

(19)



(11)

**EP 2 807 702 B1**

(12)

**FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:

**05.04.2017 Bulletin 2017/14**

(51) Int Cl.:

**H01Q 21/00** (2006.01)      **H01Q 1/28** (2006.01)  
**H01Q 3/26** (2006.01)      **H01Q 19/13** (2006.01)  
**H01Q 19/18** (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **13701118.5**

(86) Numéro de dépôt international:

**PCT/EP2013/051509**

(22) Date de dépôt: **25.01.2013**

(87) Numéro de publication internationale:

**WO 2013/110793 (01.08.2013 Gazette 2013/31)**

(54) **FORMATEUR MULTI-FAISCEAUX À DEUX DIMENSIONS, ANTENNE COMPORTANT UN TEL FORMATEUR MULTI-FAISCEAUX ET SYSTÈME DE TÉLÉCOMMUNICATION PAR SATELLITE COMPORTANT UNE TELLE ANTENNE**

ZWEIDIMENSIONALER MEHRSTRAHLFORMER, ANTENNE MIT EINEM SOLCHEN MEHRSTRAHLFORMER UND SATELLITENTELEKOMMUNIKATIONSSYSTEM MIT EINER DERARTIGEN ANTENNE

TWO DIMENSIONAL MULTIBEAM FORMER, ANTENNA USING SUCH AND SATELLITE TELECOMMUNICATION SYSTEM.

(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**

(72) Inventeurs:

- **LEGAY, Hervé**  
F-31830 Plaisance Du Touch (FR)
- **SAULEAU, Ronan**  
F-35690 Acigne (FR)
- **ETTORRE, Mauro**  
F-35000 Rennes (FR)

(30) Priorité: **27.01.2012 FR 1200244**

(43) Date de publication de la demande:

**03.12.2014 Bulletin 2014/49**

(74) Mandataire: **Nguyen, Dominique et al**

**Marks & Clerk France**  
**Immeuble Visium**  
**22, avenue Aristide Briand**  
**94117 Arcueil Cedex (FR)**

(73) Titulaires:

- **THALES**  
**92400 Courbevoie (FR)**
- **Université de Rennes 1**  
**35065 Rennes Cedex (FR)**
- **Centre National de la Recherche Scientifique**  
**75794 Paris Cedex 16 (FR)**

(56) Documents cités:

**WO-A1-2005/099042**      **WO-A1-2008/087388**  
**US-A- 3 170 158**      **US-A- 5 162 803**

**EP 2 807 702 B1**

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

## Description

**[0001]** La présente invention concerne un formateur multi-faisceaux à deux dimensions, une antenne comportant un tel formateur multi-faisceaux et un système de télécommunication par satellite comportant une telle antenne. Elle s'applique notamment au domaine des télécommunications par satellite.

**[0002]** Dans le domaine des télécommunications par satellite, il est nécessaire de disposer d'une antenne à formation de faisceaux permettant de couvrir un vaste territoire, tel que l'Europe par exemple, avec un très grand nombre de faisceaux fins ayant une ouverture angulaire par exemple inférieure à  $0,2^\circ$ , et avec un bon recouvrement des faisceaux.

**[0003]** Une première architecture d'antenne à formation de faisceaux, appelée antenne à réflecteur avec un réseau focal, consiste à utiliser un réseau de sources associé à un réflecteur, par exemple parabolique, le réseau de sources, appelé réseau focal, étant placé dans un plan focal situé au foyer du réflecteur. En réception, le réflecteur réfléchit une onde plane incidente reçue et la focalise dans le plan focal du réflecteur sur le réseau focal. Selon la direction d'arrivée de l'onde plane incidente sur le réflecteur, sa focalisation par le réflecteur est réalisée en différents points du plan focal. Le réflecteur permet donc de concentrer l'énergie des signaux incidents reçus sur une zone réduite du réseau focal, cette zone dépendant de la direction d'arrivée du signal incident. La synthèse d'un faisceau correspondant à une direction particulière, peut donc être réalisée à partir d'un nombre réduit de sources présélectionnées du réseau focal, typiquement de l'ordre de sept sources pour un réseau focal comportant par exemple de l'ordre de deux cent sources. Les sources sélectionnées pour la synthèse d'un faisceau sont différentes d'un faisceau à un autre et sélectionnées selon la direction d'arrivée des signaux incidents sur le réflecteur. Pour la synthèse d'un faisceau, un formateur de faisceaux combine tous les signaux focalisés sur les sources sélectionnées dédiées à ce faisceau. Le nombre de sources dédié à un faisceau étant faible, ce type d'antenne présente l'avantage de fonctionner avec un formateur de faisceau de complexité réduite et ne posant pas de problème majeur pour sa réalisation même lorsque le nombre de faisceaux augmente significativement, par exemple pour 400 faisceaux. Cependant en cas de perte d'une source, par exemple suite à une panne d'un amplificateur de signaux positionné en sortie de cette source, le faisceau correspondant sera fortement altéré. Pour éviter la perte d'une source, il est donc nécessaire de doubler le nombre d'amplificateurs positionnés en sortie de chaque source ainsi que toutes les chaînes électroniques de commande correspondantes. Ce qui augmente la complexité et l'encombrement de l'antenne.

**[0004]** Une deuxième architecture d'antenne à formation de faisceaux, appelée antenne réseau phasé (en anglais : phased array antenna), consiste à utiliser un

réseau de sources rayonnantes à rayonnement direct dans lequel toutes les sources participent à la synthèse de chacun des faisceaux, la synthèse de chaque faisceau étant réalisée par un formateur de faisceaux par application d'une matrice de déphasage en sortie du réseau de sources rayonnantes de manière à compenser le retard de rayonnement des sources les unes par rapport aux autres pour chaque direction de rayonnement du réseau de sources rayonnantes. Par conséquent, tous les faisceaux sont formés par l'ensemble des sources, seule la loi de retard appliquée à chaque source change d'un faisceau à un autre faisceau. Cette architecture présente l'avantage d'une moindre sensibilité de l'antenne en cas de perte de sources et permet de diminuer le nombre de chaînes d'amplification par un facteur deux mais présente l'inconvénient d'un formateur de faisceaux très complexe à réaliser, voire irréalisable actuellement lorsque le nombre de faisceaux à synthétiser est très important. En effet, pour synthétiser par exemple un faisceau avec un réseau de 300 sources rayonnantes, le formateur de faisceaux doit combiner les 300 signaux hyperfréquences en sortie de chaque source. Pour synthétiser 100 faisceaux avec un réseau de 300 sources rayonnantes, cette combinaison doit être réalisée 100 fois. Les matrices de déphasage correspondantes sont donc très volumineuses et ne peuvent pas être réalisées avec des circuits hyperfréquences. Par conséquent, ce type d'antenne n'existe actuellement que pour un nombre limité de faisceaux et de sources, tel que par exemple 6 faisceaux et 64 sources.

**[0005]** Il est possible de réaliser la synthèse d'un grand nombre de faisceaux et d'obtenir un grand nombre de spots en utilisant une formation numérique des faisceaux. Pour cela, les signaux hyperfréquences sont convertis au niveau de chaque source en signaux numériques avant d'être appliqués en entrée du formateur de faisceaux numérique. Cette solution nécessite cependant d'implanter des dispositifs de transposition de fréquence et des convertisseurs analogique / numérique au niveau de chaque source, ce qui augmente la complexité, la masse, le volume et la consommation de l'antenne et n'est pas acceptable pour une utilisation dans le domaine des télécommunications multimédia.

**[0006]** Une troisième architecture d'antenne à formation de faisceaux multiples, consiste à utiliser un réseau phasé comportant des sources de petite taille magnifiées par un système optique comportant un ou plusieurs réflecteurs. Cette architecture peut être appelée antenne réseau imageur, car le réseau focal conserve globalement les mêmes caractéristiques qu'un réseau phasé à rayonnement direct, la synthèse d'un spot étant réalisée par la quasi-totalité des sources.

**[0007]** Une première configuration d'antenne réseau imageur comporte deux réflecteurs paraboliques, principal et secondaire, ayant le même foyer et un réseau phasé. Le réflecteur parabolique principal est de grande taille, le réflecteur parabolique secondaire est de taille plus faible, le réseau phasé placé devant le réflecteur

secondaire comporte des sources de taille réduite. Le comportement de cette antenne est similaire à celui de l'antenne réseau phasé à rayonnement direct mais présente l'avantage d'augmenter la taille de l'ouverture rayonnante de l'antenne par rapport à une antenne réseau phasé à rayonnement direct, avec un facteur d'agrandissement défini par le rapport des diamètres des deux réflecteurs, ce qui permet de diminuer la taille des sources du réseau phasé et donc la taille des faisceaux. Son principal inconvénient réside dans la complexité du formateur de faisceaux associé au réseau phasé car, comme dans le cas de l'antenne réseau phasé à rayonnement direct, l'ensemble des sources participe à la contribution de l'ensemble des faisceaux.

**[0008]** Une deuxième configuration d'antenne réseau imageur comporte un seul réflecteur parabolique et un réseau phasé défocalisé placé devant le réflecteur. Cette configuration présente un facteur d'agrandissement de l'ouverture rayonnante de l'antenne par rapport à une antenne réseau phasé à rayonnement direct, égal au rapport entre la focale du réflecteur parabolique et la distance à laquelle le réseau a été défocalisé. Dans cette configuration, la plupart des sources participe de façon identique à la contribution de l'ensemble des faisceaux, mais le fonctionnement du réseau phasé est un peu différent de celui d'un réseau phasé à rayonnement direct, ou de celui du réseau phasé associé à la première configuration d'antenne réseau imageur. Au contraire de ces deux types de réseaux phasés qui émettent une onde plane, le réseau défocalisé associé à une configuration d'antenne réseau imageur à un seul réflecteur émet une onde sphérique, qui est convertie en onde plane par le réflecteur principal.

**[0009]** Les deux configurations d'antenne réseau imageur présentent deux inconvénients majeurs. En raison de l'éloignement du réseau phasé par rapport au foyer du ou des réflecteurs, ils induisent des aberrations. En effet, la distribution de phase sur l'ouverture rayonnante associée au réflecteur principal est affectée par une distorsion spatiale de phase qui est d'autant plus importante que le faisceau de signaux est dépointé. Ces distorsions de phase se traduisent par une dégradation du faisceau rayonné et doivent être compensées par une modification de la loi d'alimentation du réseau phasé. Les deux configurations d'antenne réseau imageur présentent également un deuxième inconvénient provenant de la variation de la taille de l'ouverture rayonnante en fonction du dépointage du faisceau et dû au fait que la surface d'interception d'un faisceau émis par le réseau phasé varie en fonction de l'angle de dépointage. Pour obtenir une ouverture rayonnante de taille identique, il est alors nécessaire d'ajuster la taille du réseau phasé en fonction de l'angle de dépointage.

**[0010]** Du fait de ces différents inconvénients, un formateur de faisceaux orthogonaux développé pour un réseau phasé à rayonnement direct n'est pas optimal s'il est utilisé pour les antennes réseau imageur. Le formateur de faisceau doit être conçu en association avec le

système optique de l'antenne, c'est-à-dire avec le ou les réflecteurs, ce qui est impossible avec les formateurs de faisceaux existants pour lesquels le formateur de faisceaux est conçu indépendamment des réflecteurs de l'antenne.

**[0011]** Une quatrième architecture d'antenne à formation de faisceaux comporte un formateur de faisceaux quasi-optique dans lequel un signal émis par un ensemble de ports d'entrée est guidé entre deux plaques métalliques parallèles vers un port de sortie. La propagation du signal émis est interrompue par un mur réflecteur qui le réfléchit et le focalise sur le port de sortie.

**[0012]** Il existe deux configurations différentes de formateur de faisceaux quasi-optique. Selon une première configuration, les ports d'entrée et de sortie sont situés dans un même milieu de propagation défini entre deux plaques parallèles, le milieu de propagation pouvant comporter un diélectrique. Dans ce cas, les ports d'entrée et de sortie sont distribués selon deux axes orthogonaux distincts et le mur réflecteur est illuminé avec un angle d'offset pour qu'il transmette la totalité du signal des ports d'entrée vers un, ou plusieurs, port de sortie.

**[0013]** Selon une deuxième configuration, appelée structure pill-box, les ports d'entrée et de sortie sont situés dans deux milieux de propagation différents superposés, chaque milieu de propagation étant défini entre deux plaques métalliques parallèles. Les deux couches de substrat constituant les deux milieux de propagation, sont couplées par un mur réflecteur interne s'étendant transversalement par rapport aux plans des couches. La première couche de substrat, par exemple la couche inférieure, comporte au moins une source d'énergie hyperfréquence placée au foyer du réflecteur interne. Les ports de sortie sont situés dans la deuxième couche de substrat. Pour améliorer la transition des ondes entre les deux couches de substrat, le document FR 2 944 153 décrit d'aménager des fentes de couplage s'étendant le long du réflecteur interne.

**[0014]** Dans ces deux configurations, en émission, la source d'énergie placée au foyer du réflecteur interne émet une onde incidente cylindrique guidée dans le milieu de propagation tri-plaques. L'onde incidente cylindrique est réfléchiée par le réflecteur interne qui la transforme en une onde plane. L'onde plane réfléchiée est ensuite acheminée par des guides d'onde jusqu'à un réseau de fentes rayonnantes. L'énergie est alors rayonnée par des fentes rayonnantes sous la forme d'un faisceau. La formation du faisceau rayonné par l'antenne est réalisée de façon naturelle par simple guidage de l'onde dans la couche de substrat, ou dans les deux couches de substrat, et par l'intermédiaire des moyens de transition quasi-optiques constitués par le réflecteur interne et éventuellement les fentes de couplage. Le déplacement de la source dans le plan du foyer du réflecteur génère des fronts d'onde correspondant à des directions de propagation données. Un balayage et un dépointage du faisceau en élévation, dans un plan perpendiculaire au plan de l'antenne, est obtenu par commutation de différentes

sources. Cependant, étant donné que les sources sont situées dans un même plan, le dépointage du faisceau ne peut pas être réalisé dans toutes les directions de l'espace mais uniquement dans un seul plan et aucune formation de faisceaux en azimut n'est possible.

**[0015]** Un premier but de l'invention est de réaliser un formateur multi-faisceaux ne comportant pas les inconvénients des formateurs de faisceaux existants, simple à mettre en oeuvre, permettant la formation d'un grand nombre de faisceaux fins avec un bon recouvrement des faisceaux dans un large domaine angulaire et permettant d'assurer un dépointage des faisceaux dans toutes les directions de l'espace.

**[0016]** Un deuxième but de l'invention est de réaliser un formateur de faisceau pouvant être conçu et dimensionné en association avec des réflecteurs d'une antenne.

**[0017]** Un troisième but de l'invention est de réaliser une antenne à formation de faisceaux multiples et en particulier une antenne réseau imageur comportant un tel formateur multi-faisceaux et dans laquelle, les aberrations de phases sont fortement réduites.

**[0018]** Pour cela, l'invention concerne un formateur multi-faisceaux à deux dimensions comportant un premier étage de formation de faisceaux destiné à synthétiser des faisceaux focalisés selon une première direction X de l'espace et un deuxième étage de formation de faisceaux destiné à focaliser les faisceaux formés par le premier étage selon une deuxième direction Y de l'espace, les deux étages étant connectés entre eux. Chaque étage comporte au moins deux structures planes multi-couches superposées l'une au-dessus de l'autre. Chaque structure multi-couches du premier et du deuxième étage comporte un réflecteur interne s'étendant transversalement au plan de la structure multi-couches, au moins deux premières sources internes disposées devant le réflecteur interne et respectivement reliées à deux premiers ports d'entrée/sortie alignés selon un premier axe de la structure multi-couches, au moins deux secondes sources internes disposées dans un plan focal du réflecteur interne et respectivement reliées à deux seconds ports d'entrée/sortie alignés selon un deuxième axe de la structure multi-couches perpendiculaire au premier axe. Les deux secondes sources internes de la même structure multi-couches du premier étage de formation de faisceaux sont respectivement reliées à deux premières sources internes de deux structures multi-couches différentes du deuxième étage de formation de faisceaux par l'intermédiaire des ports d'entrée/sortie, appelés ports de liaison, auxquels sont respectivement connectées les secondes et premières sources internes.

**[0019]** Avantagusement, le premier étage de formation de faisceaux comporte  $N_y$  structures multi-couches planes superposées l'une au-dessus de l'autre, chaque structure multi-couches du premier étage comportant  $N_x$  premières sources internes disposées devant le réflecteur interne de la structure multi-couches correspondante et connectées à  $N_x$  ports d'entrée/sortie alignés pa-

rallèlement à un axe V et  $M_x$  secondes sources disposées dans le plan focal du réflecteur interne correspondant et connectées à  $M_x$  ports de liaison alignés parallèlement à un axe U perpendiculaire à l'axe V. En outre le deuxième étage de formation de faisceaux comporte  $M_x$  structures multi-couches planes superposées l'une au-dessus de l'autre, chaque structure multi-couches du deuxième étage de formation de faisceaux comportant  $N_y$  premières sources internes disposées devant le réflecteur interne de la structure multi-couches correspondante et connectées à  $N_y$  ports de liaison alignés parallèlement à un axe V' et  $M_y$  secondes sources disposées dans le plan focal du réflecteur interne (16) correspondant et connectées à  $M_y$  ports d'entrée /sortie alignés parallèlement à un axe U' perpendiculaire à l'axe V'. Les  $N_y$  structures multi-couches du premier étage comportent  $N_y * M_x$  ports de liaison connectés respectivement à  $M_x * N_y$  ports de liaison correspondants des  $M_x$  structures multi-couches du deuxième étage,  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  étant des nombres entiers supérieurs à 1, les ports de liaison d'une même structure multi-couches du premier étage de formation de faisceaux étant respectivement connectés à des structures multi-couches différentes du deuxième étage de formation de faisceaux.

**[0020]** Avantagusement, chaque port de liaison de la  $N_k$ ème structure multi-couches du premier étage de formation de faisceaux est connecté au  $N_k$ ème port de liaison de l'une des structures multi-couches correspondante du deuxième étage de formation de faisceaux,  $N_k$  étant un nombre entier compris entre 1 et  $N_y$  inclus.

**[0021]** Selon un premier mode de réalisation des structures multi-couches de l'invention, chaque structure multi-couches comporte un plan métallique supérieur, un plan métallique inférieur et une unique couche de substrat intercalée entre le plan métallique supérieur et le plan métallique inférieur, le réflecteur interne s'étend transversalement dans la couche de substrat du plan métallique inférieur au plan métallique supérieur et les premières et secondes sources internes de chaque structure multi-couches sont disposées dans la couche de substrat et reliées respectivement à un premier et un second port d'entrée/sortie, les premier et second ports d'entrée/sortie étant disposés selon deux directions orthogonales du plan de la couche de substrat.

