



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
03.12.2014 Bulletin 2014/49

(51) Int Cl.:
H01Q 15/00 (2006.01) H01Q 1/52 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **14169886.0**

(22) Date de dépôt: **26.05.2014**

(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

(72) Inventeurs:
• **Pintos, Jean-François**
38140 Saint-Blaise-du-Buis (FR)
• **El Bouayadi, Ossama**
38000 Grenoble (FR)

(30) Priorité: **31.05.2013 FR 1354998**

(74) Mandataire: **Bonnet, Michel**
Cabinet Bonnet
93, Rue Réaumur - Boîte 10
75002 Paris (FR)

(71) Demandeur: **Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives**
75015 Paris (FR)

(54) **Dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques et son procédé de fabrication**

(57) Ce dispositif (10) de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques à structure de métamatériau (12) comporte :

- une pluralité d'éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) séparés les uns des autres et disposés sur un substrat (14),
- une pluralité de réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) interconnectant électriquement au moins une partie de ces éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$), ces réseaux d'interconnexion (20, 22, 24)

n'étant pas connectés électriquement entre eux.

En outre, au moins deux de ces réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) sont dimensionnés différemment l'un de l'autre pour engendrer des déphasages ($\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{n/2}$), entre les éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) qu'ils interconnectent, différents de l'un de ces réseaux d'interconnexion à l'autre.

Un tel dispositif permet de diminuer davantage le couplage entre des antennes planaires placées autour d'un métamatériau de ce type.

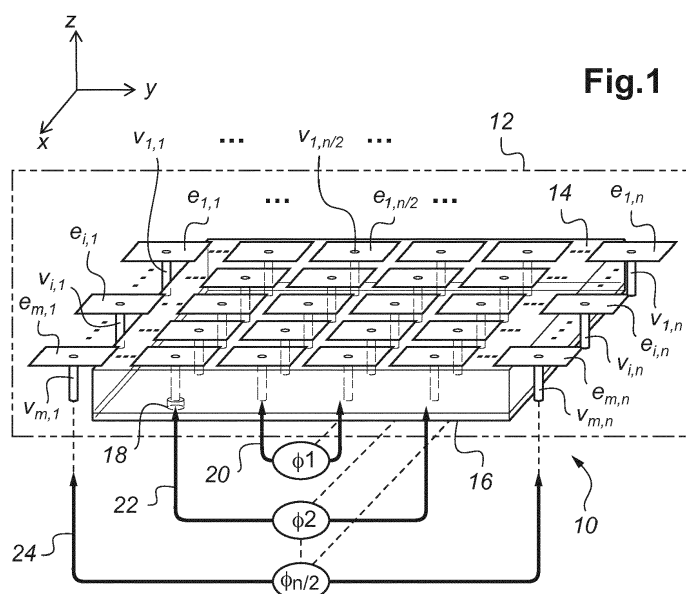


Fig.1

Description

[0001] La présente invention concerne un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques. Elle concerne également un procédé de fabrication de ce dispositif.

[0002] L'invention s'applique plus particulièrement à un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques à structure de métamatériau comportant :

- une pluralité d'éléments conducteurs séparés les uns des autres et disposés sur un substrat,
- une pluralité de réseaux d'interconnexion interconnectant électriquement au moins une partie de ces éléments conducteurs, ces réseaux d'interconnexion n'étant pas nécessairement connectés électriquement entre eux.

[0003] L'utilisation d'antennes dans des systèmes de communication, de surveillance ou de navigation satellitaire est incontournable. Cependant, dans ce type de systèmes, la place disponible pour ces dispositifs est réduite et impose un besoin de miniaturisation des antennes.

[0004] Grâce à leur taille réduite, les antennes planaires font de bonnes candidates pour ce type de systèmes. De façon générale, une antenne planaire comporte une surface conductrice rayonnante, par exemple carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur ou plan de masse par un substrat.

[0005] Une antenne planaire peut être utilisée seule ou comme élément d'un réseau d'antennes. Afin de réduire la taille d'un réseau d'antennes, il est nécessaire de réduire la distance entre leurs surfaces rayonnantes. Cependant, ceci augmente le niveau de couplage entre ces surfaces rayonnantes. Or, ce couplage dégrade fortement les performances des antennes engendrant une baisse du rendement, des problèmes de dégradation de la polarisation des antennes ou des asymétries dans leur diagramme de rayonnement.

[0006] Parmi les différents types d'ondes qui peuvent se propager à partir d'une antenne planaire provoquant des couplages entre les surfaces rayonnantes du réseau d'antennes, on peut distinguer : des ondes spatiales diffractées par les bords des surfaces rayonnantes, des ondes de surface entre le substrat et l'air et des ondes de surface guidées par le substrat. En outre, un substrat diélectrique placé entre la surface rayonnante d'une antenne planaire et le plan de masse favorise le couplage par des ondes de surface qui peuvent être particulièrement gênantes.

[0007] Grâce à leurs propriétés électromagnétiques particulières, les métamatériaux ont trouvé un grand nombre d'applications dans le domaine des antennes. Notamment, parmi les différentes structures de métamatériaux existantes, les structures dites EBG (de l'anglais, « Electromagnetic Band Gap ») aussi connues de l'homme

du métier sous le nom de structures BIE (du français, « Bande Interdite Electromagnétique »), permettent de réduire le niveau de couplage entre les antennes d'un réseau. En effet, ce type de structures EBG possède la propriété d'empêcher la propagation d'ondes dans une bande de fréquences dite bande interdite électromagnétique. Ainsi, lorsque de telles structures EBG sont insérées entre les surfaces rayonnantes d'un réseau d'antennes, elles empêchent notamment la propagation des ondes de surface d'une antenne à l'autre permettant de réduire le niveau de couplage entre ces antennes.

[0008] L'article de Yang et al., intitulé « Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications », publié dans IEEE Transactions on Antennas and Propagation, volume 51, numéro 10, octobre 2003, propose l'utilisation d'une structure EBG de type « champignon » placée entre deux antennes planaires et démontre que cette structure est capable de diminuer le couplage entre les antennes dans la bande interdite électromagnétique de cette structure EBG.

[0009] Selon cet article, une structure EBG dite de type « champignon » comporte, de façon générale, un ensemble périodique d'éléments conducteurs de type EBG séparés les uns des autres, imprimés sur un substrat diélectrique et connectés à un plan de masse par l'intermédiaire d'un ensemble de vias métalliques formés dans le substrat diélectrique. Le comportement électrique de ce type de structure EBG soumise à une onde électromagnétique peut être modélisé selon un circuit résonant LC. En effet, lorsqu'une onde électromagnétique interagit avec la surface des éléments conducteurs, elle engendre une accumulation de charges au bord de la surface de ces éléments conducteurs et une boucle de courant s'établit entre deux de ces éléments conducteurs par l'intermédiaire des vias métalliques. Ainsi, une inductance (L) résulte du courant circulant à travers les vias métalliques et une capacité (C) résulte de l'accumulation de charges entre les éléments conducteurs. Il est bien connu de l'homme du métier que la fréquence de résonance f_r d'un circuit LC est proportionnelle à

l'expression : $\frac{1}{\sqrt{LC}}$, et que la largeur BW de la bande de passante associée à cette fréquence de résonance f_r

est proportionnelle à l'expression : $\sqrt{\frac{L}{C}}$. Ainsi, selon

ce modèle de circuit résonant LC, ce type de structure EBG se comporte comme un filtre coupe-bande des ondes incidentes à cette fréquence de résonance.

[0010] Les auteurs proposent une méthode expérimentale pour caractériser la bande interdite d'une structure EBG de type « champignon » avec plus de précision que le modèle LC, démontrant par la suite que la suppression des ondes de surface n'a lieu que lorsque la fréquence de propagation de ces ondes de surface se trouve dans la bande interdite de fréquences de la struc-

ture EBG.

[0011] Enfin, après avoir effectué une comparaison des performances des structures EBG avec d'autres techniques bien connues de l'homme du métier permettant aussi la suppression d'ondes de surface, les auteurs montrent que, parmi ces techniques, les structures de type EBG présentent les meilleurs résultats de réduction du couplage entre antennes.

[0012] Néanmoins, la bande interdite d'une structure EBG de type « champignon » dépend d'un certain nombre de paramètres inhérents à la structure, par exemple la taille et le nombre d'éléments conducteurs, le type de substrat, les dimensions du substrat, etc. Ces paramètres étant fixés lors de la conception de la structure EBG, la modification du comportement de ce type de structures n'est pas facilement envisageable après sa fabrication.

[0013] Dans le brevet publié sous le numéro FR 2 867 617 B1, un exemple de réalisation d'un métamatériau permettant de modifier ses propriétés de filtrage est proposé. Ce métamatériau est réalisé à partir d'éléments conducteurs transversaux formés d'îlots métalliques dans une matrice diélectrique, par exemple une mousse de polymère. L'idée est de réaliser un réseau 3D d'éléments conducteurs permettant de perturber de façon prédéterminée la propagation d'ondes électromagnétiques. Ainsi, par superposition de plusieurs couches d'éléments conducteurs dont au moins une couche comporte des éléments conducteurs transversaux, les propriétés de filtrage d'une telle structure volumique d'éléments conducteurs peuvent être prédéterminées. Ces éléments conducteurs transversaux peuvent être des dipôles transversaux. Ils peuvent aussi former des boucles transversales, ouvertes ou fermées, à l'aide d'une ou de deux pistes conductrices reliant une ou les deux extrémités des deux éléments conducteurs transversaux entre elles.

[0014] Afin de pouvoir relier les couches entre elles, des connexions utilisant des composants passifs ou des composants actifs, par exemple des diodes PIN, permettant d'interconnecter deux éléments conducteurs adjacents entre eux, peuvent être utilisées.

[0015] Cependant, cette structure permet seulement d'interconnecter deux éléments conducteurs adjacents. Etant donné que la distance entre deux éléments conducteurs adjacents est constante, le déphasage généré entre eux lors de leur connexion est identique pour toutes les paires d'éléments ainsi connectés.

