

(19)



(11)

EP 3 227 960 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
29.07.2020 Bulletin 2020/31

(51) Int Cl.:
H01Q 5/307 (2015.01) H01Q 9/04 (2006.01)
H01Q 9/06 (2006.01) H01Q 9/28 (2006.01)
H01Q 21/06 (2006.01) H01Q 21/24 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **15800865.6**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/EP2015/077766

(22) Date de dépôt: **26.11.2015**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2016/087304 (09.06.2016 Gazette 2016/23)

(54) **ANTENNE RESEAU MULTICOUCHE DU TYPE AUTO-COMPLEMENTAIRE**

SELBSTKOMPLEMENTÄRE MEHRSCICHTIGE GRUPPENANTENNE

SELF-COMPLEMENTARY MULTILAYER ARRAY ANTENNA

(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

(30) Priorité: **05.12.2014 FR 1402780**

(43) Date de publication de la demande:
11.10.2017 Bulletin 2017/41

(73) Titulaire: **Thales**
92400 Courbevoie (FR)

(72) Inventeurs:
• **LE ROY-NANEIX, Isabelle**
78995 Elancourt (FR)
• **MORVAN, Gwenael**
78851 Elancourt (FR)
• **LABEYRIE, Michèle**
78851 Elancourt (FR)
• **PERPERE, Bernard**
78851 Elancourt (FR)

(74) Mandataire: **Lucas, Laurent Jacques et al**
Marks & Clerk France
Conseils en Propriété Industrielle
Immeuble Visium
22, Avenue Aristide Briand
94117 Arcueil Cedex (FR)

(56) Documents cités:
WO-A1-2012/003546 US-A1- 2011 057 852

- **LOGAN JOHN T ET AL: "Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) arrays scalable to mm-waves", 2013 IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM (APSURSI), IEEE, 7 juillet 2013 (2013-07-07), pages 624-625, XP032555710, ISSN: 1522-3965, DOI: 10.1109/APS.2013.6710972 ISBN: 978-1-4799-3538-3 [extrait le 2014-01-13]**
- **DE LERA ACEDO E ET AL: "Study and Design of a Differentially-Fed Tapered Slot Antenna Array", IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 58, no. 1, 1 janvier 2010 (2010-01-01), pages 68-78, XP011297193, ISSN: 0018-926X**
- **STEVEN S HOLLAND ET AL: "The Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Array", IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 60, no. 1, 1 janvier 2012 (2012-01-01), pages 130-140, XP011391336, ISSN: 0018-926X, DOI: 10.1109/TAP.2011.2167916 cité dans la demande**

EP 3 227 960 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

[0001] La présente invention concerne une antenne réseau multicouche, du type auto-complémentaire. Elle s'applique notamment pour des antennes réseau large bande à multifonctions.

[0002] Différentes solutions existent pour réaliser des réseaux à large bande. Elles utilisent des éléments rayonnants compatibles d'architecture brique ou d'architecture tuile.

Dans l'architecture brique, le design de l'élément rayonnant est optimisé en tirant partie de sa profondeur impactant directement l'épaisseur du réseau. Des antennes réseau large bande sont constituées de réseau de type Vivaldi. Ces solutions présentent l'inconvénient d'être protubérantes et encombrantes, entraînant notamment une complexité d'intégration mécanique.

Une autre solution d'antenne large bande est décrite dans le document de A. Neto, D. Cavallo, G. Gerini and G. Toso, "Scanning Performances of Wide Band Connected Arrays in the Presence of a Backing Reflector", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 57, no. 10, Oct. 2009. Un autre type d'antenne large bande est encore proposé dans le document de D. Cavallo, A. Neto, G. Gerini : Analysis of Common-Mode Résonances in Arrays of Connected Dipoles and Possible Solutions- EUCAP 2009 et dans le document de Steven S. Holland, Marinos N. Vouvakis- The Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Array- IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 60, NO. 1, JANUARY 2012.

[0003] Toutes ces solutions ont comme inconvénient d'être encombrantes et difficiles à intégrer sur certains porteurs.

Dans le cadre des architectures tuile, une catégorie de solutions d'antennes réseau très large bande ont une structure rayonnante à base de motifs auto-complémentaires noyés dans un enrobage de couches diélectriques, permettant d'étendre la bande de fréquence.

Ces structures de type multicouche ont l'avantage de présenter un faible encombrement, facilitant leur intégration sur un porteur.

[0004] Elles présentent cependant un inconvénient résidant dans le phénomène de courants de mode commun qui peuvent apparaître dans ce type de structures multicouche.

Un document LOGAN JOHN et al : « Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) arrays scalable to mm-waves » 2013 IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM (APSURSI), 7 juillet 2013, pages 624-625 divulgue une antenne réseau du type multicouche formée d'éléments rayonnants équipée d'un réseau de vias.

[0005] Un but de l'invention est notamment de permettre de supprimer ces phénomènes de mode commun dans une antenne de type multicouche comportant une structure rayonnante à base de motifs auto-complémentaires.