**[0022]** Selon un deuxième mode de réalisation des structures multi-couches de l'invention, les premières sources internes de chaque structure multi-couches sont disposées dans une première couche de substrat intercalée entre un plan métallique supérieur et un plan métallique intermédiaire, les secondes sources sont disposées dans une deuxième couche de substrat intercalée entre le plan métallique intermédiaire et un plan métallique inférieur; les première et deuxième couches de substrat sont couplées par le réflecteur interne s'étendant du plan métallique inférieur au plan métallique supérieur et par l'intermédiaire d'une ouverture ou de fentes de couplage s'étendant le long du réflecteur interne et réalisées dans le plan métallique intermédiaire séparant les deux

couches de substrat; chaque structure multi-couches comporte en outre des premiers guides d'onde disposés dans la deuxième couche de substrat, chaque premier guide d'onde comportant une première partie de guide s'étendant selon un axe longitudinal de la structure multi-couches et connectée aux secondes sources internes et une deuxième partie de guide coudée s'étendant perpendiculairement à l'axe longitudinal et reliée à un second port d'entrée/sortie.

**[0023]** Selon un mode de réalisation du formateur multi-faisceaux de l'invention, le deuxième étage de formation de faisceaux comporte Mx premières structures multi-couches et au moins Mx secondes structures multi-couches et chaque port de liaison de la Nkième structure multi-couches du premier étage de formation de faisceaux est connecté au Nkième port de liaison de l'une des premières structures multi-couches correspondante du deuxième étage de formation de faisceaux et au Nkième port de liaison de l'une des secondes structures multi-couches du deuxième étage de formation de faisceaux, Nk étant un nombre entier compris entre 1 et Ny inclus.

**[0024]** Selon un autre mode de réalisation du formateur multi-faisceaux de l'invention, les Mx secondes structures multi-couches du deuxième étage de formation de faisceaux comportent des premières sources internes décalées linéairement par rapport aux premières sources internes des Mx premières structures multi-couches du deuxième étage de formation de faisceaux, le décalage linéaire correspondant à une translation de toutes les premières sources internes d'une même distance T inférieure à une distance entre des centres de deux premières sources internes consécutives.

**[0025]** Alternativement, les Mx secondes structures multi-couches du deuxième étage de formation de faisceaux comportent un réflecteur interne ayant une orientation décalée par rapport au réflecteur interne des Mx premières structures multi-couches du deuxième étage de formation de faisceaux.

**[0026]** Selon un autre mode de réalisation du formateur multi-faisceaux de l'invention, le premier étage de formation de faisceaux comporte Ny premières et Ny secondes structures multi-couches et les premières sources internes des Ny secondes structures multi-couches sont reliées aux premières sources internes des Ny premières structures multi-couches, les Ny secondes structures multi-couches du premier étage de formation de faisceaux comportant des premières sources internes décalées linéairement par rapport aux premières sources internes des Ny premières structures multi-couches du premier étage de formation de faisceaux.

**[0027]** Alternativement, le premier étage de formation de faisceaux comporte Ny premières et Ny secondes structures multi-couches et les premières sources internes des Ny secondes structures multi-couches sont reliées aux premières sources internes des Ny premières structures multi-couches, les Ny secondes structures multi-couches du premier étage de formation de faisceaux comportant un réflecteur interne ayant une orien-

tation décalée par rapport au réflecteur interne des Ny premières structures multi-couches du premier étage de formation de faisceaux.

**[0028]** Optionnellement, la couche de substrat unique ou les première et deuxième couches de substrat de chaque structure multi-couches comportent un matériau diélectrique.

**[0029]** Avantageusement, le matériau diélectrique est une lentille diélectrique placée entre le réflecteur interne et les premières et secondes sources internes, la lentille diélectrique ayant une surface périphérie convexe et comportant des inclusions de trous d'air, les inclusions de trous d'air ayant une densité augmentant progressivement du réflecteur interne vers les premières et les secondes sources internes.

**[0030]** Optionnellement, la couche de substrat unique ou les première et seconde couches de substrat de chaque structure multi-couches comportent en outre un premier matériau diélectrique ayant une première permittivité diélectrique, le premier matériau diélectrique comportant des inclusions d'un deuxième matériau diélectrique ayant une deuxième permittivité diélectrique plus faible que la première permittivité diélectrique, les inclusions ayant une densité augmentant du réflecteur interne vers les premières et les secondes sources internes.

**[0031]** Avantageusement, la première couche et la deuxième couche de substrat de chaque structure multi-couches comporte des moyens de déformation du réflecteur interne.

**[0032]** L'invention concerne aussi une antenne multi-faisceaux, comportant au moins un tel formateur multi-faisceaux à deux dimensions et un réseau phasé constitué d'une pluralité d'éléments rayonnants élémentaires, chaque élément rayonnant élémentaire étant relié à un port d'entrée/sortie correspondant du premier étage de formation de faisceaux par l'intermédiaire d'une chaîne d'émission et d'une chaîne de réception de signaux hyperfréquence.

**[0033]** Selon un mode de réalisation, l'antenne comporte en outre au moins un réflecteur principal, le réseau phasé connecté au formateur multi-faisceaux à deux dimensions étant placé devant le réflecteur principal dans un plan défocalisé.

**[0034]** Selon un autre mode de réalisation, l'antenne comporte en outre au moins un réflecteur principal et un réflecteur auxiliaire, le réflecteur principal et le réflecteur auxiliaire, ayant des tailles différentes et ayant la même focale F et en ce que le réseau phasé connecté au formateur multi-faisceaux à deux dimensions est placé devant le réflecteur auxiliaire.

**[0035]** Avantageusement, chaque chaîne d'émission et de réception de signaux hyperfréquence comporte un déphaseur dynamique.

**[0036]** L'invention concerne aussi un système de télécommunication par satellite comportant une telle antenne.

**[0037]** D'autres particularités et avantages de l'invention apparaîtront clairement dans la suite de la descrip-

tion donnée à titre d'exemple purement illustratif et non limitatif, en référence aux dessins schématiques annexés qui représentent :

- figure 1a : un schéma en perspective d'un exemple de formateur multi-faisceaux BFN à deux dimensions, selon l'invention ;
- figure 1b : un schéma d'un exemple de connexions entre le formateur multi-faisceaux de la figure 1a et un réseau phasé, selon l'invention ;
- figure 2a : un schéma éclaté, en perspective, d'un premier exemple de structure multi-couches d'une tranche de BFN, selon l'invention;
- figure 2b : un schéma éclaté, en perspective, d'un deuxième exemple de structure multi-couches d'une tranche de BFN, selon l'invention;
- figure 2c : un schéma éclaté, en perspective, d'une variante de réalisation du premier exemple de structure multi-couches d'une tranche de BFN, selon l'invention;
- figure 2d : un schéma éclaté, en perspective, d'une variante de réalisation du deuxième exemple de structure multi-couches d'une tranche de BFN, selon l'invention;
- figure 2e : une vue schématique de dessus d'un exemple de diélectrique comportant des inclusions de trous d'air, selon une variante de réalisation de l'invention;
- figure 3 : un exemple schématique en coupe d'un réflecteur comportant des moyens de déformation sur sa face arrière.
- figures 4a et 4b : deux schémas illustrant les connexions entre les tranches de BFN des deux étages de formation de faisceaux ;
- figures 5a, 5b, 5c : trois schémas illustrant un deuxième exemple de formateur multi-faisceaux à deux dimensions permettant d'améliorer le recouvrement entre les spots dans la première direction de l'espace, selon l'invention ;
- figure 6 : un schéma d'un troisième exemple de formateur multi-faisceaux à deux dimensions permettant d'améliorer le recouvrement entre les spots dans la deuxième direction de l'espace, selon l'invention ;
- figure 7a : un schéma d'un quatrième exemple de formateur multi-faisceaux à deux dimensions permettant d'améliorer le recouvrement entre les spots dans la première et dans la deuxième direction de l'espace, selon l'invention ;
- figure 7b : un exemple illustrant le recouvrement des spots dans le cas d'un maillage hexagonal ;
- figure 8a : un schéma illustrant le fonctionnement d'un premier exemple d'antenne réseau imageur comportant un formateur multi-faisceaux, selon l'invention;
- figures 8b et 8c : deux schémas illustrant le fonctionnement d'un deuxième exemple d'antenne réseau imageur comportant un formateur multi-faisceaux,

selon l'invention;

- figure 8d : un schéma illustrant un exemple de chaînes d'émission et de réception connectées à un formateur multifaisceaux et comportant des déphaseurs dynamiques, selon l'invention ;
- figure 9 : un schéma d'un deuxième exemple de réalisation d'une antenne réseau imageur comportant un formateur multi-faisceaux à deux dimensions, selon l'invention.

**[0038]** Selon l'exemple de réalisation de l'invention représenté sur les figures 1a et 1b, le formateur multi-faisceaux (en anglais : Beam Forming Network) à deux dimensions comporte un premier étage de formation de faisceaux apte, à l'émission, à former des faisceaux de signaux focalisés dans une première dimension de l'espace, par exemple parallèle à un axe X et un deuxième étage de formation de faisceaux connecté au premier étage de formation de faisceaux, le deuxième étage de formation de faisceaux étant apte, à l'émission, à focaliser les faisceaux formés par le premier étage de formation de faisceaux, dans une deuxième dimension de l'espace, par exemple parallèle à un axe Y. Comme représenté sur la figure 1b, les axes X et Y sont liés aux éléments rayonnants 30 d'un réseau phasé 41 auquel le formateur multi-faisceaux est destiné à être relié et peuvent ne pas être orthogonaux. L'orientation de ces axes X et Y dépend des connexions, partiellement représentées sur la figure 1b, entre les éléments rayonnants du réseau phasé et les ports d'entrée/sortie 27 du formateur multi-faisceaux auxquels ces éléments rayonnants 30 sont destinés à être reliés. Dans l'exemple de réalisation représenté sur la figure 1b, le réseau phasé comporte une maille de forme rectangulaire, mais l'invention n'est pas limitée à cette forme de maille et peut également s'appliquer à un réseau phasé ayant par exemple une maille de forme hexagonale ou carrée.

**[0039]** Les deux étages de formation de faisceaux comportent des ports correspondants 25, 26 connectés deux à deux, appelés ports de liaison dans la suite de la description. Chaque étage de formation de faisceaux comporte au moins deux structures planes de formation de faisceaux, appelées tranches de BFN, P11 à P1 NY et P21 à P2Mx, où Ny et Mx sont des nombres entiers supérieurs à un, les tranches de BFN étant empilées parallèlement les unes au-dessus des autres selon un axe perpendiculaire au plan U, V, respectivement U', V', de la structure plane. Chaque tranche de BFN P1 Nk du premier étage de formation de faisceaux, où Nk est un nombre entier compris entre 1 et Ny inclus, comporte Nx ports d'entrée/sortie 27, où Nx est un nombre entier supérieur à un, destinés à être connectés à Nx éléments rayonnants 30 d'un réseau phasé 41 d'une antenne à faisceaux multiples par l'intermédiaire de chaînes d'émission et de réception pour l'émission de faisceaux de signaux synthétisés par le formateur multi-faisceaux vers différentes zones de couverture au sol et pour la réception de faisceaux de signaux provenant de diffé-

rentes zones de couverture au sol. Chaque tranche de BFN P2Mi du deuxième étage de formation de faisceaux, où Mi est un nombre entier compris entre 1 et Mx inclus, comporte My ports d'entrée/sortie 28, où My est un nombre entier supérieur à un, destinés à l'émission, à être connectés à une alimentation de signaux hyperfréquence et à la réception, à recevoir les signaux séparés par le formateur multi-faisceaux. Le formateur multi-faisceaux à deux dimensions comporte donc Nx\*Ny ports d'entrée/sortie 27 destinés à être connectés à Nx\*Ny éléments rayonnants d'une antenne et Mx\*My ports d'entrée/sortie 28 destinés à être reliés à une alimentation de signaux hyperfréquence et permettant de former Mx\*My spots au sol. Dans le cas d'une réalisation en technologie des guides d'onde métalliques, les ports d'entrée/sortie 27, 28 sont des accès de guides d'onde alors que dans le cas d'une réalisation en technologie des circuits intégrés, les ports d'entrée/sortie 27, 28 sont des connecteurs. Les Ny tranches de BFN du premier étage P11 à P1 NY et les Mx tranches de BFN du deuxième étage P21 à P2Mx du formateur multi-faisceaux ont une structure identique et fonctionnent de la même façon mais peuvent avoir un nombre de ports d'entrée/sortie 27, 28 différent et donc un nombre de voies d'émission/réception différent.

**[0040]** Sur le mode de réalisation représenté sur les figures 1a et 1b, les deux étages de formation de faisceaux sont disposés selon deux plans UV, U'V' perpendiculaires entre eux, mais ce n'est pas indispensable. Pour que les faisceaux de signaux synthétisés à l'émission par le formateur de faisceaux soient focalisés selon les deux dimensions X, Y de l'espace, il est par contre nécessaire de connecter chaque port de liaison 25 d'une même Nkième tranche de BFN P1 Nk du premier étage de formation de faisceaux à un Nkième port de liaison 26 correspondant de l'une des différentes tranches de BFN P21 à P2Mx du deuxième étage de formation de faisceaux.

**[0041]** La figure 2a représente un schéma éclaté, en perspective, d'un exemple de tranche de BFN, selon un premier mode de réalisation de l'invention. Sur cet exemple, la tranche de BFN comporte une structure plane multi-couches comportant deux plans métalliques parallèles, respectivement inférieur 14 et supérieur 10, et une couche de substrat 9 intercalée entre les deux plans métalliques inférieur et supérieur 14, 10. Les deux plans métalliques et la couche de substrat de la tranche de BFN sont parallèles à un plan UV. La structure multi-couches ainsi constituée, forme un milieu de propagation en configuration dite tri-plaques. La hauteur de la tranche de BFN est disposée selon un axe W orthogonal au plan UV. La couche de substrat 9 comporte deux réseaux de ports d'entrée/sorties 27, 25, selon que la tranche de BFN est utilisée à l'émission ou à la réception, disposés orthogonalement selon les axes V et U. Dans l'exemple de la figure 2a, les deux réseaux de ports d'entrée/sorties comportent respectivement quatre ports d'entrée/sortie 27 alignés selon la direction V et deux ports d'entrée/sortie

25 alignés selon la direction U. Les ports d'entrée/sortie 25, 27 sont couplés par l'intermédiaire d'un réflecteur interne 16 disposé transversalement dans la couche de substrat 9, le réflecteur interne 16 s'étendant du plan métallique inférieur 14 au plan métallique supérieur 10. Chaque port d'entrée/sortie 27, 25 est connecté à un guide d'onde 20, 19 relié à une source interne 15, respectivement 18. Les guides d'onde 20, 19 peuvent s'étendre parallèlement les uns à côté des autres ou être espacés les uns des autres et ils peuvent avoir une section transversale rectangulaire ou un profil incurvé. Les sources internes 15, 18 peuvent être alignées les unes à côtés des autres ou disposées selon un contour courbe afin d'optimiser les performances de l'antenne multi-faisceaux.

**[0042]** La figure 2b représente un schéma éclaté, en perspective, d'un exemple de tranche de BFN, selon un second mode de réalisation de l'invention. Sur cet exemple, la tranche de BFN a une structure plane multi-couches de type Pill-box. Elle comporte trois plans métalliques parallèles, respectivement inférieur 14, intermédiaire 12 et supérieur 10, une première couche de substrat 11 et une deuxième couche de substrat 13, chaque couche de substrat 11, 13 étant respectivement intercalée entre deux plans métalliques parallèles successifs, le plan métallique intermédiaire 12 séparant les deux couches de substrat 11, 13. Les plans des différentes couches de la tranche de BFN sont parallèles à un plan UV. La structure multi-couches ainsi constituée, forme deux milieux de propagation en configuration dite tri-plaques, chaque milieu de propagation tri-plaques comportant une couche de substrat disposée entre deux plans métalliques. La hauteur de la tranche de BFN est disposée selon un axe W orthogonal au plan UV. Les deux couches de substrat 11, 13 sont couplées par un réflecteur interne 16 disposé transversalement dans les deux couches de substrat 11, 13 de la tranche de BFN, le réflecteur interne 16 s'étendant du plan métallique inférieur 14 au plan métallique supérieur 10, et par l'intermédiaire d'une ouverture ou de plusieurs fentes de couplage 17 s'étendant le long du réflecteur interne 16 et réalisées dans le plan métallique intermédiaire 12 séparant les deux couches de substrat 11, 13.

**[0043]** La structure multi-couches comporte deux réseaux de ports d'entrée/sortie, selon que la tranche de BFN est utilisée à l'émission ou la réception, disposés orthogonalement selon les axes U et V. Dans l'exemple de la figure 2b, les deux réseaux de ports d'entrée/sortie comportent respectivement quatre ports d'entrée/sortie 27 alignés selon la direction V et deux ports d'entrée/sortie 25 alignés selon la direction U. Chaque port d'entrée/sortie 27, 25 est connecté à un guide d'onde 20, 19 relié à une source interne 15, 18. Les guides d'onde 19 de la deuxième couche de substrat 13 sont préférentiellement coudés à 90°, de sorte à relier des sources d'entrée/sortie 18 et des ports d'entrée/sortie 25 disposés selon des axes orthogonaux.

**[0044]** Chaque tranche de BFN peut fonctionner en

émission ou en réception. En réception, les ports d'entrée/sortie 27 sont destinés à recevoir un signal hyperfréquence incident et à le réémettre dans le premier milieu de propagation tri-plaques de la tranche de BFN qui combine les signaux réémis par toutes les premières sources internes 15. Le réflecteur interne 16 réfléchit le signal combiné et le focalise dans son plan focal sur l'une des deuxièmes sources internes 18 de la tranche de BFN en fonction de la direction d'arrivée du signal incident.

**[0045]** A l'émission, un signal d'excitation est appliqué sur l'une des deuxièmes sources internes 18 de la tranche de BFN, puis réfléchi sur le réflecteur interne 16. L'énergie du signal réfléchi par le réflecteur interne 16 se propage dans le milieu de propagation tri-plaques puis est répartie sur toutes les premières sources internes 15 de la tranche de BFN. Les premières sources internes 15 transmettent cette énergie sous forme de faisceaux de signaux aux premiers ports d'entrée/sortie 27 auxquels elles sont respectivement reliées.

**[0046]** Les ports d'entrée/sortie 27 reliés aux premières sources internes 15 étant disposés sur une même ligne parallèle à la direction V, les faisceaux de signaux émis sur chaque premier port d'entrée/sortie 27 de la tranche de BFN sont focalisés suivant une seule dimension de l'espace, par exemple parallèle à la direction Y, et forment une ligne de zones de couverture au sol appelées spots. Le nombre de spots formés au sol est égal au nombre de ports d'entrée/sortie 25 placés dans le plan focal du réflecteur interne 16 de la tranche de BFN.

**[0047]** Sur la figure 2b, quatre ports d'entrée/sortie 27 dans la première couche de substrat 11 et deux ports d'entrée/sortie 25 dans la deuxième couche de substrat 13 sont représentés ce qui permet d'élaborer deux faisceaux différents correspondant à deux directions de pointage différentes et à la formation de deux spots au sol.

**[0048]** Les ports d'entrée/sortie 27 reliés aux premières sources internes 15 d'une même tranche de BFN étant disposés selon une même ligne, les spots formés au sol par une tranche de BFN sont alignés.

