



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
02.08.2023 Bulletin 2023/31

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
H01Q 3/26 ^(2006.01) **H01Q 25/00** ^(2006.01)
H01Q 21/00 ^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **23153543.6**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
H01Q 3/2664; H01Q 25/008; H01Q 21/0031

(22) Date de dépôt: **26.01.2023**

(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 ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(72) Inventeurs:
• **FRAYSSE, Jean-Philippe**
31200 TOULOUSE (FR)
• **LASSAUCE, Léonin**
88000 EPINAL (FR)
• **TUBAU, Ségolène**
31300 TOULOUSE (FR)
• **LEGAY, Hervé**
31830 PLAISANCE DU TOUCH (FR)

(30) Priorité: **27.01.2022 FR 2200694**

(71) Demandeur: **THALES**
92400 Courbevoie (FR)

(74) Mandataire: **Atout PI Laplace**
Immeuble "Visium"
22, avenue Aristide Briand
94117 Arcueil Cedex (FR)

(54) **FORMATEUR DE FAISCEAUX QUASI-OPTIQUE A GUIDE D'ONDES A PLAQUES PARALLELES SUPERPOSEES**

(57) L'invention se rapporte à un formateur de faisceaux quasi-optique (1), comprenant un ensemble de ports faisceaux (6, 8), un ensemble de ports réseaux, un dispositif quasi-optique et au moins un guide d'ondes à plaques parallèles (2, 3, 5) s'étendant entre les ports faisceaux (6, 8) et les ports réseaux, les ports faisceaux (6,

8) et/ou les ports réseaux étant superposés sur au moins deux étages, chacun des au moins deux étages étant séparés par un plan conducteur (4) commun à deux étages adjacents, le formateur de faisceaux quasi-optique (1) comprenant un film résistif (11) disposé dans la continuité du plan conducteur (4).

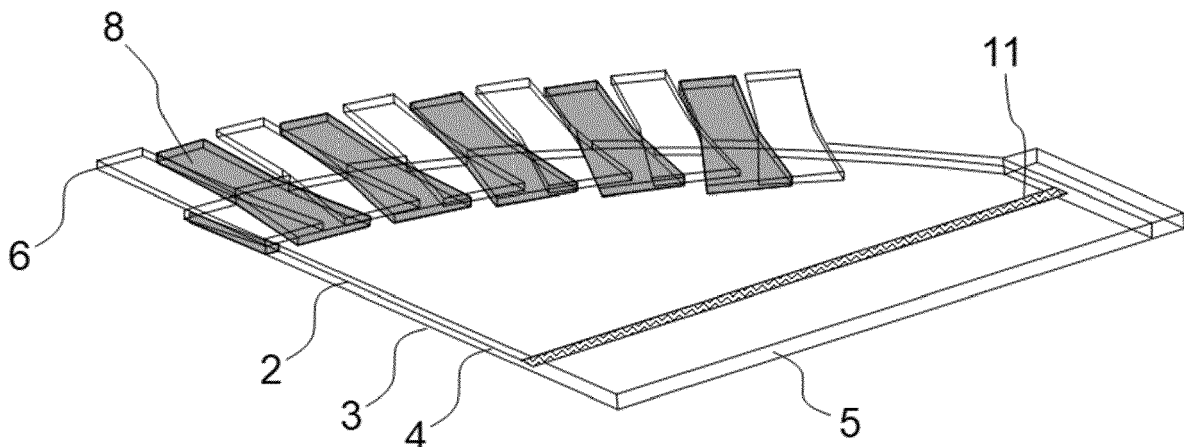


FIG. 5

Description

Domaine technique

[0001] L'invention concerne de manière générale le domaine des télécommunications, et en particulier les formateurs de faisceaux quasi-optiques (FFQO) pour antennes actives multifaisceaux.

[0002] Les formateurs de faisceaux quasi-optiques peuvent être embarqués dans des satellites ou dans des stations au sol. Les antennes utilisant de tels formateurs peuvent fonctionner en émission ou en réception, de façon réciproque.

[0003] Un formateur de faisceaux quasi-optiques est un dispositif focalisant (en réception) et collimatant (en émission). La figure 1 représente un formateur de faisceaux quasi-optiques de l'état de l'art pouvant s'appliquer par exemple aux formateurs de faisceaux pillbox, à lentille à retard continue ou Rotman. Un formateur de faisceaux quasi-optiques intègre classiquement un guide à plaques parallèles 16, reliant des ports faisceaux 17 et des ports réseaux 18. Le guide d'ondes à plaques parallèles 16 permet de guider les ondes en mode TEM (acronyme pour « Transverse Electrique Magnétique »), dans lequel le champ électrique E et le champ magnétique H évoluent dans des directions perpendiculaires à la direction de propagation X.

[0004] Les fronts d'onde sont incurvés dans le plan XY. Afin de compenser la courbure du front d'onde, un dispositif quasi-optique 23 est introduit entre les ports faisceaux et les ports réseaux. Ce dispositif quasi-optique peut être par exemple une lentille telle qu'utilisée pour les lentilles à retard continue ou un réflecteur tel qu'utilisé pour les formateurs de faisceaux pillbox. Chaque port réseau 18 est connecté à un amplificateur 19 suivi d'un élément rayonnant 20 par l'intermédiaire d'une ligne à retard 21 et d'un port amplificateur 22. Il transforme les ondes cylindriques émanant des ports faisceaux en des ondes planes rayonnées par le panneau rayonnant de l'antenne active multifaisceaux.

[0005] Les formateurs de faisceaux quasi-optiques produisent des faisceaux multiples alignés selon un axe, qui se recoupent usuellement à un niveau de gain qui peut être jusqu'à 10 dB inférieur au gain maximum des faisceaux, comme illustré par la figure 2. De telles limitations sont classiques et usuellement observées pour toute antenne multifaisceaux associant un système optique (par exemple un réflecteur, une lentille) et un réseau focal de multi-sources passives, chacune d'entre elles définissant un accès spot.

[0006] Ce niveau de recouvrement des faisceaux provient d'un compromis sur la taille de ces sources qui doit répondre à deux contraintes antagonistes : d'une part, elles doivent être suffisamment larges pour bien illuminer le système optique, et ainsi éviter des pertes par débordement, et d'autre part, elles doivent être suffisamment proches pour que les faisceaux se recouvrent.

[0007] Lorsqu'une zone géographique est couverte

par une antenne produisant ce regroupement de faisceaux, certaines stations terrestres sont alors exposées à un gain antenne diminué de ces pertes de recouvrement. Il est donc souhaitable de minimiser ces pertes de recouvrement, et donc de réaliser des faisceaux multiples qui se recouvrent à un haut niveau de gain.

[0008] Plusieurs solutions ont été envisagées pour minimiser les pertes liées au recouvrement des faisceaux.

[0009] Il est par exemple connu d'utiliser deux formateurs de faisceaux quasi-optiques avec des sources intercalées, comme divulgué par exemple dans la demande de brevet WO 2013/110793 A1. L'utilisation de ces deux formateurs permet de doubler la densité de faisceaux sur un secteur angulaire donné. Cette solution nécessite toutefois deux formateurs de faisceaux quasi-optiques, ainsi qu'un étage de combinaison. Il en résulte une masse plus importante, ainsi qu'un accroissement de complexité très important pour le cas d'une formation de faisceaux bidimensionnelle.

[0010] D'autres solutions utilisent des sources plus petites avec recombinaison glissante de deux sources adjacentes, comme divulgué dans l'article « A theoretical limitation on the formation of lossless multiple beam antennas » (J.L. Allen, IRE Trans., 1961, AP-9, pp. 350-352). Cette approche permet de réaliser des sources équivalentes qui sont suffisamment larges et qui se superposent partiellement de sorte que les faisceaux associés se recouperont à un niveau plus élevé. Cette solution nécessite toutefois de rajouter un circuit associant diviseur et combineur, ce qui complexifie le formateur et engendre des pertes supplémentaires.