[0016] Lorsque des interconnexions à base de diodes PIN sont utilisées, celles-ci sont simplement employées en tant que commutateurs. Dans ce cas, une logique de contrôle permet de modifier la polarisation de ces composants actifs et en conséquence de couper ou d'établir les connexions entre les éléments conducteurs.

[0017] En outre, ce type de structure de métamatériau 3D n'est pas optimal en taille lorsqu'il s'agit de l'utiliser dans un réseau d'antennes planaires ou dans un système quelconque dans lequel un encombrement réduit des dispositifs est souhaité.

[0018] Il peut ainsi être souhaité de prévoir un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques qui permette de s'affranchir d'au moins une partie des problèmes et contraintes précités.

[0019] L'invention a donc pour objet un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques à structure de métamatériau comportant :

- une pluralité d'éléments conducteurs séparés les uns des autres et disposés sur un substrat,
- une pluralité de réseaux d'interconnexion interconnectant électriquement au moins une partie de ces éléments conducteurs, ces réseaux d'interconnexion n'étant pas connectés électriquement entre eux,

dans lequel au moins deux de ces réseaux d'interconnexion sont dimensionnés différemment l'un de l'autre pour engendrer des déphasages, entre les éléments conducteurs qu'ils interconnectent, différents de l'un de ces réseaux d'interconnexion à l'autre.

[0020] Grâce à l'invention, une nouvelle manière de modifier le comportement d'un métamatériau est proposée. Plus précisément, un réglage supplémentaire est proposé, ce réglage étant extrinsèque à la structure du métamatériau. En effet, en interconnectant les éléments conducteurs du métamatériau entre eux à l'aide de plusieurs réseaux isolés électriquement, des déphasages s'établissent entre les éléments conducteurs reliés électriquement et il a été remarqué de façon surprenante qu'une combinaison optimale d'au moins deux déphasages différents entre éléments d'un réseau à l'autre permet de diminuer davantage le couplage entre des antennes planaires placées autour d'un métamatériau de ce type. Il en résulte une meilleure efficacité de ces métamatériaux, en particulier lorsqu'ils sont utilisés en tant que structure EBG mais pas seulement.

[0021] Contrairement à l'état de la technique précédemment cité, où les distances entre les éléments conducteurs interconnectés sont identiques, l'invention impose par dimensionnement des réseaux d'interconnexion qu'au moins deux de ces distances soient différentes afin de permettre cette combinaison optimale de déphasages différents.

[0022] Ce type de réglage par déphasage de réseaux d'interconnexion en les dimensionnant différemment permet de régler la fréquence de résonance du métamatériau sans augmenter son encombrement. En outre, il est non seulement adapté à tout type de structure de métamatériau, par exemple homogène, non homogène, planaire, volumique ou autre, mais il est aussi facile à réaliser sous forme industrielle quelle que soit la technologie du métamatériau, par exemple les circuits imprimés, les guides d'ondes, les lignes coaxiales, etc.

[0023] De façon optionnelle, au moins une partie desdits réseaux d'interconnexion est munie de dispositifs de déphasage réglables pour la connexion des éléments conducteurs entre eux.

[0024] Ainsi, avec l'utilisation d'éléments actifs que sont des dispositifs de déphasage réglables, par exemple des diodes, lors de l'interconnexion des éléments conducteurs entre eux, il devient possible d'ajuster les déphasages en fonction de l'application à optimiser en réglant simplement ces éléments actifs tout en conservant la structure du métamatériau et sans toucher au dimensionnement établi des réseaux d'interconnexion.

[0025] De façon optionnelle également, les éléments conducteurs sont répartis sur le substrat de façon matricielle selon m lignes et n colonnes, n étant un nombre pair, chaque réseau d'interconnexion interconnectant deux éléments conducteurs d'une même i-ème ligne placés sur les $(\frac{n}{2} - j)$ -ème et $(\frac{n}{2} + 1 + j)$ -ème colonnes, où, pour chaque réseau d'interconnexion, i prend l'une des valeurs de l'intervalle [1, m] et j l'une des valeurs

de l'intervalle $[0, \frac{n}{2} - 1]$.

[0026] De façon avantageuse, le substrat comporte une face supérieure et une face inférieure, la pluralité d'éléments conducteurs étant placée sur la face supérieure du substrat, la structure de métamatériau comportant en outre :

- un plan de masse placé sur la face inférieure du substrat avec des trous aménagés dans ce plan de masse,
- un ensemble de vias métalliques formés dans le substrat et le traversant sur toute son épaisseur, chacun de ces vias métalliques comportant une extrémité supérieure en contact avec l'un des éléments conducteurs et une extrémité inférieure disposée en regard de l'un des trous du plan de masse, sans contact électrique avec le plan de masse.

[0027] De façon optionnelle également, les extrémités inférieures des vias métalliques en contact avec les éléments conducteurs interconnectés forment des ports d'accès en points d'alimentation auxquels sont raccordés les réseaux d'interconnexion.

[0028] De façon optionnelle également, la structure de métamatériau comporte deux couches d'éléments conducteurs superposées et disposées sur une face supérieure du substrat, chacune de ces couches comportant une pluralité d'éléments conducteurs séparés les uns des autres et répartis de façon matricielle selon m lignes et n colonnes, ces deux couches étant séparées entre elles suivant une direction normale à la face supérieure du substrat d'une distance prédéterminée, les éléments conducteurs de la première couche étant disposés en quinconce par rapport aux éléments conducteurs de la deuxième couche de façon à augmenter l'effet capacitif de la cellule.

[0029] De façon optionnelle également, chacun des éléments conducteurs présente l'une des formes de l'ensemble constitué d'une forme carrée, d'une forme rec-

tangulaire, d'une forme de spirale, d'une forme de fourchette, d'une forme de croix à béquilles et d'une forme duale de croix à béquilles dite forme UC-EBG.

[0030] De façon optionnelle également, ladite pluralité de réseaux d'interconnexion présente l'une des topologies de l'ensemble constitué d'une topologie linéaire, d'une topologie en étoile, d'une topologie radiale et d'une topologie en arbre.

[0031] L'invention a également pour objet un système d'émission/réception d'ondes électromagnétiques comprenant au moins deux antennes entre lesquelles est disposé au moins un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques selon l'invention.

[0032] L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques à structure de métamatériau comportant les étapes suivantes :

- disposition sur un substrat d'une pluralité d'éléments conducteurs séparés les uns des autres,
- interconnexion électrique d'au moins une partie de ces éléments conducteurs à l'aide d'une pluralité de réseaux d'interconnexion, ces réseaux d'interconnexion n'étant pas connectés électriquement entre eux,

comprenant en outre une étape de dimensionnement des réseaux d'interconnexion, dans laquelle au moins deux de ces réseaux d'interconnexion sont dimensionnés différemment l'un de l'autre pour engendrer des déphasages, entre les éléments conducteurs qu'ils interconnectent, différents de l'un de ces réseaux d'interconnexion à l'autre.

[0033] L'invention sera mieux comprise à l'aide de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 représente en perspective coupée la structure générale d'un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques, selon un mode de réalisation de l'invention,
- la figure 2 représente en perspective un exemple de disposition d'une pluralité d'éléments conducteurs d'un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques, selon un mode de réalisation préféré de l'invention,
- la figure 3 représente en perspective coupée une cellule élémentaire de la pluralité d'éléments conducteurs de la figure 2,
- la figure 4 est une vue de dessus partielle de l'ensemble d'éléments conducteurs de la figure 2,
- la figure 5 est une vue en coupe d'un exemple de système d'émission/réception à deux antennes,
- la figure 6 est une vue schématique de dessus du système d'émission/réception de la figure 5,
- la figure 7 est une vue schématique de dessus du système d'émission/réception de la figure 5 compor-

tant en outre un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques, selon un mode de réalisation de l'invention,

- la figure 8 illustre des courbes de couplage entre antennes des systèmes d'émission/réception des figures 6 et 7 en fonction de la fréquence d'émission/réception des antennes,
- la figure 9 illustre des courbes de couplage entre antennes des systèmes d'émission/réception des figures 6 et 7 en fonction de la distance entre les antennes,
- la figure 10 illustre les étapes successives d'un procédé de fabrication d'un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques, selon un mode de réalisation de l'invention.

[0034] La figure 1 représente en perspective coupée la structure générale d'un dispositif 10 de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques à structure de métamatériau 12, selon un mode de réalisation possible de l'invention. Ce dispositif peut par exemple être placé entre deux éléments d'une antenne planaire définis sur un même substrat pour limiter les ondes de surface entre ces deux éléments.

[0035] Dans ce mode de réalisation, la structure de métamatériau 12 est de type champignon et comporte une pluralité d'éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ de forme rectangulaire, séparés les uns des autres et disposés sur une face supérieure d'un substrat 14 réalisé, par exemple, en matériau diélectrique. Ce substrat peut être un matériau isolant à base d'époxy, matériau isolant bien connu de l'homme du métier, par exemple du type FR4 avec une valeur de permittivité relative ϵ_R d'environ 4,4. Les éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ sont répartis sur le substrat 14 de façon matricielle en m lignes et n colonnes selon deux directions principales orthogonales notées y et x . Ainsi, chaque ligne d'éléments conducteurs, par exemple la première ligne, comporte n éléments conducteurs selon la direction x ($e_{1,1}, \dots, e_{1,j}, \dots, e_{1,n}$, pour cette première ligne) et chaque colonne d'éléments conducteurs, par exemple la dernière colonne, comporte m éléments conducteurs selon la direction y ($e_{1,n}, \dots, e_{i,n}, \dots, e_{m,n}$, pour cette dernière colonne). Un plan de masse 16 est placé sur une face inférieure du substrat 14 avec des trous 18 aménagés dans ce plan de masse 16 et disposés en vis-à-vis des éléments conducteurs selon une direction z orthogonale au plan (x, y). Pour des raisons de clarté, un seul trou 18 est représenté sur la figure 1, mais le plan de masse 16 comporte concrètement autant de trous 18 que d'éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$.

