



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
02.10.2019 Bulletin 2019/40

(51) Int Cl.:
H01Q 15/00 (2006.01) H01Q 15/24 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **19165394.8**

(22) Date de dépôt: **27.03.2019**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

• **Centre National de la Recherche Scientifique**
75794 Paris Cedex 16 (FR)

(72) Inventeurs:
• **LEGAY, Hervé**
31830 PLAISANCE DU TOUCH (FR)
• **CALLEAU, Antoine**
35510 CESSON SEVIGNE (FR)
• **GARCIA VIGUERAS, Maria**
35708 RENNES CEDEX 7 (FR)
• **ETTORRE, Mauro**
35069 RENNES Cedex (FR)

(30) Priorité: **29.03.2018 FR 1800260**

(71) Demandeurs:
• **Thales**
92400 Courbevoie (FR)
• **Institut National des Sciences Appliquees (INSA)**
35708 Rennes Cédex 07 (FR)
• **Université de Rennes 1**
35065 Rennes Cedex (FR)

(74) Mandataire: **Priori, Enrico**
Marks & Clerk France
Immeuble "Visium"
22, avenue Aristide Briand
94117 Arcueil Cedex (FR)

(54) **ELEMENT RAYONNANT A POLARISATION CIRCULAIRE METTANT EN UVRE UNE RESONANCE DANS UNE CAVITE DE FABRY PEROT**

(57) Elément rayonnant à polarisation circulaire, comprenant au moins une ouverture d'excitation (OE) d'une onde polarisée linéairement selon une première polarisation dite d'excitation (Ex), une surface sélective en fréquence (S2), une métasurface (S1) comprenant un réseau bidimensionnel et périodique de cellules à métasurface (MS), l'ouverture d'excitation (OE) débouchant sur la métasurface (S1), les cellules à métasurface (MS) étant toutes orientées de façon identique vis-à-vis de la polarisation d'excitation (Ex) et configurées pour :

- réfléchir une onde incidente (E_{ix}) selon la polarisation d'excitation (Ex) pour former une onde réfléchie (Er_{1x}) polarisée selon la polarisation d'excitation (Ex), et
- dépolariser et réfléchir l'onde incidente (E_{ix}) pour former une onde réfléchie (Er_{1y}) polarisée selon la polarisation orthogonale (E_y) avec une différence de phase sensiblement égale à $\pm 90^\circ$ par rapport l'onde réfléchie (Er_{1x}) polarisée selon la polarisation d'excitation (Ex), et avec une amplitude sensiblement égale à l'amplitude d'une onde rayonnée (E'_{tx}) par la surface sélective en fréquence (S2), issue de l'onde réfléchie (Er_{1x}) polarisée selon la polarisation d'excitation (Ex).

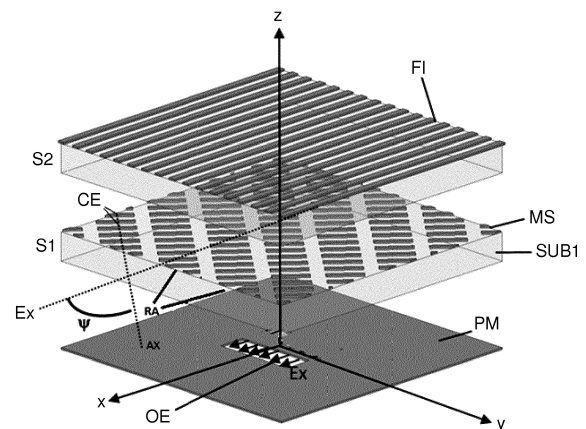


FIG.4

Description

[0001] L'invention porte sur un élément rayonnant à polarisation circulaire, notamment pour une antenne plane, et destiné à être utilisé notamment dans des communications spatiales, à bord de satellites ou dans des terminaux utilisateurs. L'invention se rapporte aussi à une antenne réseau comportant au moins un tel élément rayonnant.

[0002] Différents types d'éléments rayonnants ont récemment été développés, répondant aux contraintes et aux spécificités des communications spatiales.

[0003] Les éléments rayonnants dits « compacts », comme par exemple les antennes à cavités résonantes de Fabry Perot, permettent notamment d'offrir un bon compromis entre plusieurs spécifications : une bonne efficacité de surface sur toute la bande de fonctionnement, une bande passante suffisante en adaptation et en rayonnement, un faible encombrement et une faible masse. L'encombrement est particulièrement critique dans les bandes de fréquences basses L (1 à 2 GHz), S (2 à 4 GHz), C (de 3,4 à 4,2 GHz en réception et de 5,725 et 7,075 GHz en émission) pénalisées par des longueurs d'onde significatives. Aussi, la recherche d'éléments compacts et large bande est particulièrement active pour les antennes multispots, associant un réflecteur et un réseau focal constitué d'un grand nombre de sources. Les antennes à cavités résonantes de Fabry Perot, actuellement utilisées dans les communications spatiales, sont polarisées linéairement. L'obtention d'une polarisation circulaire sur de telles antennes doit être réalisée sans dégrader la compacité de l'élément rayonnant par l'adjonction d'un dispositif permettant d'obtenir un rayonnement en polarisation circulaire.

[0004] Les éléments rayonnants disposant d'ouvertures linéaires rayonnantes continues, comme le sont par exemple les formateurs de faisceaux quasi-optiques, permettent quant à eux de rayonner plusieurs fronts d'ondes plans sur un large secteur angulaire. Elles sont formées d'un guide d'onde à plaques parallèles terminées par un cornet longitudinal, qui réalise la transition entre le guide d'onde à plaques parallèles et l'espace libre. Un dispositif focalisant/collimateur est inséré sur le trajet de propagation des ondes radiofréquences, entre les deux plaques métalliques parallèles, permettant de convertir des fronts d'ondes cylindriques issus des sources en des fronts d'ondes plans. Ces ouvertures linéaires rayonnantes continues fonctionnent sur une très large bande (par exemple à 20 et à 30 GHz), en raison de l'absence de modes de propagation résonants. Elles sont par ailleurs capables de rayonner sur un très vaste secteur angulaire. Toutefois, dans leur fonctionnement nominal, la polarisation de l'onde rayonnée est celle de l'onde qui se propage dans le guide d'onde à plaques parallèles, à savoir linéaire.

[0005] Pour obtenir des largeurs de faisceaux identiques selon les deux plans, il est par ailleurs connu d'élargir l'ouverture linéaire rayonnante continue en utilisant un diviseur à plaques parallèles. Ces réseaux d'ouvertures linéaires rayonnent également en polarisation linéaire, comme chaque ouverture linéaire rayonnante.

[0006] Il y a donc un besoin actuel de trouver des dispositifs capables de convertir une polarisation linéaire en polarisation circulaire, compatibles avec les ouvertures rayonnantes existantes, et pouvant faire par ailleurs fonction d'élément rayonnant à polarisation circulaire.

[0007] Une première solution connue consiste à recouvrir l'élément rayonnant d'un radôme polarisant constitué de plusieurs surfaces sélectives en fréquence (FSS), dont les caractéristiques sont optimisées de sorte à générer une différence de phase de 90° entre les deux polarisations orthogonales, sans perturber le fonctionnement de l'antenne. Des radômes polarisants mettant en cascade des couches quart d'onde présentent des bonnes performances en bande passante et en incidence oblique, avec toutefois une épaisseur (épaisseur de l'ordre d'une longueur d'onde dans le vide) nuisant à la compacité de l'antenne. Des polariseurs fins ont été également développés, mais leurs performances en bande passante et en incidence oblique sont limitées.

[0008] Une solution consistant à combiner un polariseur et une cavité de Fabry Perot, se retrouve dans le document « Self polarizing Fabry-Perot antennas based on polarization twisting element » (S. A. Muhammad, R. Sauleau, G. Valerio, L. L. Coq, and H. Legay, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 3, pp. 1032-1040, Mar. 2). La solution est illustrée par la figure 1. La cavité de Fabry Perot à surfaces sélectives en fréquence rayonne de façon similaire dans deux sous espaces (supérieur et inférieur). Elle est constituée de deux surfaces périodiques partiellement réfléchissantes (FSS1, FSS2) selon une polarisation linéaire E_x , et est excitée selon cette polarisation. Les surfaces périodiques sont transparentes à l'onde E_y . Un plan de masse à inversion de sens de polarisation réfléchit l'onde émise dans le plan inférieur, transforme sa polarisation linéaire (par exemple de E_x à E_y), et renvoie l'onde dans la direction supérieure. Ce plan de masse PM est réalisé au moyen de corrugations COR de profondeur $\lambda/4$, inclinées à 45° par rapport aux grilles constituant les surfaces périodiques partiellement réfléchissantes (FSS1, FSS2). Une distance de $\lambda/8$ (où λ est la longueur d'onde dans l'élément rayonnant) entre le plan de masse PM à inversion de polarisation et la cavité de Fabry Perot à surfaces périodiques partiellement réfléchissantes réalise un retard de phase de 90° sur la composante E_y , nécessaire pour l'obtention de la polarisation circulaire. La cavité étant transparente à la composante E_y , le champ est rayonné dans le sous espace supérieur. Le comportement en fréquence de cette solution est cependant relativement faible bande. En effet, comme l'illustre la figure 4 du document cité, le taux d'ellipticité de l'onde à la sortie du polariseur est à 1 dB sur une bande de fréquence correspondant à environ 2,5% de la fréquence centrale. Ce comportement faible bande est lié d'une part aux corrugations du plan de masse PM, dont la hauteur ($\lambda/4$) est fonction de la longueur d'onde. Il est lié également à l'espacement ($\lambda/8$) entre la surface périodique partiellement réfléchissante inférieure FSS1 et le

plan de masse PM, qui est fonction de la longueur d'onde.

[0009] L'invention vise donc à obtenir un élément rayonnant à polarisation circulaire à partir d'une excitation linéaire, à la fois compact en hauteur et très large bande.