[0011] Dans d'autres solutions, une apodisation du signal sur les ports de sortie est utilisée pour élargir le lobe principal de chaque faisceau tout en abaissant le niveau de leurs lobes secondaires. L'élargissement du lobe principal permet un meilleur recouvrement des faisceaux mais ne permet pas l'ajout de faisceaux supplémentaires. Pour réaliser cette apodisation, il est requis de moduler l'amplitude du signal de sortie en fonction de la position de l'élément rayonnant dans le réseau. Cela peut être réalisé de manière passive à l'aide d'atténuateurs ou bien de manière active avec une amplification variable en fonction de la position de chaque élément dans la maille du réseau. Cette solution entraîne cependant une réduction du gain de l'antenne active, pour un nombre d'élément rayonnant donné, et n'est donc pas souhaitable.

[0012] Dans une autre approche décrite dans l'article « Reconfigurable Multi-Beam Pillbox Antenna for Millimeter Wave Automotive Radars » (M. Ettorre, R. Sauleau, Proc. ITST, pp. 87-90, 2009), des sources sont superposées sur deux niveaux différents, ce qui génère toutefois un couplage important entre les accès.

[0013] La figure 3 illustre le fonctionnement simplifié d'un combineur/diviseur plan E, dans lequel les sources sont superposées sur deux niveaux différents (Port 1 et Port 2 ; le port 3 correspond au port de sortie). En effet, le fonctionnement en mode impair met bien en évidence

la faible isolation entre les ports d'entrée et la mauvaise adaptation du port d'entrée excité (les lignes de champ E ne sont pas rectilignes).

[0014] Il existe ainsi un besoin pour des formateurs de faisceaux quasi-optique améliorés, capables de minimiser les pertes liées au recoupement des faisceaux, sans accroissement significatif de la complexité et/ou de l'encombrement.

Résumé de l'invention

[0015] Un objet de l'invention est donc un formateur de faisceaux quasi-optique, comprenant un ensemble de ports faisceaux, un ensemble de ports réseaux, un dispositif quasi-optique et au moins un guide d'ondes à plaques parallèles s'étendant entre les ports faisceaux et les ports réseaux, les ports faisceaux et/ou les ports réseaux étant superposés sur au moins deux étages, chacun des au moins deux étages étant séparés par un plan conducteur commun à deux étages adjacents, le formateur de faisceaux quasi-optique comprenant un film résistif disposé dans la continuité du plan conducteur.

[0016] Avantageusement, le formateur de faisceaux quasi-optique comprend une pluralité de guide d'ondes à plaques parallèles superposés, chaque guide d'ondes à plaques parallèles superposé étant disposé face aux ports faisceaux et/ou face aux ports réseaux d'un même étage, le formateur comprenant en outre un guide d'ondes à plaques parallèles commun, disposé dans la continuité des guides d'ondes à plaques parallèles superposés, le film résistif étant disposé à la jonction entre chaque guide d'ondes à plaques parallèles superposé et le guide d'ondes à plaques parallèles commun.

[0017] Avantageusement, le film résistif est attenant aux ports faisceaux.

[0018] Avantageusement, le film résistif est attenant aux ports réseaux.

[0019] Avantageusement, chaque port faisceau ayant une largeur identique entre deux ports faisceaux consécutifs d'un même étage, les ports faisceaux de deux étages superposés adjacents sont décalés de la largeur du port faisceau divisée par le nombre d'étages de ports faisceaux.

[0020] Avantageusement, les ports faisceaux sont superposés sur au moins quatre étages, la longueur de chaque plan conducteur selon la direction de propagation d'une onde dans le formateur de faisceaux quasi-optique étant variable d'un étage à l'autre.

[0021] Avantageusement les ports faisceaux ont des dimensions différentes, d'un étage à l'autre.

[0022] Avantageusement, chaque port réseau ayant une largeur identique entre deux ports réseau consécutifs d'un même étage, les ports réseaux de deux niveaux superposés adjacents sont décalés de la largeur du port réseau divisée par le nombre d'étages de ports réseaux.

[0023] Avantageusement, les ports réseaux d'un étage sont configurés pour être tous couplés à une antenne, et les ports réseaux d'un étage adjacent superposé sont

configurés pour être tous couplés à une charge non connectée à l'antenne.

[0024] Avantageusement, le formateur de faisceaux quasi-optique comprend, sur chacun des bords latéraux, une pluralité de dispositifs d'absorption configurés pour absorber l'énergie non transmise entre les ports faisceaux et les ports réseaux, lesdits dispositifs d'absorption étant superposés sur les au moins deux étages, la position des dispositifs d'absorption étant décalée d'une distance correspondant à $\lambda_g/4$, où λ_g désigne la longueur d'onde guidée dans le formateur de faisceaux quasi-optique, le film résistif étant disposé entre les dispositifs d'absorption de deux étages superposés.

[0025] Avantageusement, les dispositifs d'absorption comprennent des ports factices ou un absorbant.

[0026] Avantageusement, les ports réseaux et/ou les ports faisceaux comprennent des lignes coaxiales, des guides coaxiaux, des lignes triplaques ou des lignes microrubans.

[0027] Avantageusement, le formateur de faisceaux quasi-optique est réalisé sous forme de circuit imprimé PCB multicouches, le guide d'ondes à plaques parallèles étant chargés d'un matériau diélectrique, les ports faisceaux étant réalisés en technologie SIW.

[0028] L'invention se rapporte aussi à une antenne active comprenant un formateur de faisceaux quasi-optique précité, et une pluralité d'éléments rayonnants connectés en sortie dudit formateur de faisceaux.

[0029] Avantageusement les dimensions des ports réseaux sont inférieures aux dimensions des éléments rayonnants.

Description des figures

[0030] D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins annexés donnés à titre d'exemple.

La figure 1 illustre une antenne comprenant un formateur de faisceaux quasi-optique selon l'état de l'art.

La figure 2 illustre le diagramme de rayonnement pour différents angles de dépointage, avec un formateur de faisceaux quasi-optique selon l'état de l'art.

La figure 3 illustre plusieurs représentations schématiques du fonctionnement d'un combineur plan E selon l'état de l'art.

La figure 4 illustre une vue de dessus (parallèle au plan XY) du formateur de faisceaux quasi-optique selon un mode de réalisation de l'invention.

La figure 5 illustre une vue en perspective du formateur de faisceaux quasi-optique, selon la coupe de

la figure 4.

La figure 6 illustre une vue en perspective d'un mode de réalisation de l'agencement de port du formateur de faisceaux quasi-optique selon l'invention, dans lequel les ports sont décalés les uns par rapport aux autres.

La figure 7 illustre plusieurs représentations schématiques du fonctionnement d'un combineur plan E selon un mode de réalisation de l'invention.

La figure 8 illustre le diagramme de rayonnement pour différents angles de dépointage, avec un formateur de faisceaux quasi-optique selon un mode de réalisation de l'invention.

La figure 9 illustre une vue en perspective d'un mode de réalisation de l'agencement de port faisceaux du formateur de faisceaux quasi-optique selon l'invention, comprenant quatre étages de ports faisceaux.

La figure 10 illustre une représentation schématique, dans le plan XZ, d'un mode de réalisation de l'agencement de port faisceaux du formateur de faisceaux quasi-optique selon l'invention, comprenant quatre étages de ports faisceaux.

La figure 11 illustre une vue en perspective d'un mode de réalisation de l'agencement de port faisceaux, dans lequel les ports faisceaux ont différentes dimensions.

La figure 12 illustre une vue en perspective d'un bord du formateur de faisceaux quasi-optique selon un mode de réalisation de l'invention, comprenant des absorbants.

La figure 13 illustre une vue en perspective d'un bord du formateur de faisceaux quasi-optique selon un mode de réalisation de l'invention, comprenant des ports factices.