[0036] Le dispositif 10 de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques comporte en outre un ensemble de vias métalliques $v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}$ formés dans le substrat 14. Ces vias métalliques $v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}$ traversent le substrat 14 sur toute son épaisseur. L'extrémité supérieure de chacun de ces vias métalliques, par exemple le via $v_{i,j}$, est en contact avec l'un des

éléments conducteurs, en l'occurrence l'élément conducteur $e_{i,j}$ pour le via $v_{i,j}$. L'extrémité inférieure de chacun de ces vias métalliques est disposée en regard de l'un des trous 18 du plan de masse 16, sans contact électrique avec le plan de masse 16, permettant aux éléments conducteurs d'établir des connexions électriques externes à la structure de métamatériau 12. A titre d'exemple, l'élément conducteur $e_{1,1}$ peut être connecté électriquement à l'élément conducteur $e_{1,n}$ à l'aide d'une ligne de transmission connectant les extrémités inférieures de leurs vias respectifs $v_{1,1}$ et $v_{1,n}$.

[0037] Selon le mode particulier de réalisation de la figure 1, les éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ sont interconnectés électriquement deux par deux, selon une direction privilégiée, celle de l'axe y , à l'aide d'une pluralité de réseaux d'interconnexion, ces réseaux d'interconnexion n'étant pas connectés électriquement entre eux. Pour des raisons de clarté, seule une partie des réseaux d'interconnexion de la dernière ligne m est représentée sur la figure 1 par les références 20, 22, 24, mais toutes les lignes d'éléments conducteurs comportent également des réseaux d'interconnexion.

[0038] Ainsi, selon ce mode de réalisation, chaque réseau d'interconnexion connecte deux éléments conducteurs d'une même i -ème ligne placés sur les

$(\frac{n}{2} - j)$ -ème et $(\frac{n}{2} + 1 + j)$ -ème colonnes, où, pour chaque réseau d'interconnexion, i prend l'une des valeurs de l'intervalle $[1, m]$ et j l'une des valeurs de l'intervalle $[0, \frac{n}{2} - 1]$. De cette façon, le réseau d'inter-

nexion 20 illustré sur la figure 1 connecte les deux éléments $e_{m,n/2}$ et $e_{m,n/2+1}$ placés au centre de la m -ième et dernière ligne, le réseau d'interconnexion 22 connecte ensuite les deux éléments voisins $e_{m,n/2-1}$, $e_{m,n/2+2}$ entre eux. Les autres éléments conducteurs de la m -ième et dernière ligne sont interconnectés de la même manière deux à deux de proche en proche jusqu'au réseau d'interconnexion 24 qui connecte le premier élément $e_{m,1}$ et le dernier élément $e_{m,n}$ de la m -ième et dernière ligne.

[0039] Comme évoqué précédemment, les réseaux d'interconnexion des éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ entre eux peuvent être constitués de lignes de transmission. Il est connu de l'homme du métier qu'un modèle équivalent de premier ordre caractérise une ligne de transmission par un déphasage dont la valeur est fonction de la longueur de cette ligne de transmission.

[0040] En conséquence, une topologie linéaire de réseaux d'interconnexion telle que celle décrite précédemment permet d'engendrer des déphasages différents $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{n/2}$ entre les éléments conducteurs interconnectés par les réseaux d'interconnexion 20, 22, 24 (et les autres non représentés) puisque les longueurs de ces réseaux d'interconnexion constitués de lignes de transmission sont différentes.

[0041] Il faut noter que dans ce mode de réalisation n

est nécessairement un nombre pair, permettant de connecter tous les éléments d'une ligne entre eux deux à deux. Cependant, dans d'autres variantes de réalisation, il peut y avoir certains éléments conducteurs parmi les n éléments conducteurs $e_{i,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{i,n}$ d'une ligne i quelconque du métamatériau qui ne sont pas interconnectés électriquement entre eux ou qui sont interconnectés à plus de deux par réseau d'interconnexion.

[0042] Egalement, dans ce mode de réalisation, une topologie linéaire identique des réseaux d'interconnexion est appliquée à toutes les lignes de la structure de métamatériau 12. Néanmoins, dans d'autres variantes de réalisation, la topologie linéaire des réseaux d'interconnexion peut être différente d'une ligne à une autre de cette structure.

[0043] En outre, les éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ de la structure de métamatériau 12 peuvent être interconnectés électriquement selon des topologies de réseaux d'interconnexion diverses et notamment différentes d'une topologie linéaire. Ils peuvent, par exemple, être interconnectés selon une topologie en étoile ou une topologie radiale ou une topologie en arbre.

[0044] D'une façon générale, conformément à l'invention, et quelle que soit la topologie choisie d'interconnexion des éléments conducteurs, au moins deux des réseaux d'interconnexion sont dimensionnés différemment l'un de l'autre pour engendrer des déphasages, entre les éléments conducteurs qu'ils interconnectent, différents de l'un de ces réseaux d'interconnexion à l'autre.

[0045] D'autre part, dans d'autres modes de réalisation possibles, les éléments conducteurs peuvent avoir des formes différentes de celle, rectangulaire, illustrée sur la figure 1. Il est bien connu de l'homme du métier la conception d'éléments conducteurs en forme de carré, spirale, fourchette, croix à béquilles et en forme duale de croix à béquilles dite forme UC-EBG comme détaillé dans l'article de Kovacs et al, intitulé « Dispersion analysis of planar metallo-dielectric EBG structures in Ansoft HFSS », publié à l'occasion de « 17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications », 19-21 mai 2008.

[0046] La figure 2 représente en perspective un exemple de disposition préférée des éléments conducteurs de la structure de métamatériau 12 du dispositif 10 de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques. Plus précisément, cette disposition préférée comporte deux couches d'éléments conducteurs verticalement superposées (la verticale étant définie par la direction z) et disposées sur la face supérieure du substrat 14.

[0047] La superposition de couches d'éléments conducteurs permet d'augmenter l'effet capacitif de la structure de métamatériau 12 en permettant un recouvrement partiel des éléments conducteurs de ces couches, rendant ainsi la fréquence de résonance f_r de cette structure indépendante de la taille des éléments conducteurs. En revanche, la fréquence de résonance f_r devient plutôt fonction du nombre d'éléments conducteurs.

[0048] Comme dans le mode de réalisation précédem-

ment décrit, chacune de ces deux couches comporte une pluralité d'éléments conducteurs de forme rectangulaire séparés les uns des autres et répartis de façon matricielle selon m lignes et n colonnes. Ces deux couches sont séparées entre elles d'une distance prédéterminée selon la direction z . Les éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ de la première couche sont décalés des éléments conducteurs $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$ de la deuxième couche suivant les deux directions principales x et y de la face supérieure du substrat 14 non parallèles entre elles. Autrement dit, les éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ de la première couche sont disposés en quinconce par rapport aux éléments conducteurs $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$ de la deuxième couche qui les recouvrent partiellement.

[0049] Chacun des éléments conducteurs de chaque couche est connecté à un via métallique. Ainsi, la pluralité d'éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ de la première couche est connectée à une pluralité de vias métalliques $v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}$ formés dans le substrat 14 et la pluralité d'éléments conducteurs $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$ de la deuxième couche est connectée à une pluralité de vias métalliques $v'_{1,1}, \dots, v'_{i,j}, \dots, v'_{m,n}$ formés aussi dans le substrat 14.

[0050] Les vias métalliques en contact avec les éléments conducteurs des deux couches sont tous de même taille et traversent toutes les couches de la structure de métamatériau 12, notamment les deux couches d'éléments conducteurs, le substrat 14 et le plan de masse 16. Des pistes conductrices 26 sont placées dans le même plan que les éléments conducteurs $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$ de la deuxième couche qui est la plus élevée des deux couches d'éléments conducteurs au-dessus du substrat 14, afin de couvrir l'extrémité supérieure des vias métalliques $v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_m$, en contact avec les éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ de la première couche. Ces pistes conductrices 26 de forme carrée sont disposées séparément les unes des autres et des éléments conducteurs $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$ de la deuxième couche. Elles sont réparties de façon matricielle selon les m lignes et n colonnes précitées.

[0051] La figure 3 représente en perspective coupée une cellule élémentaire de la pluralité d'éléments conducteurs de la figure 2. Cette cellule élémentaire comporte en son centre un élément conducteur $e_{i,j}$ appartenant à la première couche d'éléments conducteurs située à une hauteur h_1 , par exemple d'environ 2,5 mm, du plan de masse 16. Quatre éléments conducteurs voisins $e'_{i,j-1}$, $e'_{i,j}$, $e'_{i+1,j-1}$, $e'_{i+1,j}$, appartenant à la deuxième couche d'éléments conducteurs, celle-ci séparée d'une distance h_2 de la première couche selon la direction z , par exemple d'environ 0,2 mm, sont disposés au-dessus de cet élément conducteur $e_{i,j}$ et en quinconce de manière à le recouvrir partiellement. Ces quatre éléments conducteurs voisins sont représentés partiellement dans cette cellule élémentaire de la figure 3.

[0052] Entre les deux couches d'éléments conducteurs, un matériau isolant 28 est inséré, par exemple un

matériau diélectrique du type FR4 et de permittivité relative $\epsilon_R = 4,4$. Bien entendu des variantes de réalisation peuvent être envisagées avec d'autres types de matériau isolant ou sans matériau isolant.

[0053] La portion de chaque élément conducteur $e'_{i,j-1}$, $e'_{i,j}$, $e'_{i+1,j-1}$, $e'_{i+1,j}$ recouvrant l'élément conducteur $e_{i,j}$ est déterminée en fonction de la taille de cet élément conducteur $e_{i,j}$ et de celle de sa piste conductrice 26. L'effet capacitif résultant d'une cellule élémentaire augmente ainsi avec le rapprochement des éléments conducteurs d'une même couche et le ratio de superposition entre les éléments conducteurs de couches différentes. Néanmoins, tous les éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$, $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$ doivent rester séparés les uns des autres et des pistes conductrices 26.

[0054] L'effet inductif d'une cellule élémentaire est déterminé par les vias métalliques qui la traversent et dépend de la valeur de leurs dimensions. Le diamètre d_v d'un via métallique quelconque $v_{i,j}$ est par exemple d'environ 0,3 mm et sa longueur d'environ 2,7 mm.