**[0049]** La couche de substrat 9 ou les première et deuxième couches de substrat 11, 13 de la tranche de BFN peuvent comporter un diélectrique. Dans ce cas, la tranche de BFN peut être réalisée en utilisant la technologie des cartes de circuits imprimés PCB (en anglais Printed Circuit Board). Selon cette technologie, connue sous le nom SIW (en anglais : Substrate Integrated Waveguide) ou sous le nom de laminé (en anglais : laminated), le réflecteur interne 16, les parois transversales des premières sources internes 15, et le cas échéant des deuxièmes sources internes 18, et les parois transversales des guides d'onde 19, 20 sont réalisés par des arrangements réguliers de trous métallisés traversant la ou les couches de substrat 9, 11, 13 et reliant les plaques métalliques supérieure 10 et inférieure 14, respectivement les plaques supérieure 10 et intermédiaire 12 et/ou les plaques intermédiaire 12 et inférieure 14. L'utilisation de milieux de propagation diélectriques tri-plaques per-

met d'obtenir un formateur multi-faisceaux très compact et d'encombrement réduit. Les excitations des ports d'entrée/sortie des sources hyperfréquence internes sont alors réalisées par des transitions. Cependant, cette technologie induit des pertes de propagation qui doivent être compensées par des amplificateurs disposés en amont des premières sources internes 15 de la tranche de BFN.

**[0050]** Selon une variante de réalisation particulièrement avantageuse de l'invention, la couche de substrat 9 ou les première et deuxième couches de substrat 11, 13 de la tranche de BFN peuvent comporter un milieu diélectrique ayant un gradient de permittivité diélectrique, la permittivité diélectrique diminuant progressivement du réflecteur interne 16 vers les premières et secondes sources internes 15, 18. A titre d'exemple non limitatif, comme représenté sur la figure 2c, le gradient de permittivité diélectrique peut être obtenu en utilisant un matériau diélectrique ayant une première permittivité diélectrique  $\epsilon_1$  et comportant des inclusions 22 d'un matériau diélectrique différent ayant une deuxième permittivité diélectrique  $\epsilon_2$  plus faible que la première permittivité diélectrique  $\epsilon_1$ . Pour ne pas perturber la propagation des signaux destinés à se propager dans la tranche de BFN, les inclusions 22 doivent avoir des dimensions b inférieures à la longueur d'onde desdits signaux et les distances d séparant deux inclusions consécutives doivent être inférieures à la longueur d'onde desdits signaux. La densité des inclusions augmente du réflecteur 16 vers les premières et les secondes sources internes 15, 18 de la tranche de BFN pour que la permittivité diélectrique diminue de plus en plus en se rapprochant des premières et secondes sources internes 15, 18.

**[0051]** Lorsque la tranche de BFN est réalisée en technologie SIW, le gradient de permittivité diélectrique peut être obtenu par exemple par des inclusions 22 de trous d'air aménagés dans le milieu diélectrique. Dans ce cas, les trous d'air ne sont pas métallisés et peuvent être réalisés par des perçages débouchant au travers de la plaque métallique supérieure 10, la densité des trous d'air augmentant du réflecteur 16 vers les premières et les secondes sources internes 15, 18 de la tranche de BFN pour diminuer la permittivité diélectrique près des sources internes. Dans ce cas, le dépôt métallique de la plaque métallique supérieure 10 ayant été détruit localement par le perçage des trous d'air, il est nécessaire de réaliser un dépôt additionnel d'une couche de diélectrique au-dessus de la plaque métallique supérieure 10 et un dépôt d'une couche métallique additionnelle au-dessus de la couche de diélectrique additionnelle pour reconstituer l'étanchéité du milieu de propagation.

**[0052]** Avantageusement, le gradient de permittivité diélectrique peut être obtenu en utilisant un milieu diélectrique constitué par exemple d'une lentille diélectrique 21 à périphérie convexe, ayant une permittivité diélectrique  $\epsilon_1$  supérieure à la permittivité diélectrique de l'air, et comportant des inclusions 22, comme représenté par exemple sur les figures 2d et 2e. Les inclusions 22 peu-

vent par exemple être des inclusions de trous d'air, le diamètre et/ou la densité des inclusions 22 augmentant progressivement du réflecteur interne vers les sources internes 15, 18.

**[0053]** L'utilisation d'un milieu diélectrique ayant un gradient de permittivité dans la ou les première et seconde couches de substrat 9, 11, 13 de la tranche de BFN présente l'avantage d'incurver la direction de propagation des signaux et donc de pouvoir utiliser des premières et des secondes sources internes 15, 18 moins directives. Il devient alors possible de resserrer les faisceaux synthétisés. Les premières et les secondes sources internes 15, 18 sont alors de taille réduite, le formateur multi-faisceaux est plus compact et le recouvrement des faisceaux synthétisés est meilleur.

**[0054]** Avantagusement, chaque tranche de BFN peut comporter des moyens de déformation permettant de modifier la forme du réflecteur 16 interne à la structure multi-couches de ladite tranche de BFN, comme représenté par exemple sur la figure 3. Ces moyens de déformation peuvent par exemple comporter un ensemble 23 de pistons associés à des actionneurs, les pistons étant régulièrement répartis sur la face arrière du réflecteur 16, la face arrière étant la face du réflecteur opposée à la face réfléchissant les ondes hyperfréquence. Les moyens de déformation du réflecteur 16 permettent ainsi d'optimiser la forme du réflecteur interne 16 et d'assurer efficacement la focalisation des signaux, sur les secondes sources 18 de chaque tranche de BFN, en fonction de leur direction d'arrivée sur les premières sources internes 15. Les moyens de déformation du réflecteur 16 permettent aussi de réaliser des faisceaux à contours formés de forme quelconque préalablement choisie. Les déformations du réflecteur interne peuvent, par exemple, être différentes d'une tranche de BFN à une autre tranche de BFN pour réaliser des faisceaux de contours de formes différentes.

**[0055]** Sur les figures 4a et 4b, le premier étage du formateur de faisceaux comporte  $N_x \times N_y$  ports d'entrée/sortie de faisceaux de signaux destinés à être connectés à  $N_x \times N_y$  éléments rayonnants 30 d'une antenne multi-faisceaux. Le deuxième étage du formateur de faisceaux comporte  $M_x \times M_y$  ports d'entrée/sortie de signaux permettant, à l'émission, de former  $M_x \times M_y$  faisceaux focalisés dans les deux directions X et Y de l'espace correspondants à  $M_x \times M_y$  spots au sol.  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  sont des nombres entiers supérieurs à 1.

**[0056]** Le premier étage de formation de faisceaux comporte  $N_y$  tranches de BFN,  $P_{11}, \dots, P_{1N_y}$ , superposées les unes au-dessus des autres, chaque tranche de BFN  $P_{1N_k}$  du premier étage comportant  $N_x$  ports d'entrée/sortie, 271 à 27 $N_x$ , de faisceaux de signaux et  $M_x$  ports de liaison, 251 à 25 $M_x$ , connectés respectivement à  $M_x$  tranches de BFN,  $P_{21}$  à  $P_{2M_x}$ , du deuxième étage.

**[0057]** Le deuxième étage de formation de faisceaux comporte  $M_x$  tranches de BFN,  $P_{21}$  à  $P_{2M_x}$ , superposées les unes au-dessus des autres, chaque tranche de BFN  $P_{2M_i}$  du deuxième étage de formation de faisceaux

comportant  $N_y$  ports de liaison, 261 à 26 $N_y$ , connectés respectivement aux  $N_y$  tranches de BFN,  $P_{11}$  à  $P_{1N_y}$ , du premier étage et  $M_y$  ports d'entrée /sortie 281 à 28 $M_y$  destinés, à l'émission, à être alimentés par des signaux d'excitation, et à la réception, à recevoir des signaux focalisés dans les deux dimensions de l'espace X et Y par les deux étages du formateur multi-faisceaux. Sur l'exemple de la figure 4a,  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $M_x$  et  $M_y$  sont égaux à deux et permettent de former deux lignes de deux faisceaux correspondant à quatre spots au sol, 1 à 4.

**[0058]** Les  $N_y$  tranches de BFN,  $P_{11}$  à  $P_{1N_y}$ , du premier étage comportent  $N_y \times M_x$  ports de liaison connectés respectivement à  $M_x \times N_y$  ports de liaison correspondants des  $M_x$  tranches de BFN,  $P_{21}$  à  $P_{2M_x}$ , du deuxième étage. Comme le montre la figure 4b, la première tranche de BFN,  $P_{11}$ , du premier étage comporte  $M_x$  ports de liaison, 251 à 25 $M_x$ , reliés aux premiers ports de liaison 261 de chacune des  $M_x$  tranches de BFN,  $P_{21}$  à  $P_{2M_x}$ , du deuxième étage, et ainsi de suite, chaque  $N_k$ ème tranche de BFN  $P_{1N_k}$  du premier étage comporte  $M_x$  ports de liaison reliés au  $N_k$ ème port de liaison 26 $N_k$  (non représenté) de chacune des  $M_x$  tranches de BFN,  $P_{21}$  à  $P_{2M_x}$ , du deuxième étage, jusqu'à la dernière tranche de BFN,  $P_{1N_y}$ , du premier étage qui comporte  $M_x$  ports de liaison reliés aux derniers ports de liaison, 26 $N_y$ , de chacune des  $M_x$  tranches de BFN,  $P_{21}$  à  $P_{2M_x}$ , du deuxième étage.

**[0059]** Sur l'exemple de réalisation représenté sur les figures 1a et 1b, le premier étage de formation de faisceaux comporte trois tranches de BFN, chaque tranche de BFN comportant cinq ports d'entrée/sortie et cinq ports de liaison. Le deuxième étage de formation de faisceaux comporte cinq tranches de BFN, chaque tranche de BFN comportant trois ports d'entrée/sortie et trois ports de liaison, les cinq ports de liaison de chaque tranche de BFN du premier étage de formation de faisceaux étant respectivement connectés à l'un des trois ports de liaison correspondant des cinq tranches de BFN différentes du deuxième étage. Ce formateur de faisceaux permet de synthétiser  $3 \times 5 = 15$  faisceaux différents focalisés dans les deux directions X et Y de l'espace.

**[0060]** Le formateur multi-faisceaux à deux dimensions peut fonctionner en émission et/ou en réception. Il est possible d'utiliser un seul formateur de faisceaux fonctionnant à l'émission et à la réception ou alternativement d'utiliser deux formateurs de faisceaux différents, l'un fonctionnant à l'émission et l'autre à la réception. Dans le cas où un seul formateur de faisceaux est utilisé pour l'émission et la réception de signaux, la commutation entre l'émission et la réception peut être réalisée par exemple, soit à partir des fréquences des signaux, les fréquences d'émission et les fréquences de réception étant situées dans des bandes de fréquence différentes, soit par un séquençement temporel prédéterminé, ou par toute autre méthode connue.

**[0061]** En réception, les premières sources internes 15 reçoivent un signal transmis par les éléments rayonnants 30 d'un réseau phasé et réémettent l'énergie du

signal reçue dans chaque tranche de BFN du premier étage de formation de faisceaux. Dans les tranches de BFN du premier étage de formation de faisceaux, l'énergie est focalisée une première fois, dans une première dimension de l'espace, sur l'une des deuxièmes sources 18 du premier étage par l'intermédiaire du réflecteur interne 16, la deuxième source 18 qui collecte l'énergie focalisée dépend de la direction d'arrivée du signal. Le signal focalisé dans la première dimension de l'espace est ensuite transmis à l'une des premières sources internes 15 de chaque tranche de BFN du deuxième étage de formation de faisceaux. Dans chaque tranche de BFN du deuxième étage, le faisceau est focalisé une deuxième fois, de la même façon que dans le premier étage, dans une deuxième dimension de l'espace perpendiculaire à la première dimension de l'espace, sur l'une des deuxièmes sources 18 de l'une des tranches de BFN du deuxième étage et transmis au port d'entrée/sortie 28 auquel elle est reliée. Les tranches de BFN du deuxième étage ayant une structure identique à celle des tranches de BFN du premier étage, la focalisation de faisceau est réalisée selon le même principe dans les deux étages.

**[0062]** A l'émission, un signal d'excitation est appliqué sur l'un des ports d'entrée/sortie 28 du deuxième étage de formation de faisceaux et transmis, par l'intermédiaire de la deuxième source 18 auquel il est connecté, à l'intérieur de la tranche de BFN correspondante. Dans la tranche de BFN, le signal est guidé dans le guide d'onde 19 relié à la deuxième source 18 puis réfléchi sur le réflecteur interne 16. L'énergie réfléchie par le réflecteur interne 16 est ensuite répartie sur toutes les premières sources 15 de la tranche de BFN du deuxième étage puis transmise à l'une des deuxièmes sources 18 de chaque tranche de BFN du premier étage auxquelles les premières sources 15 de la tranche de BFN du deuxième étage sont respectivement connectées. Les énergies des faisceaux de signaux transmis aux deuxièmes sources 18 des tranches de BFN du premier étage sont ensuite réfléchies par le réflecteur interne 16 des tranches de BFN du premier étage puis réparties sur toutes les premières sources 15 des tranches de BFN du premier étage de formation de faisceaux. Les faisceaux de signaux synthétisés par le formateur de faisceau sont alors transmis à tous les éléments rayonnants 30 du réseau phasé auxquels les premières sources 15 du premier étage de formation de faisceaux sont connectées puis les faisceaux de signaux sont émis vers des zones de couverture au sol constituant les spots.

**[0063]** Pour obtenir une bonne couverture au sol, il faut que deux spots consécutifs se recouvrent partiellement. Si le recouvrement entre deux spots consécutifs est insuffisant, comme représenté par exemple sur la figure 4a qui montre quatre spots, 1 à 4, espacés les uns des autres et ne se recouvrant pas, la couverture au sol présente des trous. Pour améliorer le recouvrement entre les spots, l'invention consiste à ajouter des tranches de BFN supplémentaires permettant d'obtenir des spots supplémentaires entre deux spots consécutifs initiaux

d'une même ligne et/ou pour réaliser des lignes de spots additionnelles s'intercalant entre deux lignes de spots initiales.

**[0064]** L'exemple de réalisation illustré schématiquement sur la figure 5a représente deux tranches de BFN du premier étage de formation de faisceaux connectées aux mêmes éléments rayonnants. Cet exemple de réalisation ne comportant qu'un seul étage de formation de faisceaux, les faisceaux 1 et 3 correspondants sont focalisés dans une seule direction Y et correspondent à deux lignes de spots L1 et L2 élargis dans la direction X où il n'y a pas de focalisation des faisceaux. Selon cet exemple de réalisation, comme représenté sur la figure 5b, des lignes de spots additionnelles L'1, L'2, parallèles à la direction Y, sont ajoutées à deux lignes de spots L1, L2, en utilisant deux fois plus de tranches de BFN du premier étage de formation de faisceaux que d'éléments rayonnants du réseau défocalisé et en connectant deux tranches de BFN, P11, P'11, différentes du premier étage de formation de faisceaux à chacun des éléments rayonnants 30 du réseau défocalisé 41. Pour une antenne de réception, l'ajout des tranches de BFN P'11 supplémentaires nécessite de placer un diviseur de signal en sortie des éléments rayonnants 30 du réseau phasé, ce qui induit des pertes qui doivent être compensées par un amplificateur.

**[0065]** Pour obtenir des lignes de spots L'1 et L'2 additionnelles, il est en outre nécessaire que la deuxième tranche de BFN P'11 présente un décalage linéaire, par exemple d'une demi-maille, une maille correspondant à l'espacement entre deux premières sources internes 15', par rapport à la première tranche de BFN P11 en ce qui concerne la position respective des premières sources internes 15' par rapport au réflecteur interne 16' correspondant. Le décalage linéaire peut être obtenu soit en appliquant une translation aux premières sources internes 15' de la deuxième tranche de BFN comme représenté schématiquement sur la figure 5c, soit en appliquant une rotation au réflecteur interne 16' de la deuxième tranche de BFN pour en changer l'orientation, la position des premières sources internes 15' n'étant alors pas modifiée. Sur la figure 5c, la deuxième tranche de BFN, P'11, du premier étage comporte des premières sources internes 15' décalées linéairement selon l'axe V perpendiculaire à la direction longitudinale U de la tranche de BFN par rapport aux premières sources internes 15 de la première tranche de BFN, P11, du premier étage connectée au même élément rayonnant 30. Le décalage linéaire correspond à une translation de toutes les premières sources internes 15' d'une même distance T inférieure à la distance entre les centres de deux premières sources 15 consécutives. Le décalage linéaire T peut par exemple être égal à la moitié de la distance entre les centres de deux premières sources consécutives, c'est-à-dire à une demi-maille. Dans le cas d'un formateur de faisceaux à deux étages, le deuxième étage de formation de faisceaux, non représenté sur la figure 5a, comporte également deux fois plus de tranches de BFN, chaque

tranche de BFN du deuxième étage étant connectée à l'ensemble des tranches de BFN du premier étage par l'intermédiaire des ports de liaison, comme indiqué ci-dessus en liaison avec les figures 4a et 4b.

**[0066]** Sur l'exemple de réalisation de la figure 6, le nombre de lignes de spots est inchangé mais des spots additionnels 5, 6, 7, 8, sont ajoutés sur chaque ligne de spots, L1, L2, chaque spot additionnel étant intercalé entre deux spots consécutifs initiaux 1, 2, 3, 4, de façon à combler des trous de couverture au sol sur chaque ligne de spot. Pour cela, seul le nombre de tranches de BFN du deuxième étage de formation de faisceaux est doublé, le nombre de tranches de BFN du premier étage n'est pas changé. Chaque port de liaison, 251 à 25Mx, des tranches de BFN, P11 à P1 Ny, du premier étage est alors relié à un port de liaison, 261 à 26Ny, d'une première tranche de BFN, P21 à P2Mx, du deuxième étage de formation de faisceaux et à un port de liaison, 26'1 à 26'Ny, d'une deuxième tranche de BFN, P'21 à P'2Mx, du deuxième étage. Comme dans le cas décrit en liaison avec la figure 5c, la deuxième tranche de BFN, P'21 à P'2Mx, du deuxième étage comporte des premières sources internes 15' décalées linéairement selon l'axe V perpendiculaire à la direction longitudinale U de la deuxième tranche de BFN par rapport aux premières sources internes 15 de la première tranche de BFN, P21 à P2Mx, du deuxième étage connectée au même port de liaison du premier étage de formation de faisceaux. Alternativement, les positions des premières sources internes sont identiques pour la première tranche P21 à P2Mx et la deuxième tranche P'21 à P'2Mx de BFN du deuxième étage mais le réflecteur interne 16' de la deuxième tranche P'21 à P'2Mx de BFN du deuxième étage est décalé angulairement par rapport au réflecteur 16 de la première tranche P21 à P2Mx du deuxième étage.

**[0067]** Sur l'exemple de réalisation de la figure 7a, des spots additionnels et des lignes additionnelles sont ajoutés. Pour l'ajout des lignes additionnelles L'1 et L'2, le nombre de tranches de BFN du premier étage de formation de faisceaux et le nombre de tranches de BFN du deuxième étage de formation de faisceaux sont doublés comme indiqué en liaison avec la figure 5a et en outre, pour l'ajout des spots additionnels sur chaque ligne de spots L1, L2, L'1, L'2, le nombre de tranches de BFN du deuxième étage de formation de faisceaux est doublé une nouvelle fois comme indiqué en liaison avec la figure 6. Au total, le nombre de tranches de BFN du premier étage P11 à P1 Ny, P'11 à P'1 Ny est doublé et le nombre de tranches de BFN du deuxième étage P21 à P2Mx, P'21 à P'2Mx, P''21 à P''2Mx, P'''21 à P'''2Mx est quadruplé.