[0010] Un objet de l'invention est donc un élément rayonnant à polarisation circulaire, comprenant :

- au moins une ouverture d'excitation d'une onde polarisée linéairement selon une première polarisation dite d'excitation ;
- une surface sélective en fréquence, partiellement réfléchissante pour la polarisation d'excitation et transparente pour une deuxième polarisation orthogonale à la polarisation d'excitation, dite polarisation orthogonale, et à la direction de propagation de l'onde, et disposée dans un plan défini par la polarisation d'excitation et par la polarisation orthogonale ;

l'élément rayonnant comprenant en outre une métasurface, totalement réfléchissante, faisant face à la surface sélective en fréquence, et comprenant un réseau bidimensionnel et périodique d'éléments planaires conducteurs formant cellules à métasurface,

l'ouverture d'excitation débouchant sur la métasurface,

la surface sélective en fréquence et la métasurface formant une cavité résonante pour la polarisation d'excitation, les cellules à métasurface étant toutes orientées de façon identique vis-à-vis de la polarisation d'excitation et configurées pour :

- réfléchir une onde incidente selon la polarisation d'excitation pour former une onde réfléchie polarisée selon la polarisation d'excitation, et
- dépolariser et réfléchir l'onde incidente pour former une onde réfléchie polarisée selon la polarisation orthogonale avec une différence de phase sensiblement égale à $\pm 90^\circ$ par rapport l'onde réfléchie polarisée selon la polarisation d'excitation, et avec une amplitude sensiblement égale à l'amplitude d'une onde rayonnée par la surface sélective en fréquence, issue de l'onde réfléchie polarisée selon la polarisation d'excitation.

[0011] Avantageusement, la métasurface comprend un plan de masse sur lequel sont disposés un substrat et le réseau de cellules à métasurface agencées en rangées, les centres de chaque cellule à métasurface d'une même rangée étant alignés selon un axe d'alignement, l'axe d'alignement étant orienté d'un angle de rotation (ψ) par rapport à la polarisation d'excitation, l'angle de rotation (ψ) étant déterminé de sorte à obtenir une matrice $[S]$ de type diagonale, où :

$$[S'] = {}^t[R][S][R],$$

$[S]$ étant la matrice de répartition de la métasurface, et $[R]$ une matrice de rotation d'angle ψ .

[0012] Avantageusement, les cellules à métasurfaces d'une même rangée sont couplées par une ligne d'interconnexion à métasurface allongée selon l'axe d'alignement.

[0013] Avantageusement, les rangées sont connectées entre elles par l'intermédiaire des cellules à métasurface, formant avec les lignes d'interconnexion à métasurface un motif de grillage à maille rectangulaire.

[0014] En variante, les cellules à métasurface d'une même rangée sont isolées les unes des autres.

[0015] Avantageusement, les cellules à métasurface d'une même rangée sont toutes espacées périodiquement.

[0016] Avantageusement, toutes les cellules à métasurface de la métasurface ont les mêmes dimensions.

[0017] Avantageusement, la surface sélective en fréquence comprend un réseau de fils métalliques parallèles, espacés périodiquement, et alignés avec la polarisation d'excitation.

[0018] En variante, la surface sélective en fréquence comprend un réseau bidimensionnel de dipôles métalliques agencés de façon périodique.

[0019] Avantageusement, l'ouverture d'excitation comprend au moins une ouverture de guide d'ondes débouchant dans la cavité résonante.

[0020] Avantageusement, l'ouverture d'excitation comprend une alimentation double formée par deux guides d'ondes débouchant de manière symétrique dans la cavité résonante, et connectés à un réseau d'adaptation d'impédance.

[0021] Avantageusement, l'ouverture d'excitation est un cornet d'une ouverture linéaire rayonnante.

[0022] Avantageusement, l'élément rayonnant comprend une pluralité d'ouvertures d'excitation, les ouvertures d'excitation étant formées par un réseau d'ouvertures rayonnantes linéaires.

[0023] Avantageusement, l'élément rayonnant comprend au moins une deuxième cavité mise en cascade sur la surface sélective en fréquence.

[0024] Avantageusement, les cellules à métasurface sont de forme rectangulaire.

[0025] L'invention se rapporte également à une antenne réseau comprenant au moins un élément rayonnant précité.

[0026] D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins annexés donnés à titre d'exemple et qui représentent, respectivement :

- 5 - figure 1, un élément rayonnant à polarisation circulaire de l'état de l'art ;
- figure 2, une représentation schématique, dans le plan yz, de l'élément rayonnant selon l'invention, à partir de la théorie des rayons ;
- figure 3, une vue d'ensemble et une vue détaillée, dans le plan xy, de plusieurs rangées de cellules à métasurface constitutives de la métasurface et isolées l'une de l'autre;
- 10 - figure 4, une vue en perspective des cellules à métasurface isolées l'une de l'autre, illustrant plus particulièrement l'orientation entre l'axe d'alignement des cellules à métasurface par rapport à la polarisation d'excitation ;
- figure 5, une vue d'ensemble et une vue détaillée, dans le plan xy, de plusieurs rangées de cellules à métasurface constitutives de la métasurface et reliées par une ligne d'interconnexion;
- figure 6, une vue en perspective des cellules à métasurface couplées les unes aux autres par une ligne d'interconnexion ;
- 15 - figure 7, une vue en perspective des cellules à métasurface formant un grillage à maille rectangulaire ;
- figure 8, une application de l'élément rayonnant selon l'invention, où l'ouverture d'excitation est un cornet d'ouverture linéaire rayonnante ;
- figure 9, une application de l'élément rayonnant selon l'invention, où les d'ouvertures d'excitation sont des ouvertures linéaires rayonnante mises en réseau ;
- 20 - figures 10A, 10B et 10C, un mode de réalisation dans lequel l'ouverture d'excitation comprend une alimentation double ;
- figures 11A et 11B, des courbes illustrant la directivité et le taux d'ellipticité en fonction de la fréquence, pour plusieurs configurations d'éléments rayonnants.

25

[0027] La figure 2 illustre une représentation schématique, dans le plan yz, de l'élément rayonnant selon l'invention, à partir de la théorie des rayons. L'élément rayonnant comprend une ouverture d'excitation OE, qui débouche sur une métasurface S1. La métasurface S1 comprend un réseau d'éléments planaires conducteurs formant des cellules à métasurface (non représentées sur la figure 1), présentant un certain motif répété périodiquement de façon bidimensionnelle. Les cellules à métasurface ont des dimensions inférieures à la longueur d'onde de fonctionnement de l'élément rayonnant (dimensions dites « sub-lambda »).

30

[0028] Une onde polarisée linéairement selon une première polarisation d'excitation est produite au niveau de l'ouverture d'excitation OE. L'ouverture d'excitation OE est représentée par un guide d'ondes rectangulaire pénétrant dans la métasurface S1 sans dépasser de la métasurface S1, ou en dépassant légèrement de celle-ci. L'onde polarisée linéairement se propage dans la cavité, délimitée par la métasurface S1 et par une surface sélective en fréquence S2, comprenant un agencement de fils métalliques ou de dipôles répartis périodiquement. La métasurface S1 et la surface sélective en fréquence S2 sont espacées l'une de l'autre d'une distance D1. La surface sélective en fréquence S2 est partiellement réfléchissante pour la polarisation d'excitation Ex (également appelée polarisation TE, pour « Transverse Electric ») et transparente pour une deuxième polarisation Ey orthogonale à la polarisation d'excitation Ex, dite polarisation orthogonale (également appelée polarisation TM, pour « Transverse Magnetic »), et à la direction de propagation de l'onde. La surface sélective en fréquence S2 est donc caractérisée respectivement par des coefficients de réflexion et de transmission r_{2x} et t_{2x} . L'onde produite par l'ouverture d'excitation est rayonnée en partie (Etx), et en partie réfléchi. Cette partie réfléchi est appelée onde incidente Eix.

35

40

[0029] La métasurface S1 est totalement réfléchissante. Elle agit en plan de masse, faisant face à la surface sélective en fréquence S2. La métasurface S1 est caractérisée respectivement par les coefficients de réflexion r_{1xx} et r_{1yx} , qui traduisent les composantes de l'onde réfléchi selon les polarisations Ex et Ey pour l'onde incidente Eix.

45

[0030] Une résonance s'établit entre les deux surfaces pour l'onde en polarisation d'excitation Ex, typique des résonateurs de Fabry Perot. L'onde incidente Eix, qui se propage dans la cavité, subit une série de réflexions sur la surface sélective en fréquence S2 et sur la métasurface S1. A chaque réflexion sur la surface sélective en fréquence S2, une partie de l'onde incidente Eix est rayonnée. A chaque réflexion sur la métasurface S1, une partie de l'onde incidente Eix subit une rotation de polarisation, également appelée dépolarisation, produisant l'onde polarisée Er1y selon la polarisation orthogonale Ey. L'amplitude de l'onde polarisée Er1y selon la polarisation orthogonale Ey est déterminée par le coefficient de réflexion r_{1yx} . Une autre partie de l'onde incidente Eix conserve sa polarisation, produisant l'onde polarisée Er1x selon la polarisation d'excitation Ex. L'amplitude de l'onde polarisée Er1x selon la polarisation d'excitation Ex est déterminée par le coefficient de réflexion r_{1xx} . La synthèse d'un rayonnement en polarisation circulaire s'obtient lorsque l'onde rayonnée E'tx par la surface sélective en fréquence S2, et issue de l'onde réfléchi Er1x polarisée selon la polarisation d'excitation Ex, correspond en amplitude à l'onde polarisée Er1y selon la polarisation orthogonale Ey, avec un déphasage de $\pm 90^\circ$. L'amplitude de l'onde rayonnée E'tx par la surface sélective en fréquence S2 est déterminée

50

55

par le coefficient de transmission t_{2x} . La surface sélective en fréquence S2 étant transparente à la polarisation orthogonale E_y , l'onde polarisée E_{r1y} selon la polarisation orthogonale E_y est rayonnée sans être atténuée. L'onde polarisée E_{r1y} selon la polarisation orthogonale E_y est notée $E't_y$. Un premier rayonnement en polarisation circulaire est donc composé des ondes $E't_x$ et $E't_y$.

5 **[0031]** L'onde réfléchie E_{r1x} subit une nouvelle réflexion sur la surface sélective en fréquence S2, avec un coefficient de réflexion r_{2x} , et, selon le même principe, un deuxième rayonnement en polarisation circulaire est composé des ondes $E''t_x$ et $E''t_y$, puis un troisième rayonnement en polarisation circulaire, composé des ondes $E'''t_x$ et $E'''t_y$.