[0055] Selon une variante de réalisation, les vias métalliques $v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}$ en contact avec les éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ de la première couche peuvent être des vias métalliques borgnes. Dans ce cas, les pistes conductrices 26 ne sont plus nécessaires. En effet, avec ce type de vias borgnes, bien connus de l'homme du métier, l'extrémité supérieure borgne de chacun des vias métalliques $v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}$ est en contact direct avec chacun des éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ et ne s'étend pas au-delà de la première couche.

[0056] La figure 4 est une vue de dessus partielle de l'ensemble d'éléments conducteurs de la figure 2. Plus précisément, elle permet de présenter, à titre d'exemple, les dimensions des éléments conducteurs rectangulaires de la figure 2 ainsi que les distances entre ces éléments.

[0057] Dans cet exemple d'application, tous les éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ et $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$ des deux couches ont les mêmes dimensions, la longueur c_{e1} selon l'axe y de l'un quelconque des éléments conducteurs étant d'environ 2 mm et la largeur c_{e2} selon l'axe x étant d'environ 1,5 mm. Les vias métalliques sont placés au centre de ces éléments conducteurs. Les extrémités supérieures des vias métalliques en contact avec les éléments conducteurs de la première couche sont connectées aux pistes conductrices 26 de forme carrée. Le côté, c_p , de l'une quelconque de ces pistes conductrices 26 mesure environ 0,64 mm.

[0058] La distance g entre deux éléments conducteurs d'une même couche est de 1 mm, laissant ainsi un espace suffisant entre l'une quelconque des pistes conductrices 26 et les quatre éléments conducteurs coplanaires voisins, par exemple $e'_{i,j-1}$, $e'_{i,j}$, $e'_{i+1,j-1}$, $e'_{i+1,j}$ pour la piste conductrice 26 située au-dessus de l'élément conducteur $e_{i,j}$. La distance P_1 entre deux vias d'une même couche selon la direction y est d'environ 3 mm et la distance P_2 entre deux vias selon la direction x est d'environ 2,5 mm.

[0059] La figure 5 illustre un exemple de système

d'émission/réception d'ondes électromagnétiques comprenant deux antennes planaires. Plus précisément, elle illustre une vue en coupe d'un système d'émission/réception comprenant deux antennes planaires 30 et 32 disposées l'une à côté de l'autre de façon coplanaire sur un substrat tel que le substrat 14. Chaque antenne planaire 30 ou 32 comporte une surface conductrice rayonnante carrée séparée du plan de masse 16 par le substrat 14 et des moyens d'excitation 34 et 36, notamment des sondes coaxiales, permettant l'alimentation des antennes planaires 30 et 32 respectivement. Ces sondes coaxiales traversent le plan de masse 16 sans contact électrique avec ce dernier grâce à deux trous qui y sont aménagés.

[0060] La figure 5 illustre en outre trois types d'ondes pouvant générer les phénomènes de couplage à partir de l'une quelconque des deux antennes 30 et 32 : des ondes spatiales 38 rayonnées par les surfaces conductrices rayonnantes carrées des antennes planaires 30 et 32, des ondes de surface 40 entre le substrat 14 et l'air et des ondes de surface 42 guidées par le substrat 14 entre les deux antennes planaires 30 et 32. Ces ondes 38, 40, 42 peuvent provoquer des couplages entre les antennes du système d'émission/réception dégradant ainsi leurs performances.

[0061] La figure 6 est une vue de dessus du système d'émission/réception de la figure 5. Dans cet exemple de réalisation et comme indiqué précédemment, les surfaces conductrices rayonnantes des antennes planaires 30 et 32 sont de forme carrée, chaque côté L, W mesurant environ 11,5 mm. Bien entendu, dans d'autres variantes de réalisation ils peuvent être de forme différente, par exemple rectangulaire avec une longueur L et une largeur W différentes. Les moyens d'excitation 34 et 36 sont placés à une distance δ d'environ 2,5 mm du centre de chacune des surfaces conductrices rayonnantes des antennes planaires 30 et 32 respectivement.

[0062] La distance Δ entre les moyens d'excitation 34 et 36 des deux antennes planaires 30 et 32 est d'environ

$0,6\lambda_0$ avec $\lambda_0 = \frac{c}{f}$, où c est une constante représentant la vitesse de la lumière dans le vide et f correspond à la fréquence de fonctionnement du système.

[0063] Ainsi, ce système d'émission/réception étant dimensionné pour être utilisé autour d'une fréquence d'environ 5,5 GHz, la valeur de la distance Δ est d'environ 32,7 mm. Entre les deux antennes planaires 30 et 32, une zone de largeur D d'environ 14,75 mm est réservée à l'insertion d'un dispositif 10 à structure de métamatériau 12 permettant ainsi de diminuer le niveau de couplage entre ces antennes.

[0064] La figure 7 est une vue de dessus du système d'émission/réception illustré dans les figures 5 et 6 comportant en outre le dispositif de perturbation 10 selon l'invention disposé entre les antennes planaires 30 et 32 dans la zone de largeur D. La structure de métamatériau 12 est dans ce cas une structure de type champignon

comportant par exemple, conformément au mode de réalisation préféré de la figure 2, deux couches d'éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{4,6}$ et $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{4,6}$, chaque couche comportant quatre lignes de six éléments conducteurs chacune. Pour des raisons de clarté, une seule couche d'éléments conducteurs du dispositif de perturbation 10 est représentée sur la figure 7.

[0065] Ces éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{4,6}$ et $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{4,6}$ sont connectés à autant de vias métalliques $v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{4,6}$ et $v'_{1,1}, \dots, v'_{i,j}, \dots, v'_{4,6}$ dont les extrémités inférieures libres constituent des ports d'accès à des points d'alimentation. Ces points d'alimentation permettent l'interconnexion des éléments conducteurs $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{4,6}$ et $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{4,6}$ de chaque couche à l'aide d'une pluralité de réseaux d'interconnexion.

[0066] La topologie de ces réseaux d'interconnexion étant du type linéaire détaillé précédemment, pour chaque couche, les six éléments conducteurs $e_{i,1}, e_{i,2}, e_{i,3}, e_{i,4}, e_{i,5}, e_{i,6}$ d'une même ligne i sont interconnectés entre eux deux par deux, en commençant par les deux éléments conducteurs placés au centre de la ligne, $e_{i,3}$ et $e_{i,4}$, à l'aide par exemple d'une ligne de transmission telle que l'interconnexion 20 illustrée sur la figure 1. Ensuite, l'interconnexion de leurs deux voisins $e_{i,2}$ et $e_{i,5}$ est réalisée à l'aide d'une ligne de transmission telle que l'interconnexion 22 illustrée sur la figure 1. Enfin, les deux éléments conducteurs placés aux extrémités de la ligne, $e_{i,1}$ et $e_{i,6}$, sont interconnectés à l'aide d'une ligne de transmission telle que l'interconnexion 24 illustrée sur la figure 1. Cette même topologie des réseaux d'interconnexion est répétée pour chacune des quatre lignes de chaque couche.

[0067] Etant donné que les trois lignes de transmission 20, 22 et 24 connectant chacune une paire d'éléments conducteurs entre eux sont isolées les unes des autres et ont des longueurs différentes, elles permettent d'engendrer des déphasages différents entre les éléments conducteurs.

[0068] Ainsi, ce mode de réalisation particulier permet trois déphasages Φ_1, Φ_2, Φ_3 réglables et différents les uns des autres sur chaque ligne. Une combinaison optimale de valeurs de ces déphasages Φ_1, Φ_2, Φ_3 permet d'optimiser le découplage des antennes planaires 30 et 32 placées autour de ce dispositif de perturbation 10. A titre d'exemple, pour le système d'émission/réception de la figure 7 et avec les dimensions indiquées en référence à la figure 6, une valeur des déphasages $(\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3) = (300^\circ, 300^\circ, 45^\circ)$ permet de minimiser le couplage entre les antennes 30 et 32 lorsqu'elles fonctionnent à une fréquence de 5,5 GHz en empêchant la transmission des ondes de surface 40.

[0069] La figure 8 illustre des courbes de couplage 44, 46 et 48 entre les antennes planaires des systèmes d'émission/réception des figures 6 et 7 pour une bande de fréquences allant de 4 à 7 GHz.

[0070] Plus précisément, la courbe 44 présente le niveau de couplage en dB du système d'émission/réception de la figure 6 en l'absence de dispositif de perturba-

tion tel que le dispositif 10. Ce système d'émission/réception présente une fréquence de résonance f_r à environ 5,5 GHz et un couplage d'environ -16 dB à cette fréquence de résonance f_r .

[0071] La courbe 46 présente le niveau de couplage en dB du système d'émission/réception de la figure 6 dans le cas où une structure de métamatériau 12 sans réseau d'interconnexion des éléments conducteurs entre eux est placée dans la zone de largeur D entre les deux antennes planaires 30 et 32 du système. Comme on peut le voir sur la courbe 46, la présence de la structure de métamatériau 12 entre les antennes planaires 30 et 32 permet de réduire leur couplage d'environ 2 dB à la fréquence de 5,5 GHz.

[0072] La courbe 48 présente le niveau de couplage en dB du système d'émission/réception de la figure 7 dans le cas où le dispositif de perturbation 10 selon l'invention est placé dans la zone de largeur D entre les deux antennes planaires 30 et 32 du système. Comme on peut le voir sur la courbe 48, le couplage entre les antennes planaires 30 et 32 à la fréquence de résonance f_r de 5,5 GHz est dans ce cas d'environ -32 dB, ce qui indique que la présence de ce dispositif 10, avec des déphasages (Φ_1, Φ_2, Φ_3) de valeurs $(300^\circ, 300^\circ, 45^\circ)$ respectivement, permet de réduire le couplage des antennes planaires 30 et 32 de 14 dB par rapport à la présence de la structure de métamatériau 12 sans réseau d'interconnexion des éléments conducteurs entre eux.

[0073] La figure 9 illustre des courbes de couplage 50, 52 et 54 entre les antennes planaires 30 et 32 des systèmes d'émission/réception des figures 6 et 7 en fonction de la distance Δ entre ces deux antennes normalisée par rapport à la longueur d'onde λ_0 et pour une fréquence de 5,5 GHz.