**[0068]** Les différents exemples de réalisation ont été décrits en considérant un maillage rectangulaire des spots. Un maillage hexagonal, comme représenté par exemple sur la figure 7b, peut également être réalisé avec la même configuration des deux étages de formation de faisceaux que celle représentée sur l'exemple de

réalisation de la figure 7a. Pour cela, il est nécessaire soit de décaler, d'une demi-maille, les premières sources internes des tranches de BFN additionnelles P''21 à P''2Mx et P'''21 à P'''2Mx, soit de décaler les secondes sources internes des tranches de BFN additionnelles P''21 à P''2Mx et P'''21 à P'''2Mx, soit de modifier l'orientation du réflecteur interne 16 de ces tranches de BFN additionnelles P''21 à P''2Mx et P'''21 à P'''2Mx.

**[0069]** Les figures 8a, 8b et 8c représentent trois schémas illustrant le fonctionnement d'un premier exemple (figure 8a) et d'un deuxième exemple (figures 8b et 8c) d'antenne réseau imageur comportant un réflecteur principal 40, un réseau phasé 41 défocalisé placé devant le réflecteur principal 40 et un formateur multi-faisceaux selon l'invention. Pour simplifier les figures 8a à 8c et la description correspondante, dans ces trois schémas, le réseau rayonnant 41 considéré est un réseau linéaire et une seule tranche de BFN est considérée pour la formation d'un faisceau. Sur la figure 8a, le réflecteur interne 16 à la tranche de BFN est disposé dans une configuration offset correspondant au premier mode de réalisation de la tranche de BFN décrite en liaison avec la figure 2a. Sur les figures 8b et 8c, le réflecteur interne 16 à la tranche de BFN réfléchit les signaux dans la même direction que le faisceau incident, ce qui correspond au deuxième mode de réalisation de la tranche de BFN décrite en liaison avec la figure 2b. Sur les figures 8a et 8b, la direction du faisceau incident 33a est normale au réflecteur principal 40 de l'antenne alors que sur la figure 8c, la direction du faisceau incident 33b est dépointée par rapport à la direction normale. Le réseau phasé 41 est constitué d'une pluralité d'éléments rayonnants élémentaires 30, chaque élément rayonnant élémentaire 30 étant destiné à émettre et/ou à recevoir des faisceaux de signaux hyperfréquence. Chaque élément rayonnant élémentaire 30 est connecté à un port d'entrée/sortie 27 de la tranche de BFN par une chaîne d'émission et une chaîne de réception de signaux hyperfréquence et par l'intermédiaire de guides de liaison 42. Chaque chaîne d'émission et chaque chaîne de réception peut comporter un amplificateur 31 destiné à masquer les pertes d'énergie dans les tranches de BFN du formateur de faisceau. A l'émission, l'amplificateur 31 est un amplificateur de puissance et à la réception l'amplificateur 31 est un amplificateur à faible bruit. Optionnellement, chaque chaîne d'émission et de réception peut également comporter un déphaseur dynamique 32, comme représenté par exemple sur la figure 8d, permettant notamment de compenser les déformations du réflecteur principal 40 de l'antenne réseau imageur et les erreurs statiques de fabrication et d'intégration de l'antenne. Les déformations du réflecteur principal peuvent par exemple être dues à des variations de température ou à des instabilités d'un satellite auquel l'antenne réseau imageur est fixée. Les ports d'entrée/sortie 25 reliés aux deuxièmes sources internes 18 de la tranche de BFN sont destinés à être reliés à la réception, à des moyens de traitement des signaux reçus et à l'émission, à des moyens d'excitation.

**[0070]** En réception, un faisceau de signaux incident 33a, 33b est réfléchi par le réflecteur principal 40 sur le réseau phasé 41. Le réseau phasé 41 étant défocalisé, l'énergie du faisceau réfléchi 34a, 34b est captée par la quasi-totalité des éléments rayonnants 30 du réseau phasé 41 puis transmise par chaque chaîne de réception, aux ports d'entrée/sortie 27, et guidée par les guides de liaison 42 jusqu'à l'ensemble des premières sources internes 15 des tranches de BFN. Les premières sources internes 15 réémettent l'énergie du signal reçu dans la tranche de BFN, où l'énergie est focalisée sur l'une des deuxièmes sources 18 par l'intermédiaire du réflecteur interne 16 et transmise à l'un des ports d'entrée/sortie 25. Le port d'entrée/sortie 25 qui collecte l'énergie focalisée dépend de la direction d'arrivée du signal. Comme le montrent les figures 8b et 8c, pour deux directions d'arrivée différentes, l'énergie est focalisée sur deux ports 25a, 25b différents.

**[0071]** A l'émission, un signal d'excitation est appliqué sur l'un des ports d'entrée/sortie 25 et transmis, par l'intermédiaire de la deuxième source 18 auquel il est connecté, à l'intérieur de la tranche de BFN. Dans la tranche de BFN, l'énergie du signal est réfléchi sur le réflecteur interne 16 puis répartie sur toutes les premières sources 15 de la tranche de BFN. Les faisceaux de signaux synthétisés par la tranche de BFN sont alors transmis à tous les éléments rayonnants 30 du réseau phasé défocalisé 41 auxquels les premières sources 15 sont connectées puis émis vers le réflecteur principal 40 de l'antenne qui réfléchit les faisceaux vers des zones de couverture au sol constituant les spots.

**[0072]** Le second mode de réalisation d'une tranche de BFN correspondant aux figures 2b, 8b et 8c permet d'obtenir une antenne réseau imageur plus performante qu'en utilisant un formateur multi-faisceaux selon le premier mode de réalisation correspondant aux figures 2a et 8a dans lequel les tranches de BFN comportent un réflecteur interne placé dans une configuration offset. En effet, dans le second mode de réalisation d'une tranche de BFN, les secondes sources internes 18 associées aux ports d'entrée/sortie 25 sont centrées par rapport au réflecteur interne 16, ce qui améliore les performances en dépointage de l'antenne réseau imageur car l'antenne comportera moins d'aberrations de phase. Or, cette configuration optique n'est possible que grâce à la séparation, sur différentes couches de substrats, des signaux incidents et réfléchis sur le réflecteur interne 16. Avec tout autre type de formateur multi-faisceaux connus, il serait impossible de réaliser une antenne à configuration équivalente fonctionnant dans un espace libre car le réseau phasé ferait alors blocage au signal réfléchi par le réflecteur auxiliaire.

**[0073]** Par ailleurs, grâce à la présence du réflecteur interne au formateur multi-faisceaux, et à la possibilité d'ajouter un diélectrique dans la tranche de BFN, ce qui permet de diminuer l'encombrement du formateur multi-faisceaux, l'invention présente l'avantage de pouvoir réaliser, dans l'antenne réseau imageur associée au forma-

teur multi-faisceaux, des trajets optiques importants similaires à ceux qui s'établissent dans une configuration d'antenne à deux réflecteurs de type Cassegrain tout en minimisant l'encombrement de l'antenne. Dans ce cas, le réflecteur interne au formateur multi-faisceaux est de forme elliptique.

**[0074]** Un autre avantage de l'antenne réseau imageur associée au formateur multi-faisceaux selon l'invention, par rapport à la configuration d'une antenne de type Cassegrain équivalente, concerne ses performances en rayonnement. L'antenne réseau imageur réalisée à partir d'un réflecteur et d'un réseau phasé défocalisé et associée au formateur multi-faisceaux selon l'invention dispose de plusieurs paramètres permettant d'optimiser son fonctionnement, tels que la forme du réflecteur principal 40, la disposition des éléments rayonnants 30 du réseau phasé 41, la longueur des guides de liaison 42, la disposition des premières sources internes 15, la forme du réflecteur interne 16, et la disposition des secondes sources internes 15. Ces différents degrés de liberté peuvent être optimisés pour minimiser les aberrations de phase dans plusieurs directions d'arrivée, et ainsi étendre considérablement la couverture angulaire de l'antenne. Il est ainsi possible d'annuler ces aberrations dans cinq directions d'arrivée différentes, ce qui correspond à une antenne à cinq foyers. Au contraire, la configuration d'antenne de type Cassegrain peut être optimisée uniquement en ce qui concerne la forme des réflecteurs principal et auxiliaire et ainsi former uniquement deux foyers.

**[0075]** Enfin un dernier avantage réside dans la qualité de recouvrement des faisceaux. Une antenne à réflecteur qui comporte deux sources contigües disposées dans le plan focal de l'antenne génère deux faisceaux qui se recouvrent à un faible niveau, typiquement -4 à -5 dB. Les mêmes problèmes de recouvrement entre faisceaux apparaissent pour une antenne réseau imageur avec un formateur multi-faisceaux quasi-optique selon l'invention, mais comme décrit en liaison avec les figures 5a, 6 et 7, l'invention permet de résoudre ce problème en ajoutant des tranches de BFN supplémentaires dans les deux étages du formateur multi-faisceaux quasi-optique alors que dans les antennes connues, ce problème ne peut être résolu qu'en multipliant le nombre des antennes utilisées.

**[0076]** Le formateur multi-faisceaux à deux dimensions peut également être utilisé dans d'autres types d'antenne, telle que par exemple un réseau phasé à rayonnement direct ou une antenne réseau imageur comportant deux réflecteurs paraboliques externes de tailles différentes ayant la même focale, tel que représenté par exemple sur la figure 9. Dans le cas d'un réseau à rayonnement direct, l'antenne ne comporte aucun réflecteur externe, les faisceaux synthétisés par le formateur multi-faisceaux sont directement émis par les éléments rayonnants du réseau phasé et forment les spots au sol. Dans le cas d'une antenne réseau imageur comportant deux réflecteurs externes constitués d'un réflec-

teur principal 40, et d'un réflecteur auxiliaire 44 de tailles différentes ayant la même focale F, le réseau phasé 41 associé au formateur multi-faisceaux à deux dimensions selon l'invention est placé devant le réflecteur auxiliaire 44. A la réception, un faisceau de signaux incident sur le réflecteur principal 40 est réfléchi vers le réflecteur auxiliaire 44 en passant par le plan focal F situé entre le réflecteur principal et le réflecteur auxiliaire. Le signal réfléchi une première fois par le réflecteur principal 40 et imagé par le plan focal F est réfléchi une deuxième fois par le réflecteur auxiliaire 44 sur le réseau phasé 41 et focalisé par le formateur multi-faisceaux. A l'émission, les faisceaux synthétisés par le formateur multi-faisceaux sont émis par le réseau phasé puis suivent le chemin de propagation inverse de celui suivi à la réception. [0077] Dans les différents exemples de réalisation d'antennes décrits ci-dessus, un seul formateur multi-faisceaux est connecté au réseau phasé. Or le formateur multi-faisceaux ne peut fonctionner que dans une seule polarisation alors que le réseau phasé peut extraire des signaux dans deux polarisations orthogonales. Aussi, pour obtenir une antenne multi-faisceaux fonctionnant dans deux polarisations orthogonales, il est nécessaire d'utiliser deux formateurs multi-faisceaux et de connecter les éléments rayonnants du réseau phasé de l'antenne aux deux formateurs multi-faisceaux.

## Revendications

### 1. Formateur multi-faisceaux à deux dimensions, caractérisé en ce que :

- Il comporte un premier étage de formation de faisceaux destiné à synthétiser des faisceaux focalisés selon une première direction X de l'espace et un deuxième étage de formation de faisceaux destiné à focaliser les faisceaux formés par le premier étage selon une deuxième direction Y de l'espace, les deux étages étant connectés entre eux,
- chaque étage comporte au moins deux structures planes multi-couches (P11, P12), (P21, P22) superposées l'une au-dessus de l'autre,
- chaque structure multi-couches (P11, P12, P21, P22) du premier et du deuxième étage comporte un réflecteur interne (16) s'étendant transversalement au plan de la structure multi-couches, au moins deux premières sources internes (15) disposées devant le réflecteur interne (16) et respectivement reliées à deux premiers ports d'entrée/sortie (27, 26) alignés selon un premier axe (V, V') de la structure multi-couches, au moins deux secondes sources internes (18) disposées dans un plan focal du réflecteur interne (16) et respectivement reliées à deux seconds ports d'entrée/sortie (25, 28) alignés selon un deuxième axe (U, U') de la structure multi-

couches perpendiculaire au premier axe (V, V'),  
 - les deux secondes sources internes (18) de la même structure multi-couches (P11), respectivement (P12), du premier étage de formation de faisceaux étant respectivement reliées à deux premières sources internes (15) de deux structures multi-couches différentes (P21), (P22) du deuxième étage de formation de faisceaux par l'intermédiaire des ports d'entrée/sortie (25, 26), appelés ports de liaison, auxquels sont respectivement connectées les secondes et premières sources internes (18, 15).

### 2. Formateur multi-faisceaux selon la revendication 1, caractérisé en ce que :

- le premier étage de formation de faisceaux comporte  $N_y$  structures multi-couches (P11 ..., P1Ny) planes superposées l'une au-dessus de l'autre, chaque structure multi-couches du premier étage comportant  $N_x$  premières sources internes (15) disposées devant le réflecteur interne (16) de la structure multi-couches correspondante et connectées à  $N_x$  ports d'entrée/sortie (271 à 27Nx) alignés parallèlement à un axe V et  $M_x$  secondes sources (18) disposées dans le plan focal du réflecteur interne (16) correspondant et connectées à  $M_x$  ports de liaison (251 à 25Mx) alignés parallèlement à un axe U perpendiculaire à l'axe V,
- le deuxième étage de formation de faisceaux comporte  $M_x$  structures multi-couches (P21 à P2Mx) planes superposées l'une au-dessus de l'autre, chaque structure multi-couches (P21 à P2Mx) du deuxième étage de formation de faisceaux comportant  $N_y$  premières sources internes (15) disposées devant le réflecteur interne (16) de la structure multi-couches correspondante et connectées à  $N_y$  ports de liaison (261 à 26Ny) alignés parallèlement à un axe V' et  $M_y$  secondes sources (18) disposées dans le plan focal du réflecteur interne (16) correspondant et connectées à  $M_y$  ports d'entrée /sortie (281 à 28My) alignés parallèlement à un axe U' perpendiculaire à l'axe V',
- les  $N_y$  structures multi-couches du premier étage comportent  $N_y * M_x$  ports de liaison connectés respectivement à  $M_x * N_y$  ports de liaison correspondants des  $M_x$  structures multi-couches du deuxième étage,  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  étant des nombres entiers supérieurs à 1, les ports de liaison d'une même structure multi-couches du premier étage de formation de faisceaux étant respectivement connectés à des structures multi-couches différentes du deuxième étage de formation de faisceaux.

### 3. Formateur multi-faisceaux selon la revendication 2,

- caractérisé en ce que** chaque port de liaison (251 à 25Mx) d'une Nkième structure multi-couches (P1 Nk) du premier étage de formation de faisceaux est connecté au Nkième port de liaison de l'une des structures multi-couches (P21 à P2Mx) correspondante du deuxième étage de formation de faisceaux, Nk étant un nombre entier compris entre 1 et Ny inclus.
4. Formateur multi-faisceaux selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** chaque structure multi-couches comporte un plan métallique supérieur (10), un plan métallique inférieur (14) et une unique couche de substrat (9) intercalée entre le plan métallique supérieur (10) et le plan métallique inférieur (14), **en ce que** le réflecteur interne (16) s'étend transversalement dans la couche de substrat (9) du plan métallique inférieur (14) au plan métallique supérieur (10) et **en ce que** les premières sources internes (15) et les secondes sources internes (18) de chaque structure multi-couches sont disposées dans la couche de substrat (9) et reliées respectivement à un premier et un second port d'entrée/sortie (27, 25), les premier et second ports d'entrée/sortie (27, 25) étant disposés selon deux directions orthogonales (V, U) du plan de la couche de substrat (9).
5. Formateur multi-faisceaux selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que**:
- Les premières sources internes (15) de chaque structure multi-couches sont disposées dans une première couche de substrat (11) intercalée entre un plan métallique supérieur (10) et un plan métallique intermédiaire (12), les secondes sources (18) sont disposées dans une deuxième couche de substrat (13) intercalée entre le plan métallique intermédiaire (12) et un plan métallique inférieur (14),
  - les première et deuxième couches de substrat (11, 13) sont couplées par le réflecteur interne (16) s'étendant du plan métallique inférieur (14) au plan métallique supérieur (10) et par l'intermédiaire d'une ouverture ou de fentes de couplage (17) s'étendant le long du réflecteur interne (16) et réalisées dans le plan métallique intermédiaire (12) séparant les deux couches de substrat (11, 13),
  - chaque structure multi-couches comporte en outre des premiers guides d'onde (19) disposés dans la deuxième couche de substrat (13), chaque premier guide d'onde (19) comportant une première partie de guide s'étendant selon un axe longitudinal de la structure multi-couches et connectée aux secondes sources internes (18) et une deuxième partie de guide coudée s'étendant perpendiculairement à l'axe longitudinal et reliée à un second port d'entrée/sortie (25).
6. Formateur multi-faisceaux selon l'une des revendications 2 à 5, **caractérisé en ce que** le deuxième étage de formation de faisceaux comporte Mx premières structures multi-couches (P21 à P2Mx) et au moins Mx secondes structures multi-couches (P'21 à P'2Mx) et **en ce que** chaque port de liaison (251 à 25Mx) de la Nkième structure multi-couches (P1 Nk) du premier étage de formation de faisceaux est connecté au Nkième port de liaison de l'une des premières structures multi-couches (P21 à P2Mx) correspondante du deuxième étage de formation de faisceaux et au Nkième port de liaison de l'une des secondes structures multi-couches (P'21 à P'2Mx) correspondante du deuxième étage de formation de faisceaux, Nk étant un nombre entier compris entre 1 et Ny inclus.
7. Formateur multi-faisceaux selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** les Mx secondes structures multi-couches (P'21 à P'2Mx) du deuxième étage de formation de faisceaux comportent des premières sources internes (15') décalées linéairement par rapport aux premières sources internes (15) des Mx premières structures multi-couches (P21 à P2Mx) du deuxième étage de formation de faisceaux, le décalage linéaire correspondant à une translation de toutes les premières sources internes (15') d'une même distance T inférieure à une distance entre des centres de deux premières sources internes consécutives.
8. Formateur multi-faisceaux selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** les Mx secondes structures multi-couches (P'21 à P'2Mx) du deuxième étage de formation de faisceaux comportent un réflecteur interne (16') ayant une orientation décalée par rapport au réflecteur interne (16) des Mx premières structures multi-couches (P21 à P2Mx) du deuxième étage de formation de faisceaux.
9. Formateur multi-faisceaux selon l'une des revendications 4 à 6, **caractérisé en ce que** le premier étage de formation de faisceaux comporte Ny (P11,...,P1Ny) premières et Ny secondes structures multi-couches (P'11,...,P'1Ny) et **en ce que** les premières sources internes des Ny secondes structures multi-couches (P'11,...,P'1Ny) sont reliées aux premières sources internes des Ny premières structures multi-couches (P'11,...,P'1Ny), les Ny secondes structures multi-couches du premier étage de formation de faisceaux comportant des premières sources internes (15') décalées linéairement par rapport aux premières sources internes (15) des Ny premières structures multi-couches du premier étage de formation de faisceaux.
10. Formateur multi-faisceaux selon l'une des revendications 4 à 6, **caractérisé en ce que** le premier étage

