



Europäisches
Patentamt
European
Patent Office
Office européen
des brevets



(11)

EP 3 540 853 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
18.09.2019 Bulletin 2019/38

(51) Int Cl.:
H01Q 3/46 (2006.01) **H01Q 21/06 (2006.01)**

(21) Numéro de dépôt: **19162018.6**

(22) Date de dépôt: **11.03.2019**

(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

(30) Priorité: **14.03.2018 FR 1852200**

(71) Demandeur: **Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives**
75015 Paris (FR)
 (72) Inventeur: **CLEMENTE, Antonio**
38054 Grenoble Cedex 09 (FR)
 (74) Mandataire: **Cabinet Beaumont**
4, Place Robert Schuman
B.P. 1529
38025 Grenoble Cedex 1 (FR)

(54) ANTENNE À RÉSEAU TRANSMETTEUR LARGE BANDE

(57) L'invention concerne un réseau transmetteur (203) comprenant une pluralité de cellules, chaque cellule étant adaptée à transmettre un signal radio en introduisant dans ce signal un déphasage, ladite pluralité de cellules comportant des cellules d'un premier type (205-I) et des cellules d'un deuxième type (205-II), dans lequel : le réseau comprend un empilement de première (M1), deuxième (M2) et troisième (M3) couches conductrices séparées deux à deux par des couches diélectriques (D1, D2) ;

chaque cellule comprend un premier élément d'antenne

(205a) formé dans la première couche conductrice (M1) et un deuxième élément d'antenne (205b) formé dans la troisième couche conductrice (M3) ;
 dans chaque cellule du premier type, le premier élément d'antenne est connecté au deuxième élément d'antenne par un via (211) traversant la deuxième couche conductrice ; et
 dans chaque cellule du deuxième type, le premier élément d'antenne n'est pas connecté au deuxième élément d'antenne.

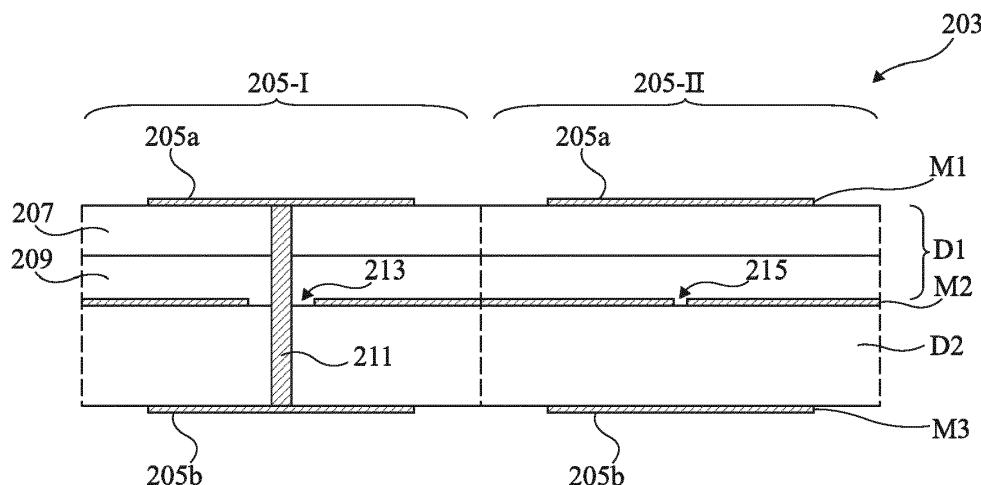


Fig 2

Description**Domaine**

[0001] La présente demande concerne le domaine des antennes radio à réseau transmetteur ("transmit-array antenna" en langue anglaise). Elle vise plus particulièrement un réseau transmetteur large bande, par exemple pour des applications entre 1 et 300 GHz.

Exposé de l'art antérieur

[0002] La figure 1 est une vue de côté schématique d'une antenne à réseau transmetteur. Une telle antenne comprend typiquement une ou plusieurs sources primaires 101 (une unique source dans l'exemple représenté) irradiant un réseau transmetteur 103. Le réseau 103 comprend une pluralité de cellules élémentaires 105, par exemple disposées en matrice selon des lignes et des colonnes. Chaque cellule 105 comprend typiquement un premier élément d'antenne 105a disposé du côté d'une première face du réseau tournée vers la source primaire 101, et un deuxième élément d'antenne 105b disposé du côté d'une face du réseau opposée à la première face. Chaque cellule 105 est apte, en émission, à recevoir un rayonnement électromagnétique sur son premier élément d'antenne 105a et à réémettre ce rayonnement depuis son deuxième élément d'antenne 105b avec un déphasage ϕ connu, et, en réception, à recevoir un rayonnement électromagnétique sur son deuxième élément d'antenne 105b et à réémettre ce rayonnement depuis son premier élément d'antenne 105a avec le même déphasage ϕ .

[0003] Les caractéristiques du faisceau produit par l'antenne, et notamment sa forme (ou gabarit) et sa direction centrale (ou direction de pointage), dépendent des valeurs des déphasages introduits par les différentes cellules.

[0004] Les antennes à réseau transmetteur ont notamment pour avantages d'avoir une bonne efficacité énergétique, et d'être relativement simples, peu onéreuses, et peu encombrantes, notamment grâce au fait que les réseaux transmetteurs sont réalisables en technologie planaire, généralement sur circuit imprimé.

[0005] L'article intitulé "Wideband linearly-polarized transmitarray antenna for 60 GHz backhauling" de C. Jouanlanne et al. (IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 3, pp. 1440-1445, Mar. 2017) décrit un exemple de réalisation d'une antenne à réseau transmetteur. Dans cet exemple, le réseau transmetteur est une structure planaire comprenant un empilement de première, deuxième et troisième couches conductrices séparées deux à deux par des couches diélectriques. Chaque cellule élémentaire comprend un premier motif conducteur formé dans la première couche conductrice et définissant le premier élément d'antenne de la cellule, et un deuxième motif conducteur formé dans la troisième couche conductrice et définissant le deuxième élément

d'antenne de la cellule. La deuxième couche conductrice forme un plan de masse disposé entre les premier et deuxième éléments d'antenne. Le couplage entre les premier et deuxième éléments d'antenne est réalisé au moyen d'un via conducteur isolé traversant le plan de masse et connectant le premier élément d'antenne au deuxième élément d'antenne. La valeur du déphasage introduit par chaque cellule dépend de la géométrie de la cellule, et notamment de la forme, des dimensions, et de la disposition des éléments d'antenne et du via de couplage de la cellule.

[0006] L'article intitulé "A V-band switched beam linearly-polarized transmit-array antenna for wireless backhaul applications" de L. Dussopt et al. (IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 12, pp. 6788-6793, Dec. 2017) décrit un autre exemple de réalisation d'une antenne à réseau transmetteur. Dans cet exemple, le réseau transmetteur est également une structure planaire comprenant un empilement de première, deuxième et troisième couches conductrices séparées deux à deux par des couches diélectriques. Chaque cellule élémentaire comprend un premier motif conducteur formé dans la première couche conductrice et définissant le premier élément d'antenne de la cellule, et un deuxième motif conducteur formé dans la troisième couche conductrice et définissant le deuxième élément d'antenne de la cellule. La deuxième couche conductrice forme un plan de masse disposé entre les premier et deuxième éléments d'antenne. Dans cette réalisation, les premier et deuxième éléments d'antenne ne sont pas connectés, le couplage entre les premier et deuxième éléments étant réalisé au moyen d'une fente formée dans le plan de masse en vis-à-vis des deux éléments. La valeur du déphasage introduit par chaque cellule dépend de la géométrie de la cellule, et notamment de la forme, des dimensions et de la disposition des éléments d'antenne et de la fente de couplage de la cellule.