A cet effet, l'invention a pour objet une antenne réseau

du type multicouche comportant une structure rayonnante formée d'un réseau d'éléments rayonnants composant des motifs auto-complémentaires, ladite surface rayonnante étant séparée d'un plan de masse par une couche diélectrique, ladite antenne comportant un réseau de vias métallisés traversant ladite couche diélectrique entre la surface rayonnante et le plan de masse, chaque via étant positionné en regard d'un point donné, dit point particulier, d'un élément rayonnant.

[0006] Dans un mode de réalisation possible chaque élément rayonnant comporte plusieurs points particuliers, un via étant réalisé en regard de chaque point particulier.

[0007] Un point particulier est par exemple situé entre deux points d'alimentation électrique consécutifs d'un élément rayonnant, que le point particulier est par exemple situé au milieu de deux points d'alimentation électrique consécutif. Dans un autre mode de réalisation possible, chaque élément rayonnant comporte quatre points particuliers, chaque point étant situé entre deux points d'alimentation électrique consécutifs.

[0008] Les vias sont par exemple des trous métallisés réalisés dans ladite couche. Dans un autre mode de réalisation possible, ils ont la forme de picots.

[0009] La structure rayonnante est par exemple du type circuit imprimé, les éléments rayonnants étant des pavés métalliques imprimés.

[0010] La structure rayonnante est par exemple recouverte d'une couche diélectrique, ladite couche étant recouverte d'un radôme.

[0011] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'aide de la description qui suit faite en regard de dessins annexés qui représentent :

- 35 - La figure 1, une illustration d'une structure rayonnante à base de motifs auto-complémentaires ;
- La figure 2, par une vue en coupe une antenne comportant une structure rayonnante selon la figure 1,
- Les figures 3a et 3b, une illustration du phénomène de résonance de mode commun susceptible de se produire dans une antenne ;
- 40 - La figure 4, une courbe représentative de la dégradation du coefficient de réflexion provoqué par le phénomène précité ;
- 45 - La figure 5, un exemple de réalisation d'une antenne selon l'invention par une vue de dessus d'un élément rayonnant ;
- La figure 6, un exemple de réalisation d'une antenne selon l'invention par une vue en coupe partielle ;
- 50 - La figure 7, un exemple de courbe représentative du coefficient de réflexion d'une antenne selon l'invention.

[0012] La figure 1 présente à titre d'exemple une structure rayonnante à base de motifs auto-complémentaires par une vue partielle d'un réseau. Les motifs présentés utilisent des pavés métalliques imprimés 1, 2 de forme carrée, d'autres formes étant possibles. Une structure

rayonnante auto-complémentaire est composée d'un réseau de motifs élémentaires 1, 2 de type dipôle dont chacun des deux pôles est un élément rayonnant, un pavé métallique 1, 2 imprimé de forme carrée dans l'exemple de la figure 1. Chaque motif est alimenté par des lignes bifilaires 10 dont les conducteurs sont connectés à la jonction des deux pavés d'un dipôle. Par exemple une ligne bifilaire 10 a sa première branche connectée à un point d'alimentation 14 d'un pavé et sa deuxième branche connectée à un point d'alimentation 14' du pavé voisin 2, les deux points 14, 14' étant en regard l'un de l'autre.

[0013] Chaque pavé 1, 2 comporte donc quatre points d'alimentation 11, 12, 13, 14 pour réaliser deux polarisations électromagnétiques orthogonales. La structure rayonnante est du type circuit imprimé, les pavés métalliques 1, 2 étant imprimés sur le circuit, les zones entre les pavés étant non métalliques. De façon connue, les lignes bifilaires ayant une impédance caractéristique de l'ordre de 190 ohms pour s'adapter à l'impédance des dipôles (60π ohms, soit la moitié de l'impédance du vide), sont reliées aux autres circuits hyperfréquence à l'aide d'un symétriseur, encore appelé balun, en technologie multicouche permettant ici d'une part la transformation d'impédance de 50 ohms en 190 ohms et d'autre part le passage d'une propagation équilibrée à une propagation non équilibrée.

[0014] La figure 2 présente par une vue en coupe une antenne comportant une structure rayonnante à base de motifs auto-complémentaires du type de celle présentée en figure 1. Plus particulièrement la figure 2 montre l'aspect multicouche d'une telle antenne. La structure multicouche est par exemple composée au moins de la structure rayonnante 21 avec les pavés métalliques 1, de couches isolantes 22, 23 et d'un plan métallique 24. Une couche en mousse 22 est par exemple placée entre le plan métallique et la structure rayonnante 21. Une couche en mousse 23 est par exemple placée au dessus de la structure rayonnante. Cette couche en mousse peut être remplacée par un espace rempli d'air. L'ensemble des couches 21, 22, 23, 24 est recouverte par un radôme 25 qui participe à la qualité du rayonnement.

L'ensemble des lignes bifilaires alimentant les motifs élémentaires ne sont pas représentés sur cette figure pour des raisons de lisibilité. Elles traversent par exemple la couche 22 et le plan métallique 24 pour être connectés à un ou plusieurs circuits de commande, par exemple de type circuit imprimé.