Les figures 14, 15 et 16 illustrent différents modes de réalisation d'implémentation des ports réseaux et/ou des ports faisceaux.

La figure 17 illustre une vue en perspective des ports réseaux du formateur de faisceaux quasi-optique selon un mode de réalisation de l'invention, dans lequel les ports réseaux sont alternativement connectés à une charge non connectée à l'antenne.

[0031] Selon un mode de réalisation de l'invention illustré par les figures 4 et 5, le formateur de faisceaux quasi-optique comprend un guide d'ondes à plaques parallèles supérieur 2 et un guide d'ondes à plaques parallèles inférieur 3, superposés l'un par rapport à l'autre. Ils

partagent ainsi un plan conducteur commun 4, qui constitue la paroi inférieure du guide d'ondes à plaques parallèles supérieur 2, et la paroi supérieure du guide d'ondes à plaques parallèles inférieur 3. Les guides d'ondes à plaques parallèles supérieur et inférieur s'étendent dans le plan XY, ils sont donc superposés selon la direction Z.

[0032] Les guides d'ondes à plaques parallèles supérieur et inférieur ne sont pas superposés sur toute l'étendue du formateur de faisceaux quasi-optique, mais seulement sur une partie de celui-ci. Au-delà d'une certaine distance à partir du réseau focal de ports faisceaux, le guide d'ondes à plaques parallèles supérieur 2 et le guide d'ondes à plaques parallèles inférieur 3 forment, en l'absence de plan métallique, un guide d'ondes à plaques parallèles commun 5.

[0033] Le formateur de faisceaux quasi-optique comprend également un ensemble de ports faisceaux supérieurs 6 destinés à alimenter le guide d'ondes à plaques parallèles supérieur 2. Les ports faisceaux supérieurs 6 sont situés dans le plan du guide d'ondes à plaques parallèles supérieur 2.

[0034] De la même manière, le formateur de faisceaux quasi-optique comprend un ensemble de ports faisceaux inférieurs 8 destinés à alimenter le guide d'ondes à plaques parallèles inférieur 3. Les ports faisceaux inférieurs 8 sont situés dans le plan du guide d'ondes à plaques parallèles inférieur 3.

[0035] Le formateur de faisceaux quasi-optique comprend également un ensemble de ports réseaux (7, 9), qui peuvent être disposés sur un seul et même niveau, afin de transmettre les signaux aux éléments rayonnants.

[0036] Les ports faisceaux supérieurs 6 et les ports faisceaux inférieurs 8 sont situés dans le plan focal du dispositif quasi-optique 10. Chaque port faisceau comprend une source pour générer une onde TEM (pour « Transverse Electromagnetic » en anglais), une onde TE (pour « Transverse Electric » en anglais) ou bien les deux.

[0037] Selon un mode de réalisation de l'invention, les sources sont des cornets, en particulier des cornets en plan H, qui sont particulièrement adaptés pour réaliser de la reconfiguration de faisceaux, chaque source du port faisceau définissant un accès spot.

[0038] Cependant, il est à noter que d'autres formes de sources bien connues peuvent être utilisées (réseaux de monopoles, transitions entre lignes micro-ruban et guide à plaques parallèles, transitions entre lignes triplaques et guide à plaques parallèles, transitions entre guides coaxiaux et guide à plaques parallèles, etc.). Les cornets peuvent facilement être conçus et fabriqués en technologie PCB.

[0039] Selon un autre mode de réalisation, le formateur de faisceaux quasi-optique comprend un seul étage de ports faisceaux, un ensemble de ports réseaux supérieurs 7, et un ensemble de ports réseaux inférieurs 9.

[0040] A la jonction entre le guide d'onde supérieur et le guide d'onde inférieur d'une part, et le guide d'onde

commun d'autre part, un film résistif est disposé dans la continuité du plan conducteur qui sépare le guide d'onde supérieur et le guide d'onde inférieur, comme l'illustre la figure 5.

[0041] Le film résistif est une couche qui a une résistivité au carré telle que quand des lignes de courant traversent le film résistif, une certaine quantité d'énergie est dissipée, ce qui réduit le couplage entre les ports faisceaux.

[0042] Selon des modes de réalisation, le film résistif 11 peut être plus proche des ports faisceaux que du dispositif quasi-optique, ou à l'inverse être plus proche du dispositif quasi-optique que des ports faisceaux. De même, le film résistif peut être plus ou moins large (la largeur correspond à la dimension selon la direction longitudinale X).

[0043] En variante, le film résistif 11 peut être attaché aux ports faisceaux, et/ou attaché aux ports réseaux, à savoir en connexion directe avec les ports. Dans ce cas, le formateur de faisceaux ne comprend qu'un seul guide d'ondes à plaques parallèles, sur un seul et unique étage.

[0044] Il est possible de définir les dimensions ainsi que les caractéristiques du film résistif 11 au moyen de mesures empiriques réalisées lors d'une phase de simulation ou lors d'une phase de calcul, de façon à obtenir le niveau de découplage souhaité entre les ports faisceaux.

[0045] La dimension du film résistif, dans la direction de propagation X, peut avantageusement être supérieure ou égale à $\lambda_g/4$, où λ_g désigne la longueur d'onde guidée dans le formateur de faisceaux quasi-optique 1.

[0046] Le film résistif peut comprendre par exemple un alliage de nickel-phosphore.

[0047] Il est avantageux de disposer le film résistif 11 sur toute la longueur du plan métallique 4, selon la direction transverse Y, de façon à dissiper l'énergie même pour les ports faisceaux les plus excentrés, par rapport à l'axe principal du dispositif quasi-optique.

[0048] La présence du film résistif, dans la continuité du plan conducteur (soit directement en contact avec les ports faisceaux ou les ports réseaux, soit à la jonction entre les guides superposés et le guide d'ondes à plaques parallèles commun), permet de minimiser les pertes liées au recouvrement des faisceaux.

[0049] Par ailleurs, la présence du film résistif au niveau des ports faisceaux superposés (de façon attenante, ou au niveau de la jonction avec un guide d'onde à plaques parallèles commun) permet de libérer de la place pour la taille des sources, afin qu'elles illuminent parfaitement les ports réseaux, avec une loi apodisée, permettant également de réduire les lobes secondaires. Des sources de plus grande taille permettent également de limiter l'amplitude du champ sur les bords du formateur de faisceaux quasi-optique, et de minimiser les réflexions parasites sur ceux-ci.

[0050] Selon un mode de réalisation de l'invention, les ports faisceaux (6, 8) et les ports réseaux (7, 9) sont superposés sur au moins deux étages (33, 34).

[0051] Selon un autre mode de réalisation, illustré par la figure 6, les ports faisceaux supérieurs 6 et les ports faisceaux inférieurs 8 peuvent être décalés l'un par rapport à l'autre selon la direction transverse Y, d'une distance prédéfinie. Le décalage est donc effectué dans le plan focal du dispositif quasi-optique 10.

[0052] La distance prédéfinie est avantageusement égale à la largeur du port faisceau divisée par le nombre d'étages (33, 34) de ports faisceaux, ce qui permet d'obtenir un réseau compact de ports faisceaux.

[0053] Ainsi, comme l'illustre la figure 6, pour un formateur de faisceau comprenant deux étages (33, 34), la distance prédéfinie est égale à une demi-largeur du port faisceau ($d_2/2$, d_2 correspondant à la largeur d'un port faisceau) et le centre d'un port faisceau supérieur coïncide avec la jonction entre deux ports faisceaux inférieurs, et réciproquement.

[0054] La figure 7 illustre, de façon schématique, le fonctionnement du formateur de faisceaux quasi-optique selon l'invention, à la jonction entre le guide d'ondes à plaques parallèles supérieur 2 et le guide d'ondes à plaques parallèles inférieur 3 d'une part, et le guide d'ondes à plaques parallèles commun 5 d'autre part.