- de formation de faisceaux comporte Ny (P11,...,P1Ny) premières et Ny secondes structures multi-couches (P'11,...,P'1Ny) et **en ce que** les premières sources internes des Ny secondes structures multi-couches (P'11,...,P'1Ny) du premier étage sont reliées aux premières sources internes des Ny premières structures multi-couches (P11,...,P1Ny) du premier étage, les Ny secondes structures multi-couches (P'11 à P'1 Ny) du premier étage de formation de faisceaux comportant un réflecteur interne (16') ayant une orientation décalée par rapport au réflecteur interne (16) des Ny premières structures multi-couches (P11 à P1 Ny) du premier étage de formation de faisceaux.
- 5
11. Formateur multi-faisceaux selon l'une des revendications 4 à 10, **caractérisé en ce que** la couche de substrat unique (9) ou les première (11) et deuxième (13) couches de substrat de chaque structure multi-couches comportent un matériau diélectrique.
- 10
12. Formateur multi-faisceaux selon la revendication 11, **caractérisé en ce que** le matériau diélectrique est une lentille diélectrique (21) placée entre le réflecteur interne (16) et les premières et secondes sources internes (15, 18), la lentille diélectrique (21) ayant une surface périphérie convexe et comportant des inclusions de trous d'air (22), les inclusions (22) de trous d'air ayant une densité augmentant progressivement du réflecteur interne (16) vers les premières et les secondes sources internes (15).
- 15
13. Formateur multi-faisceaux selon l'une des revendications 4 à 10, **caractérisé en ce que** la couche de substrat unique (9) ou les première et seconde couches de substrat (11, 13) de chaque structure multi-couches comportent en outre un premier matériau diélectrique ayant une première permittivité diélectrique ( $\epsilon_1$ ), le premier matériau diélectrique comportant des inclusions (22) d'un deuxième matériau diélectrique ayant une deuxième permittivité diélectrique ( $\epsilon_2$ ) plus faible que la première permittivité diélectrique ( $\epsilon_1$ ), les inclusions (22) ayant une densité augmentant du réflecteur interne (16) vers les premières et les secondes sources internes (15, 18).
- 20
14. Formateur multi-faisceaux selon l'une des revendications 4 à 10, **caractérisé en ce que** la première couche et la deuxième couche de substrat de chaque structure multi-couches comporte des moyens de déformation (23) du réflecteur interne (16).
- 25
15. Antenne multi-faisceaux, **caractérisée en ce qu'elle** comporte au moins un formateur multi-faisceaux à deux dimensions selon l'une des revendications 1 à 14 et un réseau phasé (41) constitué d'une pluralité d'éléments rayonnants élémentaires (30), chaque élément rayonnant élémentaire (30) étant relié à un
- 30
- port d'entrée/sortie (27) correspondant du premier étage de formation de faisceaux par l'intermédiaire d'une chaîne d'émission et d'une chaîne de réception de signaux hyperfréquence.
16. Antenne multi-faisceaux selon la revendication 15, **caractérisée en ce qu'elle** comporte en outre au moins un réflecteur principal (40), le réseau phasé (41) connecté au formateur multi-faisceaux à deux dimensions étant placé devant le réflecteur principal (40) dans un plan défocalisé.
17. Antenne multi-faisceaux selon la revendication 15, **caractérisée en ce qu'elle** comporte en outre au moins un réflecteur principal (40) et un réflecteur auxiliaire (44), le réflecteur principal (40) et le réflecteur auxiliaire (44), ayant des tailles différentes et ayant la même focale F et **en ce que** le réseau phasé (41) connecté au formateur multi-faisceaux à deux dimensions est placé devant le réflecteur auxiliaire (44).
18. Antenne multi-faisceaux selon l'une des revendications 16 ou 17, **caractérisée en ce que** chaque chaîne d'émission et de réception de signaux hyperfréquence comporte un déphaseur dynamique (32).
19. système de télécommunication par satellite, **caractérisé en ce qu'il** comporte au moins une antenne selon l'une des revendications 15 à 18.
- 35
- ### Patentansprüche
1. Zweidimensionaler Mehrstrahlformer, **dadurch gekennzeichnet, dass:**
- er eine erste Strahlformungsstufe zum Synthetisieren von in einer ersten Raumrichtung X fokussierten Strahlen und eine zweite Strahlformungsstufe zum Fokussieren der durch die erste Stufe gebildeten Strahlen in einer zweiten Raumrichtung Y umfasst, wobei die beiden Stufen miteinander verbunden sind;
  - jede Stufe wenigstens zwei flache Mehrlagenstrukturen (P11, P12), (P21, P22) umfasst, die einander überlagert sind;
  - jede Mehrlagenstruktur (P11, P12, P21, P22) der ersten und zweiten Stufe Folgendes umfasst: einen internen Reflektor (16), der transversal zur Ebene der Mehrlagenstruktur verläuft, wenigstens zwei erste interne Quellen (15), die vor dem internen Reflektor (16) angeordnet und jeweils mit zwei ersten Ein-/Ausgangsports (27, 26) verbunden sind, die entlang einer ersten Achse (V,V') der Mehrlagenstruktur ausgerichtet sind, wenigstens zwei interne Quellen (18), die in einer Fokalebene des inter-
- 40
- 45
- 50
- 55

nen Reflektors (16) angeordnet und jeweils mit zwei zweiten Ein-/Ausgangsports (25, 28) verbunden sind, die entlang einer zweiten Achse (U, U') der Mehrlagenstruktur lotrecht zur ersten Achse (V, V') ausgerichtet sind;

- wobei die zwei zweiten internen Quellen (18) derselben Mehrlagenstruktur (P11) bzw. (P12) der ersten Strahlformungsstufe jeweils mit zwei ersten internen Quellen (15) von zwei unterschiedlichen Mehrlagenstrukturen (P21), (P22) der zweiten Strahlformungsstufe mittels der Ein-/Ausgangsports (25, 26), Verbindungsports genannt, verbunden sind, mit denen die zweiten und die ersten internen Quellen (18, 15) jeweils verbunden sind.

**2. Mehrstrahlformer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass:**

- die erste Strahlformungsstufe  $N_y$  flache Mehrlagenstrukturen (P11, ..., P1N<sub>y</sub>) umfasst, die einander überlagert sind, wobei jede Mehrlagenstruktur der ersten Stufe  $N_x$  erste interne Quellen (15), die vor dem internen Reflektor (16) der entsprechenden Mehrlagenstruktur angeordnet und mit  $N_x$  Ein-/Ausgangsports (271 bis 27N<sub>x</sub>) angeordnet sind, die parallel zu einer Achse V ausgerichtet sind, und  $M_x$  zweite Quellen (18) umfasst, die in der Fokalebene des entsprechenden internen Reflektor (16) angeordnet und mit  $M_x$  Verbindungsports (251 bis 25M<sub>x</sub>) verbunden sind, die parallel zu einer Achse U lotrecht zur Achse V ausgerichtet sind;

- die zweite Strahlformungsstufe  $M_x$  flache Mehrlagenstrukturen (P21 bis P2M<sub>x</sub>) umfasst, die einander überlagert sind, wobei jede Mehrlagenstruktur (P21 bis P2M<sub>x</sub>) der zweiten Strahlformungsstufe  $N_y$  erste interne Quellen (15), die vor dem internen Reflektor (16) der entsprechenden Mehrlagenstruktur angeordnet und mit  $N_y$  Verbindungsports (261 bis 26N<sub>y</sub>) verbunden sind, die parallel zu einer Achse V' ausgerichtet sind, und  $M_y$  zweite Quellen (18) umfasst, die in der Fokalebene des entsprechenden internen Reflektors (16) angeordnet und mit  $M_y$  Ein-/Ausgangsports (281 bis 28M<sub>y</sub>) verbunden sind, die parallel zu einer Achse U' lotrecht zur Achse V' ausgerichtet sind;

- die  $N_y$  Mehrlagenstrukturen der ersten Stufe  $N_y * M_x$  Verbindungsports umfassen, die jeweils mit  $M_x * N_y$  entsprechenden Verbindungsports der  $M_x$  Mehrlagenstrukturen der zweiten Stufe verbunden sind, wobei  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  ganze Zahlen größer als 1 sind, wobei die Verbindungsports einer selben Mehrlagenstruktur der ersten Strahlformungsstufe jeweils mit unterschiedlichen Mehrlagenstrukturen der zweiten Strahlformungsstufe verbunden sind.

**3. Mehrstrahlformer nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass** jeder Verbindungsport (251 bis 25M<sub>x</sub>) einer  $N_k$ -ten Mehrlagenstruktur (PINK) der ersten Strahlformungsstufe mit dem  $N_k$ -ten Verbindungsport einer der Mehrlagenstrukturen (P21 bis P2M<sub>x</sub>) entsprechend der zweiten Strahlformungsstufe verbunden ist, wobei  $N_k$  eine ganze Zahl zwischen 1 und  $N_y$  einschließlich ist.

**4. Mehrstrahlformer nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass** jede Mehrlagenstruktur eine obere metallische Ebene (10), eine untere metallische Ebene (14) und eine einzelne Substratlage (9) umfasst, die sich zwischen der oberen metallischen Ebene (10) und der unteren metallischen Ebene (14) befindet, dadurch, dass der interne Reflektor (16) transversal in der Substratlage (9) der unteren metallischen Ebene (14) zur oberen metallischen Ebene (10) verläuft, und dadurch, dass die ersten internen Quellen (15) und die zweiten internen Quellen (18) jeder Mehrlagenstruktur in der Substratlage (9) angeordnet und jeweils mit einem ersten und einem zweiten Ein-/Ausgangsport (27, 25) verbunden sind, wobei der erste und der zweite Ein-/Ausgangsport (27, 25) in zwei orthogonalen Richtungen (V, U) der Ebene der Substratlage (9) angeordnet sind.

**5. Mehrstrahlformer nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass:**

- die ersten internen Quellen (15) jeder Mehrlagenstruktur in einer ersten Substratlage (11) angeordnet sind, die sich zwischen einer oberen metallischen Ebene (10) und einer metallischen Zwischenebene (12) befindet, wobei die zweiten Quellen (18) in einer zweiten Substratlage (13) angeordnet sind, die sich zwischen der metallischen Zwischenebene (12) und einer unteren metallischen Ebene (14) befindet;

- wobei die erste und die zweite Substratlage (11, 13) durch den internen Reflektor (16), der von der unteren metallischen Ebene (14) zur oberen metallischen Ebene (10) verläuft, und mittels einer Öffnung oder von Kopplungsschlitzen (17) gekoppelt sind, die entlang dem internen Reflektor (16) verlaufen und in der metallischen Zwischenebene (12) produziert werden, die die zwei Substratlagen (11, 13) trennt;

- jede Mehrlagenstruktur ferner in der zweiten Substratlage (13) angeordnete erste Wellenleiter (19), wobei jeder erste Wellenleiter (19) einen ersten Führungsteil umfasst, der entlang einer Längsachse der Mehrlagenstruktur verläuft und mit den zweiten internen Quellen (18) verbunden ist, und einen zweiten rechtwinkligen Führungsteil umfasst, der lotrecht zur Längsachse verläuft und mit einem zweiten Ein-/Aus-

gangsport (25) verbunden ist.

6. Mehrstrahlformer nach einem der Ansprüche 2 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zweite Strahlformungsstufe Mx erste Mehrlagenstrukturen (P21 bis P2Mx) und wenigstens Mx zweite Mehrlagenstrukturen (P'21 bis P'2Mx) umfasst, und dadurch, dass jeder Verbindungsport (251 bis 25Mx) der Nk-ten Mehrlagenstruktur (P1 Nk) der ersten Strahlformungsstufe mit dem Nk-ten Verbindungsport der einen der ersten Mehrlagenstrukturen (P21 bis P2Mx) entsprechend der zweiten Strahlformungsstufe und mit dem Nk-ten Verbindungsport der einen der zweiten Mehrlagenstrukturen (P'21 bis P'2Mx) entsprechend der zweiten Strahlformungsstufe verbunden ist, wobei Nk eine ganze Zahl zwischen 1 und Ny einschließlich ist.
7. Mehrstrahlformer nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mx zweiten Mehrlagenstrukturen (P'21 bis P'2Mx) der zweiten Strahlformungsstufe erste interne Quellen (15') umfassen, die linear mit Bezug auf die ersten internen Quellen (15) der Mx ersten Mehrlagenstrukturen (P21 bis P2Mx) der zweiten Strahlformungsstufe versetzt sind, wobei der lineare Versatz einer Translationsbewegung aller ersten internen Quellen (15') um dieselbe Distanz T entspricht, die geringer ist als ein Abstand zwischen Mittelpunkten von zwei ersten aufeinanderfolgenden internen Quellen.
8. Mehrstrahlformer nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mx zweiten Mehrlagenstrukturen (P'21 bis P'2Mx) der zweiten Strahlformungsstufe einen internen Reflektor (16') mit einer Orientierung umfassen, die mit Bezug auf den internen Reflektor (16) der Mx ersten Mehrlagenstrukturen (P21 bis P2Mx) der zweiten Strahlformungsstufe versetzt ist.
9. Mehrstrahlformer nach einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Strahlformungsstufe Ny (P11, ..., P1Ny) erste und Ny zweite Mehrlagenstrukturen (P'11, ..., P'1Ny) umfasst, und dadurch, dass die ersten internen Quellen der Ny zweiten Mehrlagenstrukturen (P'11, ..., P'1Ny) mit den ersten internen Quellen der Ny ersten Mehrlagenstrukturen (P'11, ..., P'1Ny) verbunden sind, wobei die Ny zweiten Mehrlagenstrukturen der ersten Strahlformungsstufe primäre interne Quellen (15') umfassen, die linear mit Bezug auf die ersten internen Strukturen (15) der Ny ersten Mehrlagenstrukturen der ersten Strahlformungsstufe versetzt sind.
10. Mehrstrahlformer nach einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Strahlformungsstufe Ny (P11, ..., P1Ny) erste und Ny zweite Mehrlagensstrukturen (P'11, ..., P'1Ny) umfasst, und dadurch, dass die ersten internen Quellen der Ny zweiten Mehrlagenstrukturen (P'11, ..., P'1Ny) mit den ersten internen Quellen der Ny ersten Mehrlagenstrukturen (P'11, ..., P'1Ny) verbunden sind, wobei die Ny zweiten Mehrlagenstrukturen der ersten Strahlformungsstufe einen internen Reflektor (16') mit einer Orientierung umfassen, die mit Bezug auf den internen Reflektor (16) der Ny ersten Mehrlagenstrukturen (P'11 bis P'1Ny) der ersten Strahlformungsstufe versetzt sind.
11. Mehrstrahlformer nach einem der Ansprüche 4 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die einzige Substratlage (9) oder die erste (11) und die zweite (13) Substratlage jeder Mehrlagenstruktur ein dielektrisches Material umfasst/en.
12. Mehrstrahlformer nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** das dielektrische Material eine dielektrische Linse (21) ist, die zwischen dem internen Reflektor (16) und der ersten und zweiten internen Quelle (15, 18) platziert ist, wobei die dielektrische Linse (21) eine konvexe periphere Fläche und Luftlocheinschlüsse (22) hat, wobei die Luftlocheinschlüsse (22) eine Dichte haben, die vom internen Reflektor (16) in Richtung der ersten und zweiten internen Quelle (15) progressiv zunimmt.
13. Mehrstrahlformer nach einem der Ansprüche 4 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die einzige Substratlage (9) oder die erste und zweite Substratlage (11, 13) jeder Mehrlagenstruktur ferner ein erstes dielektrisches Material mit einer ersten Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_1$ ) umfasst, wobei das erste dielektrische Material Einschlüsse (22) aus einem zweiten dielektrischen Material mit einer zweiten Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_2$ ) umfasst, die geringer ist als die erste Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_1$ ), wobei die Einschlüsse (22) eine Dichte haben, die vom internen Reflektor (16) in Richtung der ersten und zweiten internen Quelle (15, 18) zunimmt.
14. Mehrstrahlformer nach einem der Ansprüche 4 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste und die zweite Substratlage jeder Mehrlagenstruktur Mittel (23) zum Verformen des internen Reflektors (16) umfasst.
15. Mehrstrahlantenne, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie wenigstens einen zweidimensionalen Mehrstrahlformer nach einem der Ansprüche 1 bis 14 und ein Phased-Array (41) bestehend aus mehreren elementaren Strahlungselementen (30) umfasst, wobei jedes elementare Strahlungselement (30) mit einem Ein-/Ausgangsport (27) entsprechend der ersten Strahlformungsstufe mittels einer Mikrowellensignalsende- und-empfangskette ver-

bunden ist.

16. Mehrstrahlantenne nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie ferner wenigstens einen Hauptreflektor (40) umfasst, wobei das Phase-Array (41) mit dem zweidimensionalen Mehrstrahlformer verbunden ist, der vor dem Hauptreflektor (40) in einer defokussierten Ebene platziert ist.
17. Mehrstrahlantenne nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie ferner wenigstens einen Hauptreflektor (40) und einen Zusatzreflektor (44) umfasst, wobei der Hauptreflektor (40) und der Zusatzreflektor (44) unterschiedliche Größen und denselben Fokalfunkt F haben, und dadurch, dass das mit dem zweidimensionalen Mehrstrahlformer verbundene Phase-Array (41) vor dem Zusatzreflektor (44) platziert ist.
18. Mehrstrahlantenne nach Anspruch 16 oder 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** jede Mikrowellensignalsende- und -empfangskette einen dynamischen Phasenschieber (32) umfasst.
19. Satellitentelekommunikationssystem, **dadurch gekennzeichnet, dass** es wenigstens eine Antenne nach einem der Ansprüche 15 bis 18 umfasst.

#### Claims

1. A two-dimensional multi-beam former, **characterised in that:**

- it comprises a first beamforming stage intended to synthesise beams focused in a first direction X of space and a second beamforming stage intended to focus the beams formed by said first stage in a second direction Y of space, the two stages being connected together;

- each stage comprises at least two flat multi-layer structures (P11, P12), (P21, P22) superposed one above the other;

- each multi-layer structure (P11, P12, P21, P22) of the first and second stage comprises an internal reflector (16) extending transversely to the plane of the multi-layer structure, at least two first internal sources (15) disposed in front of the internal reflector (16) and respectively connected to two first input/output ports (27, 26) aligned along a first axis (V, V') of the multi-layer structure, at least two second internal sources (18) disposed in a focal plane of said internal reflector (16) and respectively connected to two second input/output ports (25, 28) aligned along a second axis (U, U') of the multi-layer structure perpendicular to the first axis (V, V');

- the two second internal sources (18) of the

same multi-layer structure (P11) and (P12), respectively, of the first beamforming stage being respectively connected to two first internal sources (15) of two different multi-layer structures (P21), (P22) of the second beamforming stage by means of the input/output ports (25, 26), called connection ports, to which the second and first internal sources (18, 15) are respectively connected.