[0074] Plus précisément, la courbe 50 présente le niveau de couplage en dB du système d'émission/réception de la figure 6 en l'absence de dispositif de perturbation tel que le dispositif 10.

[0075] La courbe 52 présente le niveau de couplage en dB du système d'émission/réception de la figure 6 dans le cas où une structure de métamatériau 12 sans réseau d'interconnexion des éléments conducteurs entre eux est placée dans la zone de largeur D entre les deux antennes planaires 30 et 32 du système.

[0076] La courbe 54 présente le niveau de couplage en dB du système d'émission/réception de la figure 7 dans le cas où le dispositif de perturbation 10 selon l'invention est placé dans la zone de largeur D entre les deux antennes planaires 30 et 32 du système.

[0077] Les trois courbes sont représentées pour des distances Δ entre antennes comprises dans l'intervalle de $0,6\lambda_0$ à $2\lambda_0$. Dans le cas particulier de la courbe 54, pour chacune de ces distances le niveau de couplage en dB est le niveau optimal obtenu pour une combinaison particulière de valeurs des déphasages Φ_1, Φ_2, Φ_3 .

[0078] A titre d'exemple, la table ci-dessous illustre les valeurs des déphasages Φ_1, Φ_2, Φ_3 permettant d'optimiser le découplage entre les antennes du système précé-

dent pour des distances comprises dans l'intervalle de $0,6\lambda_0$ à $2\lambda_0$:

Δ/λ_0	(Φ_1, Φ_2, Φ_3)
0,6	(300°, 300°, 45°)
0,7	(100°, 80°, 60°)
0,8	(260°, 260°, 270°)
0,9	(260°, 260°, 255°)
1	(260°, 260°, 255°)
1,1	(260°, 260°, 240°)
1,2	(260°, 260°, 240°)
1,3	(260°, 260°, 240°)
1,4	(0°, 45°, 60°)
1,5	(240°, 220°, 45°)
1,6	(225°, 0°, 30°)
1,7	(260°, 260°, 255°)
1,8	(270°, 225°, 0°)
1,9	(260°, 260°, 255°)
2	(260°, 260°, 255°)

[0079] Comme on peut le voir sur la courbe 54, la présence du dispositif de perturbation 10 avec des déphasages Φ_1, Φ_2, Φ_3 réglables permet d'obtenir des combinaisons optimales de valeurs de ces déphasages Φ_1, Φ_2, Φ_3 pour chaque distance Δ et ainsi de diminuer davantage le couplage entre les antennes 30 et 32 par rapport aux courbes 50 et 52, ceci pour toutes distances comprises dans l'intervalle de distances de $0,6\lambda_0$ à $2\lambda_0$.

[0080] On va maintenant détailler les étapes successives d'un procédé de fabrication du dispositif de perturbation 10 de la figure 1 en référence à la figure 10.

[0081] Ce procédé de fabrication comporte une première étape 100 de disposition sur le substrat 14 d'une pluralité d'éléments conducteurs séparés les uns des autres.

[0082] Plus précisément, lors d'une première sous-étape 102 de la première étape 100, deux couches d'éléments conducteurs $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$ et $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ sont verticalement superposées (i.e. selon la direction z) et disposées sur la face supérieure du substrat 14.

[0083] Lors d'une deuxième sous-étape 104 de la première étape 100, un ensemble de vias métalliques $v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}$ et $v'_{1,1}, \dots, v'_{i,j}, \dots, v'_{m,n}$ sont formés dans le substrat 14, le traversant sur toute son épaisseur.

[0084] Au cours d'une troisième sous-étape 106 de la première étape 100, un plan de masse 16 avec des trous 18 aménagés en vis-à-vis des vias métalliques traversants est défini sur la face inférieure du substrat 14.

[0085] Au cours d'une deuxième étape 108, au moins une partie des éléments conducteurs $e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$

et $e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$ est interconnectée électriquement à l'aide d'une pluralité de réseaux d'interconnexion, par exemple les réseaux d'interconnexion 20, 22, 24 décrits précédemment, ces réseaux d'interconnexion n'étant pas connectés électriquement entre eux.

[0086] Plus précisément, lors d'une première sous-étape 110 de la deuxième étape 108, à partir des valeurs des déphasages $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{n/2}$ prédéterminées et optimales pour un système d'émission/réception fonctionnant à une fréquence de résonance f_r , au moins deux réseaux d'interconnexion sont dimensionnés différemment l'un de l'autre pour engendrer ces déphasages $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{n/2}$ entre les éléments conducteurs qu'ils interconnectent.

[0087] Enfin, lors d'une deuxième sous-étape 112 de la deuxième étape 108, les éléments conducteurs concernés sont effectivement raccordés entre eux, par exemple deux à deux et selon une topologie linéaire telle qu'illustrée sur les figures 1 et 7, en utilisant les extrémités inférieures de leurs vias métalliques comme ports d'accès aux points d'alimentation des réseaux d'interconnexion.

[0088] Comme déjà évoqué dans les exemples de réalisation décrits précédemment, les déphasages $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{n/2}$ caractérisant les réseaux d'interconnexion déterminent la longueur des lignes de transmission utilisées pour la connexion des éléments conducteurs entre eux pour un système d'émission/réception donné.

[0089] Dans une variante de réalisation, au moins une partie de ces réseaux d'interconnexion est munie de dispositifs de déphasage réglables bien connus de l'homme du métier, par exemple de diodes, pour l'interconnexion des éléments conducteurs entre eux. Ceci permet d'ajuster les déphasages en fonction de l'application à optimiser en variant simplement le comportement des éléments actifs ou passifs employés tout en conservant la structure de métamatériau 12 et sans besoin de modifier la longueur des lignes de transmission.

[0090] Il apparaît clairement qu'un dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques tel que celui décrit précédemment permet d'améliorer le niveau de découplage entre antennes planaires sans augmenter l'encombrement du système d'émission/réception incluant de telles antennes quelle que soit la fréquence de résonance du système et la distance entre les antennes. La modification du comportement d'une structure EBG après sa fabrication devient ainsi envisageable grâce à l'interconnexion des éléments conducteurs à l'aide de lignes de transmission à déphasages différents. En outre, l'utilisation de dispositifs de déphasage réglables pour effectuer ces interconnexions permet d'adapter le comportement d'un même dispositif de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques à des systèmes d'émission/réception différents.

[0091] On notera par ailleurs que l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits précédemment. Il apparaîtra en effet à l'homme de l'art que diverses modifications peuvent être apportées aux modes de réali-

sation décrits ci-dessus, à la lumière de l'enseignement qui vient de lui être divulgué. Dans les revendications qui suivent, les termes utilisés ne doivent pas être interprétés comme limitant les revendications aux modes de réalisation exposés dans la présente description, mais doivent être interprétés pour y inclure tous les équivalents que les revendications visent à couvrir du fait de leur formulation et dont la prévision est à la portée de l'homme de l'art en appliquant ses connaissances générales à la mise en oeuvre de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.

Revendications

1. Dispositif (10) de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques à structure de métamatériau (12) comportant :

- une pluralité d'éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) séparés les uns des autres et disposés sur une face supérieure d'un substrat (14),
- une pluralité de réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) interconnectant électriquement au moins une partie de ces éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$), ces réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) n'étant pas connectés électriquement entre eux et au moins deux de ces réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) étant dimensionnés différemment l'un de l'autre, impliquant ainsi des distances entre éléments conducteurs interconnectés différentes d'un réseau à l'autre pour engendrer des déphasages ($\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{n/2}$), entre les éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) qu'ils interconnectent, différents de l'un de ces réseaux d'interconnexion à l'autre,

caractérisé en ce qu'il comporte en outre :

- un plan de masse (16) placé sur une face inférieure du substrat (14) avec des trous (18) aménagés dans ce plan de masse (16), et
- un ensemble de vias métalliques ($v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}, v'_{1,1}, \dots, v'_{i,j}, \dots, v'_{m,n}$) formés dans le substrat (14) et le traversant sur toute son épaisseur, chacun de ces vias métalliques ($v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}, v'_{1,1}, \dots, v'_{i,j}, \dots, v'_{m,n}$) comportant une extrémité supérieure en contact avec l'un des éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) et une extrémité inférieure disposée en regard de l'un des trous (18) du plan de masse (16), sans contact électrique avec le plan de masse (16) et en contact électrique avec l'un des réseaux d'interconnexion.

2. Dispositif (10) de perturbation d'une propagation

d'ondes électromagnétiques selon la revendication 1, dans lequel au moins une partie desdits réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) est munie de dispositifs de déphasage réglables pour la connexion des éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) entre eux.

3. Dispositif (10) de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques selon la revendication 1 ou 2, dans lequel les éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) sont répartis sur le substrat (14) de façon matricielle selon m lignes et n colonnes, n étant un nombre pair, chaque réseau d'interconnexion (20, 22, 24) interconnectant deux éléments conducteurs d'une même i-ème ligne

placés sur les $(\frac{n}{2} - j)$ -ème et

$(\frac{n}{2} + 1 + j)$ -ème colonnes, où, pour chaque réseau d'interconnexion (20, 22, 24), i prend l'une des valeurs de l'intervalle [1, m] et j l'une des valeurs de

l'intervalle $[0, \frac{n}{2} - 1]$.

4. Dispositif (10) de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel les extrémités inférieures des vias métalliques ($v_{1,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}, v'_{1,1}, \dots, v'_{i,j}, \dots, v'_{m,n}$) en contact avec les éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) interconnectés forment des ports d'accès à des points d'alimentation auxquels sont raccordés les réseaux d'interconnexion (20, 22, 24).

5. Dispositif (10) de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel la structure de métamatériau (12) comporte deux couches d'éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) superposées et disposées sur la face supérieure du substrat (14), chacune de ces couches comportant une pluralité d'éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) séparés les uns des autres et répartis de façon matricielle selon m lignes et n colonnes, ces deux couches étant séparées entre elles suivant une direction (z) normale à la face supérieure du substrat (14) d'une distance prédéterminée (h_2), les éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}$) de la première couche étant disposés en quinconce par rapport aux éléments conducteurs ($e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) de la deuxième couche.