[0055] Le film résistif 11 permet d'isoler les ports faisceaux supérieurs 6 et inférieurs 8, et d'obtenir, au niveau du port de sortie 24, situé dans le guide d'ondes à plaques parallèles commun 5, la sommation sans pertes des signaux provenant des ports faisceaux d'entrées lorsqu'ils sont en phase et de même amplitude (schéma a) de la figure 7).

[0056] En effet, dans le mode équilibré (ou pair) le potentiel électrique de part et d'autre du film résistif 11 étant identique, il n'y a pas de ligne de courant créée dans la partie résistive.

[0057] Par contre dans le cas d'un déséquilibre entre les signaux d'entrée (mode impair, schéma b) de la figure 7), le film résistif 11 est soumis à des lignes de courant qui conduisent à l'absorption par dissipation du déséquilibre entre les signaux d'entrée.

[0058] Le film résistif 11 permet ainsi de régler les problèmes de couplage que l'on peut retrouver dans l'état de la technique.

[0059] La figure 8 illustre le diagramme de rayonnement d'une antenne active multifaisceaux comprenant un formateur de faisceaux quasi-optique selon l'invention, dans lequel les ports faisceaux sont superposés sur deux niveaux. L'antenne active multifaisceaux comprend également un panneau rayonnant connecté en sortie du formateur de faisceaux. L'abscisse représente l'angle de dépointage de l'antenne.

[0060] Le numéro du port faisceau (1 à 22), visible sur la partie droite de la figure qui représente le formateur de faisceaux quasi-optique, se retrouve dans le numéro du lobe principal dans la partie gauche de la figure. Avec le formateur de faisceaux quasi-optique selon l'invention, le niveau de recouvrement est d'environ 2/3 dB, ce qui minimise fortement les pertes liées au recouvrement des faisceaux, en comparaison avec les 9 dB constatés lors-

que les ports faisceaux sont situés sur un seul et même niveau.

[0061] Le film résistif 11 permet ainsi d'adapter les guides d'ondes à plaques parallèles supérieurs et inférieurs au guide à plaques parallèles commun, tout en assurant un faible couplage mutuel entre les sources.

[0062] Avec un tel niveau de recoupement, le formateur selon l'invention garantit ainsi des transmissions à haut débit entre les satellites et des utilisateurs fixes ou en mouvement rapide (trains, avions...).

[0063] Le niveau de recoupement peut encore être amélioré en augmentant le nombre d'étages, par exemple en disposant les ports faisceaux sur quatre étages.

[0064] Ainsi, selon un mode de réalisation illustré par la figure 9, le formateur de faisceaux quasi-optique comprend plus de deux étages, en l'occurrence quatre étages (33, 34, 35, 36). Un film résistif (37, 38, 39) est disposé entre chaque étage, de façon attenante aux ports faisceaux. Les ports faisceaux de deux étages superposés peuvent avantageusement être décalés d'une distance prédéfinie égale à la largeur du port faisceau divisée par le nombre d'étages de ports faisceaux. Il peut également être prévu, dans une configuration à quatre étages ou plus illustrée par la figure 10, que la longueur chaque plan conducteur (41, 42, 43) selon la direction X de propagation d'une onde dans le formateur de faisceaux quasi-optique 1, soit variable d'un étage à l'autre, de façon, par exemple, à équilibrer le couplage entre les ports faisceaux, de façon progressive.

[0065] Par exemple le plan conducteur 42 situé à mi-hauteur est le plus long, parmi tous les plans conducteurs. En considérant les étages situés entre le partie supérieure 44 du guide d'onde et le plan conducteur médian 42, on attribue au plan conducteur situé à mi-hauteur 41 une longueur inférieure à celle du plan conducteur médian 42, et ainsi de suite (découpage par dichotomie). Les films résistifs (111, 112, 113) sont agencés en extrémité des plans conducteurs (41, 42, 43).

[0066] Ce mode de réalisation assure un couplage équilibré entre les ports faisceaux, et une bonne répartition du champ E en mode pair.

[0067] Selon un mode de réalisation particulièrement avantageux, le formateur de faisceaux quasi-optique selon l'invention est réalisé sous forme de circuit imprimé PCB multicouches. La permittivité ϵ_r des matériaux diélectriques intégrés dans le formateur de faisceaux permet en effet de réduire la longueur d'onde guidée à l'intérieur du formateur de faisceaux quasi-optique d'un facteur 7[^]7, et de réduire de ce même facteur les dimensions du formateur. Le dispositif quasi-optique 10 est intégré dans un guide à plaques parallèles chargé de diélectrique, et les ports faisceaux peuvent être réalisés en technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide).

[0068] Le procédé de fabrication du formateur de faisceaux quasi-optique comprend ainsi une étape de gravure du film résistif, aux endroits où le film résistif est prévu. La technique de fabrication d'un formateur de faisceaux quasi-optique en PCB se prête particulièrement

bien à l'adjonction d'un film résistif dans le formateur.

[0069] Les formateurs de faisceaux quasi-optiques sous forme de circuit imprimé PCB multicouches peuvent occasionner plus de pertes que des formateurs sous forme de guide métallique. Néanmoins, pour des antennes actives, les amplificateurs sont intégrés au panneau rayonnant (tous les amplificateurs contribuent à la formation du faisceau) ; ils ne sont donc pas intégrés avant le formateur, ce qui laisse plus de tolérance pour les pertes.

[0070] Selon un mode de réalisation de l'invention, illustré par la figure 11, les dimensions des ports faisceaux sont différentes d'un étage à l'autre. Dans ce cas, le nombre de ports faisceaux est différent d'un étage à l'autre. Par exemple sur la figure 11, l'étage 37 comprend trois ports faisceaux 70, et l'étage 38 comprend quatre ports faisceaux 71. Les ports faisceaux de l'étage 37 sont plus larges (selon la direction transverse Y) que les ports faisceaux de l'étage 38. Une portion de film résistif 11 s'étend à la jonction entre l'étage 37 et l'étage 38, à la sortie des ports faisceaux.

[0071] Le mode de réalisation illustré par la figure 11 peut être étendu à plus de deux étages, par exemple quatre étages voire plus, avec une longueur de plan conducteur qui est fixe ou variable d'un étage à l'autre.

[0072] Le front des ondes cylindriques excitées par les ports faisceau du formateur de faisceaux quasi-optique sont orientés vers le barycentre des ports réseau. Le champ électrique transmis est donc maximal au centre des ports réseau, et l'intensité du champ électrique peut diminuer pour les ports situés en périphérie. Il existe toutefois un champ électrique résiduel sur les bords du formateur de faisceaux quasi-optique.

[0073] Afin de réduire le champ électrique résiduel sur les bords, le formateur de faisceaux quasi-optique, tel qu'illustré par la figure 12, comprend, sur ses bords latéraux (25, 26), un premier dispositif d'absorption 12 dans l'étage supérieur 33, et un deuxième dispositif d'absorption 13 dans l'étage inférieur 34. Les bords latéraux (25, 26) sont les bords situés dans la ligne de transmission, entre les ports faisceaux et le dispositif quasi-optique (figure 4).

[0074] Les dispositifs d'absorption sont configurés pour absorber l'énergie non transmise entre les ports faisceaux (6, 8) et les ports réseaux (7, 9), et de minimiser ainsi les réflexions parasites sur les bords du formateur de faisceaux quasi-optique.

[0075] Le premier dispositif d'absorption 12 et le deuxième dispositif d'absorption 13 peuvent s'étendre sur toute la longueur du bord latéral correspondant, à savoir intégralement entre les ports faisceaux les plus excentrés et le dispositif quasi-optique. En variante, les dispositifs d'absorption peuvent s'étendre depuis le film résistif 11 jusqu'au dispositif quasi-optique 10, selon la direction longitudinale X.