[0007] De façon classique, pour limiter la complexité et maximiser la bande passante d'un réseau transmetteur, les cellules élémentaires du réseau peuvent avoir un nombre N limité de configurations (formes, dimensions et disposition des éléments d'antenne et de couplage), correspondant à N valeurs de déphasage distinctes. Autrement dit, à la conception du réseau, chaque cellule élémentaire est choisie parmi l'une des N configurations distinctes, correspondant respectivement à N valeurs de déphasage distinctes, ce qui revient à quantifier sur $\log_2(N)$ bits le déphasage introduit par les cellules. Par exemple, dans l'article susmentionné de C. Jouanlanne et al., les cellules élémentaires peuvent avoir N = 8 configurations distinctes, ce qui correspond à une quantification sur 3 bits du déphasage introduit par les cellules, et, dans l'article susmentionné de L. Dussopt et al., les cellules élémentaires peuvent avoir N = 7 configurations distinctes, ce qui correspond à une quantification sur 2,8 bits du déphasage introduit par les cellules.

[0008] Dans l'article susmentionné de C. Jouanlanne et al., le réseau transmetteur est optimisé pour fonction-

ner à une fréquence centrale de 61,5 GHz et présente une bande passante à -1 dB allant de 57 à 66 GHz, soit une bande passante relative à -1 dB de 15,4 %.

[0009] Dans l'article susmentionné de L. Dussopt et al., le réseau transmetteur est optimisé pour fonctionner à une fréquence centrale de 64,3 GHz et présente une bande passante à -3 dB allant de 58,95 à 68,8 GHz, soit une bande passante relative à -3 dB de 15,4 %.

[0010] Il serait souhaitable de pouvoir améliorer au moins en partie certains aspects des antennes à réseau transmetteur connues.

[0011] En particulier, il serait souhaitable de pouvoir disposer d'un réseau transmetteur apte à fonctionner à des fréquences plus élevées que les réseaux transmetteurs connus, et/ou présentant une bande passante relative plus étendue que les réseaux transmetteurs connus, tout en limitant le nombre de couches métalliques utilisées et en prenant en considération les limites de fabrication des technologies choisies.

Résumé

[0012] Ainsi, un mode de réalisation prévoit un réseau transmetteur comprenant une pluralité de cellules, chaque cellule étant adaptée à transmettre un signal radio en introduisant dans ce signal un déphasage, ladite pluralité de cellules comportant des cellules d'un premier type et des cellules d'un deuxième type, dans lequel :

le réseau comprend un empilement de première, deuxième et troisième couches conductrices séparées deux à deux par des couches diélectriques ; chaque cellule comprend un premier élément d'antenne formé dans la première couche conductrice et un deuxième élément d'antenne formé dans la troisième couche conductrice ;

dans chaque cellule du premier type, le premier élément d'antenne est connecté au deuxième élément d'antenne par un via traversant la deuxième couche conductrice ; et

dans chaque cellule du deuxième type, le premier élément d'antenne n'est pas connecté au deuxième élément d'antenne.

[0013] Comme indiqué précédemment, on entend par "connecté" que, dans les cellules du premier type, le via conducteur est en contact mécaniquement et électriquement avec les premier et deuxième éléments d'antenne, et on entend par "n'est pas connecté" que, dans les cellules du deuxième type, aucun conducteur électrique ne relie directement les premier et deuxième éléments d'antenne, c'est-à-dire qu'aucun conducteur électrique n'est en contact mécaniquement et électriquement à la fois avec le premier élément d'antenne et avec le deuxième élément d'antenne.

[0014] Selon un mode de réalisation, dans chaque cellule, le deuxième élément d'antenne est au moins partiellement en vis-à-vis du premier élément d'antenne.

[0015] Selon un mode de réalisation, dans chaque cellule du deuxième type, le premier élément d'antenne est couplé au deuxième élément d'antenne par une fente formée dans la deuxième couche conductrice, au moins partiellement en vis-à-vis des premier et deuxième éléments d'antenne.

[0016] La fente formée dans la deuxième couche conductrice permet de transférer une onde électromagnétique entre les premier et deuxième éléments d'antenne.

[0017] Selon un mode de réalisation, le réseau comprend N configurations de cellules distinctes, où N est un entier supérieur ou égal à 2, le réseau comprenant plusieurs cellules de chaque configuration.

[0018] Selon un mode de réalisation, les N configurations de cellules sont choisies de façon que les N valeurs de déphasages introduites respectivement par les cellules des N configurations soient de l'ordre de 0°, 360°/N, 2*360°/N, ...*360°/N.

[0019] Selon un mode de réalisation, N est égal à 8.

[0020] Selon un mode de réalisation, dans chaque cellule, le premier élément d'antenne est constitué par un motif conducteur continu et le deuxième élément d'antenne est constitué par un motif conducteur continu.

[0021] Selon un mode de réalisation, dans chaque cellule, le premier élément d'antenne occupe une surface supérieure à 20 % de la surface de la cellule, et le deuxième élément d'antenne occupe une surface supérieure à 20 % de la surface de la cellule.

[0022] Selon un mode de réalisation, dans chaque cellule de type I, le via passe par une ouverture formée dans la deuxième couche conductrice en vis-à-vis des premier et deuxième éléments d'antenne.

[0023] Selon un mode de réalisation, dans chaque cellule de type I, le via et l'ouverture sont agencés de façon que le via ne soit pas en contact avec la deuxième couche conductrice.

[0024] Selon un mode de réalisation, la première couche conductrice est une couche discontinue telle que les premiers éléments d'antenne des différentes cellules soient isolés les uns des autres et la troisième couche conductrice est une couche discontinue telle que les deuxièmes éléments d'antenne des différentes cellules soient isolés les uns des autres.

[0025] Selon un mode de réalisation, la deuxième couche conductrice forme un plan de masse commun à toutes les cellules du réseau.

[0026] Un autre mode de réalisation prévoit une antenne à réseau transmetteur comprenant un réseau transmetteur tel que défini ci-dessus, et au moins une source primaire configurée pour irradier une face du réseau.

[0027] Selon un mode de réalisation, l'antenne est adaptée à fonctionner à une fréquence comprise entre 1 et 300 GHz.

Brève description des dessins

[0028] Ces caractéristiques et avantages, ainsi que

d'autres, seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

la figure 1, précédemment décrite, est une vue de côté schématique d'une antenne à réseau transmetteur ;

la figure 2 est une vue en coupe schématique et partielle d'un exemple d'un réseau transmetteur d'une antenne à réseau transmetteur selon un mode de réalisation ;

les figures 3A et 3B sont des schémas électriques équivalents modélisant le comportement de deux types de cellules élémentaires d'un réseau transmetteur d'une antenne à réseau transmetteur selon un mode de réalisation ;

la figure 4 est une vue en perspective illustrant différentes configurations que peuvent prendre les cellules élémentaires d'un réseau transmetteur d'une antenne à réseau transmetteur selon un mode de réalisation ; et

les figures 5A et 5B illustrent respectivement l'évolution en fréquence de l'amplitude et de la phase du coefficient de transmission des différentes cellules élémentaires de la figure 4.

Description détaillée

[0029] De mêmes éléments ont été désignés par de mêmes références dans les différentes figures et, de plus, les diverses figures ne sont pas tracées à l'échelle. Par souci de clarté, seuls les éléments utiles à la compréhension des modes de réalisation décrits ont été représentés et sont détaillés.

[0030] En particulier, on va décrire ci-après des modes de réalisation d'un réseau transmetteur pour antenne à réseau transmetteur. La structure et le fonctionnement de la (des) source(s) primaire(s) de l'antenne, destinée(s) à irradier le réseau transmetteur, ne seront toutefois pas détaillés, les modes de réalisation décrits étant compatibles avec toutes ou la plupart des sources primaires d'irradiation pour antenne à réseau transmetteur connues. A titre d'exemple, chaque source primaire est adaptée à produire un faisceau de forme générale conique irradiant tout ou partie du réseau transmetteur. Chaque source primaire comprend par exemple une antenne cornet. A titre d'exemple, l'axe central de chaque source primaire est sensiblement orthogonal au plan moyen du réseau.