[0032] On obtient ainsi un faisceau en polarisation circulaire, de plus en plus atténué à mesure que l'on s'éloigne de l'ouverture d'excitation OE.

10 **[0033]** Un pré-dimensionnement de cet élément rayonnant peut être réalisé à partir de la théorie des rayons, traditionnellement utilisé pour cette catégorie d'élément rayonnant. On suppose que :

- la taille de cavité est infinie dans le plan xy ;
- la surface sélective en fréquence S2 est caractérisée respectivement par les coefficients de réflexion et de transmission r_{2x} et t_{2x} . Elle est complètement transparente à l'onde polarisée E_y ;
- la distance entre la surface sélective en fréquence S2 et la métasurface S1 est égale à $D1$;
- la métasurface S1 est caractérisée respectivement par les coefficients de réflexion r_{1xx} et r_{1yx} traduisant les composantes de l'onde réfléchie selon les polarisations E_x et E_y pour une onde incidente E_{ix} .

20 **[0034]** De ce qui précède, les fonctions de transfert T_x et T_y pour les ondes transmises polarisées $E_{trans}(x)$ et $E_{trans}(y)$ peuvent être écrites comme étant la somme de tous les champs transmis en champ lointain :

$$T_x = \frac{E_{trans}(x)}{E_{inc}} = [E't_x + E''t_x + E'''t_x + \dots] \quad (1)$$

$$T_y = \frac{E_{trans}(y)}{E_{inc}} = [E't_y + E''t_y + \dots] \quad (2)$$

Où $E_{inc} = 1$

[0035] De (1) la fonction de transfert T_x peut être déterminée :

$$T_x = t_{2x} + t_{2x}r_{1xx}r_{2x}e^{-jk_0(2D_1)\cos(\theta)} + t_{2x}r_{1xx}^2r_{2x}^2e^{-jk_0(4D_1)\cos(\theta)} + \dots \quad (3)$$

40 **[0036]** Où k_0 est le nombre d'onde dans l'espace libre, à savoir $2\pi/\lambda_0$, et θ l'angle d'incidence de l'onde d'excitation.

$$T_x = t_{2x} \sum_{n=0}^{\infty} (r_{1xx}r_{2x})^n e^{-jk_0(2nD_1)\cos(\theta)} \quad (4)$$

$$T_x = \frac{t_{2x}}{1 - r_{1xx}r_{2x}e^{-jk_0(2D_1)\cos(\theta)}} \quad (5)$$

[0037] De (2), la fonction de transfert T_y peut être déterminée :

$$T_y = r_{2x}r_{1yx}e^{-jk_0(2D_1)\cos(\theta)} + r_{2x}^2r_{1xx}r_{1yx}e^{-jk_0(4D_1)\cos(\theta)} + r_{2x}^3r_{1xx}^2r_{1yx}e^{-jk_0(6D_1)\cos(\theta)} + \dots \quad (6)$$

$$T_y = r_{1yx}r_{2x}e^{-jk_0(2D_1)\cos(\theta)} \sum_{n=0}^{\infty} (r_{1xx}r_{2x})^n e^{-jk_0(2nD_1)\cos(\theta)} \quad (7)$$

$$T_y = \frac{r_{1yx}r_{2x}e^{-jk_0(2D_1)\cos(\theta)}}{1-r_{1xx}r_{2x}e^{-jk_0(2D_1)\cos(\theta)}} \quad (8)$$

5 **[0038]** La condition de résonance est réalisée lorsque :

$$\angle r_{1xx} + \angle r_{2x} + 2N\pi = 2k_0D_1\cos(\theta) \quad (9)$$

10 **[0039]** Où $\angle r_{1xx}$ représente la composante en phase du coefficient de réflexion r_{1xx} , $\angle r_{2x}$ représente la composante en phase du coefficient de réflexion r_{2x} , et N un entier quelconque.

[0040] En utilisant les fonctions de transfert calculées en (5) et (8) pour les deux polarisations, il est possible de calculer le taux d'ellipticité (AR Axial Ratio) pour l'antenne entière, en utilisant la relation suivante :

$$AR = \frac{\sqrt{G + \sqrt{G^2 - 4 \sin^2(\varphi)}}}{\sqrt{G - \sqrt{G^2 - 4 \sin^2(\varphi)}}} \quad (10)$$

20 Où :

$$G = \rho_L + \frac{1}{\rho_L} \quad (11)$$

$$\varphi = \angle T_x - \angle T_y \quad (12)$$

$$\rho_L = \frac{|T_x|}{|T_y|} \quad (13)$$

35 **[0041]** Partant des relations (12) et (13), et en utilisant les fonctions de transfert calculées en (5) et (8), il est donc possible d'écrire la condition pour produire une polarisation circulaire pure avec les relations suivantes :

$$|t_{2x}| = |r_{1yx}r_{2x}| \quad (14)$$

$$\angle t_{2x} = \angle r_{1yx} + \angle r_{2x} - 2k_0D_1\cos(\theta) + \frac{\pi}{2} + 2N\pi \quad (15)$$

45 **[0042]** En combinant l'équation (9), décrivant la condition de résonance, et l'équation (15), décrivant la condition de polarisation circulaire, la relation suivante peut être obtenue :

$$\angle t_{2x} = \angle r_{1yx} - \angle r_{1xx} + \frac{\pi}{2} + 2N'\pi \quad (16)$$

50 **[0043]** Où N' est un entier quelconque.

[0044] L'équation (16) ne dépend pas au premier ordre de la fréquence (le nombre d'onde k_0 ne se trouve pas dans l'équation), mais relie uniquement les composantes des matrices de réflexion et de transmission de la surface sélective en fréquence S2 et de la métasurface S1. La bande passante n'est plus limitée par le mécanisme de génération de la polarisation circulaire, mais par le mécanisme de fonctionnement de la cavité de Fabry Pérot. Les techniques d'élargissement de bande passante pour cette dernière peuvent alors être utilisées, sans effets sur la polarisation circulaire. En particulier, la mise en cascade d'une deuxième cavité, au-dessus de la surface sélective en fréquence S2, permet

d'élargir la bande passante, sans que cela ne dégrade la qualité de la polarisation circulaire.

[0045] La composante en phase du coefficient de transmission t_{2x} de la surface sélective en fréquence S2 détermine la directivité de l'élément rayonnant ; elle est donc prédéterminée et connue, en fonction de la directivité souhaitée. Ainsi, d'après l'équation (16), pour produire une polarisation circulaire pure, il convient de sélectionner de façon appropriée les composantes en phase des coefficients de réflexion r_{1yx} et r_{1xx} .

[0046] La matrice de répartition [S] (ou « scattering matrix » en terminologie anglo-saxonne) de la métasurface S1 peut s'écrire de façon classique sous la forme :

$$[S] = \begin{bmatrix} r_{1xx} & r_{1xy} \\ r_{1yx} & r_{1yy} \end{bmatrix}$$

[0047] Or, la métasurface S1 ne reçoit en incidence aucune onde en polarisation orthogonale Ey, dans la mesure où la surface sélective en fréquence S2 est transparente à la polarisation orthogonale. Les coefficients de réflexion r_{1xy} et r_{1yy} , qui traduisent respectivement le coefficient de réflexion en polarisation d'excitation Ex et en polarisation orthogonale Ey pour une onde incidente en polarisation orthogonale Ey, sont donc indifférents pour le dimensionnement de la métasurface S1. Seuls les coefficients de réflexion r_{1xx} et r_{1yx} doivent être pris en considération pour le dimensionnement de la métasurface S1, et déterminés par la relation (16).

[0048] Un repère Ox'y'z est défini comme étant le résultat de la rotation d'un angle Ψ autour de l'axe Oz du repère Oxyz (l'axe Ox est défini par la polarisation d'excitation Ex, et l'axe Oy par la polarisation orthogonale Ey).

[0049] On cherche donc à obtenir, à partir de la matrice de répartition [S] dans le repère Oxyz, une matrice de répartition [S'] de type diagonale dans le repère Ox'y'z, pouvant s'écrire sous la forme :

$$[S'] = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_1} & 0 \\ 0 & e^{j\varphi_2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

[0050] Où les coefficients de réflexion diagonaux $e^{j\varphi_1}$ et $e^{j\varphi_2}$ représentent respectivement les composantes en phase des ondes réfléchies respectivement en polarisation d'excitation et en polarisation orthogonale, dans le repère Ox'y'z. Les composantes en amplitude des ondes réfléchies en polarisation d'excitation et en polarisation orthogonale sont égales à 1, traduisant le caractère sans pertes de la métasurface S1.

[0051] Sous condition d'incidence normale ($\theta=0^\circ$), il existe ainsi une relation de congruence entre la matrice de répartition [S] dans le plan Oxy, et la matrice de répartition [S'] dans le plan Ox'y', qui peut donc s'écrire sous la forme :

$$[S'] = {}^t[R][S][R] \quad (18)$$

[0052] Où [R] est une matrice de rotation d'angle Ψ :

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \sin(\Psi) \\ -\sin(\Psi) & \cos(\Psi) \end{bmatrix}$$

[0053] Il convient donc d'identifier l'angle Ψ qui permet de transformer la matrice de répartition requise [S] en matrice diagonale. Pour ce calcul, qui n'est pas détaillé ici, seuls les coefficients de réflexion r_{1xx} et r_{1yx} sont spécifiés pour le fonctionnement de l'antenne, les coefficients de réflexion r_{1xy} et r_{1yy} n'étant que des variables d'ajustement. Ainsi, une fois que l'angle Ψ a été identifié pour obtenir une matrice diagonale, les coefficients de réflexion diagonaux $e^{j\varphi_1}$ et $e^{j\varphi_2}$ sont déterminés à partir des relations (17) et (18).