6. Dispositif (10) de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel chacun des éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots$

$e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) présente l'une des formes de l'ensemble constitué d'une forme carrée, d'une forme rectangulaire, d'une forme de spirale, d'une forme de fourchette, d'une forme de croix à bécquilles et d'une forme duale de croix à bécquilles dite forme UC-EBG.

5

7. Dispositif (10) de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel ladite pluralité de réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) présente l'une des topologies de l'ensemble constitué d'une topologie linéaire, d'une topologie en étoile, d'une topologie radiale et d'une topologie en arbre. 10
8. Système d'émission/réception d'ondes électromagnétiques comprenant au moins deux antennes (30, 32) entre lesquelles est disposé au moins un dispositif (10) de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques selon une quelconque des revendications 1 à 7. 15 20
9. Procédé de fabrication d'un dispositif (10) de perturbation d'une propagation d'ondes électromagnétiques à structure de métamatériau (12) comportant les étapes suivantes : 25

- disposition (100) sur une face supérieure d'un substrat (14) d'une pluralité d'éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) séparés les uns des autres, 30
- interconnexion électrique (108) d'au moins une partie de ces éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) à l'aide d'une pluralité de réseaux d'interconnexion (20, 22, 24), ces réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) n'étant pas connectés électriquement entre eux, 35
- dimensionnement (110) des réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) selon lequel au moins deux de ces réseaux d'interconnexion (20, 22, 24) sont dimensionnés différemment l'un de l'autre, impliquant ainsi des distances entre éléments conducteurs interconnectés différentes d'un réseau à l'autre pour engendrer des déphasages ($\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{n/2}$), entre les éléments conducteurs qu'ils interconnectent, différents de 40 45
- l'un de ces réseaux d'interconnexion à l'autre,

caractérisé en ce qu'il comporte en outre les étapes suivantes :

50

- disposition (106) d'un plan de masse (16) sur une face inférieure du substrat (14) avec des trous (18) aménagés dans ce plan de masse (16), et
- formation (104) d'un ensemble de vias métalliques ($v_{i,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}, v'_{i,1}, \dots, v'_{i,j}, \dots, v'_{m,n}$) dans le substrat (14) et le traversant sur toute son épaisseur, chacun de ces vias métalliques 55

($v_{i,1}, \dots, v_{i,j}, \dots, v_{m,n}, v'_{i,1}, \dots, v'_{i,j}, \dots, v'_{m,n}$) comportant une extrémité supérieure en contact avec l'un des éléments conducteurs ($e_{1,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{m,n}, e'_{1,1}, \dots, e'_{i,j}, \dots, e'_{m,n}$) et une extrémité inférieure disposée en regard de l'un des trous (18) du plan de masse (16), sans contact électrique avec le plan de masse (16) et en contact électrique avec l'un des réseaux d'interconnexion.

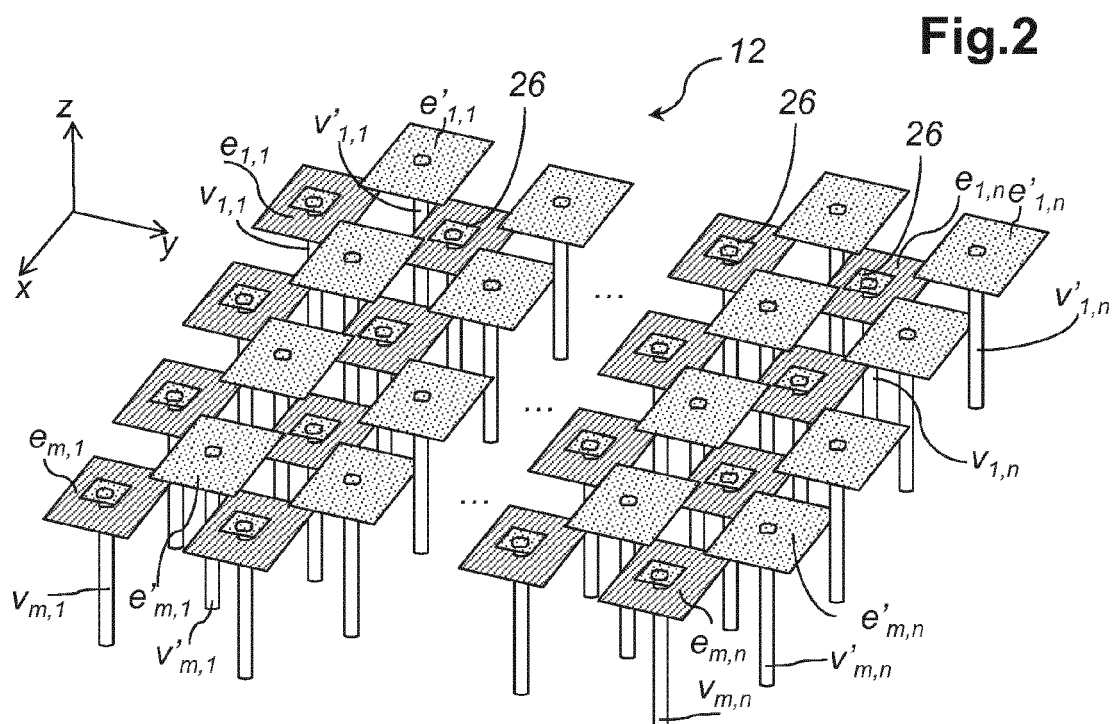
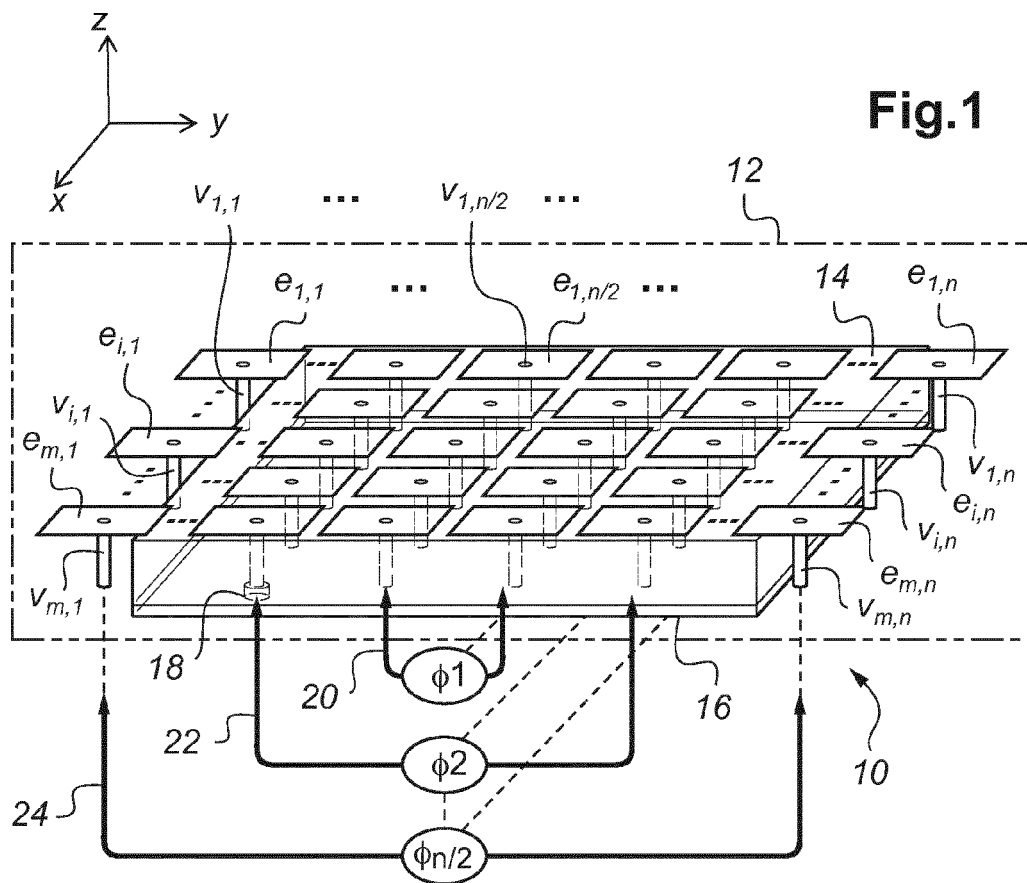