[0031] Par ailleurs, les procédés de fabrication des réseaux transmetteurs décrits ne seront pas détaillés, la réalisation des structures décrites étant à la portée de l'homme du métier à partir des indications de la présente description, par exemple en utilisant des techniques usuelles de fabrication de circuits imprimés.

[0032] Dans la description qui suit, lorsque l'on fait référence à des qualificatifs de position absolue, tels que

les termes "avant", "arrière", "haut", "bas", "gauche", "droite", etc., ou relative, tels que les termes "dessus", "dessous", "supérieur", "inférieur", etc., ou à des qualificatifs d'orientation, tels que les termes "horizontal", "vertical", etc., il est fait référence à l'orientation des figures, étant entendu que, en pratique, les dispositifs décrits peuvent être orientés différemment. Sauf précision contraire, les expressions "approximativement", "sensiblement", et "de l'ordre de" signifient à 10 % près, de préférence à 5 % près ou, lorsqu'il s'agit de valeurs angulaires, à 10° près, de préférence à 5° près.

[0033] La figure 2 est une vue en coupe schématique et partielle d'un exemple d'un réseau transmetteur 203 d'une antenne à réseau transmetteur selon un premier mode de réalisation. Le réseau 203 forme un panneau rayonnant fonctionnant en transmission, c'est-à-dire apte à recevoir un rayonnement électromagnétique sur une première face du panneau et à réémettre ce rayonnement depuis une deuxième face du panneau opposée à

la première face, ou à recevoir un rayonnement électromagnétique sur sa deuxième face et à réémettre ce rayonnement depuis sa première face. Le réseau 203 comprend une pluralité de cellules élémentaires 205, par exemple disposées en matrice selon des lignes et des colonnes. Sur la figure 2, seules deux cellules élémentaires 205-I et 205-II ont été représentées. En pratique, le réseau transmetteur 203 peut comprendre un nombre beaucoup plus élevé de cellules élémentaires 205, par exemple de l'ordre de 1000 cellules élémentaires ou plus.

Les cellules élémentaires 205 du réseau transmetteur 203 sont par exemple jointives. Les cellules élémentaires 205 ont par exemple toutes sensiblement les mêmes dimensions. A titre d'exemple, en vue de dessus, les cellules élémentaires 205 ont une forme carrée de côté sensiblement égal à la moitié de la longueur d'onde centrale de travail de l'antenne.

[0034] Chaque cellule 205 comprend un premier élément d'antenne 205a disposé du côté d'une première face du réseau 203, par exemple la face du réseau destinée à être orientée vers la ou les sources primaires (non visibles sur la figure 2) de l'antenne, et un deuxième élément d'antenne 205b disposé sur une face du réseau 203 opposée à la première face.

[0035] Chaque cellule 205 est apte, en émission, à recevoir un rayonnement électromagnétique sur son premier élément d'antenne 205a et à réémettre ce rayonnement depuis son deuxième élément d'antenne 205b avec un déphasage ϕ connu, et, en réception, à recevoir un rayonnement électromagnétique sur son deuxième élément d'antenne 205b et à réémettre ce rayonnement depuis son premier élément d'antenne 205a avec le même déphasage ϕ .

[0036] Les caractéristiques du faisceau produit par l'antenne, et notamment sa forme (ou gabarit) et sa direction centrale (ou direction de pointage), dépendent des valeurs des déphasages ϕ introduits par les différentes cellules 205.

[0037] Le réseau transmetteur 203 de la figure 2 peut

être réalisé en technologie planaire, par exemple sur une carte de circuit imprimé, ou sur un substrat en silicium, quartz, etc. Dans un mode de réalisation préféré, le réseau 203 est réalisé sur une carte de circuit imprimé, en technologie PCB (de l'anglais "Printed Circuit Board"). Cette technologie présente en effet l'avantage d'être peu coûteuse et de permettre la production à grande échelle de réseaux de grande surface.

[0038] Le réseau 203 de la figure 2 comprend un empilement de trois couches conductrices (ou niveaux conducteurs) M1, M2 et M3, respectivement appelées première, deuxième et troisième couches conductrices M1, M2 et M3, séparées deux à deux par des couches diélectriques D1 et D2. Plus particulièrement, dans l'exemple de la figure 2, la troisième couche conductrice M3 forme la couche inférieure de l'empilement, la couche diélectrique D2, appelée deuxième couche diélectrique, est disposée sur et en contact avec la face supérieure de la troisième couche conductrice M3, la deuxième couche conductrice M2 est disposée sur et en contact avec la face supérieure de la deuxième couche diélectrique D2, la couche diélectrique D1, appelée première couche diélectrique, est disposée sur et en contact avec la face supérieure de la deuxième couche conductrice M2, et la première couche conductrice M1 est disposée sur et en contact avec la face supérieure de la première couche diélectrique D1.

[0039] Les couches conductrices M1, M2 et M3 sont par exemple des couches métalliques, par exemple en cuivre. Chacune des couches conductrices M1, M2, M3 a par exemple une épaisseur comprise entre 1 et 30 µm, par exemple de l'ordre de 17 µm. La deuxième couche diélectrique D2 est par exemple constituée d'une feuille multicouches laminée à base de polytétrafluoroéthylène (PTFE) et de céramique, par exemple du type commercialisé par la société Rogers sous la dénomination commerciale Duroid®6002. A titre d'exemple, la deuxième couche diélectrique D2 présente une épaisseur de l'ordre de 254 µm. Dans l'exemple représenté, la première couche diélectrique D1 est constituée d'un empilement d'une couche diélectrique 207 et d'un film de colle diélectrique 209. Le film de colle 209 est disposé sur et en contact avec la face supérieure de la deuxième couche conductrice M2, et la couche 207 est disposée sur et en contact avec la face supérieure du film de colle 209 (la couche conductrice M1 étant disposée sur et en contact avec la face supérieure de la couche 207). La couche diélectrique 207 est par exemple constituée d'une feuille multicouches laminée à base de polytétrafluoroéthylène (PTFE) et de céramique, par exemple du type commercialisé par la société Rogers sous la dénomination commerciale Duroid®6002. A titre d'exemple, la couche 207 présente une épaisseur de l'ordre de 127 µm. Le film de colle 209 est par exemple une couche adhésive ayant notamment pour fonction de fixer la couche 207 sur la face supérieure de la couche M2. Le film de colle 209 a par exemple une épaisseur de l'ordre de 100 pm. A titre d'exemple, la couche M2 est imprimée sur la face supérieure de la deuxiè-

me couche diélectrique D2 avant fixation de la couche D1 sur la face supérieure de la couche M2. Les couches M3 et M1 peuvent quant à elles être imprimées respectivement sur la face inférieure de la couche D2 et sur la face supérieure de la couche 207. Dans l'exemple de la figure 2, le réseau transmetteur 203 comprend uniquement trois couches conductrices M1, M2 et M3, c'est-à-dire qu'il ne comprend pas de couche conductrice supplémentaire du côté de la face supérieure de la couche conductrice M1, et qu'il ne comprend pas de couche conductrice supplémentaire du côté de la face inférieure de la couche conductrice M3. On notera que les épaisseurs mentionnées ci-dessus des différentes couches sont données uniquement à titre illustratif. Ces épaisseurs ont été optimisées pour un fonctionnement à une fréquence centrale de l'ordre de 141 GHz. Ces épaisseurs peuvent toutefois être modifiées en fonction des besoins de l'application, par exemple pour réaliser une antenne destinée à fonctionner à des fréquences plus élevées ou plus faibles.