[0054] En raison du désalignement de la métasurface S1 par rapport à la polarisation d'excitation Ex, chaque onde incidente en polarisation linéaire est réfléchiée avec une composante en polarisation d'excitation Ex et une composante en polarisation orthogonale Ey. Dans le cas d'une métasurface S1 constituée d'un agencement d'éléments planaires conducteurs rectangulaires (également appelés « patches » selon la terminologie anglo-saxonne), les réponses en phase selon la polarisation Ex ou Ey sont contrôlées au premier ordre par les dimensions de l'élément planaire conducteur.

[0055] La métasurface S1 peut comprendre un réseau de cellules à métasurface MS, telles qu'illustrées en figure 3. Les dimensions des cellules à métasurface MS peuvent être obtenues de façons relativement indépendantes en fonction des composantes en phase des coefficients de réflexions diagonaux. Ainsi, les dimensions de chaque cellule à métasurface MS (longueur ly et largeur wy), sont réglées en fonction des composantes en phase des coefficients de réflexion

diagonaux $e^{j\varphi_1}$ et $e^{j\varphi_2}$ déterminés précédemment.

[0056] Les cellules à métasurface peuvent être avantageusement rectangulaires. La métasurface S1 peut donc être constituée de plusieurs rangées RA de cellules à métasurface MS.

[0057] Comme l'illustre la figure 4, les cellules à métasurface MS d'une même rangée RA sont isolées les unes des autres, et disposées sur un substrat SUB1. Ces éléments sont disposés entre le plan de masse traversé par l'ouverture d'excitation, et la surface sélective en fréquence S2. Chaque cellule à métasurface MS forme donc un dipôle, ayant un comportement principalement capacitif pour la polarisation d'excitation Ex et pour la polarisation orthogonale Ey. Tous les centres CE des cellules à métasurface MS sont alignés selon un axe d'alignement AX. L'axe d'alignement AX est donc orienté de l'angle ψ par rapport à la polarisation d'excitation Ex.

[0058] Les cellules à métasurface MS peuvent toutes avoir la même longueur (dimension ly sur la figure 3), et il peut y avoir le même espacement entre deux cellules à métasurface MS (dimension px sur la figure 3).

[0059] Selon une variante, illustrée par la figure 5, la métasurface S1 peut comprendre des lignes d'interconnexion à métasurface LG. Les lignes d'interconnexion à métasurface LG connectent entre elles toutes les cellules à métasurface MS d'une même rangée RA. Elles permettent avantageusement d'évacuer les charges électrostatiques présentes dans les cellules à métasurface MS, et améliorent ainsi le comportement global de l'élément rayonnant. Les cellules à métasurface MS ont des propriétés remarquablement stables en incidence, car des motifs particulièrement petits peuvent être utilisés, afin d'obtenir des caractéristiques larges bandes ou même bi-bande. Les cellules à métasurface MS d'une même rangée RA sont couplées en leur centre CE, de façon orthogonale, à une ligne d'interconnexion à métasurface LG.

[0060] Comme l'illustre la figure 6, la ligne d'interconnexion à métasurface LG est orientée de l'angle ψ par rapport à la polarisation d'excitation Ex. Pour chaque rangée RA, l'ensemble formé par la ligne d'interconnexion LG et par les cellules à métasurface MS constitue donc une grille à stubs (ou à éléments d'adaptations). La grille à stubs a un comportement principalement inductif pour la polarisation d'excitation Ex, et capacitif pour la polarisation orthogonale Ey.

[0061] La surface sélective en fréquence S2, partiellement réfléchissante, est constituée d'un réseau de fils métalliques FI espacés de façon périodique, et orientés selon la polarisation d'excitation Ex. En variante, la surface sélective en fréquence S2 peut être constituée de dipôles, de types fentes ou « patches » (ou « plaques » en français). Les fentes peuvent être réalisées dans une plaque métallique, et les patches disposés sur un substrat électriquement transparent.

[0062] Le réseau de cellules à métasurface MS est disposé sur un substrat SUB1, lui-même placé sur un plan de masse PM. Le plan de masse PM est traversé par l'ouverture d'excitation OE. Le substrat SUB1 peut être par exemple composé de deux couches d'Astroquartz™, entre lesquelles se trouve une couche de nidaquartz.

[0063] Selon une variante, illustrée par la figure 7, les rangées RA sont connectées entre elles par l'intermédiaire des cellules à métasurface MS. Elles forment ainsi avec les lignes d'interconnexion à métasurface LG un motif de grillage à maille rectangulaire. La métasurface S1 a ainsi un comportement inductif pour la polarisation d'excitation Ex et pour la polarisation orthogonale Ey.

[0064] La figure 8 illustre le cas où l'ouverture d'excitation OE est un cornet CRN d'une ouverture linéaire rayonnante. L'ouverture linéaire rayonnante, traversant la métasurface S1 et débouchant dans la cavité, peut constituer la partie radiative d'un formateur de faisceaux quasi-optique, caractérisé notamment par une large ouverture latérale. Cette solution permet donc de conserver une large ouverture spectrale, tout en rayonnant la polarisation circulaire. Plus la taille de l'ouverture linéaire rayonnante est importante, plus la bande passante en adaptation ou en rayonnement est réduite. Cela n'a toutefois pas d'influence sur la qualité de la polarisation circulaire, comme indiqué dans la relation (16).

[0065] La figure 9 illustre le cas où il y a une pluralité d'ouvertures d'excitation OE. Les ouvertures d'excitation OE sont formées par un réseau RES d'ouvertures rayonnantes linéaires, issues par exemple d'un diviseur à plaques parallèles. L'utilisation d'un diviseur à plaques parallèles permet notamment de mieux distribuer le champ sur les ouvertures d'excitation OE. Afin de limiter les couplages entre les ouvertures rayonnantes linéaires, il convient de limiter fortement le couplage entre les accès, par exemple à -15 dB.

[0066] Les figures 10A, 10B et 10C illustrent un mode de réalisation de l'invention, dans lequel l'ouverture d'excitation OE est dédoublée. Elle comprend une alimentation double formée par deux ouvertures de guides d'ondes (WG1, WG2) débouchant de manière symétrique dans la cavité résonante, et connectés à un réseau d'adaptation d'impédance RAD. Le réseau d'adaptation d'impédance RAD comprend au moins un iris IR, afin d'élargir la bande d'adaptation. Ce mode de réalisation permet d'annuler un éventuel mode TEM parasite présent dans l'élément rayonnant. Ce mode TEM, qui génère des lobes de polarisation croisée, est indépendant du type ouverture d'excitation OE. La figure 10C illustre une telle ouverture d'excitation, intégrée dans un élément rayonnant selon l'invention. Dans la figure 10C, chaque cellule à métasurface MS forme un dipôle, sans ligne d'interconnexion. Le dédoublement de l'ouverture d'excitation peut être réalisé de la même manière lorsque les cellules à métasurface MS sont reliées par une ligne d'interconnexion, ou lorsqu'elles forment une grillage à maille rectangulaire.

[0067] Les figures 11A et 11B illustrent le comportement en fréquence de la directivité et du taux d'ellipticité (« axial ratio » en terminologie anglo-saxonne), pour plusieurs antennes intégrant les éléments rayonnants conformes à l'invention, et comprenant une alimentation double formée par deux ouvertures de guides d'ondes, conformément au mode de réalisation précédemment décrit. Les éléments rayonnants se distinguent par différentes valeurs de la largeur (a) et

EP 3 547 450 A1

de la longueur (b) de l'ouverture d'excitation, et pour différentes valeurs du coefficient de réflectivité r_{2x} . Les valeurs du coefficient de réflectivité r_{2x} sont notées « + », « ++ » ou « +++ » pour indiquer leur valeur relative.

	a (mm)	b (mm)	Réflectivité de la surface sélective en fréquence S2
Elément rayonnant 1	5	15	+++
Elément rayonnant 2	5	15	++
Elément rayonnant 3	10	15	++
Elément rayonnant 4	10	15	+

[0068] La figure 11A illustre le comportement en fréquence de la directivité des éléments rayonnants, pour un angle $\theta=0^\circ$. Plus l'élément rayonnant est directif (donc plus grande est la réflectivité de la surface sélective en fréquence S2), moins le comportement en fréquence est large bande, ce qui est typique des antennes cavités de Fabry Perot. Pour les éléments rayonnants 2, 3 et 4, la largeur de bande à -3 dB est de l'ordre de 10% de la fréquence centrale. La figure 11B illustre le comportement en fréquence du taux d'ellipticité des éléments rayonnants, pour un angle $\theta=0^\circ$. La largeur de bande à -3 dB est supérieure à 10% pour les quatre antennes, et reste de l'ordre de 10% à -1 dB, ce qui est nettement supérieur aux performances des éléments rayonnants de l'état de la technique. Comme démontré dans la relation (16), la technique de génération de la polarisation circulaire fonctionne sur une large bande passante, et ne limite pas le fonctionnement de l'élément rayonnant.

[0069] Le comportement large bande peut être encore amélioré en mettant en cascade une deuxième cavité sur la surface sélective en fréquence S2. Pour réaliser cette mise en cascade, au moins une deuxième cavité résonante est placée sur la cavité objet de l'invention. La deuxième cavité résonante a comme surface inférieure la surface sélective en fréquence de la cavité inférieure, et comme surface supérieure une surface partiellement réfléchissante. La section transverse de la cavité supérieure peut être plus grande que celle de la première cavité inférieure, comme décrit dans le document FR2959611, ou, en alternative, avoir une section transverse sensiblement identique à celle de la cavité inférieure. Le mode de réalisation, dit « en bi-cavité », permet de faire baisser la réflectivité de la surface sélective en fréquence de la cavité inférieure, ce qui favorise le comportement large bande de l'élément rayonnant, et sans toutefois avoir d'influence sur la qualité de la polarisation circulaire.