[0076] La position du premier dispositif d'absorption 12 et du deuxième dispositif d'absorption 13 est avantageusement décalée d'une distance correspondant à $\lambda_g/4$

dans la direction transverse Y, où λ_g désigne la longueur d'onde guidée dans le formateur de faisceaux quasi-optique 1. Le sens du décalage, c'est-à-dire quel absorbant est en retrait par rapport à l'autre, n'a pas d'importance. Par ailleurs, le film résistif 11 est disposé entre le premier dispositif d'absorption 12 et le deuxième dispositif d'absorption 13. Le film résistif 11 peut s'étendre au-delà des dispositifs d'absorption, selon la direction transverse Y. Le film résistif 11 peut être disposé dans la continuité du plan métallique et entre le premier dispositif d'absorption 12 et le deuxième dispositif d'absorption 13, comme l'illustre la figure 12.

[0077] Le décalage de la position du premier dispositif d'absorption 12 et du deuxième dispositif d'absorption 13 d'une distance correspondant à $\lambda_g/4$ dans la direction transverse Y génère une opposition de phase entre les réflexions parasites issues des absorbants. Le signal résultant de la combinaison en opposition de phase est absorbé par le film résistif 11.

[0078] La réduction des réflexions parasites sur les bords latéraux (25, 26) permet de limiter les niveaux des signaux parasitant les lois d'amplitude et phase souhaitées sur les ports réseaux et ainsi atténuer les niveaux des lobes secondaires de l'antenne.

[0079] Les dispositifs d'absorption peuvent comprendre un matériau absorbant, par exemple une mousse époxy chargée en particules magnétiques.

[0080] Selon une variante illustrée par la figure 13, dispositifs d'absorption peuvent comprendre des ports factices 33. Chaque port factice peut se présenter sous la forme d'une structure dotée d'une portion de film résistif 71, de parois latérales conductrices 72, et d'une liaison transverse conductrice 70 qui s'étend de part et d'autre de chaque paroi latérale.

[0081] Selon une autre variante, les dispositifs d'absorption peuvent comprendre une pluralité de ports factices chargés par des charges résistives.

[0082] La figure 14 illustre une variante d'agencement des ports réseaux, dans laquelle les ports réseaux 50 d'un étage 33 sont configurés pour être tous couplés à une antenne, et les ports réseaux 51 d'un étage adjacent 34 sont configurés pour être tous couplés à une charge 52 non connectée à l'antenne, qui peut être un film résistif. Le couplage à une charge 52 non connectée à l'antenne peut être réalisé en utilisant des cornets connectés à des charges par l'intermédiaire de transitions entre guides rectangulaires et des lignes microruban 53.

[0083] Une autre variante d'agencement est illustrée par la figure 15. Les ports réseaux sur deux niveaux utilisent des transitions entre guides à plaques parallèles et des guides coaxiaux 54. Les ports 56 d'un des deux niveaux sont connectés à des charges 55, qui peuvent comprendre un film résistif. Les ports 57 du niveau adjacent sont connectés à l'antenne.

[0084] Une autre variante d'agencement est illustrée par la figure 16. Les ports réseaux sur deux niveaux utilisent des transitions entre guides à plaques parallèles et des lignes microrubans 57. Les ports 60 d'un des deux

niveaux sont connectés à des charges 58 (par exemple des films résistifs). Les ports 59 du niveau adjacent sont connectés à l'antenne.

[0085] Ces différents types de ports et de transitions peuvent également être utilisés pour les ports faisceaux.

[0086] Cet agencement permet de réduire les réflexions parasites à fortes incidences et d'utiliser des largeurs de ports réseaux supérieures à $0,6\lambda_g$. Classiquement, des ports réseaux de largeurs inférieures à $0,6\lambda_g$ sont utilisés pour limiter ces réflexions parasites.

[0087] En effet, les ondes incidentes se réfléchissent partiellement sur les ports réseaux de chaque étage. Cette réflexion s'accroît avec la taille des ports réseaux et l'incidence de l'onde. Les réflexions partielles de chaque étage sont alors en opposition de phase lorsque les ports réseaux sont décalés d'une demi-période. Elles sont alors absorbées par le film résistif.

[0088] Cette annulation de réflexion partielle fonctionne pour des largeurs de ports jusqu'à $0,8\lambda_g$ voire $0,9\lambda_g$, afin de réduire l'angle d'incidence des ondes du formateur de faisceaux quasi-optique θ_{QO} requis pour alimenter l'antenne.

[0089] En effet, l'angle d'incidence θ_{QO} est directement lié à l'espacement d_2 entre les ports réseaux à travers l'équation ci-après, θ_{rad} étant l'angle de dépointage de l'antenne, d_1 l'espacement entre les éléments rayonnants de l'antenne, ϵ_{r2} étant la permittivité du formateur de faisceaux quasi-optique :

$$\theta_{QO} = \sin^{-1} \left(\frac{d_1}{d_2 \sqrt{\epsilon_{r2}}} \sin \theta_{rad} \right)$$

[0090] L'espacement d_1 entre les éléments rayonnants de l'antenne est imposé par la contrainte de placer les lobes de réseaux de l'antenne en dehors de la couverture de l'antenne.

[0091] Typiquement pour une antenne active d'un satellite sur orbite géostationnaire devant fonctionner sur $\theta_{rad} = \pm 8,7^\circ$, l'espacement entre les éléments rayonnants est de l'ordre de $3,1\lambda$ où λ désigne la longueur d'onde dans le vide.

[0092] Ainsi, pour le cas d'une antenne active fonctionnant sur une orbite géostationnaire, augmenter la périodicité des ports réseaux de $0,6\lambda_g$ à $0,8\lambda_g$ permet de relâcher la contrainte d'incidence des ondes à l'intérieur du formateur de faisceaux quasi-optique, de $51,4^\circ$ à $38,5^\circ$, ce qui semble moins critique.

[0093] Ceci est possible en réalisant deux rangées superposées de ports réseau espacés selon une période de $0,8\lambda_g$, tout en implémentant un décalage d'une demi-période entre les deux rangées superposées. Seule une des deux rangées des ports est alors connectée aux éléments rayonnants, et les ports de l'autre rangée sont connectés à des charges (cf. figures 14, 15 et 16), ce qui permet d'éviter des réflexions spéculaires.

[0094] Selon un autre mode de réalisation illustré par

la figure 17, les ports réseaux supérieurs et inférieurs sont configurés pour être alternativement couplés, selon la direction transverse Y, à une antenne et à une charge non connectée à l'antenne.

[0095] Ainsi, l'ensemble de ports réseaux supérieurs comprend alternativement un port réseau supérieur 27 connecté à l'antenne (non visible sur la figure 17), et un port réseau 28 connecté à une charge qui n'est pas connectée à l'antenne.

[0096] De la même manière, l'ensemble de ports réseaux inférieurs comprend alternativement un port réseau inférieur 29 connecté à une charge qui n'est pas connectée à l'antenne, et un port réseau 30 connecté à l'antenne.

[0097] En considérant deux ports réseaux superposés (par exemple les ports 27 et 29, ou les ports 28 et 30), seul un des deux ports est connecté à l'antenne, l'autre étant connecté à une charge non connectée à l'antenne.

[0098] Ce fonctionnement expliqué pour une antenne en réception se transpose également dans le cas d'une antenne en transmission. Dans ce cas, une onde incidente sur les ports réseaux pour une incidence oblique est partiellement réfléchiée dans la direction du lobe de réseau. Les réflexions partielles se convertissent alors en un mode impair, qui s'évanouit dans le film résistif.

[0099] L'invention se rapporte aussi à une antenne active comprenant le formateur de faisceaux quasi-optique précité, et un panneau rayonnant connecté en sortie du formateur de faisceaux.