[0040] Dans l'exemple de la figure 2, les premiers éléments d'antenne 205a des cellules élémentaires 205 sont formés dans la couche conductrice supérieure M1, et les deuxièmes éléments d'antenne 205b des cellules élémentaires 205 sont formés dans la couche conductrice inférieure M3.

[0041] Dans chaque cellule élémentaire 205, l'élément d'antenne supérieur 205a est constitué par un motif conducteur formé dans la couche conductrice M1. Par motif, il est entendu que la forme que prend la couche conductrice présente des particularités géométriques données. L'élément d'antenne 205a de chaque cellule élémentaire 205 est isolé électriquement des éléments d'antenne 205a des autres cellules du réseau. Autrement dit, la couche conductrice M1 est une couche discontinue, c'est-à-dire qu'une bande périphérique du matériau conducteur de la couche M1 est retirée autour de chaque élément d'antenne 205a, séparant l'élément d'antenne 205a des cellules voisines. Dans chaque cellule élémentaire 205, le motif conducteur formant l'élément d'antenne 205a est par exemple un motif continu ou monobloc. A titre d'exemple, le motif conducteur formant l'élément d'antenne 205a occupe, en vue de dessus, une surface supérieure à 20 % de la surface de la cellule 205.

[0042] Dans chaque cellule élémentaire 205, l'élément d'antenne inférieur 205b est constitué par un motif conducteur ou plot conducteur formé dans la couche conductrice M3. L'élément d'antenne inférieur 205b est disposé au moins en partie en vis-à-vis (à l'aplomb) de l'élément d'antenne supérieur 205a. L'élément d'antenne 205b de chaque cellule élémentaire 205 est isolé électriquement des éléments d'antenne 205b des autres cellules du réseau. Autrement dit, la couche conductrice M3 est une couche discontinue. Dans chaque cellule élémentaire 205, le motif conducteur formant l'élément d'antenne 205b est par exemple un motif continu. A titre d'exemple, le motif conducteur formant l'élément d'antenne 205b occupe une surface supérieure à 20 % de la

surface supérieure de la cellule 205.

[0043] Dans l'exemple de la figure 2, la couche conductrice intermédiaire M2 forme un plan de masse s'étendant de façon continue sur sensiblement toute la surface du réseau 203.

[0044] Selon un aspect d'un mode de réalisation, le réseau transmetteur 203 de la figure 2 comprend deux types de cellules élémentaires 205, des cellules dites de type I (205-I) et des cellules dites de type II (205-II).

[0045] Chaque cellule de type I comprend un via conducteur 211 traversant les couches diélectriques D1 et D2 et la couche conductrice intermédiaire M2, le via 211 étant agencé de manière à connecter l'élément d'antenne supérieur 205a à l'élément d'antenne inférieur 205b. Par connecter, on entend ici que le via 211 est en contact mécaniquement et électriquement, par sa face supérieure, avec la face inférieure de l'élément d'antenne 205a, et, par sa face inférieure, avec la face supérieure de l'élément d'antenne 205b. Le via conducteur 211 est isolé, c'est-à-dire qu'il n'est pas en contact électrique avec la couche conductrice intermédiaire M2. Autrement dit, le via 211 est agencé de manière à traverser la couche conductrice intermédiaire M2 sans la toucher, et est ainsi isolé de la couche conductrice intermédiaire M2. Plus particulièrement, dans l'exemple représenté, dans chaque cellule élémentaire de type I, la couche intermédiaire M2 comprend une ouverture localisée 213, par exemple une ouverture circulaire, en vis-à-vis des éléments d'antenne supérieur 205a et inférieur 205b. Le via 211 s'étend verticalement depuis la face inférieure de l'élément d'antenne 205a jusqu'à la face supérieure de l'élément d'antenne 205b (à travers les couches diélectriques D1 et D2), en passant par l'ouverture 213. Le via 211 permet de transférer l'énergie entre les éléments d'antenne 205a et 205b. Le via conducteur est par exemple en métal, par exemple en cuivre.

[0046] Dans les cellules 205 de type II, il n'est pas prévu de via 211 traversant les couches diélectriques D1 et D2 et la couche conductrice M2, et l'élément d'antenne supérieur 205a de la cellule n'est pas connecté à l'élément d'antenne inférieur 205b de la cellule. Autrement dit, aucun élément électriquement conducteur ne relie directement l'élément d'antenne 205a de la cellule à l'élément d'antenne 205b de la cellule. À titre d'exemple, dans chaque cellule 205 de type II, la couche conductrice M2 comprend une ouverture localisée 215. L'ouverture 215 a une géométrie particulière, par exemple une fente en forme de I ou de H (en vue de dessus, non visible sur la figure 2), disposée au moins en partie en vis-à-vis des éléments d'antenne 205a et 205b de la cellule. L'ouverture 215 permet de transférer l'énergie entre les éléments d'antenne 205a et 205b.

[0047] Ainsi, dans le mode de réalisation de la figure 2, le réseau 203 combine des cellules élémentaires dans lesquelles le couplage entre les éléments d'antenne 205a et 205b est réalisé par un via (type I) et des cellules élémentaires dans lesquelles le couplage entre les éléments d'antenne 205a et 205b est réalisé sans via (type

II). Les types de cellules I et II ont pour point commun que la couche conductrice intermédiaire M2 comprend une ouverture agencée soit pour laisser passer un via conducteur isolé de la couche M2 (dans les cellules de type I) soit pour former une fente ayant un motif particulier, par exemple en forme de I ou de H (dans les cellules de type II).

[0048] Les figures 3A et 3B sont des schémas électriques équivalents modélisant respectivement le comportement d'une cellule de type I et d'une cellule de type II du réseau transmetteur 203 de la figure 2.

[0049] Dans les deux types de cellules, l'élément d'antenne 205a est modélisé par une association en parallèle d'une résistance, d'une inductance et d'une capacité entre des noeuds n1 et n2 du circuit, et l'élément d'antenne 205b est modélisé par une association en parallèle d'une résistance, d'une inductance et d'une capacité entre des noeuds n3 et n4 du circuit équivalent.

[0050] Dans les deux types de cellules, le circuit équivalent comprend en outre un transformateur T1 modélisant le couplage entre une source primaire de l'antenne et l'élément d'antenne 205a de la cellule. Le transformateur T1 comprend deux enroulements conducteurs couplés magnétiquement, l'un des deux enroulements ayant ses deux extrémités connectées respectivement aux noeuds n1 et n2 du circuit équivalent, et l'autre enroulement ayant ses deux extrémités connectées respectivement à deux noeuds d'un circuit équivalent (non représenté) modélisant la source primaire. Le transformateur T1 modélise la transmission d'une onde électromagnétique incidente W_i de la source primaire vers l'élément d'antenne 205a, ou d'une onde électromagnétique transmise W_t par la cellule, de l'élément d'antenne 205a vers la source primaire.

[0051] Dans les deux types de cellules, le circuit équivalent comprend de plus un transformateur T2 modélisant le couplage entre une source externe et l'élément d'antenne 205b de la cellule. Le transformateur T2 comprend deux enroulements conducteurs couplés magnétiquement, l'un des deux enroulements ayant ses deux extrémités connectées respectivement aux noeuds n3 et n4 du circuit équivalent, et l'autre enroulement ayant ses deux extrémités connectées respectivement à deux noeuds d'un circuit équivalent (non représenté) modélisant la source externe. Le transformateur T2 modélise la transmission d'une onde électromagnétique incidente W_i de la source externe vers l'élément d'antenne 205b, ou d'une onde électromagnétique transmise W_t de l'élément d'antenne 205b vers la source externe ou dans l'espace de propagation.

[0052] De plus, dans les deux types de cellules, le circuit équivalent comprend un réseau de couplage CN ayant un premier noeud d'entrée/sortie connecté au noeud n1, un deuxième noeud d'entrée/sortie connecté au noeud n2, un troisième noeud d'entrée/sortie connecté au noeud n3, et un quatrième noeud d'entrée/sortie connecté au noeud n4. Le circuit CN modélise le couplage entre les éléments d'antenne 205a et 205b de la cel-

lule.