2. The multi-beam former according to claim 1, **characterised in that:**

- the first beamforming stage comprises  $N_y$  flat multi-layer structures (P11, ..., P1Ny) superposed one above the other, each multi-layer structure of said first stage comprising  $N_x$  first internal sources (15) disposed in front of the internal reflector (16) of the corresponding multi-layer structure and connected to  $N_x$  input/output ports (271 to 27Nx) aligned parallel to an axis V and  $M_x$  second sources (18) disposed in the focal plane of the corresponding internal reflector (16) and connected to  $M_x$  connection ports (251 to 25Mx) aligned parallel to an axis U perpendicular to the axis V;

- the second beamforming stage comprises  $M_x$  flat multi-layer structures (P21 to P2Mx) superposed one above the other, each multi-layer structure (P21 to P2Mx) of said second beamforming step comprising  $N_y$  first internal sources (15) disposed in front of the internal reflector (16) of the corresponding multi-layer structure and connected to  $N_y$  connection ports (261 to 26Ny) aligned parallel to an axis V' and  $M_y$  second sources (18) disposed in the focal plane of the corresponding internal reflector (16) and connected to  $M_y$  input/output ports (281 to 28My) aligned parallel to an axis U' perpendicular to the axis V';

- the  $N_y$  multi-layer structures of the first stage comprise  $N_y \cdot M_x$  connection ports respectively connected to  $M_x \cdot N_y$  corresponding connection ports of the  $M_x$  multi-layer structures of the second stage, with  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  being integers higher than 1, the connection ports of the same multi-layer structure of the first beamforming stage respectively being connected to different multi-layer structures of the second beamforming stage.

3. The multi-beam former according to claim 2, **characterised in that** each connection port (251 to 25Mx) of an  $N_k$ -th multi-layer structure (P1Nk) of the first beamforming stage is connected to the  $N_k$ -th connection port of one of the corresponding multi-layer structures (P21 to P2Mx) of the second beamforming stage, with  $N_k$  being an integer between 1

and  $N_y$  inclusive.

4. The multi-beam former according to any one of claims 1 to 3, **characterised in that** each multi-layer structure comprises an upper metallic plane (10), a lower metallic plane (14) and a single substrate layer (9) interposed between the upper metallic plane (10) and the lower metallic plane (14), **in that** the internal reflector (16) extends transversely in the substrate layer (9) of the lower metallic plane (14) to the upper metallic plane (10), and **in that** the first internal layers (15) and the second internal sources (18) of each multi-layer structure are disposed in the substrate layer (9) and are respectively connected to a first and to a second input/output port (27, 25), the first and second input/output ports (27, 25) being disposed in two orthogonal directions (V, U) of the plane of the substrate layer (9).
5. The multi-beam former according to any one of claims 1 to 3, **characterised in that**:
  - the first internal sources (15) of each multi-layer structure are disposed in a first substrate layer (11) interposed between an upper metallic plane (10) and an intermediate metallic plane (12), the second sources (18) are disposed in a second substrate layer (13) interposed between the intermediate metallic plane (12) and a lower metallic plane (14);
  - the first and second substrate layers (11, 13) are coupled by the internal reflector (16) extending from the lower metallic plane (14) to the upper metallic plane (10) and by means of an opening or of coupling slots (17) that extend along the internal reflector (16) and are produced in the intermediate metallic plane (12) that separates the two substrate layers (11, 13);
  - each multi-layer structure further comprises first waveguides (19) disposed in the second substrate layer (13), each first waveguide (19) comprising a first guide part that extends along a longitudinal axis of the multi-layer structure and is connected to second internal sources (18) and a second right-angle guide part that extends perpendicular to the longitudinal axis and is connected to a second input/output port (25).
6. The multi-beam former according to any one of claims 2 to 5, **characterised in that** the second beamforming stage comprises  $M_x$  first multi-layer structures (P21 to P2Mx) and at least  $M_x$  second multi-layer structures (P'21 to P'2Mx), and **in that** each connection port (251 to 25Mx) of the  $N_k$ -th multi-layer structure (P1 Nk) of the first beamforming stage is connected to the  $N_k$ -th connection port of one of the corresponding first multi-layer structures (P21 to P2Mx) of said second beamforming stage and to the  $N_k$ -th connection port of one of the corresponding second multi-layer structures (P'21 to P'2Mx) of the second beamforming stage, with  $N_k$  being an integer between 1 and  $N_y$  inclusive.
7. The multi-beam former according to claim 6, **characterised in that** the  $M_x$  second multi-layer structures (P'21 to P'2Mx) of the second beamforming stage comprise first internal sources (15') that are linearly offset relative to the first internal sources (15) of the  $M_x$  first multi-layer structures (P21 to P2Mx) of the second beamforming stage, the linear offset corresponding to a translation movement of all of the first internal sources (15') by the same distance T that is less than a distance between centres of two first consecutive internal sources.
8. The multi-beam former according to claim 6, **characterised in that** the  $M_x$  second multi-layer structures (P'21 to P'2Mx) of the second beamforming stage comprise an internal reflector (16') with an orientation that is offset relative to the internal reflector (16) of the  $M_x$  first multi-layer structures (P21 to P2Mx) of the second beamforming stage.
9. The multi-beam former according to any one of claims 4 to 6, **characterised in that** the first beamforming stage comprises  $N_y$  (P11, ..., P1Ny) first and  $N_y$  second multi-layer structures (P'11, ..., P'1Ny), and **in that** the first internal sources of the  $N_y$  second multi-layer structures (P'11, ..., P'1Ny) are connected to the first internal sources of the  $N_y$  first multi-layer structures (P'11, ..., P'1Ny), the  $N_y$  second multi-layer structures of the first beamforming stage comprising first internal sources (15') that are linearly offset relative to the first internal sources (15) of the  $N_y$  first multi-layer structures of the first beamforming stage.
10. The multi-beam former according to any one of claims 4 to 6, **characterised in that** the first beamforming stage comprises  $N_y$  (P11, ..., P1Ny) first and  $N_y$  second multi-layer structures (P'11, ..., P'1Ny), and **in that** the first internal sources of the  $N_y$  second multi-layer structures (P'11, ..., P'1Ny) of the first stage are connected to the first internal sources of the  $N_y$  first multi-layer structures (P11, ..., P1Ny) of the first stage, the  $N_y$  second multi-layer structures (P'11 to P'1Ny) of the first beamforming stage comprising an internal reflector (16') with an orientation that is offset relative to the internal reflector (16) of the  $N_y$  first multi-layer structures (P11 to P1Ny) of the first beamforming stage.
11. The multi-beam former according to any one of claims 4 to 10, **characterised in that** the single substrate layer (9) or the first (11) and second (13) substrate layers of each multi-layer structure comprise a dielectric material.

12. The multi-beam former according to claim 11, **characterised in that** the dielectric material is a dielectric lens (21) placed between the internal reflector (16) and the first and second internal sources (15, 18), the dielectric lens (21) having a convex peripheral surface and comprising air pocket inclusions (22), the air pocket inclusions (22) having a density that progressively increases from the internal reflector (16) towards the first and second internal sources (15). 5 10
13. The multi-beam former according to any one of claims 4 to 10, **characterised in that** the single substrate layer (9) or the first and second substrate layers (11, 13) of each multi-layer structure further comprise a first dielectric material having a first dielectric permittivity ( $\epsilon_1$ ), the first dielectric material comprising inclusions (22) for a second dielectric material having a second dielectric permittivity ( $\epsilon_2$ ) that is weaker than the first dielectric permittivity ( $\epsilon_1$ ), the inclusions (22) having a density that increases from the internal reflector (16) towards the first and second internal sources (15, 18). 15 20
14. The multi-beam former according to any one of claims 4 to 10, **characterised in that** the first and second substrate layers of each multi-layer structure comprise means (23) for deforming the internal reflector (16). 25 30
15. A multi-beam antenna, **characterised in that** it comprises at least one two-dimensional multi-beam former according to any one of claims 1 to 14 and a phased array (41) made up of a plurality of elementary radiating elements (30), each elementary radiating element (30) being connected to a corresponding input/output port (27) of the first beamforming stage by means of a microwave frequency signal transmission chain and reception chain. 35 40
16. The multi-beam antenna according to claim 15, **characterised in that** it further comprises at least one main reflector (40), the phased array (41) connected to the two-dimensional multi-beam former being placed in front of the main reflector (40) in a defocused plane. 45
17. The multi-beam antenna according to claim 15, **characterised in that** it further comprises at least one main reflector (40) and an auxiliary reflector (44), the main reflector (40) and the auxiliary reflector (44) having different sizes and having the same focal point F, and **in that** the phased array (41) that is connected to the two-dimensional multi-beam former is placed in front of the auxiliary reflector (44). 50 55
18. The multi-beam antenna according to any one of claims 16 to 17, **characterised in that** each micro- wave frequency signal transmission and reception chain comprises a dynamic phase-shifter (32).
19. A satellite telecommunication system, **characterised in that** it comprises at least one antenna according to any one of claims 15 to 18.