[0015] Les figures 3a et 3b illustrent les phénomènes de courants de mode commun propre aux structures à motifs auto-complémentaires. Ces figures présentent une vue focalisée sur deux pavés métalliques voisins 1, 2 alimentés par une ligne bifilaire 10. Plus précisément, un pavé 1 est alimenté électriquement en un point 14 par une branche 101 de la ligne 10 et l'autre pavé 2 est alimenté en un point 14' par l'autre branche 102 de la ligne. Cette dernière traverse l'isolant 22 supportant les pavés, puis traverse les autres couches non représentées.

La figure 3a présente les courants 31, 32 traversant les pavés, induits par l'alimentation amenée par la ligne bifilaire 10. Ces courants se déplacent dans une même direction, correspondant à un fonctionnement idéal.

5 La figure 3b illustre les courants de mode commun 33, 34 qui se superposent aux courants précédents 31, 32. Ces courants de mode commun sont provoqués par les couplages électromagnétiques entre les pavés métalliques équipés de leurs excitations bifilaires. Les courants de mode commun 33, 34 sont opposés. Leur superposition aux courants nominaux 31, 32 perturbe le rayonnement de la structure rayonnante 21.

[0016] La figure 4 illustre les effets de ces phénomènes de type résonance de mode commun. Plus particulièrement la figure 4 illustre par une courbe 40 la valeur en dB du coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence, entre 6 GHz et 18 GHz. Le coefficient S11 est relié au taux d'onde stationnaire.

Ce phénomène de résonance de mode commun se traduit par une augmentation du coefficient de réflexion proche de 1 à certaines fréquences, illustrée par des pics 41, 42. L'ampleur de l'augmentation du coefficient de réflexion et les fréquences correspondantes dépendent notamment du type de la nature du réseau, et en particulier du type de maille.

L'analyse des champs dans la structure multicouche de l'antenne met en évidence par ailleurs l'apparition d'un champ Ez, perpendiculaire à la surface, qui se propage dans la structure multicouche.

[0017] La figure 5 illustre le principe de l'invention par un exemple de réalisation. Selon l'invention, on insère des vias métallisés en des points donnés 51, 52, 53, 54 dans la couche 22 séparant les éléments rayonnants 1 et le plan de masse, afin de réduire, voire d'éliminer le couplage entre les éléments rayonnant provoquant le mode parasite décrit ci-dessus.

La figure 5 illustre la position de ces points donnés que l'on appellera par la suite points particuliers. Ces points particuliers appartiennent aux éléments rayonnants, c'est-à-dire que les vias sont disposés en regard des éléments rayonnants. La figure 5 illustre des exemples de positions des points particuliers pour un pavé métallique, les positions étant les mêmes pour tous les autres pavés métalliques.

45 Une position avantageuse est située entre les points d'alimentation 11, 12, 13, 14 en dehors de la zone centrale du pavé. Une position particulièrement avantageuse est située au milieu de deux points du côté du pavé comme illustré par la figure 5. De façon plus générale, un point particulier 54 est situé par exemple entre deux points d'alimentation consécutifs 11, 12. Deux points d'alimentation 11, 12 d'un élément rayonnant 1 sont consécutifs s'ils se suivent en parcourant le tour de cet élément. En pratique si la forme de l'élément le permet, les points particuliers peuvent être situés sur une droite reliant deux points consécutif, et notamment au milieu, comme illustré par la figure 5.

Dans l'exemple de cette figure 5, les vias sont placés en

quatre points 51, 52, 53, 54 situés chacun au milieu de points d'alimentation du pavé.

Les vias sont réalisés ainsi en regard de chaque élément rayonnant de la surface rayonnante 21.

[0018] La figure 6 illustre par une vue en coupe, les vias 61, 62, 63 reliant un pavé métallique 1 et le plan de masse, ou plan métallique 24. En réalisant ces vias pour chaque pavé on obtient un maillage régulier de vias 61, 62, 63, 64, 65 bloquant en partie ou totalement le passage des courants de mode commun. On obtient ainsi un réseau de vias métallisés traversant la couche 22, en matériau diélectrique, dans une direction perpendiculaire à la surface rayonnante, les vias étant positionnés en regard des points particuliers 51, 52, 53, 54.

Dans l'exemple des figures 5 et 6, un seul via est disposé entre les points d'alimentation. En cas de nécessité, il est possible de placer plusieurs vias entre deux points d'alimentation, notamment en fonction de la nature du phénomène de mode commun.

[0019] Dans le cas où les éléments rayonnants n'ont pas la forme de pavé carrés comme illustré par les figures, les points particuliers d'insertion des vias peuvent être placés entre les points d'alimentation des éléments rayonnants, en dehors de la zone centrale.

[0020] Pour réaliser les vias 61, 62, 63, 64, 65 on peut utiliser entre les éléments rayonnants 1 et le plan de masse 24 un matériau diélectrique de faible permittivité permettant de réaliser des vias métallisés, éventuellement percés. On peut aussi utiliser des mousses aptes à être métallisées.

[0021] Dans un autre mode de réalisation, dans le cas notamment où les lignes bifilaires sont formées de picots, on peut ajouter des picots supplémentaires aux lignes bifilaires, en particulier dans des modes de réalisation de l'antenne où la couche 22 située entre les éléments rayonnant et le plan de masse est une mousse de faible densité, non apte à être métallisée.