[0053] Dans les cellules de type I (couplage par via), il existe une connexion électrique directe entre les éléments d'antenne 205a et 205b. Le réseau de couplage CN comprend une association en série de deux inductances reliant le noeud n1 au noeud n3, et une capacité ayant une première électrode connectée au point milieu entre les deux inductances et une deuxième électrode connectée aux noeuds n2 et n4.

[0054] Dans les cellules de type II (couplage sans via), il n'existe pas de connexion électrique directe entre les éléments d'antenne 205a et 205b. Le réseau de couplage CN comprend un transformateur constitué de deux enroulements couplés magnétiquement, le premier enroulement ayant ses extrémités connectées respectivement aux noeuds n1 et n2 et le deuxième enroulement ayant ses extrémités connectées respectivement aux noeuds n3 et n4.

[0055] Les essais réalisés ont montré que le fait de combiner des cellules à couplage par via et des cellules à couplage sans via dans un même réseau transmetteur permet d'atteindre des fréquences de fonctionnement plus élevées et/ou d'obtenir des bandes passantes plus étendues que lorsqu'un seul type de cellule est utilisé. En particulier, combiner les deux topologies permet de s'affranchir des limites et des tolérances de fabrication d'une technologie de réalisation fixée et donc d'atteindre des bandes passantes plus étendues que lorsqu'un seul type de cellule est utilisé.

[0056] Pour limiter la complexité et maximiser la bande passante du réseau transmetteur, les cellules élémentaires du réseau peuvent avoir un nombre N limité de configurations (formes, dimensions et disposition des éléments d'antenne et de couplage), correspondant à N valeurs de déphasage distinctes, où N est un entier supérieur ou égal à 2. Autrement dit, à la conception du réseau, chaque cellule élémentaire est choisie parmi l'une de N configurations distinctes, correspondant respectivement à N valeurs de déphasage distinctes, ce qui revient à quantifier sur $\log_2(N)$ bits le déphasage introduit par les cellules. Les cellules d'une même configuration sont identiques aux dispersions de fabrication près, et le réseau transmetteur peut comprendre plusieurs cellules de chaque configuration. A titre d'exemple, N est un entier supérieur ou égal à 4, et, parmi les N configurations de cellules, plusieurs sont de type I (à couplage par via) et plusieurs sont de type II (à couplage sans via). Les N configurations de cellules sont de préférence choisies de façon que les N valeurs de déphasages introduites respectivement par les cellules des N configurations soient de l'ordre de 0°, 360°/N, 2*360°/N, ... (N-1)*360°/N.

[0057] La figure 4 est une vue en perspective illustrant plus en détail un exemple de réalisation des cellules élémentaires du réseau. Dans cet exemple, le nombre N de configurations distinctes de cellules est fixé à 8, soit une quantification sur 3 bits de la valeur de déphasage introduite par les cellules, avec des valeurs de déphasage relatives des 8 configurations de cellules respectivement

de l'ordre de 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° et 315°. Dans cet exemple, les cellules ont été optimisées pour un fonctionnement à une fréquence centrale de 141 GHz. On désigne ici par UC1, UC2, UC3, UC4, UC5, UC6, UC7 et UC8 les 8 configurations de cellules.

[0058] Dans cet exemple, les cellules UC1, UC2 et UC3 sont de type II (couplage sans via) et les cellules UC4, UC5, UC6, UC7 et UC8 sont de type I (couplage par via).

[0059] Dans chacune des cellules de type II UC1, UC2 et UC3, les éléments d'antenne 205a et 205b de la cellule présentent chacun un motif correspondant à une plaque pleine de forme rectangulaire. De plus, dans chacune des cellules UC1, UC2 et UC3, l'élément d'antenne 205a est de même dimension que l'élément d'antenne 205b et est disposé entièrement en vis-à-vis de l'élément d'antenne 205b. Autrement dit, dans chacune des cellules UC1, UC2 et UC3, l'élément d'antenne 205a est de même forme et de mêmes dimensions que l'élément d'antenne 205b, et est placé entièrement en vis-à-vis de l'élément d'antenne 205b. Dans chacune des cellules UC1, UC2 et UC3, la fente de couplage 215 est en forme de I. Les cellules UC1, UC2 et UC3 diffèrent les unes des autres par les dimensions de leurs éléments d'antennes 205a et 205b et/ou de leur fente de couplage 215. Ceci permet d'ajuster la réponse de chaque cellule pour obtenir les états de phase nécessaires.

[0060] Dans chacune des cellules de type I UC4, UC5, UC6 et UC7, les éléments d'antenne 205a et 205b de la cellule ont chacun la forme d'une plaque pleine présentant des bords rectilignes et au moins un bord arrondi ou plus généralement curviligne. De plus, dans chacune des cellules UC4, UC5, UC6 et UC7, l'élément d'antenne 205a est de même forme et de mêmes dimensions que l'élément d'antenne 205b, et est placé au moins partiellement en vis-à-vis de l'élément d'antenne 205b. Les cellules UC4, UC5, UC6 et UC7 diffèrent les unes des autres par les formes et/ou dimensions de leurs éléments d'antennes 205a et 205b et/ou par le diamètre de leur ouverture circulaire 213 formée dans la couche conductrice M2 ou par le diamètre de leur via conducteur 211.

[0061] Dans la cellule de type I UC8, les éléments d'antenne 205a et 205b ont chacun la forme d'une plaque rectangulaire comportant une ouverture en forme de U dans sa partie centrale. De plus, l'élément d'antenne 205a est de mêmes dimensions que l'élément d'antenne 205b, et est placé entièrement en vis-à-vis de l'élément d'antenne 205b.

[0062] Plus généralement, les cellules élémentaires de type I et II peuvent être formées à partir de tous autres motifs facilement industrialisables, étant entendu que l'on pourra, pour obtenir les déphasages souhaités, faire varier un ou plusieurs des paramètres suivants : la forme des éléments d'antenne 205a et 205b, les dimensions de l'ouverture 213 ou 215 formée dans la couche conductrice M2, les dimensions des éléments d'antenne 205a et/ou 205b, les dimensions du via conducteur 211 ou de la fente 215, etc.

[0063] Les figures 5A et 5B illustrent la réponse en fréquence des cellules élémentaires UC1, UC2, UC3, UC4, UC5, UC6, UC7 et UC8 de l'exemple de la figure 4.

[0064] La figure 5A illustre l'évolution, en fonction de la fréquence F de l'onde incidente (en abscisse, en GHz), de l'amplitude du coefficient de transmission S_{21} (en ordonnée, en dB) de chaque cellule. La figure 5A comprend plus particulièrement huit courbes C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 et C8 représentant l'évolution de l'amplitude du coefficient de transmission respectivement pour les huit configurations de cellules élémentaires UC1, UC2, UC3, UC4, UC5, UC6, UC7 et UC8 de l'exemple de la figure 4.

[0065] La figure 5B illustre l'évolution, en fonction de la fréquence F de l'onde incidente (en abscisse, en GHz), de la phase du coefficient de transmission S_{21} (en ordonné en degrés) de chaque cellule. La figure 5B comprend plus particulièrement huit courbes D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7 et D8 représentant l'évolution de la phase du coefficient de transmission respectivement pour les huit configurations de cellules élémentaires UC1, UC2, UC3, UC4, UC5, UC6, UC7 et UC8 de l'exemple de la figure 4.

[0066] Comme cela apparaît sur la figure 5A, la bande passante à -1 dB du réseau transmetteur présente une largeur de l'ordre de 29 GHz, pour une fréquence centrale de travail de l'ordre de 141 GHz, soit une bande passante relative d'environ 20 %.