Revendications

1. Formateur de faisceaux quasi-optique (1), comprenant un ensemble de ports faisceaux (6, 8), un ensemble de ports réseaux (7, 9), un dispositif quasi-optique (10) et au moins un guide d'ondes à plaques parallèles (2, 3, 5) s'étendant entre les ports faisceaux (6, 8) et les ports réseaux (7, 9), les ports faisceaux (6, 8) et/ou les ports réseaux (7, 9) étant superposés sur au moins deux étages (33, 34), chacun des au moins deux étages (33, 34) étant séparés par un plan conducteur (4) commun à deux étages (33, 34) adjacents, **caractérisé en ce que** le formateur de faisceaux quasi-optique (1) comprend un film résistif (11) disposé dans la continuité du plan conducteur (4).
2. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon la revendication 1, comprenant une pluralité de guide d'ondes à plaques parallèles superposés (2, 3), chaque guide d'ondes à plaques parallèles superposé (2, 3) étant disposé face aux ports faisceaux (6, 8) et/ou face aux ports réseaux (7, 9) d'un même étage (33, 34), le formateur (1) comprenant en outre un guide d'ondes à plaques parallèles commun (5), disposé dans la continuité des guides d'ondes à plaques parallèles superposés (2, 3), le film résistif (11) étant disposé à la jonction entre chaque guide d'ondes à plaques parallèles superposé (2, 3) et le guide d'ondes à plaques parallèles commun (5).
3. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon la revendication 1, dans lequel le film résistif (11) est attaché aux ports faisceaux (6, 8).
4. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon la revendication 1, dans lequel le film résistif (11) est attaché aux ports réseaux (7, 9).
5. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, chaque port faisceau (6, 8) ayant une largeur (d_2) identique entre deux ports faisceaux consécutifs (61, 62) d'un même étage, les ports faisceaux (61, 62) de deux étages superposés adjacents (33, 34) sont décalés de la largeur du port faisceau divisée par le nombre d'étages (33, 34) de ports faisceaux.
6. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les ports faisceaux sont superposés sur au moins quatre étages (33, 34, 35, 36), la longueur de chaque plan conducteur (41, 42, 43) selon la direction de propagation d'une onde dans le formateur de faisceaux quasi-optique (1) étant variable d'un étage à l'autre.
7. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les ports faisceaux (70, 71) ont des dimensions différentes, d'un étage à l'autre (37, 38).
8. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, chaque port réseau (7, 9) ayant une largeur identique entre deux ports réseau consécutifs d'un même étage, les ports réseaux de deux niveaux superposés adjacents sont décalés de la largeur du port réseau divisée par le nombre d'étages de ports réseaux.
9. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les ports réseaux (50) d'un étage (33) sont configurés pour être tous couplés à une antenne, et les ports réseaux (51) d'un étage adjacent superposé (34) sont configurés pour être tous couplés à une charge non connectée à l'antenne.
10. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon l'une des revendications précédentes, comprenant, sur chacun des bords latéraux (25, 26), une pluralité de dispositifs d'absorption (12, 13) configurés pour absorber l'énergie non transmise entre les ports faisceaux (6, 8) et les ports réseaux (7, 9), lesdits dispositifs d'absorption (12, 13) étant superposés sur les au moins deux étages (33, 34), la position des

dispositifs d'absorption (12, 13) étant décalée d'une distance correspondant à $\lambda_g/4$, où λ_g désigne la longueur d'onde guidée dans le formateur de faisceaux quasi-optique (1), le film résistif (11) étant disposé entre les dispositifs d'absorption (12, 13) de deux étages superposés (33, 34). 5

11. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon la revendication 10, dans lequel les dispositifs d'absorption comprennent des ports factices ou un absorbant. 10
12. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les ports réseaux et/ou les ports faisceaux comprennent des lignes coaxiales, des guides coaxiaux, des lignes triplaques ou des lignes microrubans. 15
13. Formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon l'une des revendications précédentes, réalisé sous forme de circuit imprimé PCB multicouches, le guide d'ondes à plaques parallèles étant chargé d'un matériau diélectrique, les ports faisceaux étant réalisés en technologie SIW. 20
25
14. Antenne active comprenant un formateur de faisceaux quasi-optique (1) selon l'une des revendications précédentes, et une pluralité d'éléments rayonnants connectés en sortie dudit formateur de faisceaux (1). 30
15. Antenne active selon la revendication 14, dans laquelle les dimensions des ports réseaux sont inférieures aux dimensions des éléments rayonnants. 35

40

45

50

55

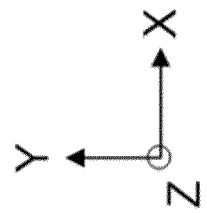
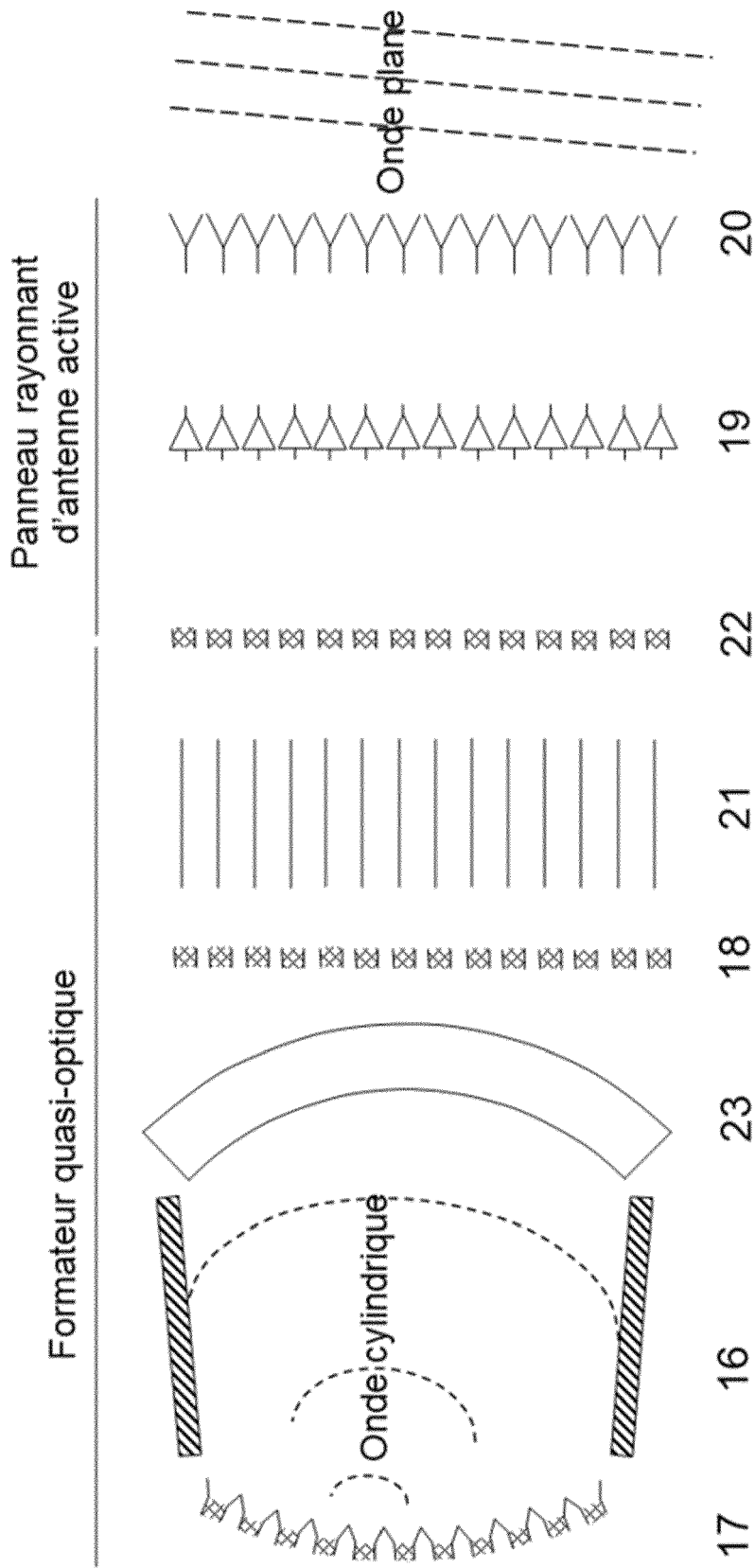


