
			ES 2592156 T3	28-11-2016
			FR 2938346 A1	14-05-2010
			US 2012086605 A1	12-04-2012
			WO 2010052234 A1	14-05-2010

US 7015857	B1	21-03-2006	AUCUN	

US 10969458	B1	06-04-2021	AUCUN	