[0022] La figure 7 illustre l'amélioration apportée par le réseau de vias, dans le cas où les vias sont installés selon le mode de réalisation de la figure 5. Comme sur la figure 4, on représente le coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence dans la même plage, entre 6 et 16 GHz. La courbe 40 représentant la valeur du coefficient de réflexion ne présente plus les pics 41, 42 de la courbe 40 de la figure 4. Les points 71, 72 de la courbe correspondant aux fréquences des pics 41, 42 sont fortement atténués, les pics élevés ayant disparus. Par le passage de la première courbe 40 à la deuxième courbe 70, on constate une nette amélioration des performances de la surface rayonnante 21, au niveau du coefficient de réflexion, en fonction de la fréquence, sous incidence de 20 degrés dans l'exemple d'application.

Revendications

1. Antenne réseau du type multicouche comportant une structure rayonnante (21) formée d'un réseau

d'éléments rayonnants (1, 2) composant des motifs auto-complémentaires, chaque élément rayonnant comportant quatre points d'alimentation électrique (11, 12, 13, 14), ladite surface rayonnante étant séparée d'un plan de masse (24) par une couche diélectrique (22), **caractérisée en ce que** ladite antenne comporte un réseau de vias métallisés (61, 62, 63, 64, 65) traversant ladite couche diélectrique (22) entre la surface rayonnante (21) et le plan de masse (24), chaque via étant positionné en regard d'un point donné (51, 52, 53, 54), dit point particulier, d'un élément rayonnant, chaque point particulier étant situé entre deux points d'alimentation électriques consécutifs, deux points d'alimentation consécutifs (11, 12) se suivant dans le parcours du tour d'un élément rayonnant.

2. Antenne selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** chaque point particulier est situé au milieu de deux points d'alimentation électrique (11, 12) consécutifs.
3. Antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** les vias sont des trous métallisés réalisés dans ladite couche (22).
4. Antenne selon l'une quelconque des revendications 1 à 2, **caractérisée en ce que** les vias ont la forme de picots.
5. Antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** la structure rayonnante (21) est du type circuit imprimé, les éléments rayonnants étant des pavés métalliques imprimés.
6. Antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** la structure rayonnante est recouverte d'une couche diélectrique (23), ladite couche (23) étant recouverte d'un radôme (45).
7. Antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce qu'**elle est apte à fonctionner dans une large bande de fréquences, pour des applications multifonctions.

Patentansprüche

1. Netzwerkantenne vom Typ Mehrschichtantenne, beinhaltend eine Strahlstruktur (21), gebildet aus einem Netzwerk von Strahlelementen (1, 2) welche selbstkomplementäre Motive bilden, wobei jedes Strahlelement vier elektrische Speisungspunkte (11, 12, 13, 14) beinhaltet, wobei die Strahlfläche von einer Massenebene (24) durch eine dielektrische Schicht (22) getrennt ist, **dadurch gekennzeichnet,**

- dass** die Antenne ein Netzwerk von metallisierten Durchgängen (61, 62, 63, 64, 65) beinhaltet, welche die dielektrische Schicht (22) zwischen der Strahlfläche (21) und der Massenebene (24) durchqueren, wobei jeder Durchgang gegenüber einem gegebenen Punkt (51, 52, 53, 54), genannt besonderer Punkt, eines Strahlelementes positioniert ist, wobei jeder besondere Punkt zwischen zwei aufeinanderfolgenden elektrischen Speisungspunkten befindlich ist, wobei zwei aufeinanderfolgende Speisungspunkte (11, 12) einander in der Umfangsbahn eines Strahlelementes folgen.
2. Antenne nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder besondere Punkt in der Mitte zweier aufeinanderfolgender elektrischer Speisepunkte (11, 12) befindlich ist.
 3. Antenne nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Durchgänge metallisierte Löcher sind, welche in der Schicht (22) gebildet sind.
 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Durchgänge die Form von Noppen besitzen.
 5. Antenne nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Strahlstruktur (21) eine Struktur vom Typ Leiterplatte ist, wobei die Strahlelemente gedruckte Metallblöcke sind.
 6. Antenne nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Strahlstruktur mit einer dielektrischen Schicht (23) bedeckt ist, wobei die Schicht (23) mit einem Radom (45) bedeckt ist.
 7. Antenne nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie in der Lage ist, in einem breiten Frequenzband für Multifunktionsanwendungen zu arbeiten.
- site a given point (51, 52, 53, 54), called specific point, of a radiating element, each specific point being located between two consecutive electrical power supply points, with two consecutive power supply points (11, 12) following each other in the path around a radiating element.
2. The antenna as claimed in claim 1, **characterised in that** each specific point is located at the centre of two consecutive electrical power supply points (11, 12).
 3. The antenna as claimed in any one of the preceding claims, **characterised in that** the vias are metallic holes produced in said layer (22).
 4. The antenna as claimed in any one of claims 1 to 2, **characterised in that** the vias are in the form of pins.
 5. The antenna as claimed in any one of the preceding claims, **characterised in that** the radiating structure (21) is of the printed circuit type, with the radiating elements being printed metal blocks.
 6. The antenna as claimed in any one of the preceding claims, **characterised in that** the radiating structure is covered with a dielectric layer (23), said layer (23) being covered with a radome (45).
 7. The antenna as claimed in any one of the preceding claims, **characterised in that** it is able to operate in a wide frequency band, for multifunction applications.