FIG. 1

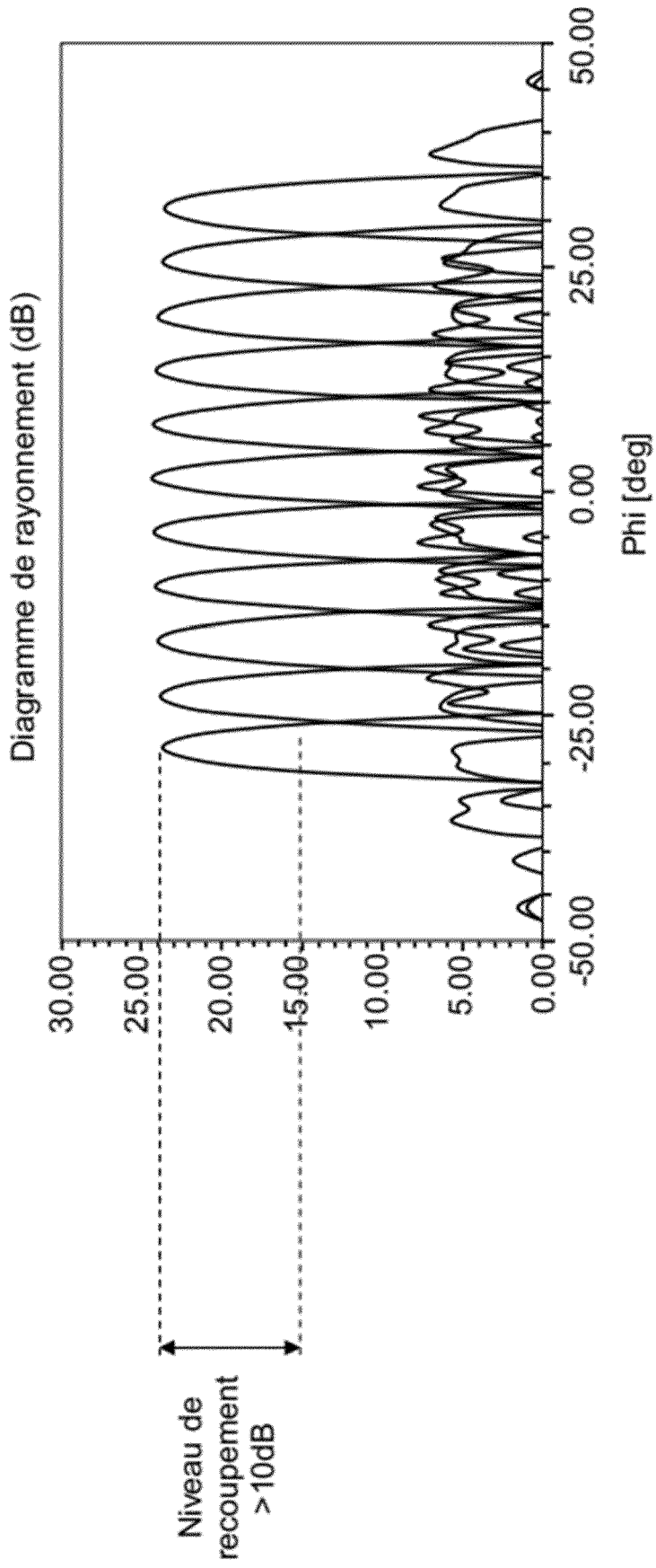
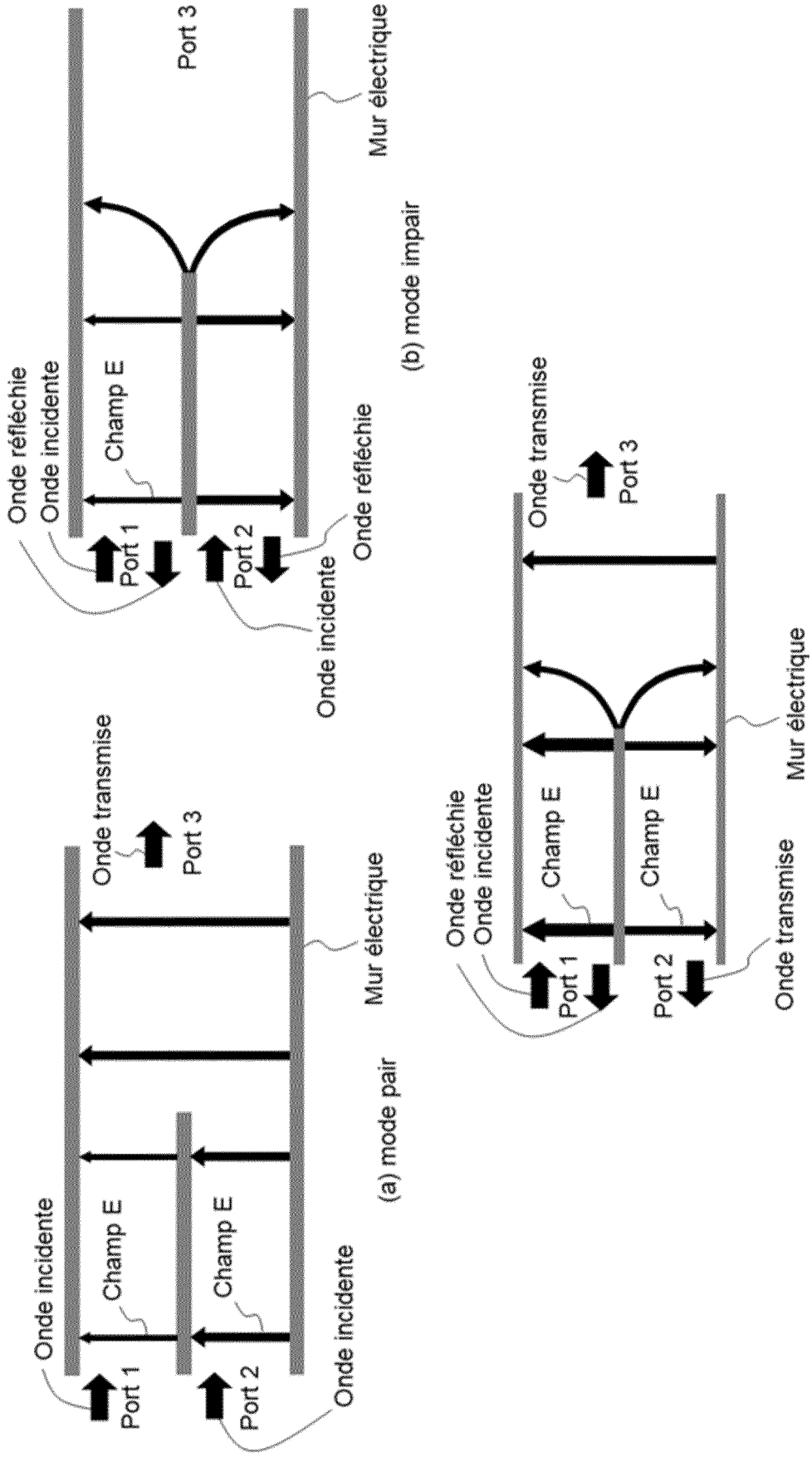