Fig.3

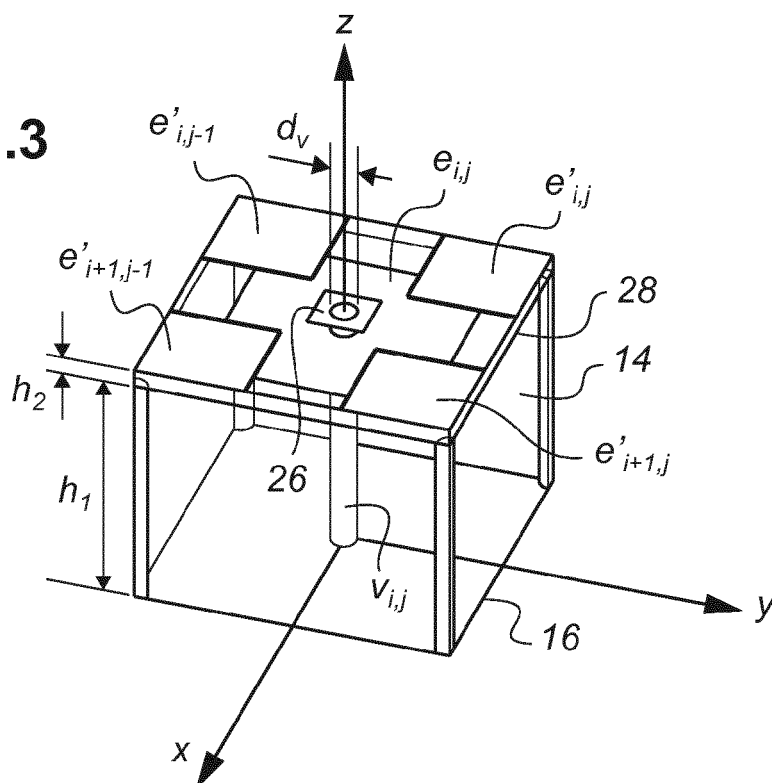
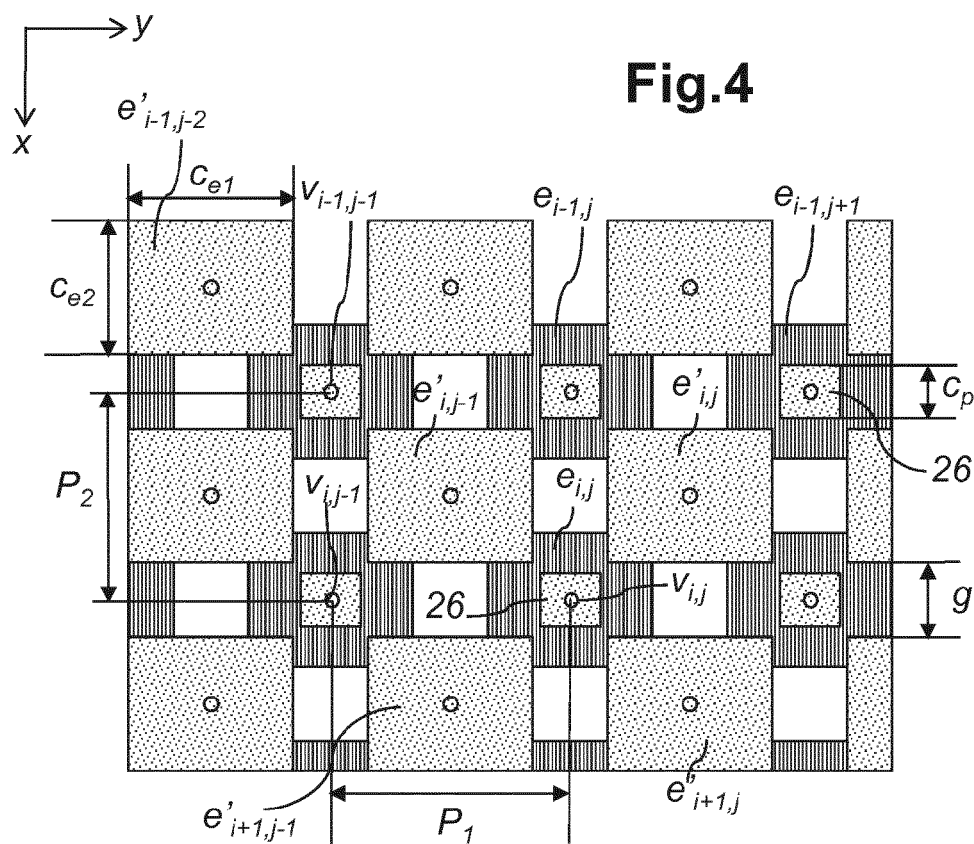


Fig.4



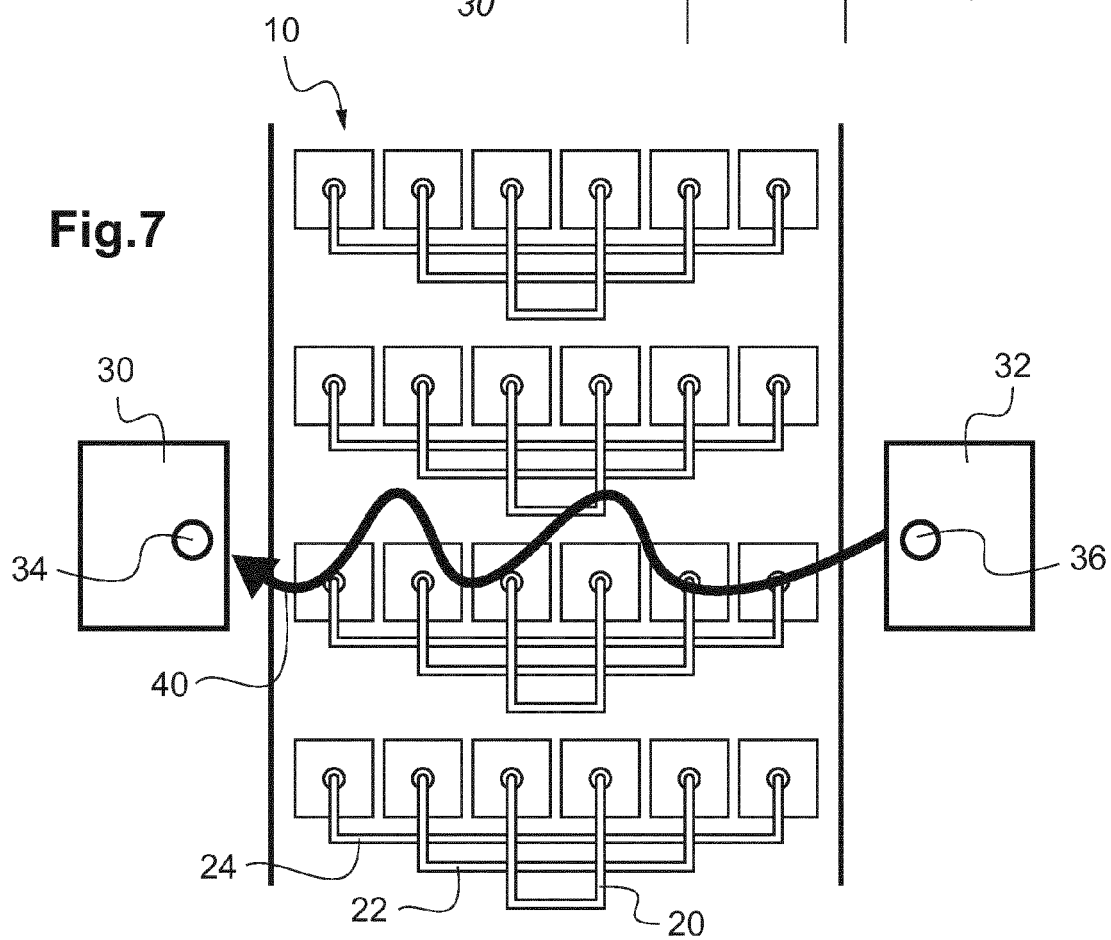
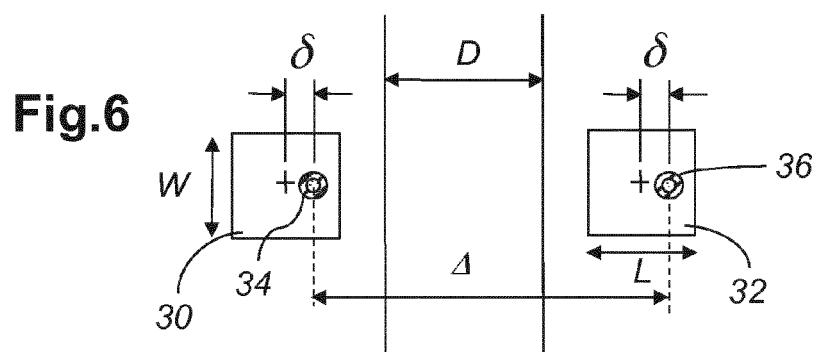
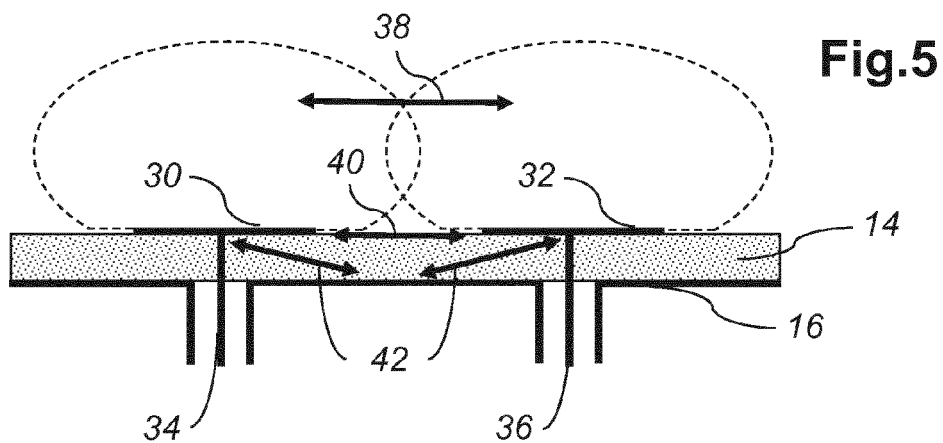