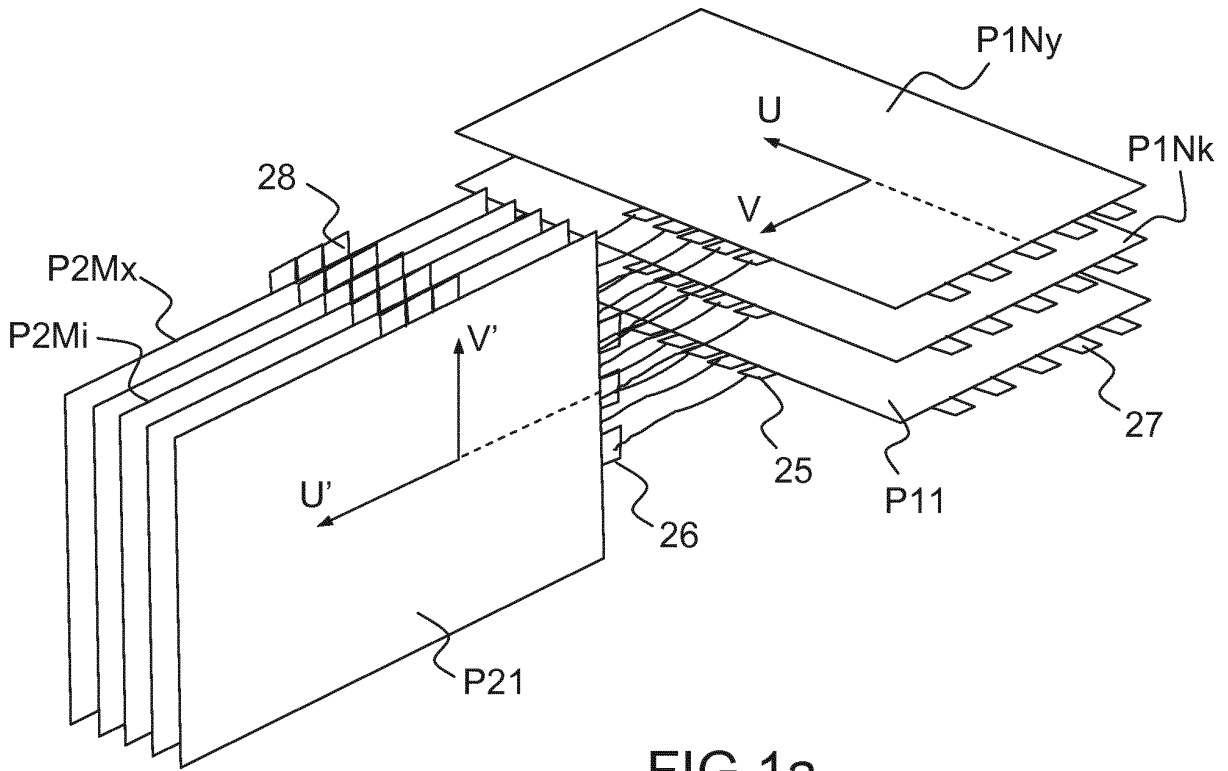


FIG. 1a

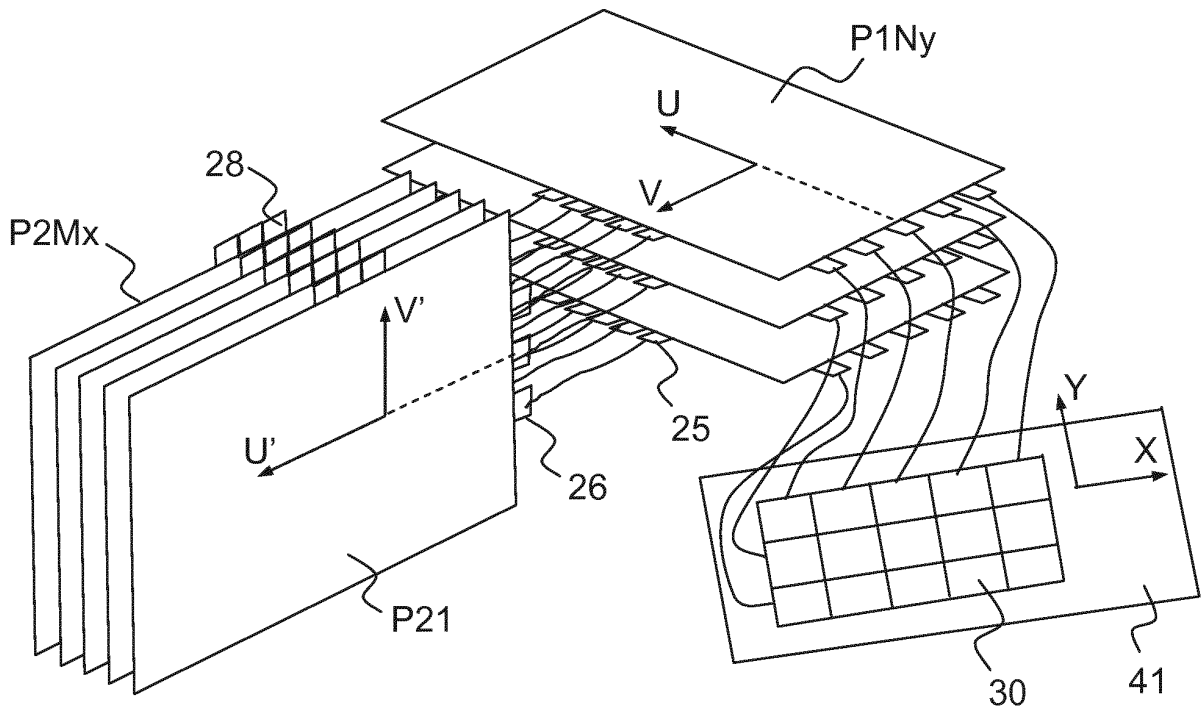


FIG. 1b

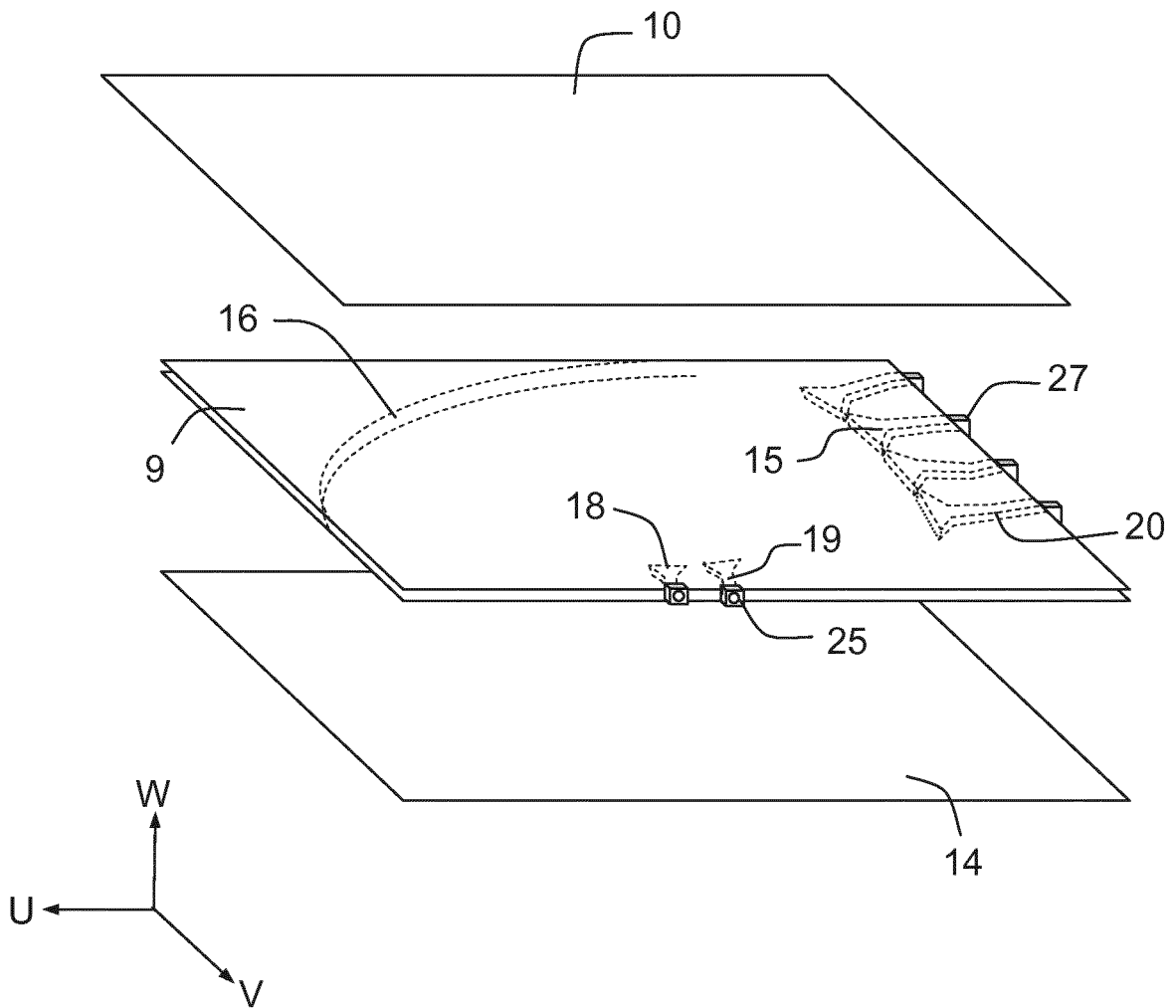


FIG.2a

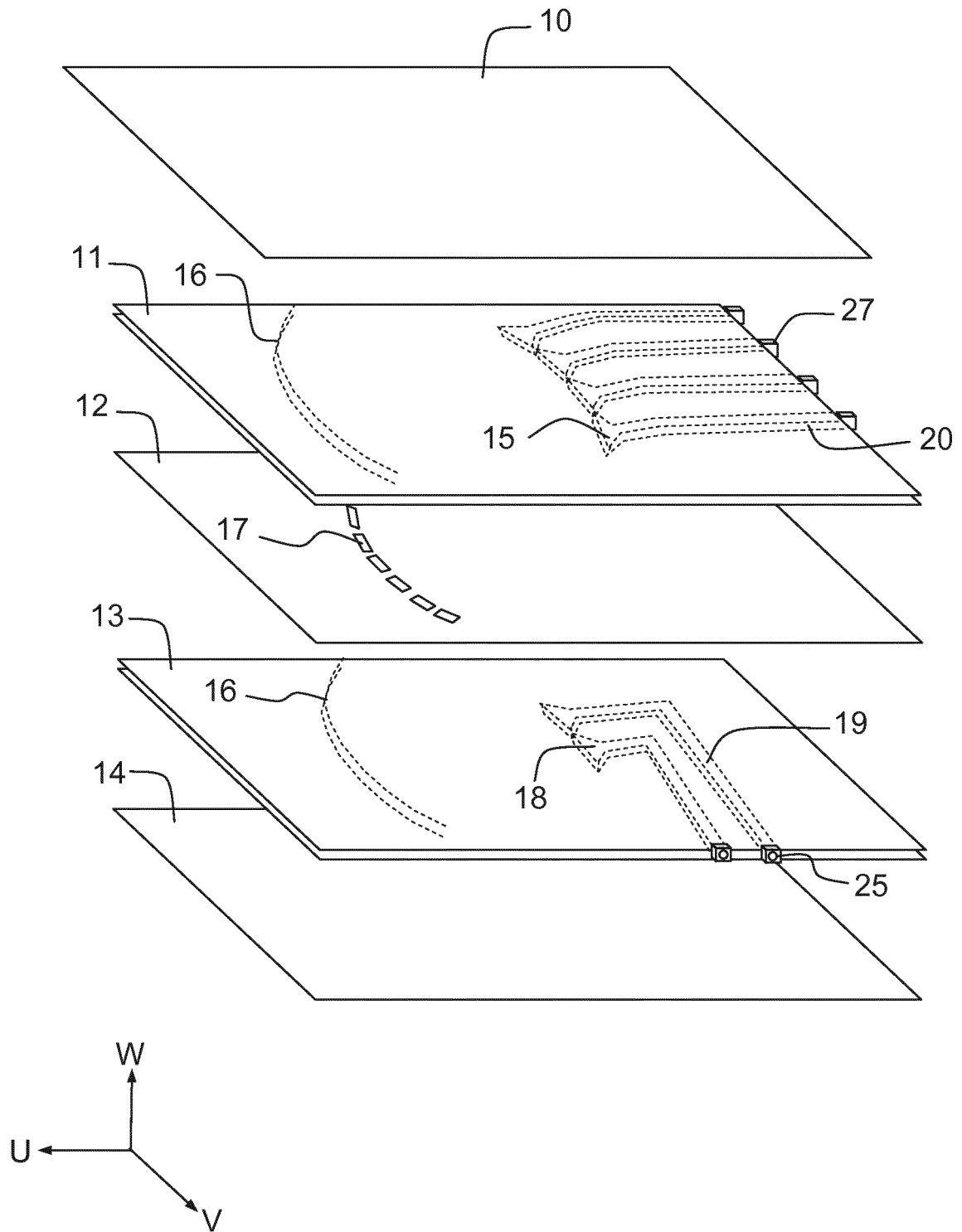


FIG.2b

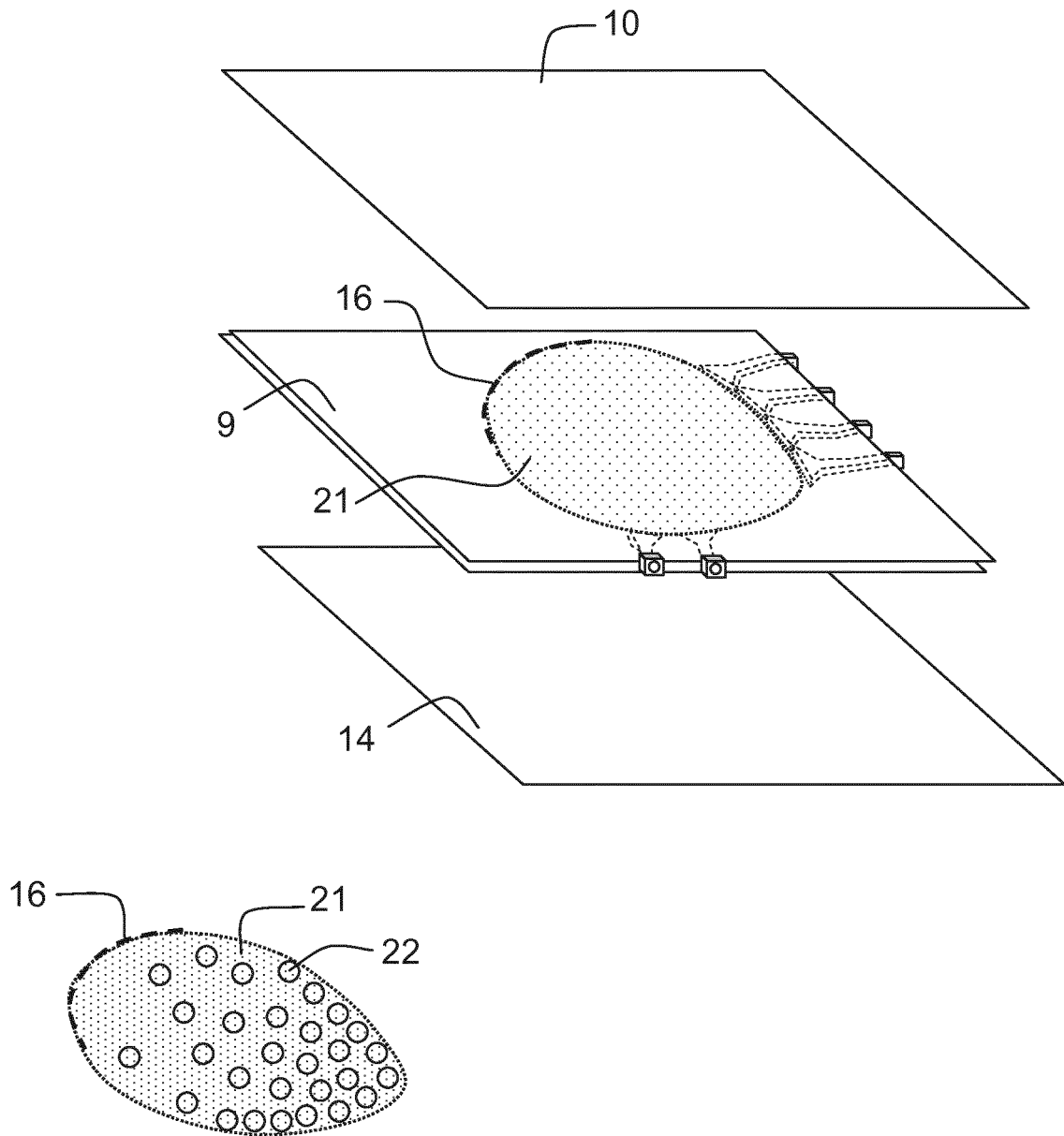


FIG.2c

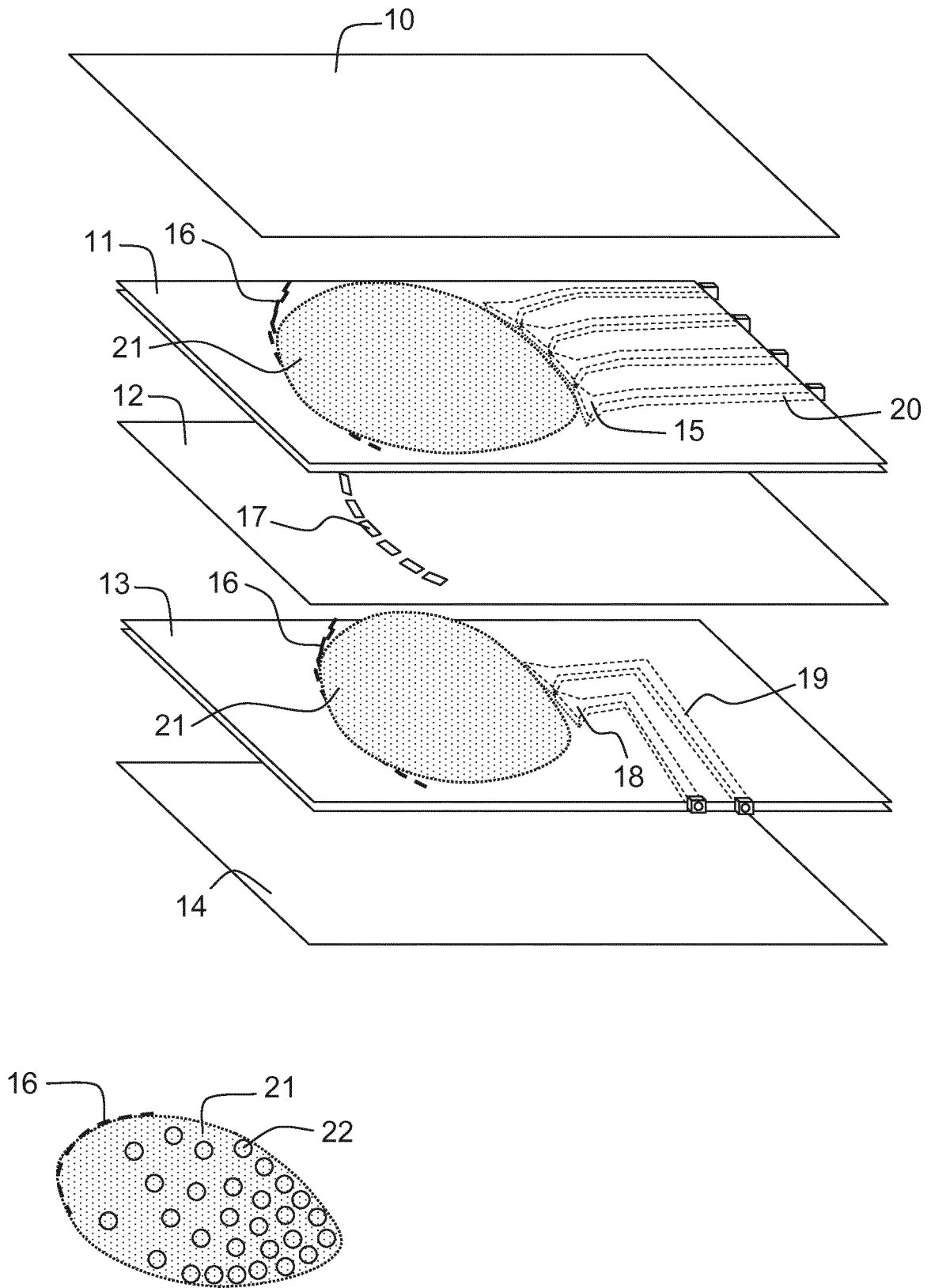


FIG.2d

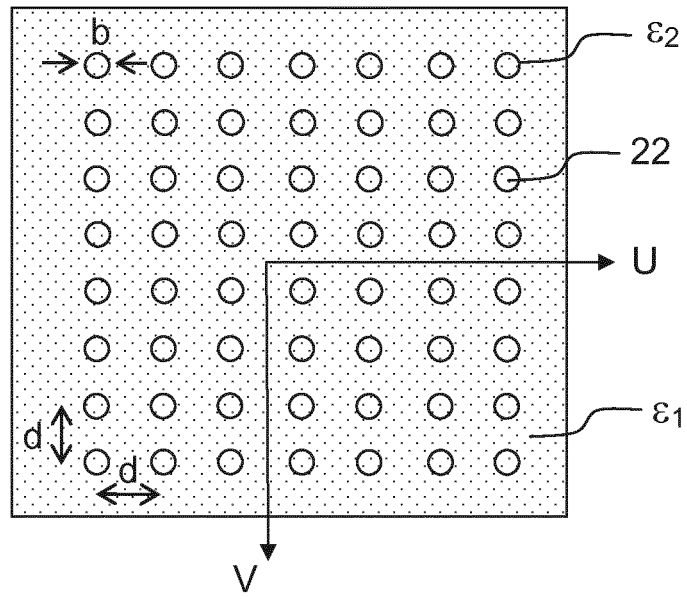


FIG. 2e

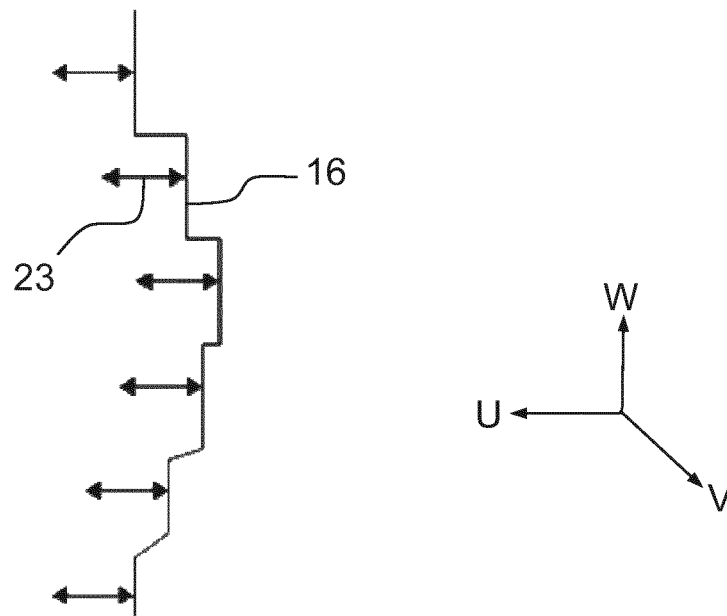


FIG. 3

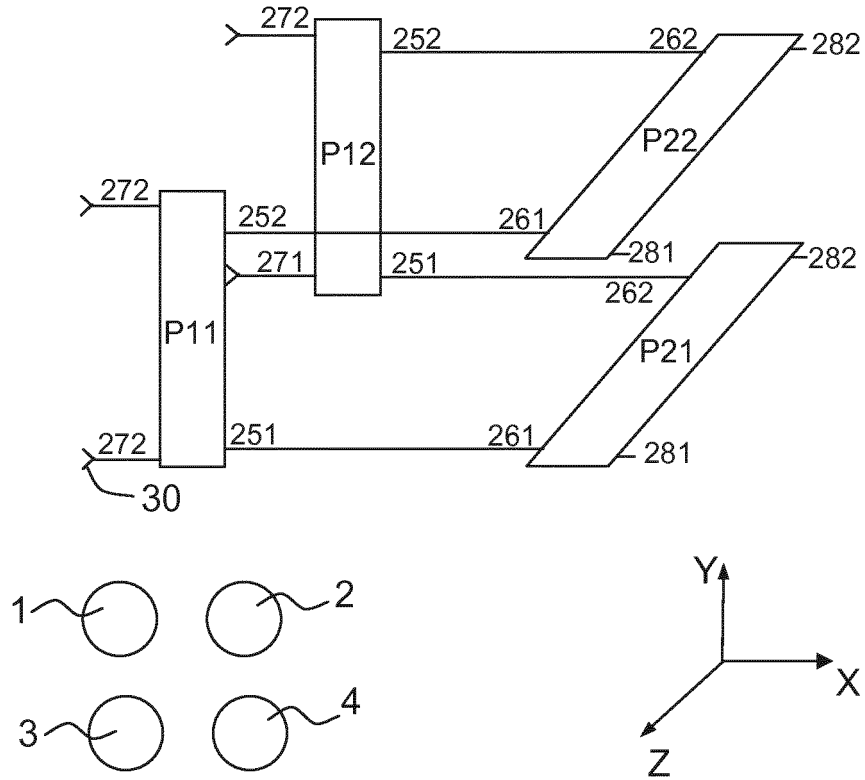


FIG. 4a

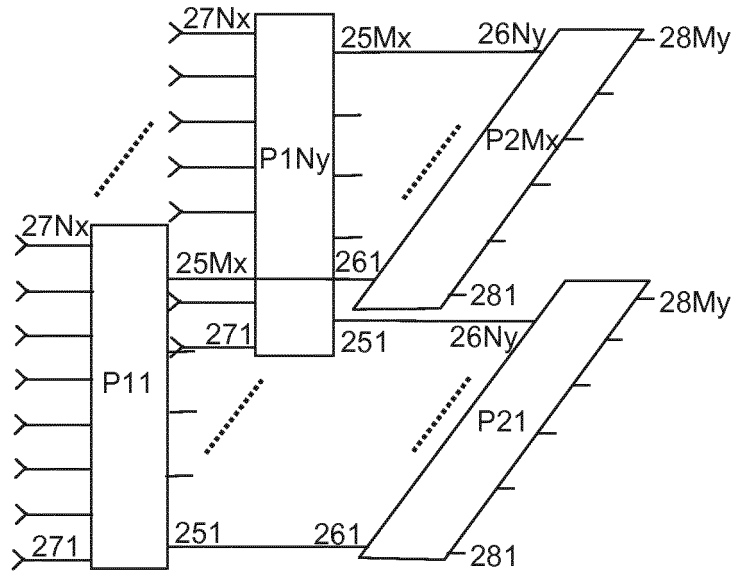


FIG. 4b

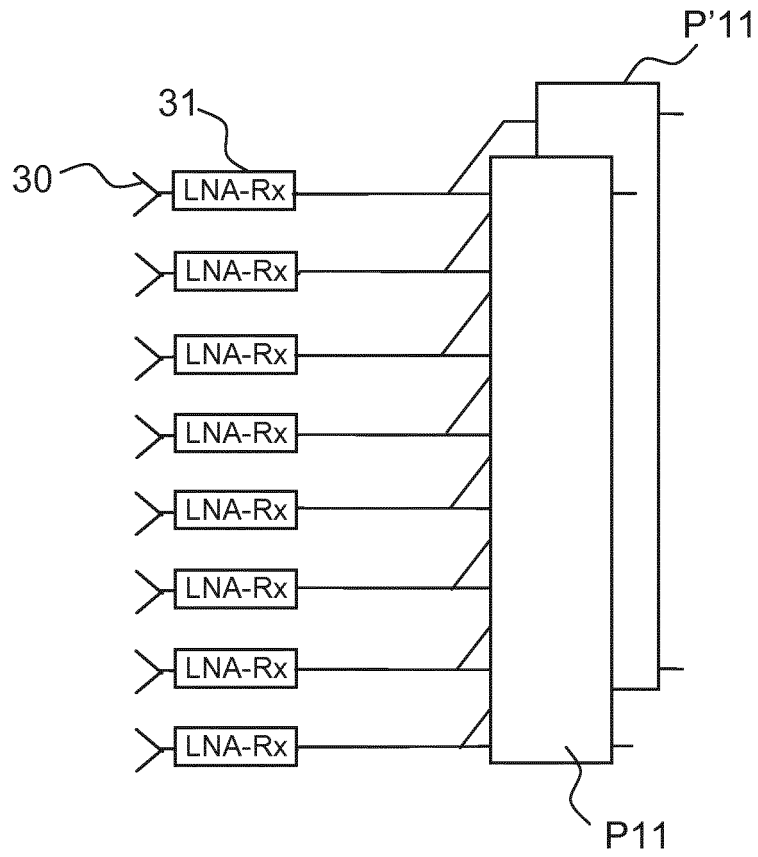


FIG.5a