[0067] La figure 5B illustre les déphasages respectifs introduits par les différentes cellules. En prenant la cellule UC2 (courbe D2) comme cellule de référence (déphasage nul), on voit sur la figure 5B que quelle que soit la fréquence de fonctionnement (dans la bande susmentionnée de 29 GHz centrée sur une fréquence centrale de travail de 141 GHz), la cellule UC3 (courbe D3) introduit un déphasage relatif (par rapport au déphasage introduit par la cellule UC2) d'environ 45°, la cellule UC4 introduit un déphasage relatif d'environ 90°, la cellule UC7 introduit un déphasage relatif d'environ 135°, la cellule UC8 introduit un déphasage relatif d'environ 180°, la cellule UC5 introduit un déphasage relatif d'environ 225°, la cellule UC6 introduit un déphasage relatif d'environ 270°, et la cellule UC1 introduit un déphasage relatif d'environ 315°.

[0068] Ainsi, le mode de réalisation décrit en relation avec la figure 2, consistant à combiner au sein d'un même réseau transmetteur des cellules élémentaire à couplage par via et des cellules élémentaires à couplage sans via, permet d'atteindre des fréquences de travail particulièrement élevées, avec des bandes passantes relatives importantes.

[0069] Cette solution est tout particulièrement adaptée à la réalisation d'antennes destinées à fonctionner à des fréquences comprises entre 80 GHz et 200 GHz, mais peut être utilisées plus généralement à d'autres fréquences, par exemple pour réaliser des antennes destinées à fonctionner à des fréquences comprises entre 1 et 300 GHz.

[0070] Des modes de réalisation particuliers ont été décrits. Diverses variantes et modifications apparaîtront

à l'homme de l'art. En particulier, les modes de réalisation décrits ne se limitent pas aux exemples de réalisation des cellules de type I et II décrits en relation avec les figures 2 et 4.

[0071] On notera en particulier que les cellules de type II (à couplage sans via) peuvent inclure des cellules similaires à ce qui a été décrit en relation avec la figure 2, mais ne comportant pas de fente dans le plan de masse M2 en vis-à-vis des éléments d'antenne 205a et 205b.

[0072] Par ailleurs, les modes de réalisation décrits ne se limitent pas aux exemples de dimensions et de matériaux mentionnés dans la présente demande.

15 Revendications

1. Réseau transmetteur (203) comprenant une pluralité de cellules (205), chaque cellule (205) étant adaptée à transmettre un signal radio en introduisant dans ce signal un déphasage, ladite pluralité de cellules comportant des cellules d'un premier type (205-I) et des cellules d'un deuxième type (205-II), dans lequel :

le réseau comprend un empilement de première (M1), deuxième (M2) et troisième (M3) couches conductrices séparées deux à deux par des couches diélectriques (D1, D2), la deuxième couche conductrice (M2) étant une couche continue formant un plan de masse commun à toutes les cellules du réseau ;
 chaque cellule (205) comprend un premier élément d'antenne (205a) formé dans la première couche conductrice (M1) et un deuxième élément d'antenne (205b) formé dans la troisième couche conductrice (M3), la première couche conductrice (M1) étant une couche discontinue telle que les premiers éléments d'antenne (205a) des différentes cellules (205) soient isolés les uns des autres et la troisième couche conductrice (M3) étant une couche discontinue telle que les deuxièmes éléments d'antenne (205b) des différentes cellules (205) soient isolés les uns des autres ;
 dans chaque cellule du premier type (205-I), le premier élément d'antenne (205a) est connecté au deuxième élément d'antenne (205b) par un via conducteur (211) passant par une ouverture formée dans la deuxième couche conductrice (M2), le via (211) et l'ouverture (213) étant agencés de façon que le via ne soit pas en contact avec la deuxième couche conductrice (M2) ; et dans chaque cellule du deuxième type (205-II), le premier élément d'antenne (205a) n'est pas connecté au deuxième élément d'antenne (205b).

2. Réseau transmetteur (203) selon la revendication 1,

dans lequel, dans chaque cellule (205), le deuxième élément d'antenne (205b) est au moins partiellement en vis-à-vis du premier élément d'antenne (205a).

3. Réseau transmetteur (203) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel, dans chaque cellule du deuxième type (205-II), le premier élément d'antenne (205a) est couplé au deuxième élément d'antenne (205b) par une fente (215) formée dans la deuxième couche conductrice (M2), au moins partiellement en vis-à-vis des premier (205a) et deuxième (205b) éléments d'antenne. 5
4. Réseau transmetteur (203) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, comprenant N configurations de cellules (UC1, UC2, UC3, UC4, UC5, UC6, UC7, UC8) distinctes, où N est un entier supérieur ou égal à 2, le réseau comprenant plusieurs cellules (205) de chaque configuration. 15
5. Réseau transmetteur (203) selon la revendication 4, dans lequel les N configurations de cellules sont choisies de façon que les N valeurs de déphasages introduites respectivement par les cellules des N configurations soient de l'ordre de 0°, 360°/N, 2*360°/N, ... (N-1)*360°/N. 20
6. Réseau transmetteur (203) selon la revendication 5, dans lequel N est égal à 8. 30
7. Réseau transmetteur (203) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel, dans chaque cellule, le premier élément d'antenne (205a) est constitué par un motif conducteur continu et le deuxième élément d'antenne (205b) est constitué par un motif conducteur continu. 35
8. Réseau transmetteur (203) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel, dans chaque cellule, le premier élément d'antenne (205a) occupe une surface supérieure à 20 % de la surface de la cellule, et le deuxième élément d'antenne (205b) occupe une surface supérieure à 20 % de la surface de la cellule. 40
9. Antenne à réseau transmetteur comprenant un réseau transmetteur (203) selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, et au moins une source primaire (101) configurée pour irradier une face du réseau (203). 45
10. Antenne selon la revendication 9, adaptée à fonctionner à une fréquence comprise entre 1 et 300 GHz. 50