Revendications

1. Élément rayonnant à polarisation circulaire, comprenant :

- au moins une ouverture d'excitation (OE) d'une onde polarisée linéairement selon une première polarisation dite d'excitation (Ex) ;
- une surface sélective en fréquence (S2), partiellement réfléchissante pour la polarisation d'excitation (Ex) et transparente pour une deuxième polarisation (Ey) orthogonale à la polarisation d'excitation (Ex), dite polarisation orthogonale, et à la direction de propagation de l'onde, et disposée dans un plan défini par la polarisation d'excitation (Ex) et par la polarisation orthogonale (Ey) ;
- caractérisé en ce qu'il** comprend en outre une métasurface (S1), totalement réfléchissante, faisant face à la surface sélective en fréquence (S2), et comprenant un réseau bidimensionnel et périodique d'éléments planaires conducteurs formant cellules à métasurface (MS), l'ouverture d'excitation (OE) débouchant sur la métasurface (S1),
- la surface sélective en fréquence (S2) et la métasurface (S1) formant une cavité résonante pour la polarisation d'excitation (Ex),
- les cellules à métasurface (MS) étant toutes orientées de façon identique vis-à-vis de la polarisation d'excitation (Ex) et configurées pour :

- réfléchir une onde incidente (Eix) selon la polarisation d'excitation (Ex) pour former une onde réfléchie (Er1x) polarisée selon la polarisation d'excitation (Ex), et
- dépolariser et réfléchir l'onde incidente (Eix) pour former une onde réfléchie (Er1y) polarisée selon la polarisation orthogonale (Ey) avec une différence de phase sensiblement égale à $\pm 90^\circ$ par rapport l'onde réfléchie (Er1x) polarisée selon la polarisation d'excitation (Ex), et avec une amplitude sensiblement égale à l'amplitude d'une onde rayonnée (E'tx) par la surface sélective en fréquence (S2), issue de l'onde réfléchie (Er1x) polarisée selon la polarisation d'excitation (Ex).

EP 3 547 450 A1

2. Élément rayonnant selon la revendication 1, la métasurface (S1) comprenant un plan de masse (PM) sur lequel sont disposés un substrat (SUB1) et le réseau de cellules à métasurface (MS) agencées en rangées (RA), les centres (CE) de chaque cellule à métasurface (MS) d'une même rangée (RA) étant alignés selon un axe d'alignement (AX), l'axe d'alignement (AX) étant orienté d'un angle de rotation (ψ) par rapport à la polarisation d'excitation (Ex), l'angle de rotation (ψ) étant déterminé de sorte à obtenir une matrice [S] de type diagonale, où :

$$[S'] = {}^t[R][S][R],$$

[S] étant la matrice de répartition de la métasurface (S1), et [R] une matrice de rotation d'angle ψ .

3. Élément rayonnant selon la revendication 2, les cellules à métasurfaces (MS) d'une même rangée (RA) étant couplées par une ligne d'interconnexion à métasurface (LG) allongée selon l'axe d'alignement (AX).

4. Élément rayonnant selon la revendication 3, les rangées (RA) étant connectées entre elles par l'intermédiaire des cellules à métasurface (MS), formant avec les lignes d'interconnexion à métasurface (LG) un motif de grillage à maille rectangulaire.

5. Élément rayonnant selon la revendication 2, les cellules à métasurface (MS) d'une même rangée (RA) étant isolées les unes des autres.

6. Élément rayonnant selon l'une des revendications 2 à 5, les cellules à métasurface (MS) d'une même rangée (RA) étant toutes espacées périodiquement.

7. Élément rayonnant selon l'une des revendications 2 à 6, toutes les cellules à métasurface (MS) de la métasurface (S1) ayant les mêmes dimensions.

8. Élément rayonnant selon l'une des revendications précédentes, la surface sélective en fréquence (S2) comprenant un réseau de fils métalliques (FI) parallèles, espacés périodiquement, et alignés avec la polarisation d'excitation (Ex).

9. Élément rayonnant selon l'une des revendications 1 à 7, la surface sélective en fréquence (S2) comprenant un réseau bidimensionnel de dipôles métalliques agencés de façon périodique.

10. Élément rayonnant selon l'une des revendications précédentes, l'ouverture d'excitation (OE) comprenant au moins une ouverture de guide d'ondes débouchant dans la cavité résonante.

11. Élément rayonnant selon la revendication 10, l'ouverture d'excitation (OE) comprenant une alimentation double formée par deux guides d'ondes (WG1, WG2) débouchant de manière symétrique dans la cavité résonante, et connectés à un réseau d'adaptation d'impédance (RAD).

12. Élément rayonnant selon l'une des revendications 1 à 9, l'ouverture d'excitation (OE) étant un cornet (CRN) d'une ouverture linéaire rayonnante.

13. Élément rayonnant selon l'une des revendications 1 à 9, comprenant une pluralité d'ouvertures d'excitation, les ouvertures d'excitation étant formées par un réseau (RES) d'ouvertures rayonnantes linéaires.

14. Élément rayonnant selon l'une des revendications précédentes, comprenant au moins une deuxième cavité mise en cascade sur la surface sélective en fréquence (S2).

15. Élément rayonnant selon l'une des revendications précédentes, les cellules à métasurface (MS) étant de forme rectangulaire.