Fig.8

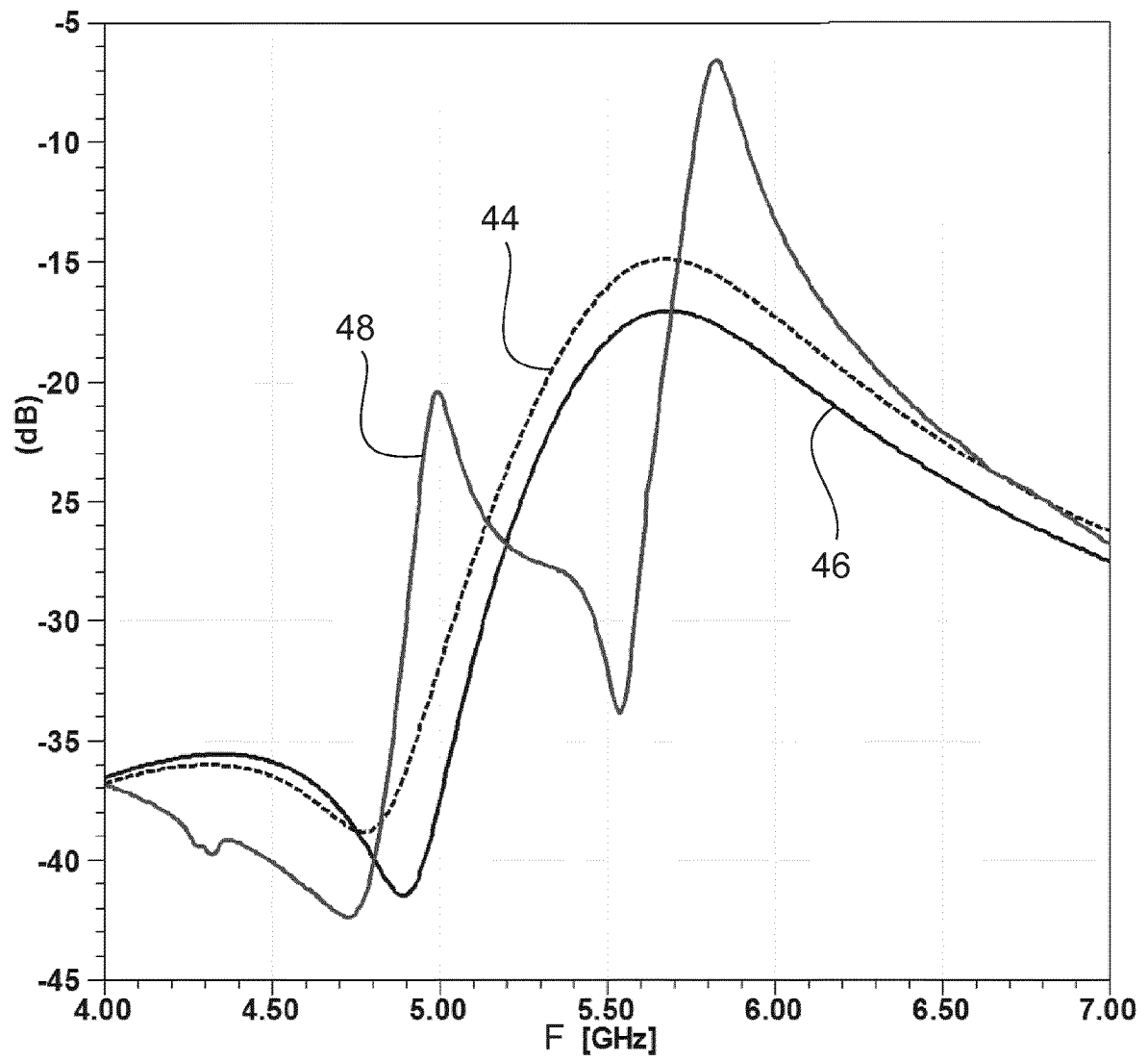
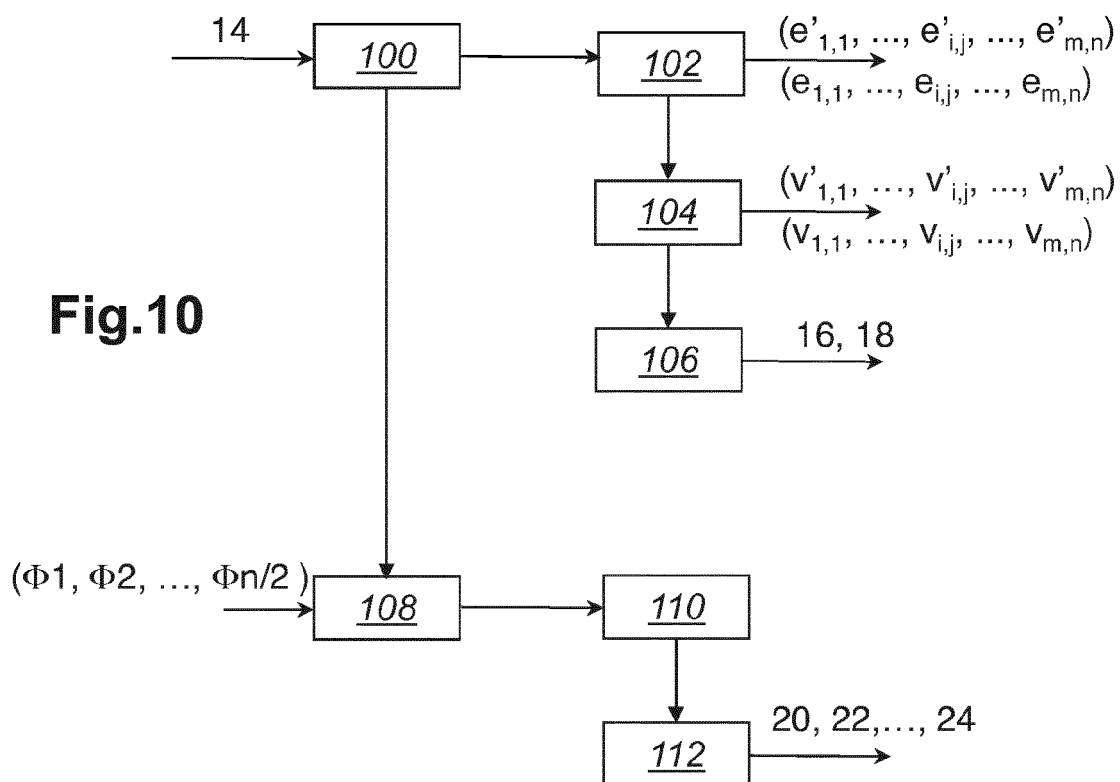
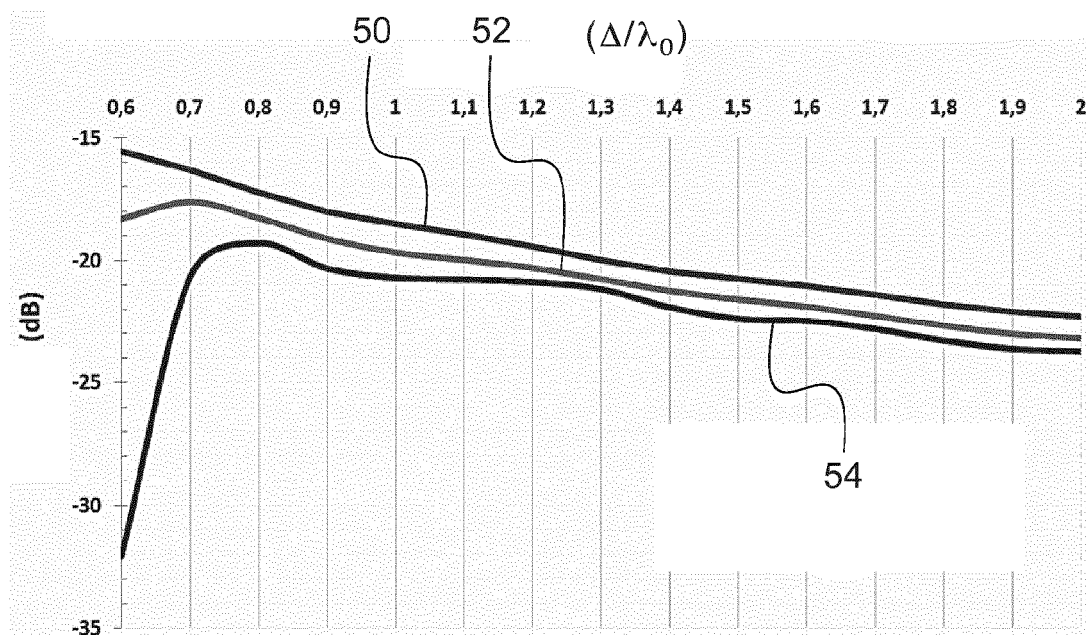


Fig.9



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 14 16 9886

5

10

15

20

25

30

35

40

45

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	EP 2 518 823 A1 (RESEARCH IN MOTION LTD [CA]) 31 octobre 2012 (2012-10-31) * colonne 2, ligne 48 - colonne 3, ligne 7 * * colonne 4, ligne 7 - colonne 4, ligne 36 * * colonne 8, ligne 19 - ligne 47 * * figures 4, 8, 9, 11, 12 *	1-9	INV. H01Q15/00 H01Q1/52
A	US 2005/134521 A1 (WALTHO ALAN E [US]) 23 juin 2005 (2005-06-23) * alinéa [0021] * * alinéa [0025] * * alinéa [0039] - alinéa [0041] * * alinéa [0054] - alinéa [0056] * * figures 1-9 *	1-9	
A	EP 2 362 487 A1 (NTT DOCOMO INC [JP]) 31 août 2011 (2011-08-31) * page 13, ligne 21 - page 15, ligne 17 * * figures 24-30 *	1-9	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
A	EP 2 518 824 A1 (RESEARCH IN MOTION LTD [CA]) 31 octobre 2012 (2012-10-31) * alinéa [0021] - alinéa [0023] * * alinéa [0041] * * alinéa [0049] * * figures 2-4, 7, 8, 9 *	1-9	H01Q
A	GB 2 467 763 A (UNIV KENT CANTERBURY [GB]) 18 août 2010 (2010-08-18) * page 1, ligne 1 - ligne 3 * * page 10, ligne 6 - page 11, ligne 27 * * page 14, ligne 21 - page 15, ligne 8 * * page 15, ligne 31 - page 16, ligne 24 * * figures 1-4, 13, 15 *	1-9	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 7 octobre 2014	Examineur Köppe, Maro
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

50

55

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 14 16 9886

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)
X A	US 2003/112186 A1 (SANCHEZ VICTOR C [US] ET AL) 19 juin 2003 (2003-06-19) * le document en entier * -----	1,2,4-9 3	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 7 octobre 2014	Examineur Köppe, Maro
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	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

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

EP 14 16 9886

07-10-2014

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.

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 2518823 A1	31-10-2012	CA 2775414 A1 EP 2518823 A1	27-10-2012 31-10-2012
US 2005134521 A1	23-06-2005	AUCUN	
EP 2362487 A1	31-08-2011	CN 102195140 A EP 2362487 A1 JP 5236754 B2 JP 2012034332 A US 2011210905 A1	21-09-2011 31-08-2011 17-07-2013 16-02-2012 01-09-2011
EP 2518824 A1	31-10-2012	CA 2775408 A1 EP 2518824 A1	27-10-2012 31-10-2012
GB 2467763 A	18-08-2010	EP 2396855 A1 GB 2467763 A US 2012098628 A1 WO 2010092390 A1	21-12-2011 18-08-2010 26-04-2012 19-08-2010
US 2003112186 A1	19-06-2003	AUCUN	

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 2867617 B1 [0013]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **DE YANG et al.** Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Octobre 2003, vol. 51 (10 [0008])
- **DE KOVACS et al.** Dispersion analysis of planar metal-dielectric EBG structures in Ansoft HFSS. *17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, 19 Mai 2008 [0045]