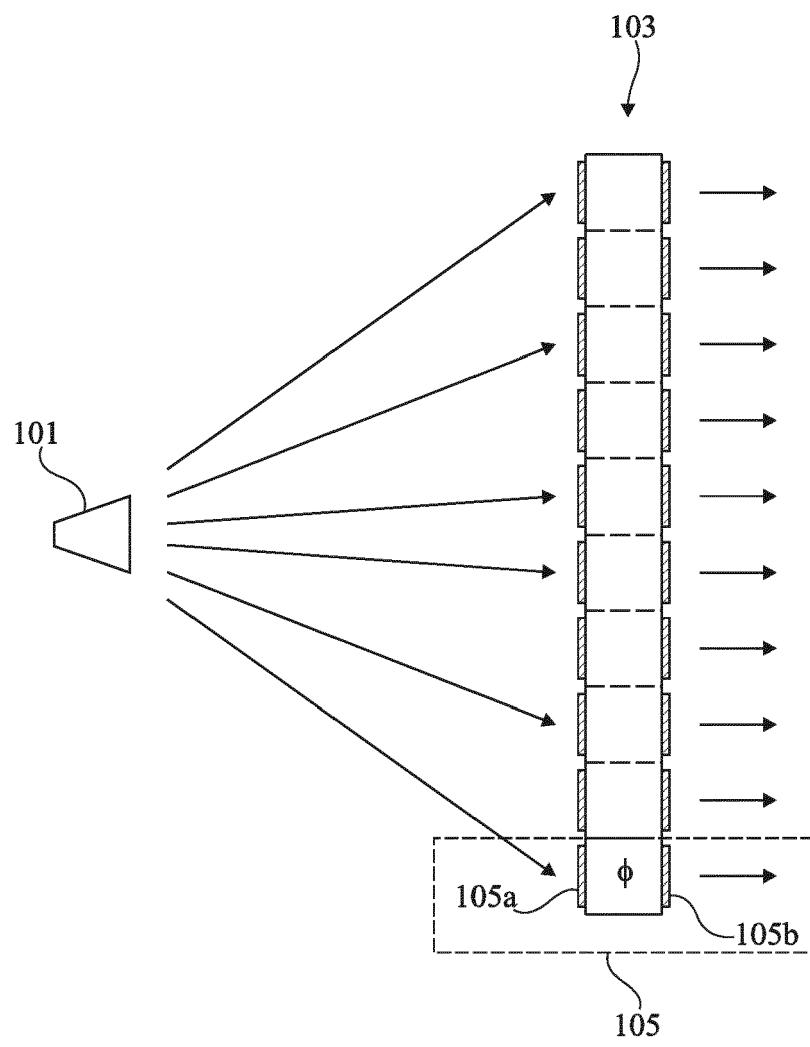


Fig 1

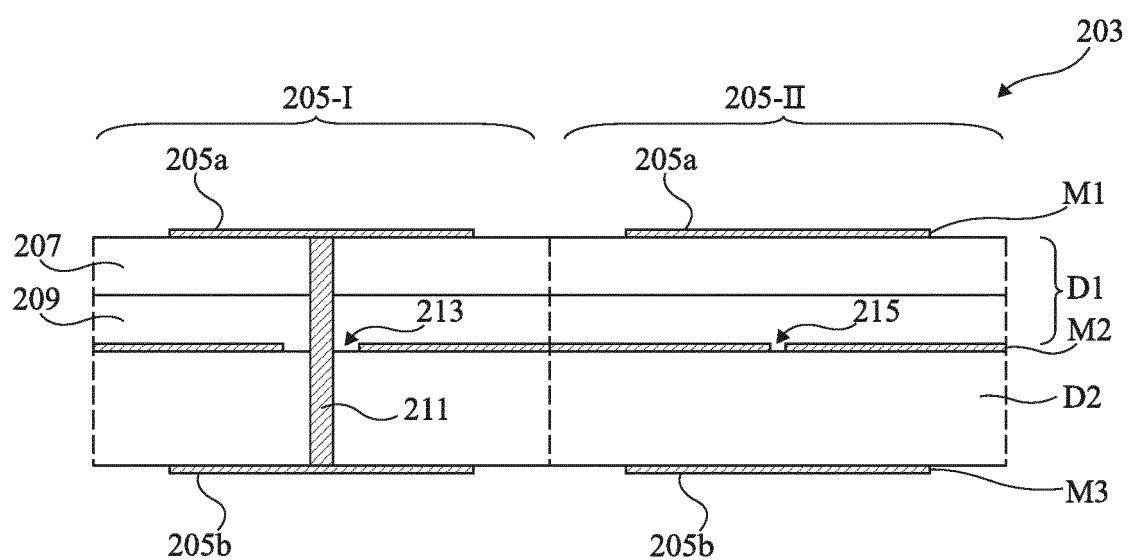


Fig 2

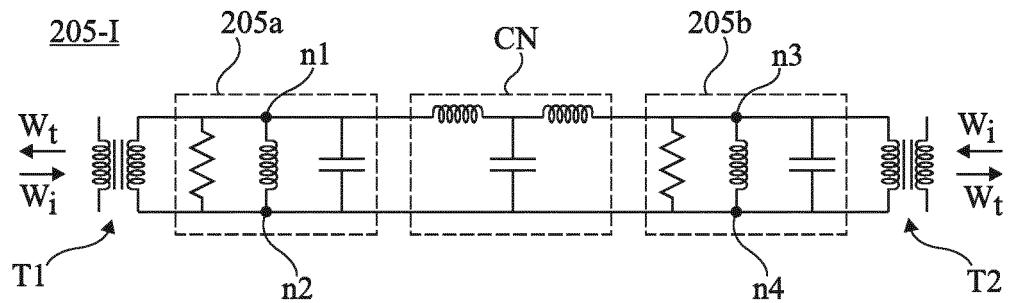


Fig 3A

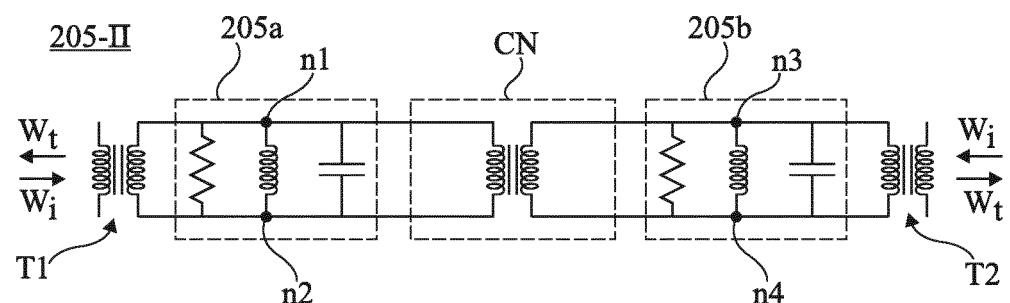


Fig 3B

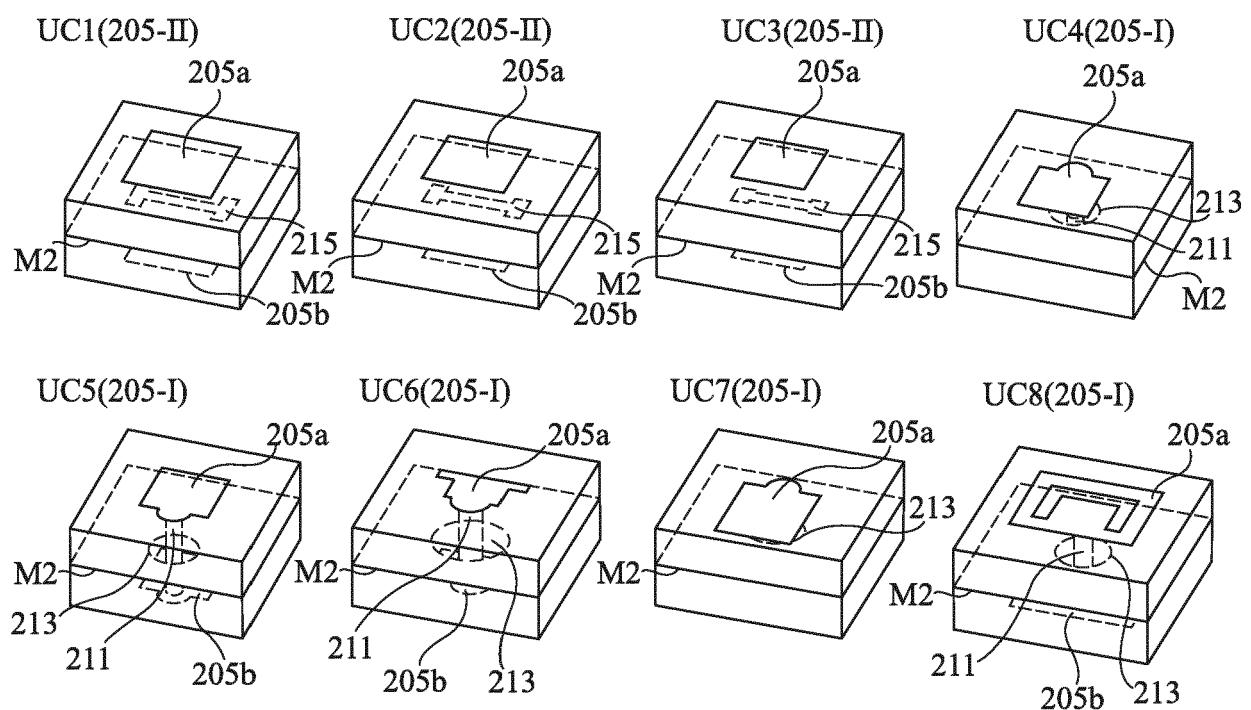


Fig 4

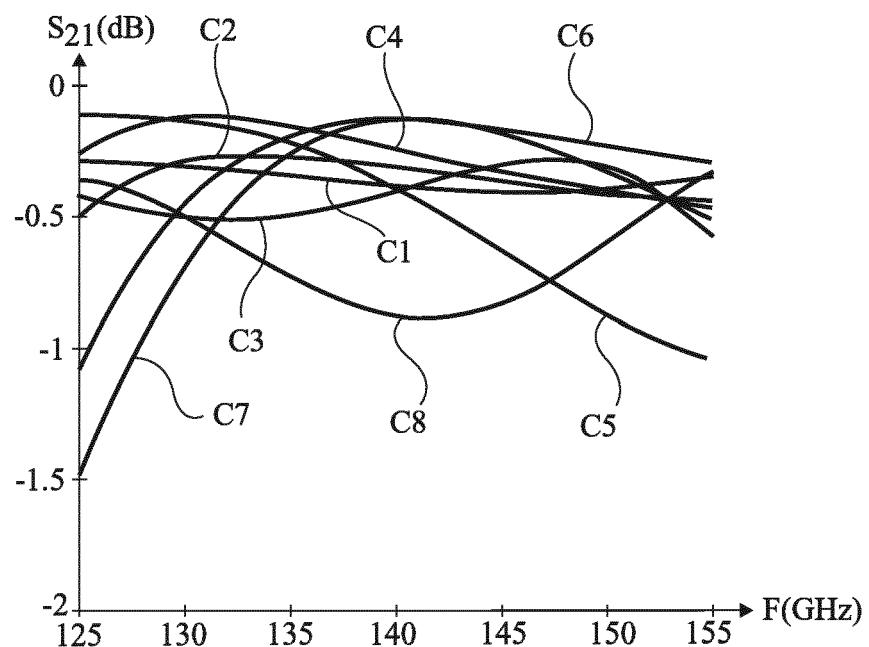


Fig 5A

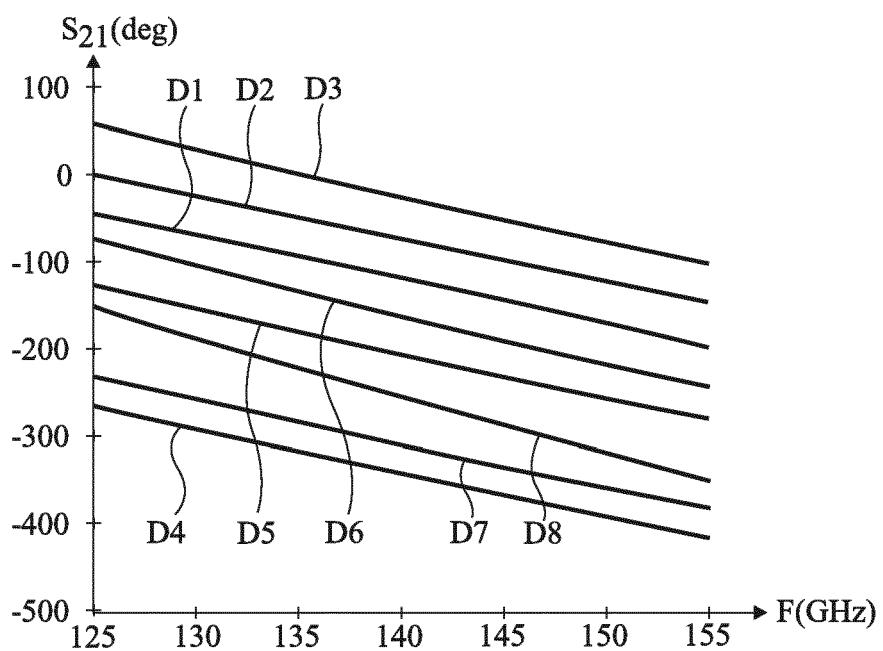


Fig 5B



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 19 16 2018

5

| DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS | | | | |
|---------------------------------------|---|--|-------------------------|--------------------------------------|
| | Catégorie | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes | Revendication concernée | CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC) |
| 10 | A | SAEED I LATIF ET AL: "Study of the microtrip patch or ring as a cell element for a transmit-array with slotted ground plane", ANTIENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM (APSURSI), 2010 IEEE, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 11 juillet 2010 (2010-07-11), pages 1-4, XP032145346, DOI: 10.1109/APS.2010.5560959 ISBN: 978-1-4244-4967-5 * le document en entier * | 1-10 | INV. H01Q3/46 H01Q21/06 |
| 15 | A | JONATHAN Y LAU ET AL: "Design and characterization of a 6 * 6 planar reconfigurable transmitarray", ANTIENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), 2010 PROCEEDINGS OF THE FOURTH EUROPEAN CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 12 avril 2010 (2010-04-12), pages 1-5, XP031705795, ISBN: 978-1-4244-6431-9 * le document en entier * | 1-10 | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) |
| 20 | A | ----- | | H01Q H04B |
| 25 | A | KAOUACH H ET AL: "X-band transmit-arrays with linear and circular polarization", ANTIENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), 2010 PROCEEDINGS OF THE FOURTH EUROPEAN CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 12 avril 2010 (2010-04-12), pages 1-5, XP031706079, ISBN: 978-1-4244-6431-9 * le document en entier * | 1-10 | |
| 30 | A | ----- | | |
| 35 | A | KAOUACH H ET AL: "X-band transmit-arrays with linear and circular polarization", ANTIENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), 2010 PROCEEDINGS OF THE FOURTH EUROPEAN CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 12 avril 2010 (2010-04-12), pages 1-5, XP031706079, ISBN: 978-1-4244-6431-9 * le document en entier * | 1-10 | |