Claims

1. A multilayer type antenna array comprising a radiating structure (21) formed by an array of radiating elements (1, 2) forming self-complementary patterns, each radiating element comprising four electrical power supply points (11, 12, 13, 14), said radiating surface being separated from a ground plane (24) by a dielectric layer (22), **characterised in that** said antenna comprises an array of metallic vias (61, 62, 63, 64, 65) passing through said dielectric layer (22) between the radiating surface (21) and the ground plane (24), each via being positioned oppo-

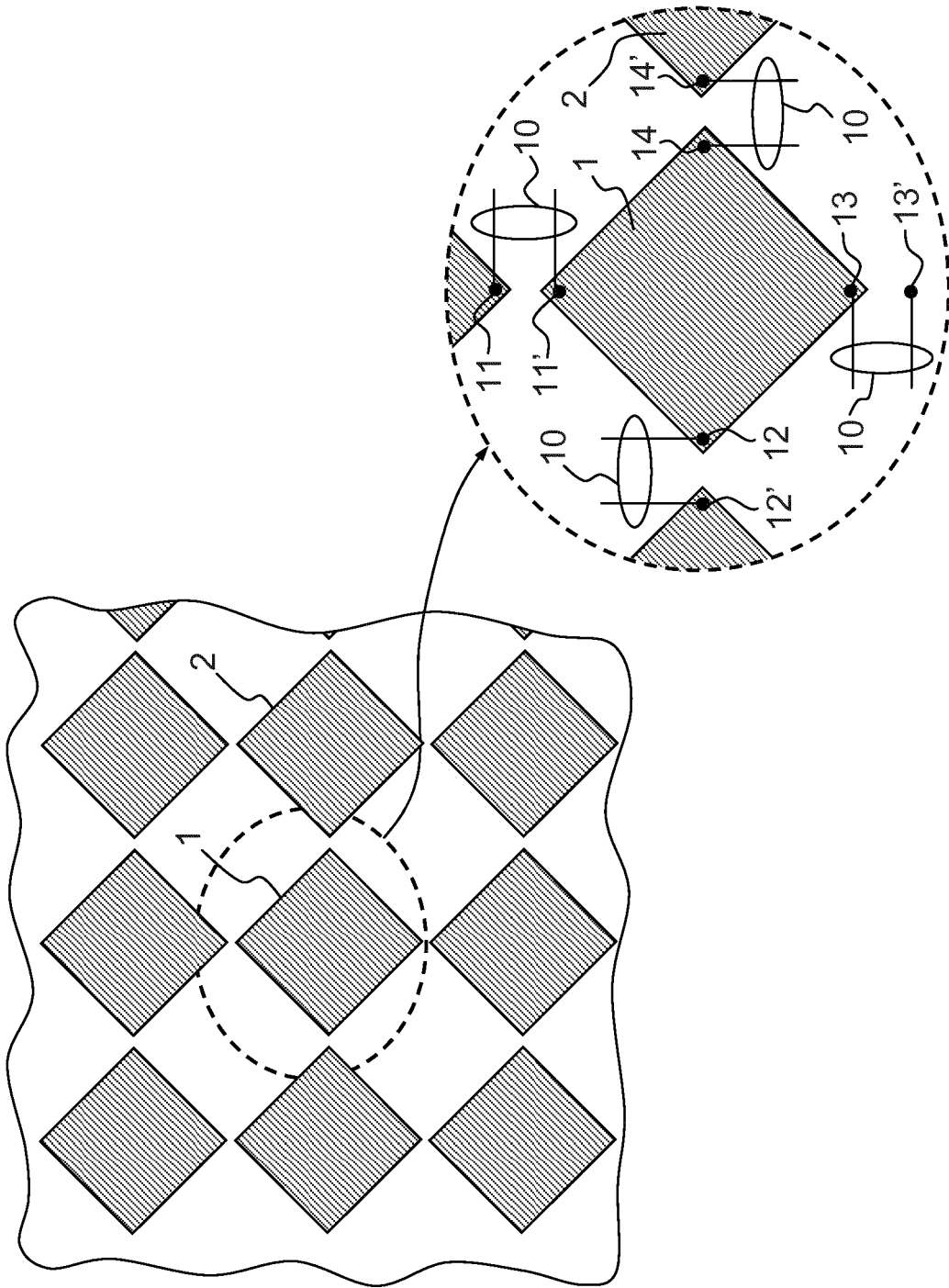


FIG. 1

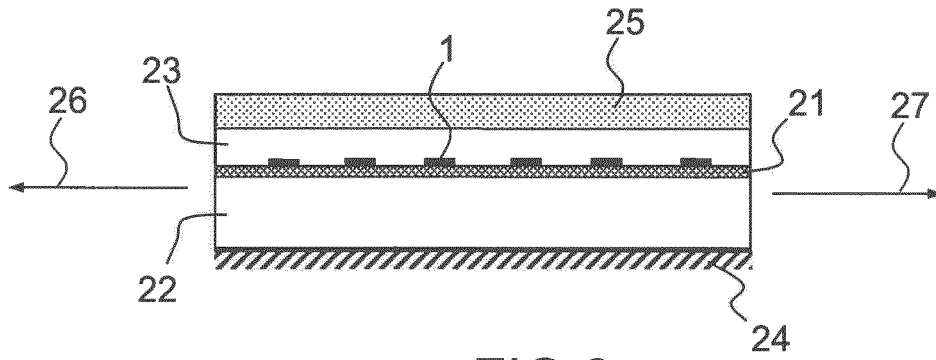


FIG. 2

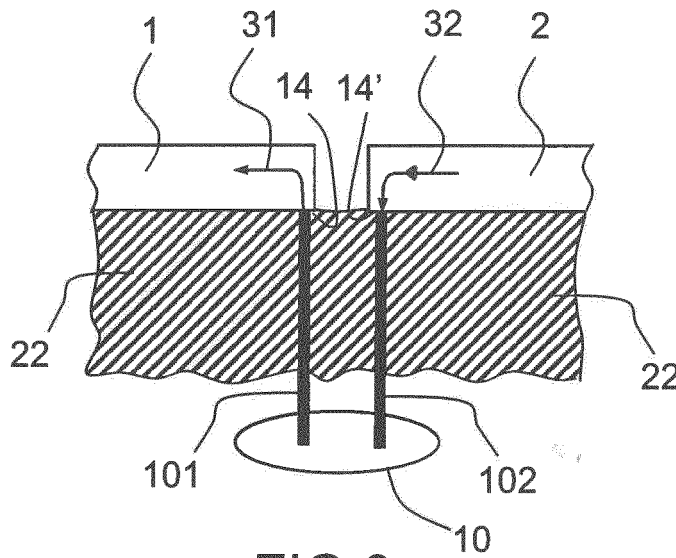


FIG. 3a

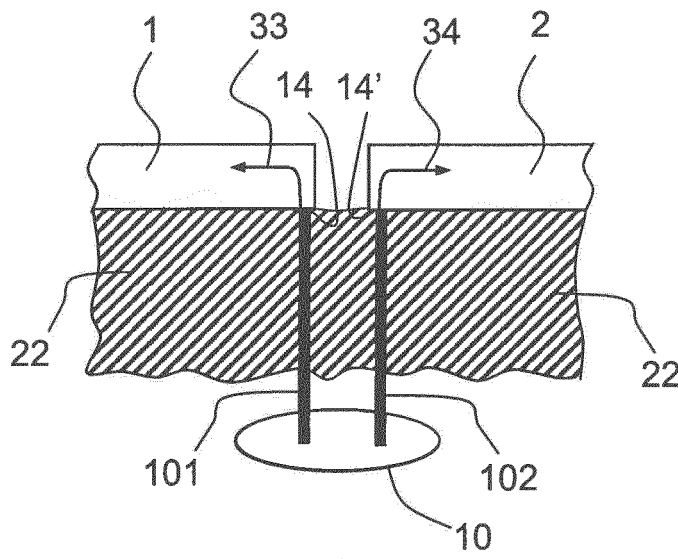


FIG. 3b

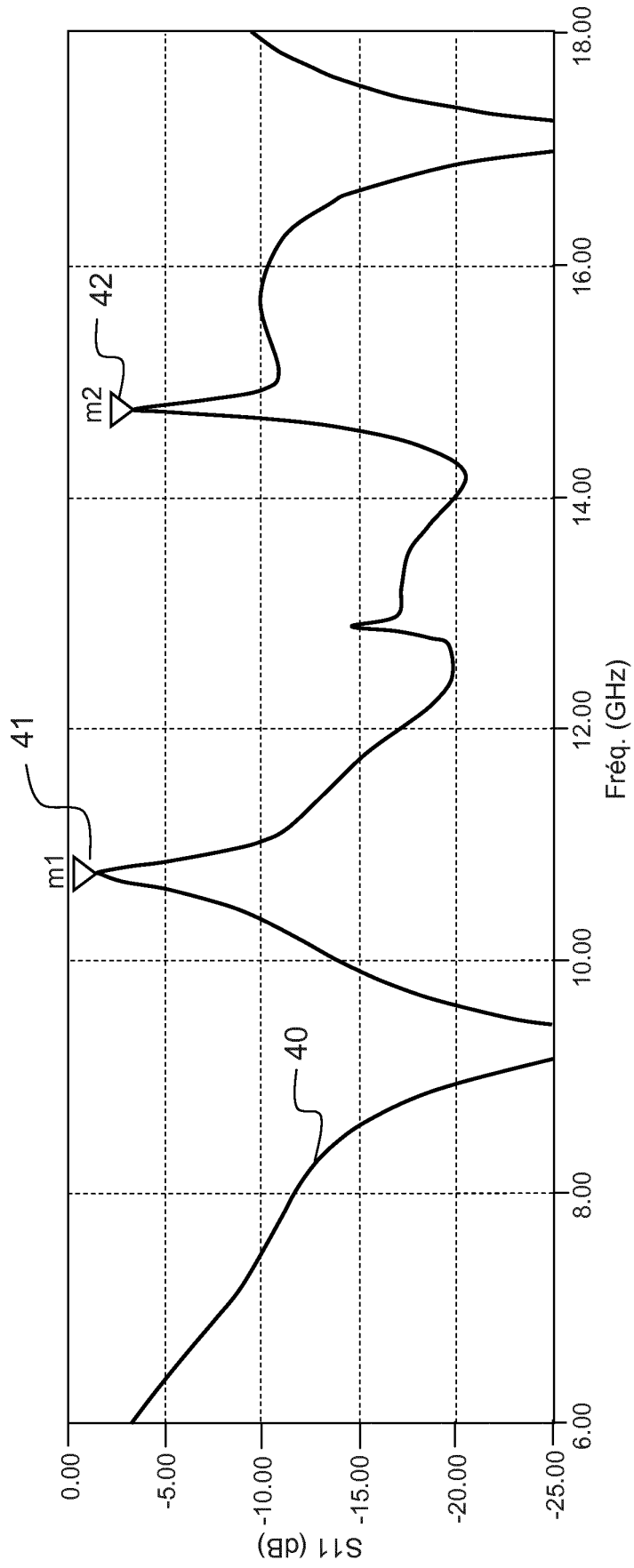


FIG.4

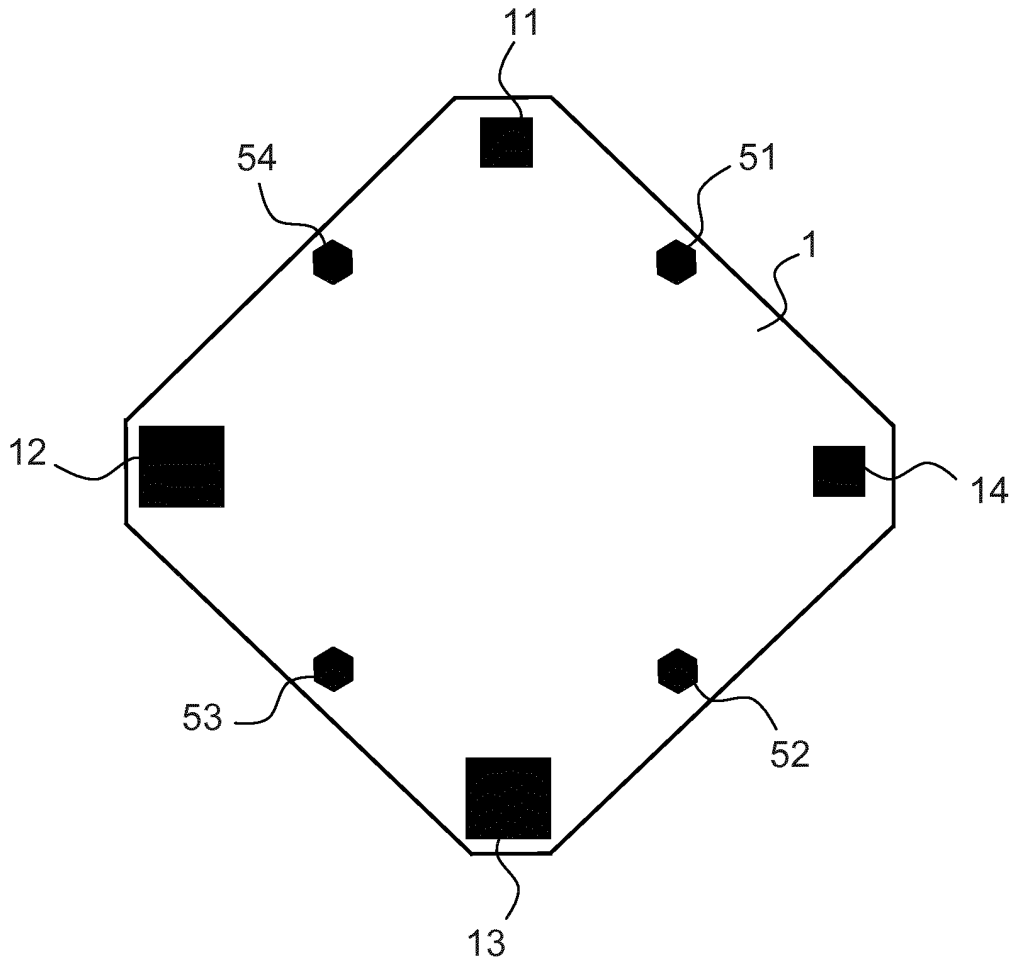


FIG. 5

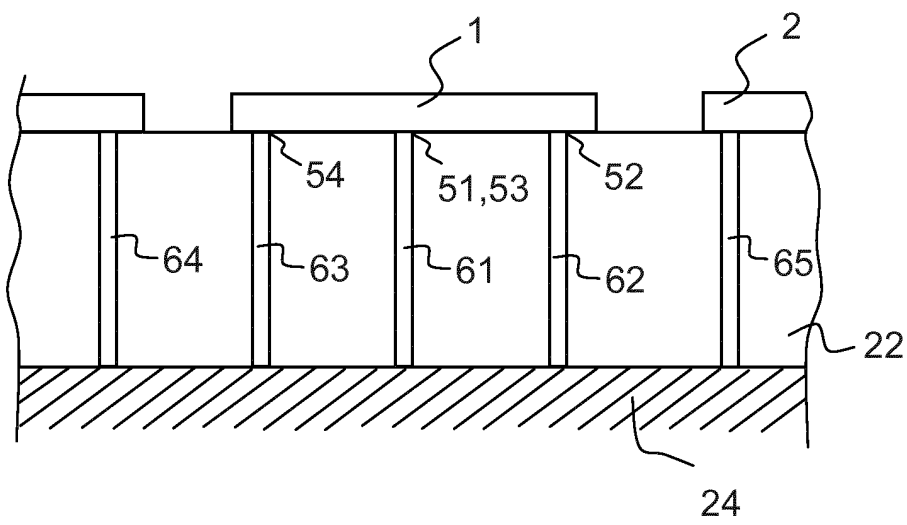


FIG. 6