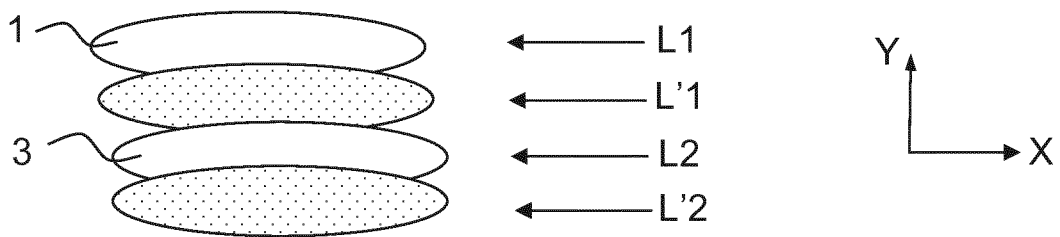


FIG.5b



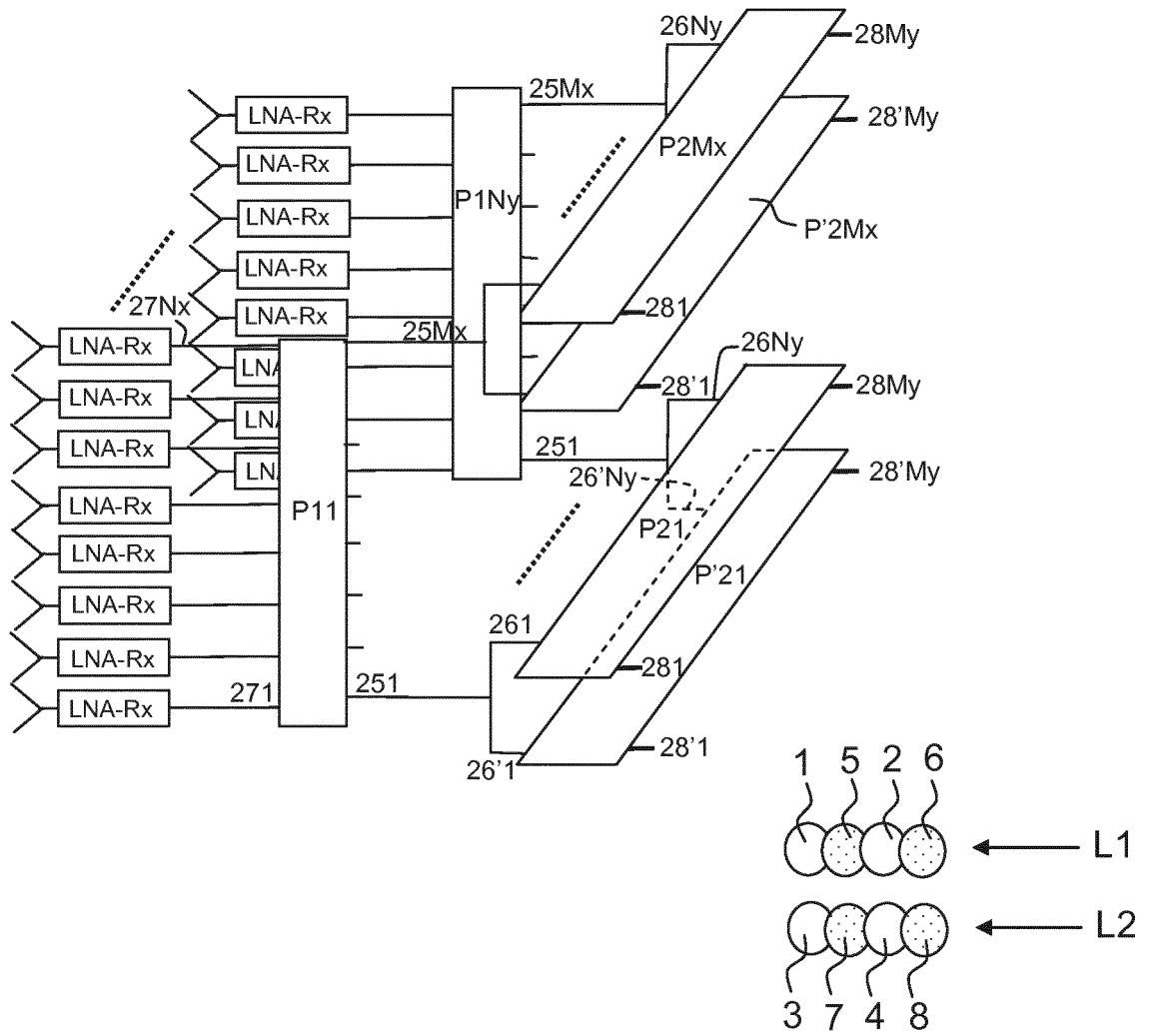


FIG.6

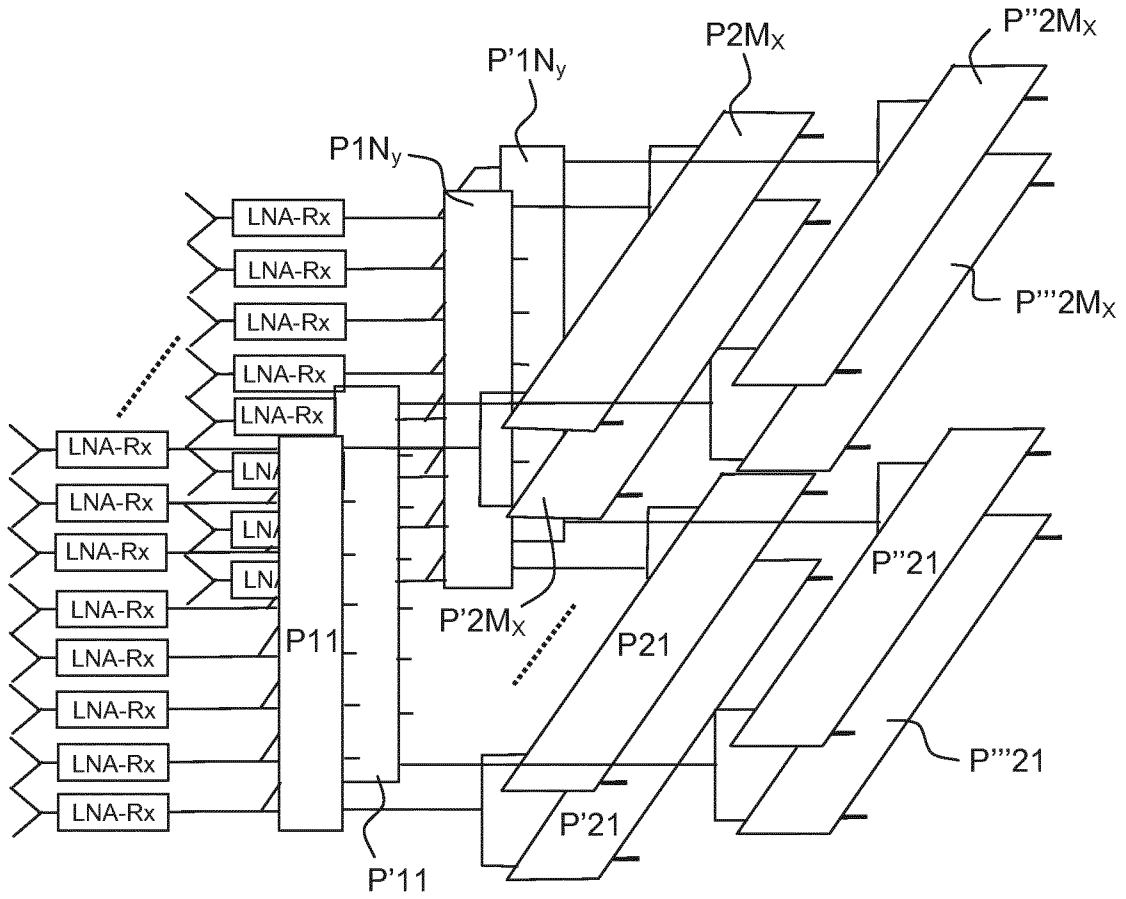


FIG.7a

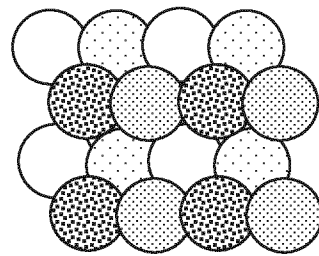
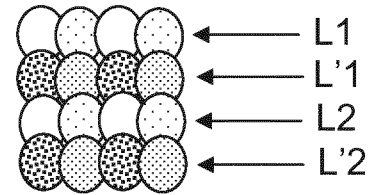


FIG.7b

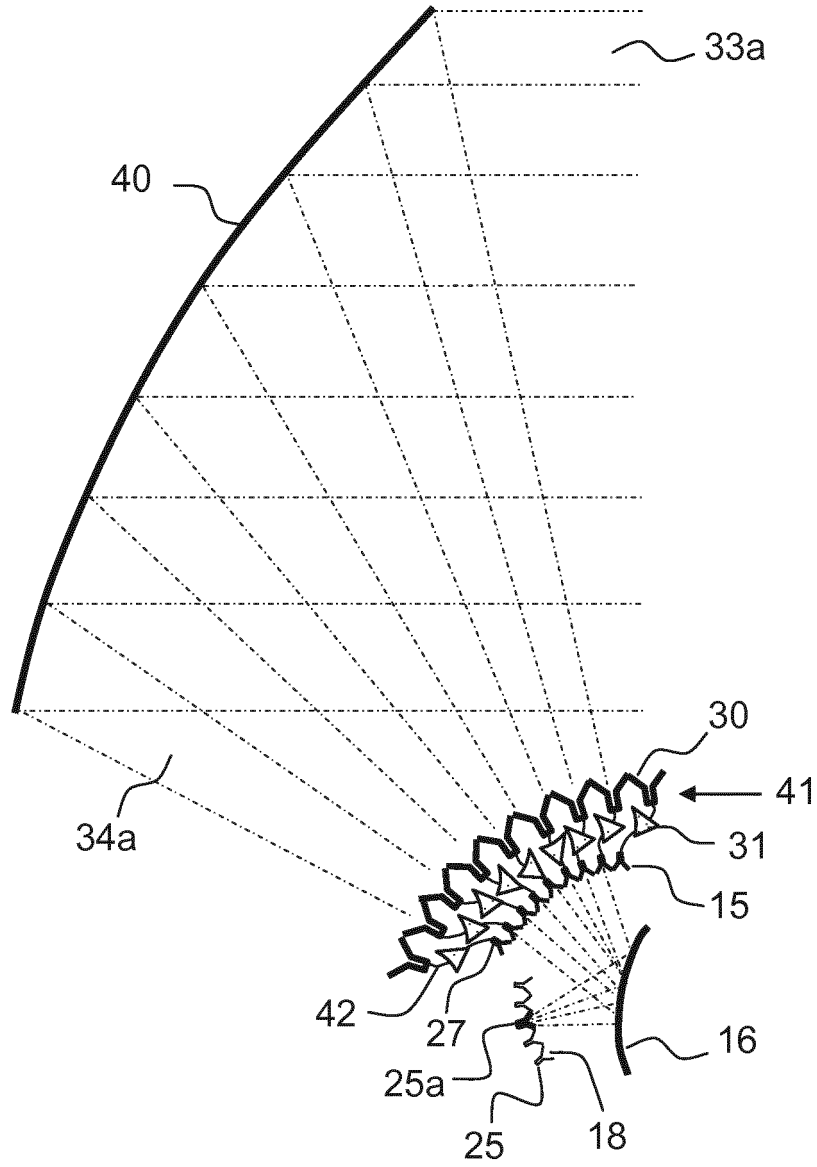


FIG.8a

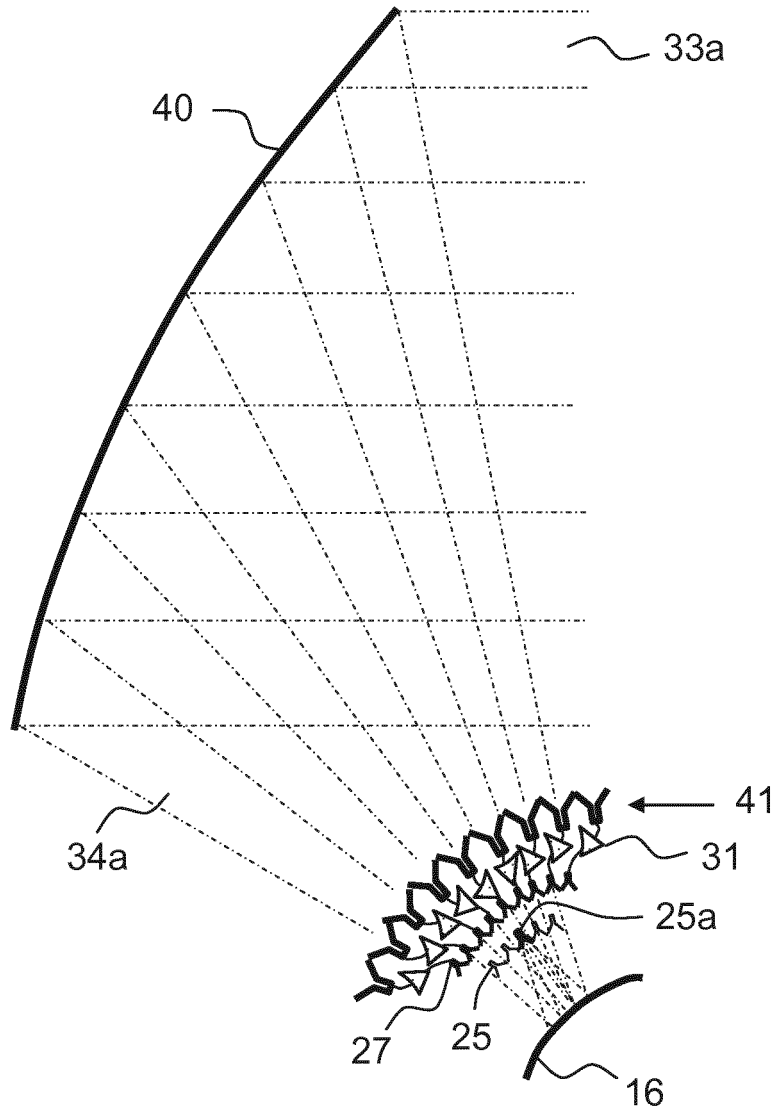


FIG.8b

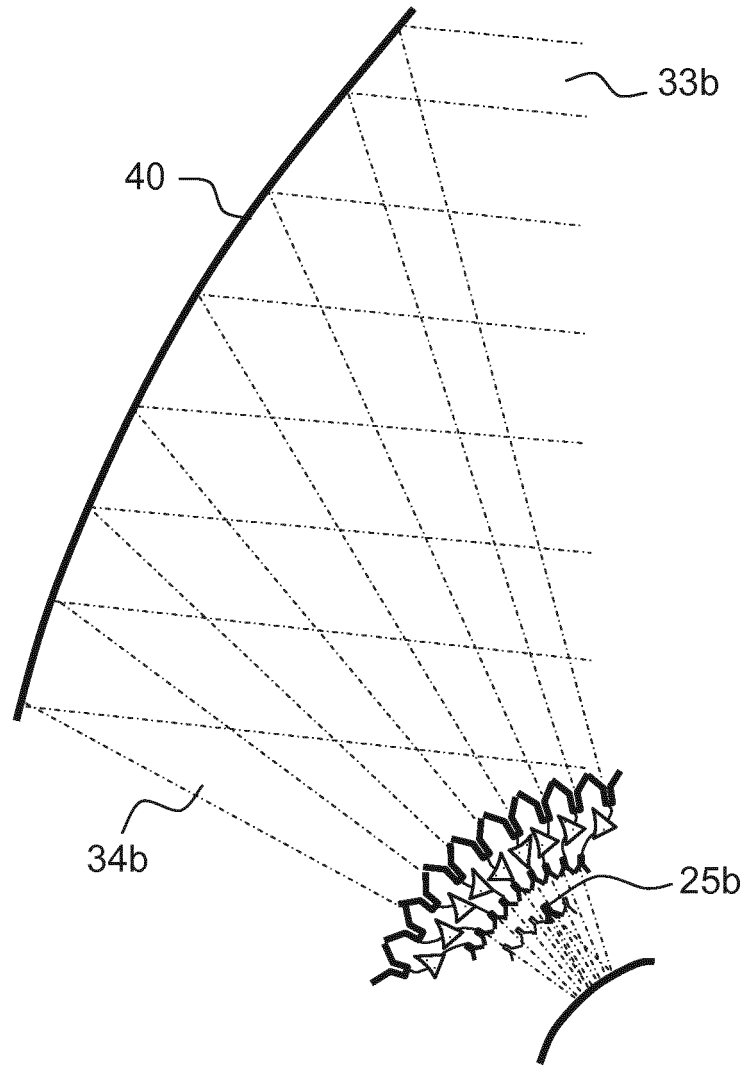


FIG.8c

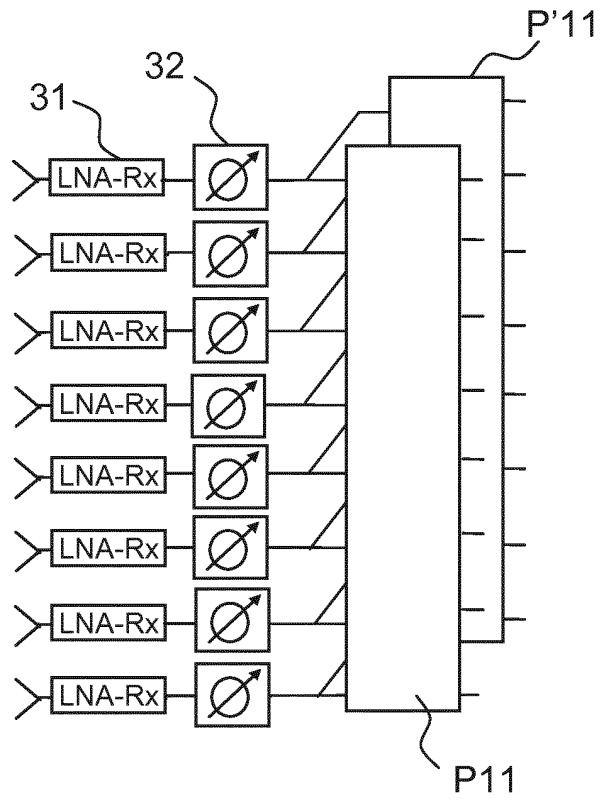


FIG.8d

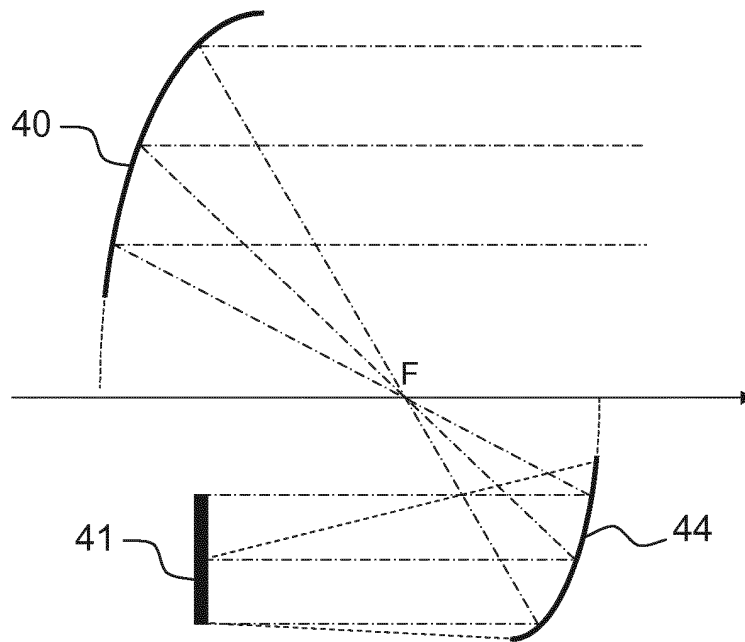


FIG.9

**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 2944153 [0013]