16. Antenne réseau comprenant au moins un élément rayonnant selon l'une des revendications précédentes.

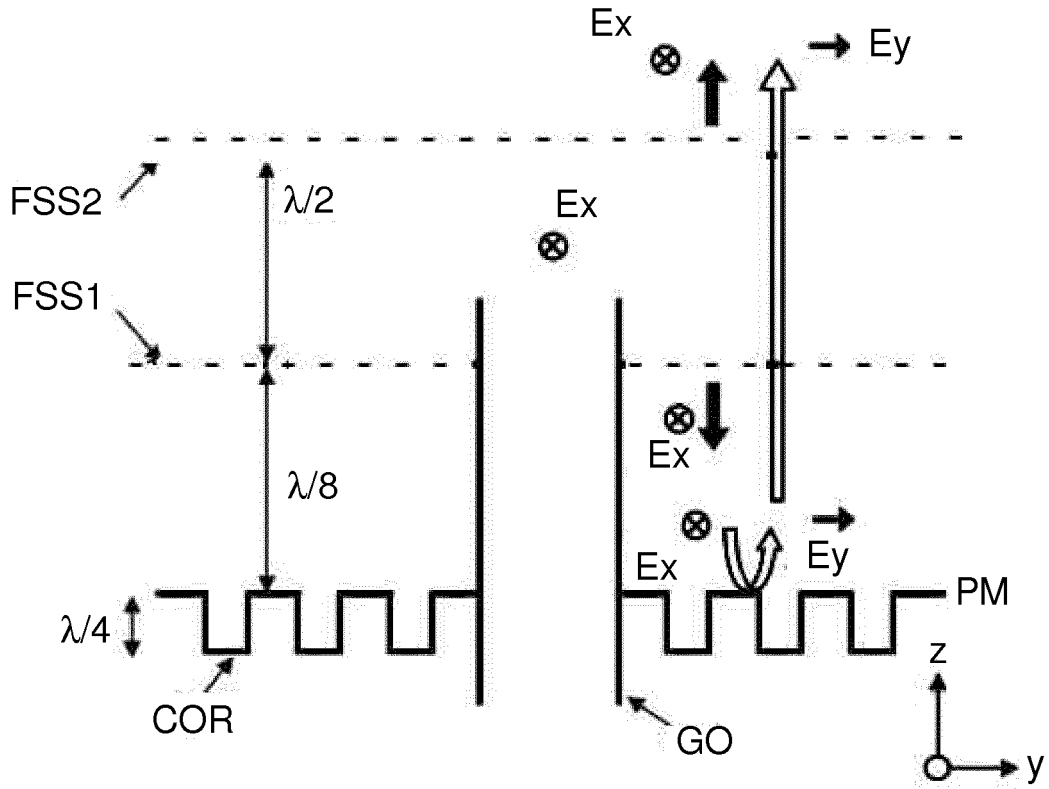


FIG.1

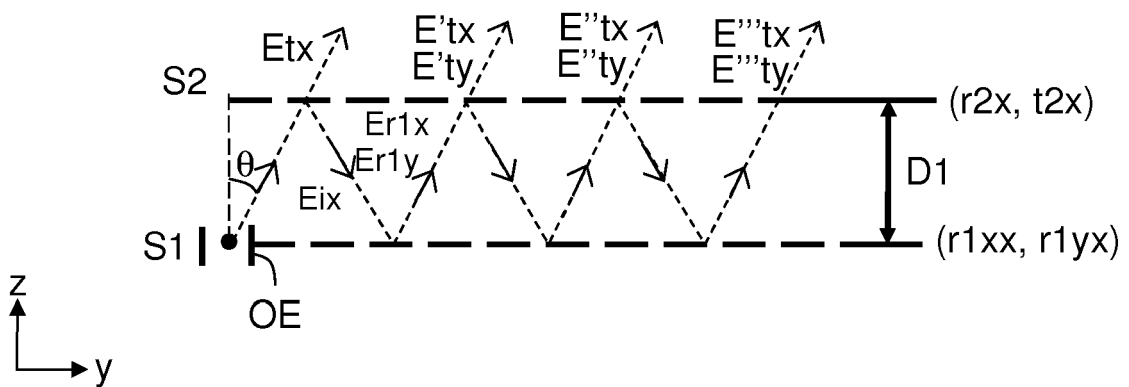


FIG.2

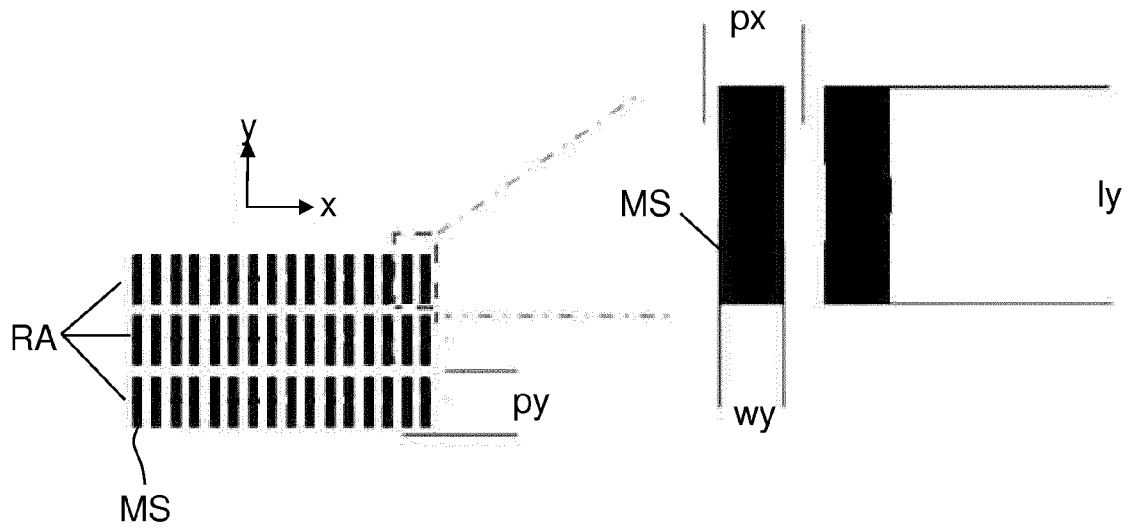


FIG. 3

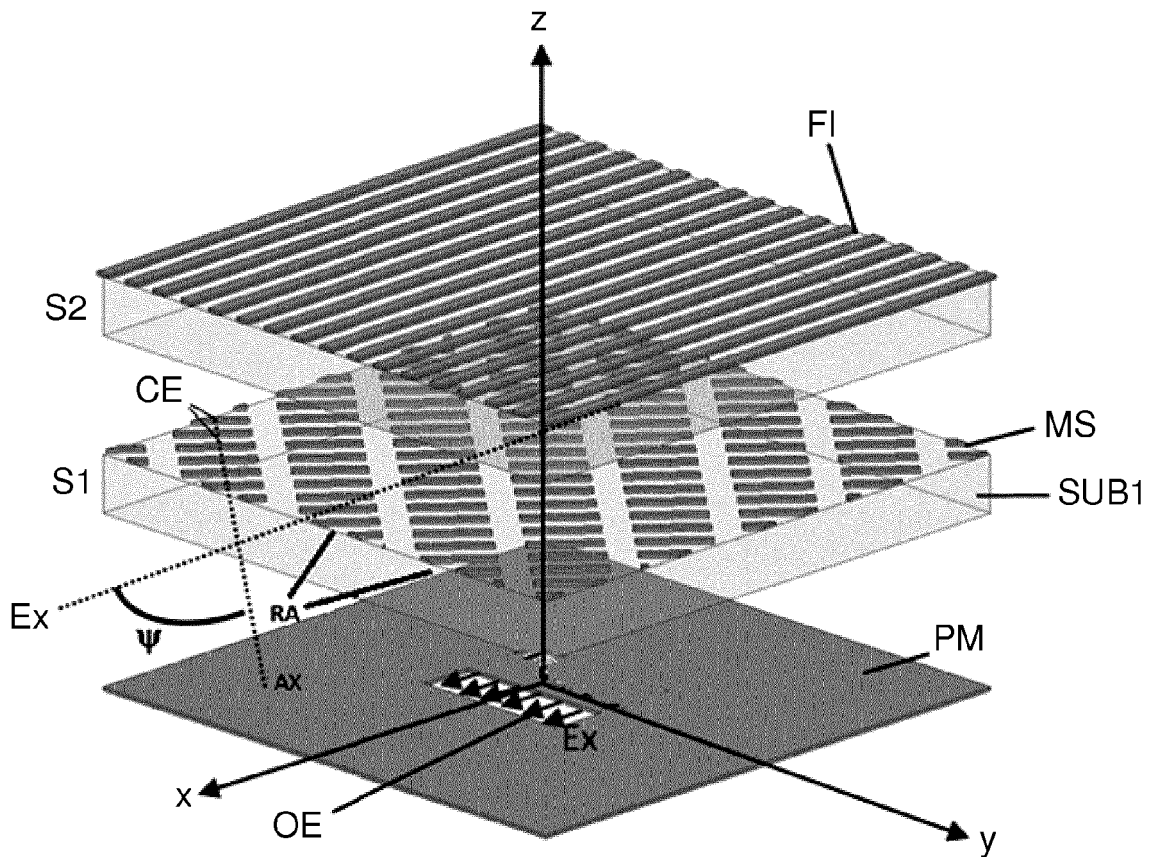


FIG. 4

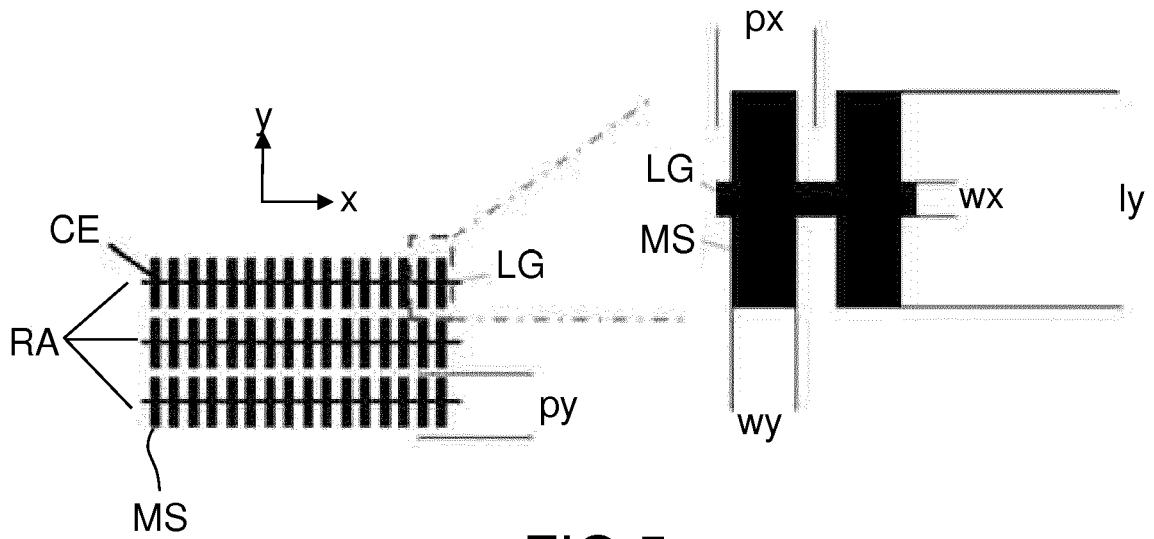


FIG.5

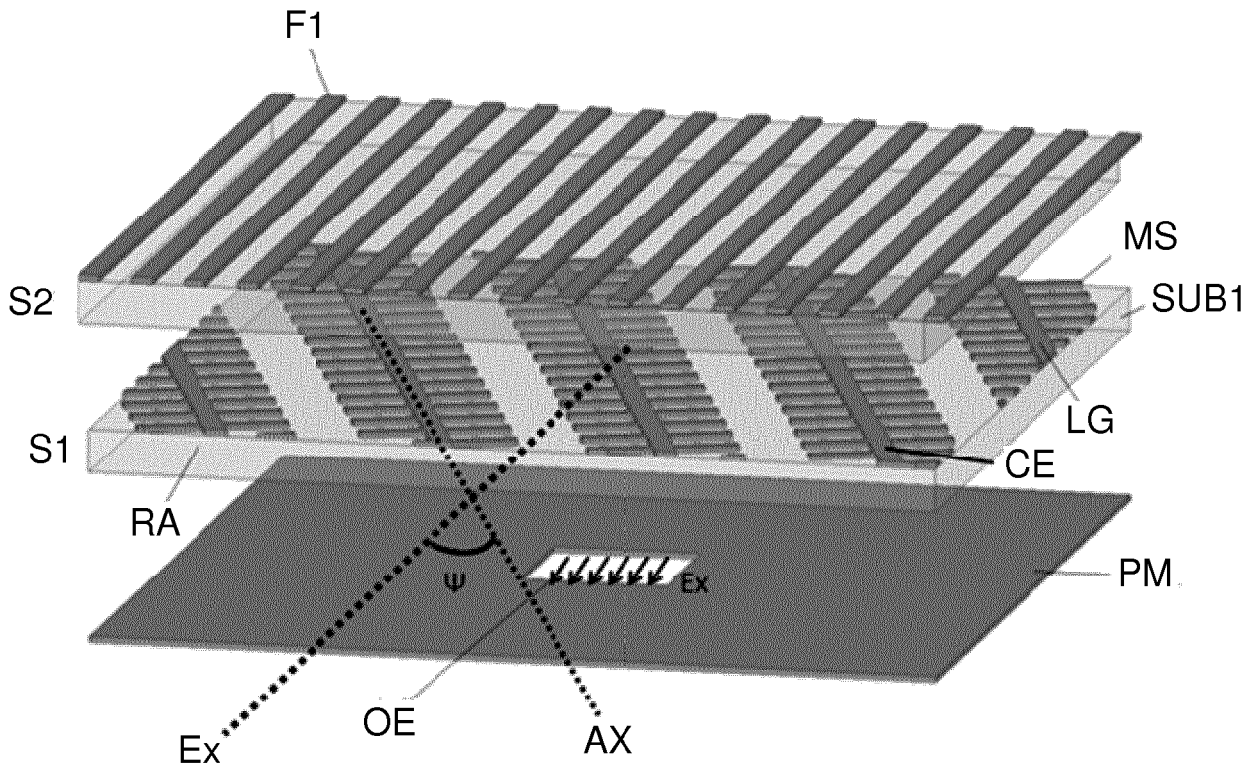


FIG.6

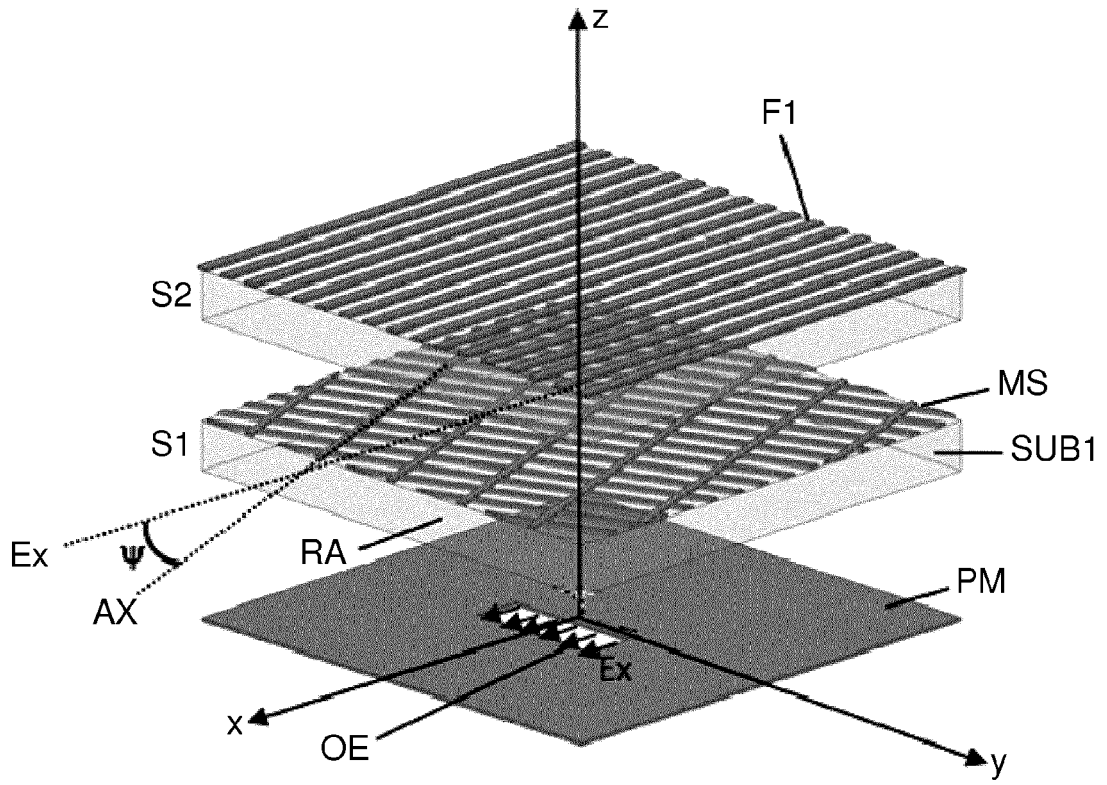


FIG. 7

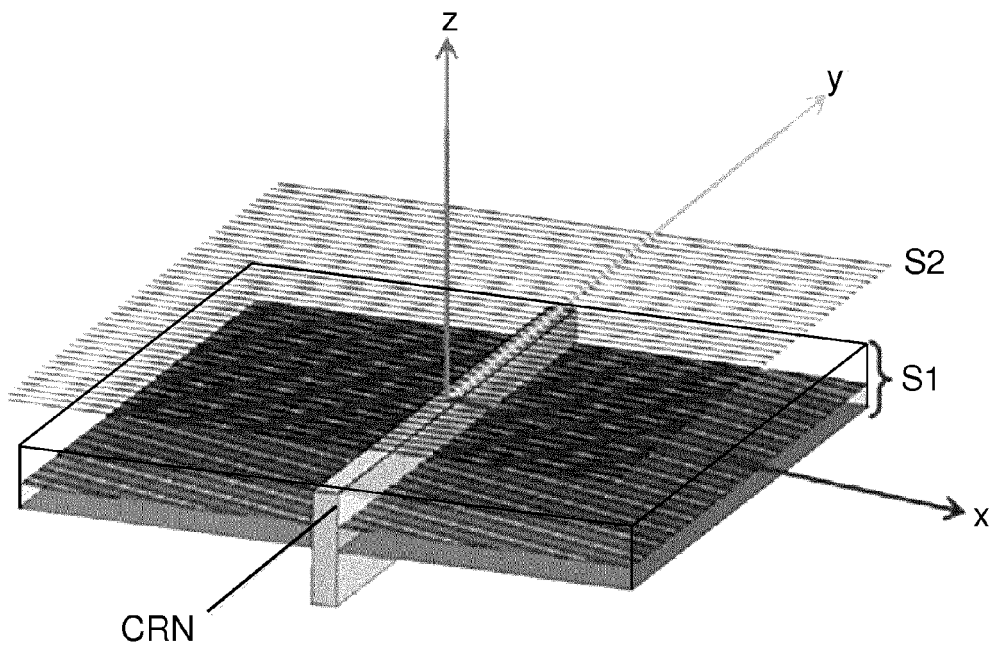


FIG. 8

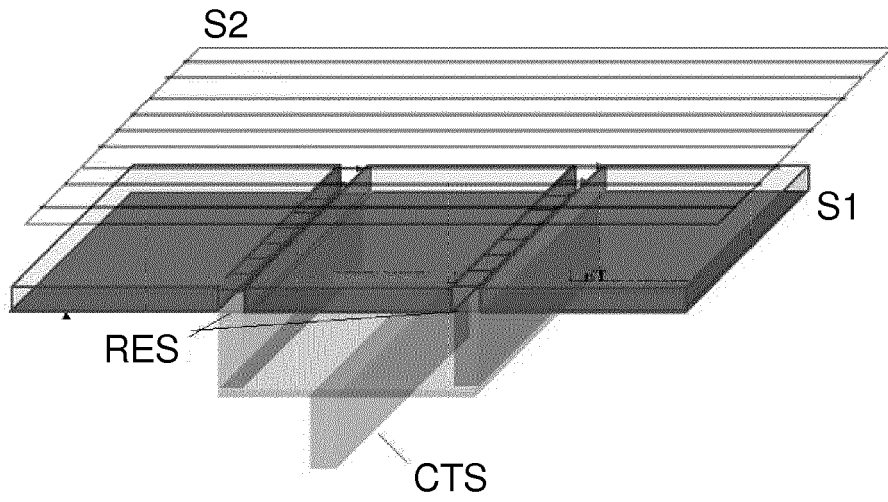


FIG.9

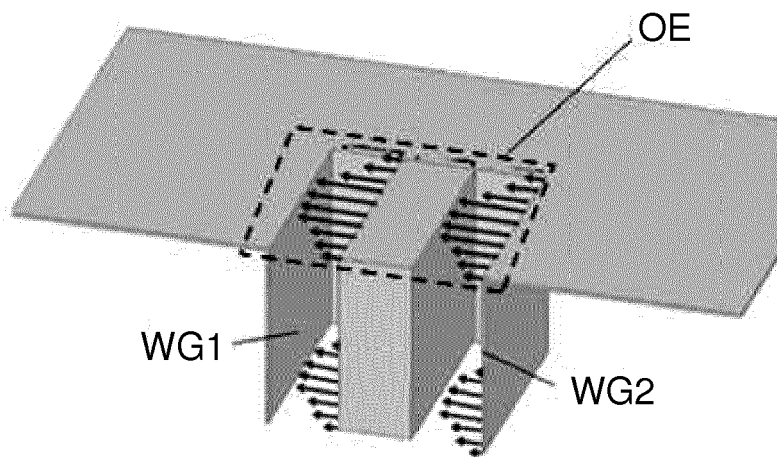


FIG.10A

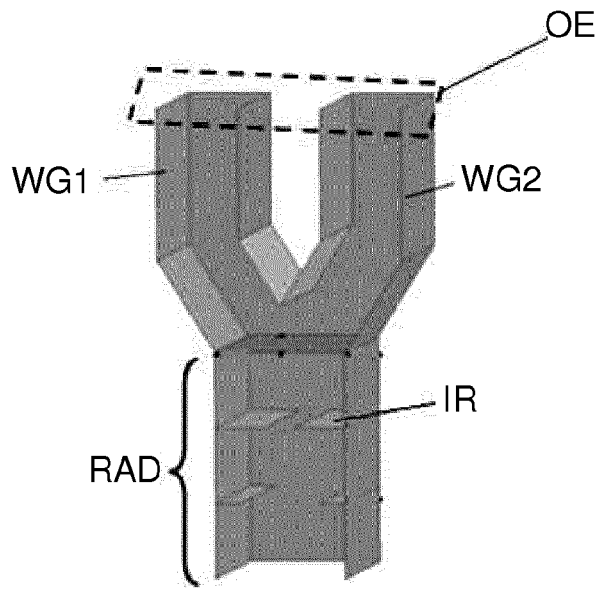


FIG.10B

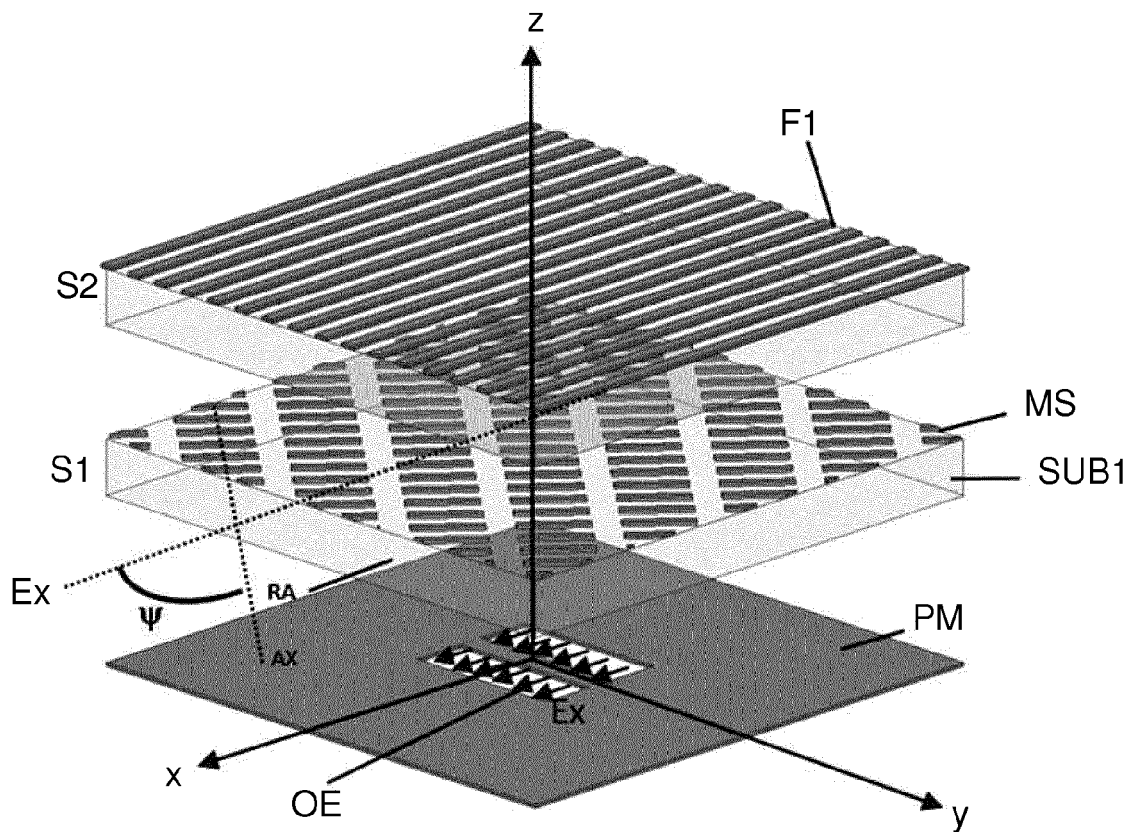


FIG.10C

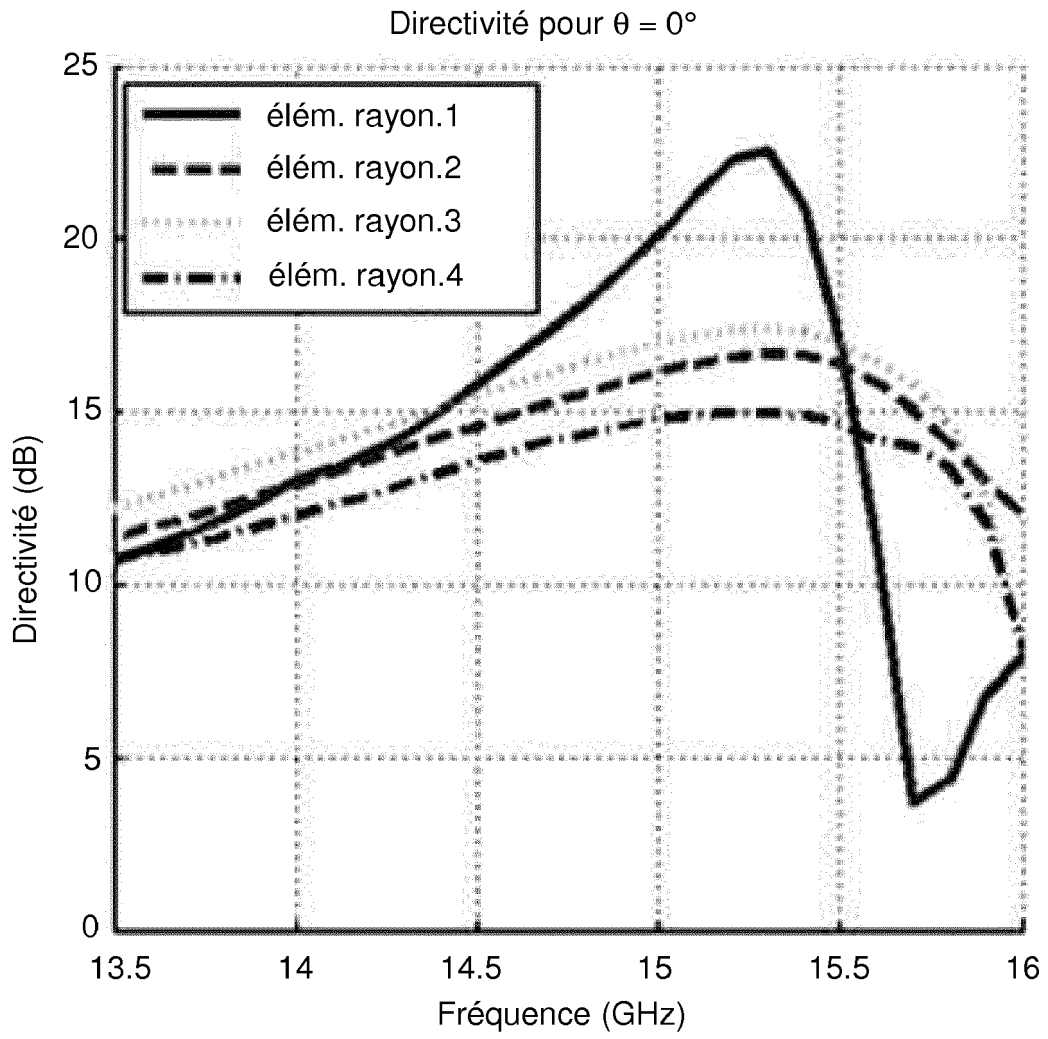


FIG.11A

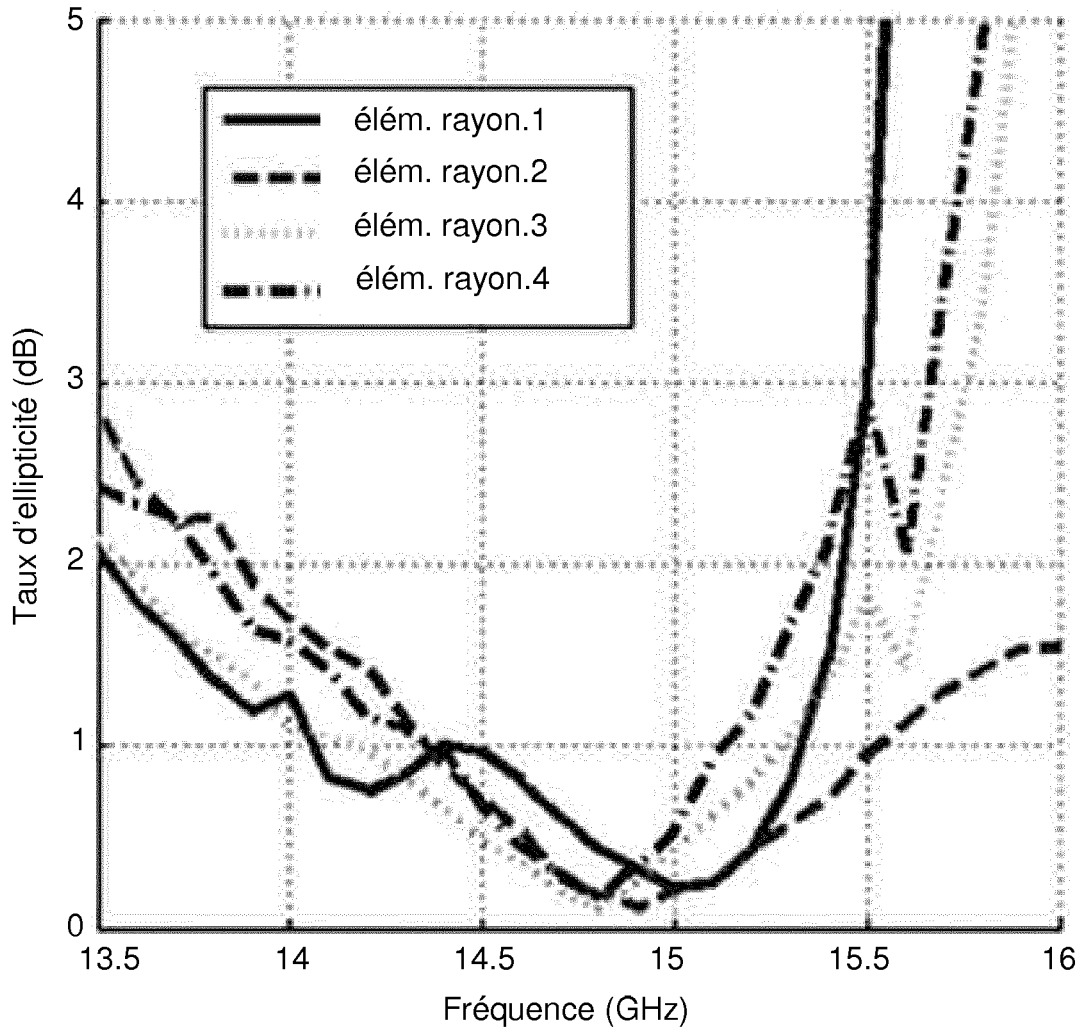


FIG.11B



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 19 16 5394

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