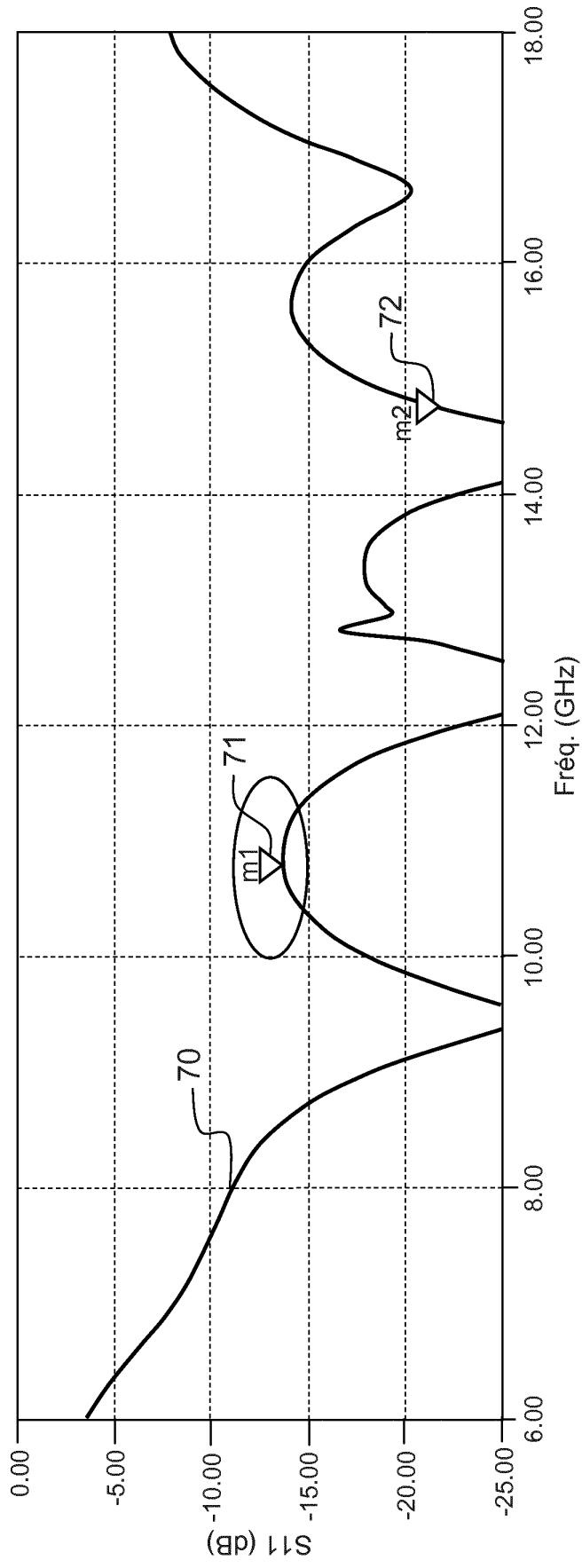


FIG.7

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.

Littérature non-brevet citée dans la description

- **A. NETO ; D. CAVALLO ; G. GERINI ; G. TOSO.** Scanning Performances of Wide Band Connected Arrays in the Presence of a Backing Reflector. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Octobre 2009, vol. 57 (10 [0002]
- **D.CAVALLO ; A. NETO ; G. GERINI.** *Analysis of Common-Mode Résonances in Arrays of Connected Dipoles and Possible Solutions- EUCAP*, 2009 [0002]
- **STEVEN S. HOLLAND ; MARINOS N. VOUVAKIS.** The Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Array. *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, Janvier 2012, vol. 60 (1 [0002]
- **LOGAN JOHN et al.** Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) arrays scalable to mm-waves. *2013 IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM (APSURSI)*, 07 Juillet 2013, 624-625 [0004]