| 40 | | ----- | -/- | |
| 45 | | Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications | | |
| 1 | Lieu de la recherche | Date d'achèvement de la recherche | Examinateur | |
| | La Haye | 21 mai 2019 | Wattiaux, Véronique | |
| 50 | CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES | | | |
| | X : particulièrement pertinent à lui seul | T : théorie ou principe à la base de l'invention | | |
| | Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie | E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date | | |
| | A : arrière-plan technologique | D : cité dans la demande | | |
| | O : divulgation non-écrite | L : cité pour d'autres raisons | | |
| | P : document intercalaire | & : membre de la même famille, document correspondant | | |

EPO FORM 1503.03.82 (P04C02)



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 19 16 2018

5

| DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS | | | |
|---|--|--|--------------------------------------|
| Catégorie | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes | Revendication concernée | CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC) |
| 10 | A ANTONIO CLEMENTE ET AL: "Design of a reconfigurable transmit-array at X-band frequencies", ANTENNA TECHNOLOGY AND APPLIED ELECTROMAGNETICS (ANTEM), 2012 15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, IEEE, 25 juin 2012 (2012-06-25), pages 1-4, XP032219584, DOI: 10.1109/ANTEM.2012.6262295 ISBN: 978-1-4673-0290-6 * le document en entier * | 1-10 | |
| 15 | | | |
| 20 | | | |
| 25 | | | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) |
| 30 | | | |
| 35 | | | |
| 40 | | | |
| 45 | | | |
| 50 | Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications | | |
| 55 | Lieu de la recherche Date d'achèvement de la recherche Examinateur | La Haye 21 mai 2019 Wattiaux, Véronique | |
| 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)

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

- **DE C. JOUANLANNE et al.** Wideband linearly-polarized transmitarray antenna for 60 GHz backhaul-ing. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Mars 2017, vol. 65 (3), 1440-1445 [0005]
- **DE L. DUSSOPT et al.** A V-band switched beam lin-early-polarized transmit-array antenna for wireless backhaul applications. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Décembre 2017, vol. 65 (12), 6788-6793 [0006]