Y	ROBERT ORR ET AL: "Design Method for Circularly Polarized Fabry-Perot Cavity Antennas", IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION., vol. 62, no. 1, 1 janvier 2014 (2014-01-01), pages 19-26, XP055532222, US ISSN: 0018-926X, DOI: 10.1109/TAP.2013.2286839 * le document en entier *	1-16	INV. H01Q15/00 H01Q15/24
Y	WO 2011/134666 A1 (THALES SA [FR]; CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]; LEGAY HERVE [FR]; MUHAMMA) 3 novembre 2011 (2011-11-03) * page 8, lignes 1-27 - pages 15,16; figures 1,3,5,6 *	1-16	
A	Mona Pourhosseini, Pejman Rezaei: "Self-Polarizing Highly-Gain Fabry-Perot Cavity Antennas with EDR Unit Cell", ????, 3 décembre 2014 (2014-12-03), pages 138-146, XP055532279, Extrait de l'Internet: URL:http://isseem.ir/article-1-279-fa.pdf [extrait le 2018-12-10] * le document en entier *	1-16	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) H01Q
A	EP 2 827 444 A2 (THINKOM SOLUTIONS INC [US]) 21 janvier 2015 (2015-01-21) * alinéas [0034], [0036], [0038]; figures 2,3 *	3-9	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 31 mai 2019	Examineur Moumen, Abderrahim
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES 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 antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

1
EPO FORM 1503 03.02 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 19 16 5394

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

31-05-2019

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2011134666 A1	03-11-2011	EP 2564466 A1	06-03-2013
		ES 2463772 T3	29-05-2014
		FR 2959611 A1	04-11-2011
		US 2013207859 A1	15-08-2013
		WO 2011134666 A1	03-11-2011

EP 2827444 A2	21-01-2015	CA 2857100 A1	18-01-2015
		EP 2827444 A2	21-01-2015
		IL 233675 A	30-04-2018
		US 2015022409 A1	22-01-2015

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- FR 2959611 [0069]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **S. A. MUHAMMAD ; R. SAULEAU ; G. VALERIO ; L. L. COQ ; H. LEGAY.** Self polarizing Fabry-Perot antennas based on polarization twisting element. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61 (3), 1032-1040 [0008]