FIG. 2



(c) excitation d'un des ports d'entrée

FIG. 3

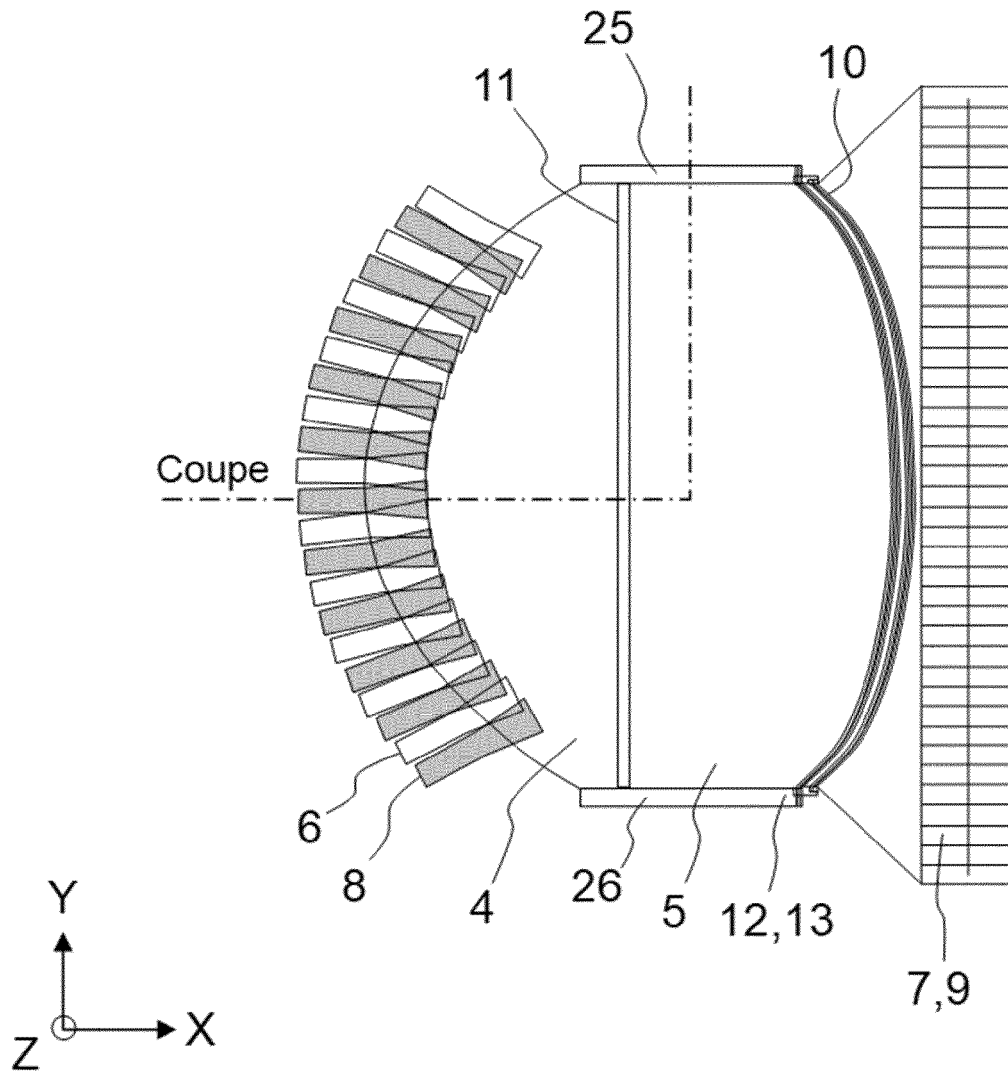


FIG. 4

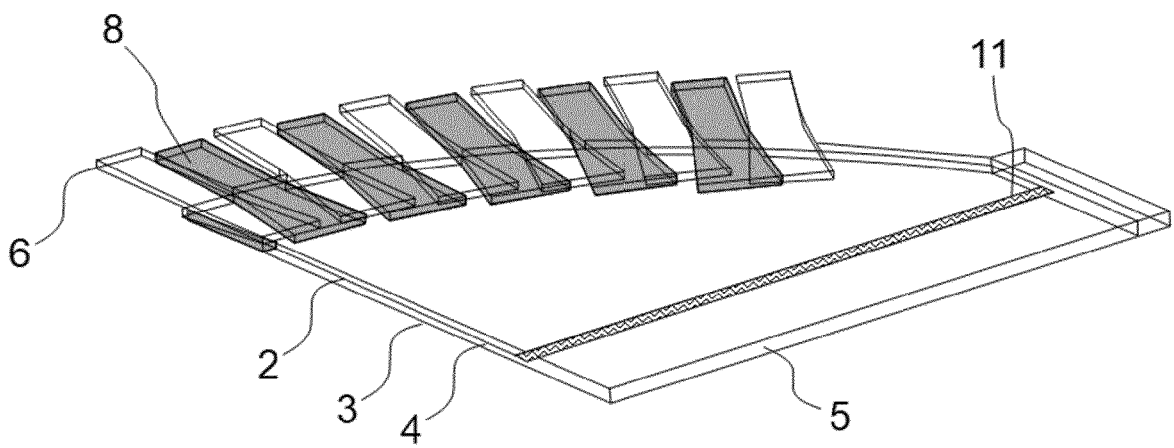


FIG. 5

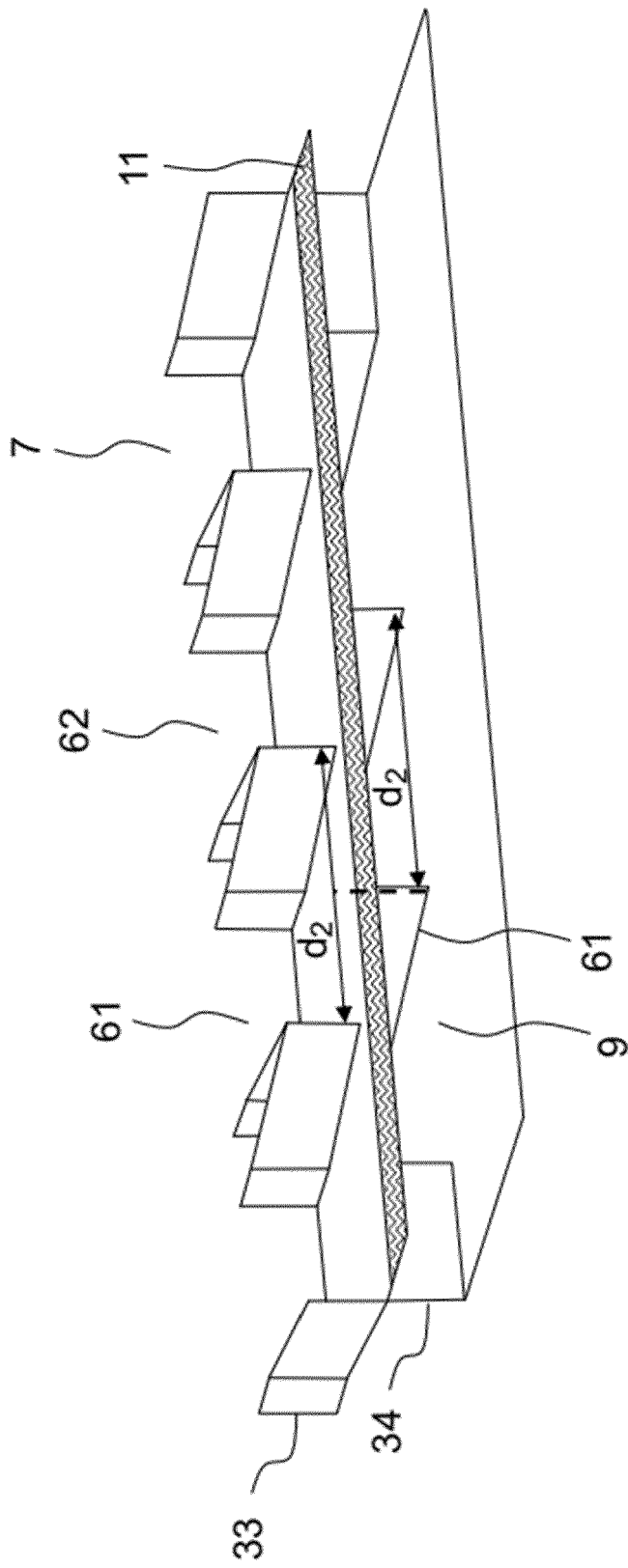


FIG. 6

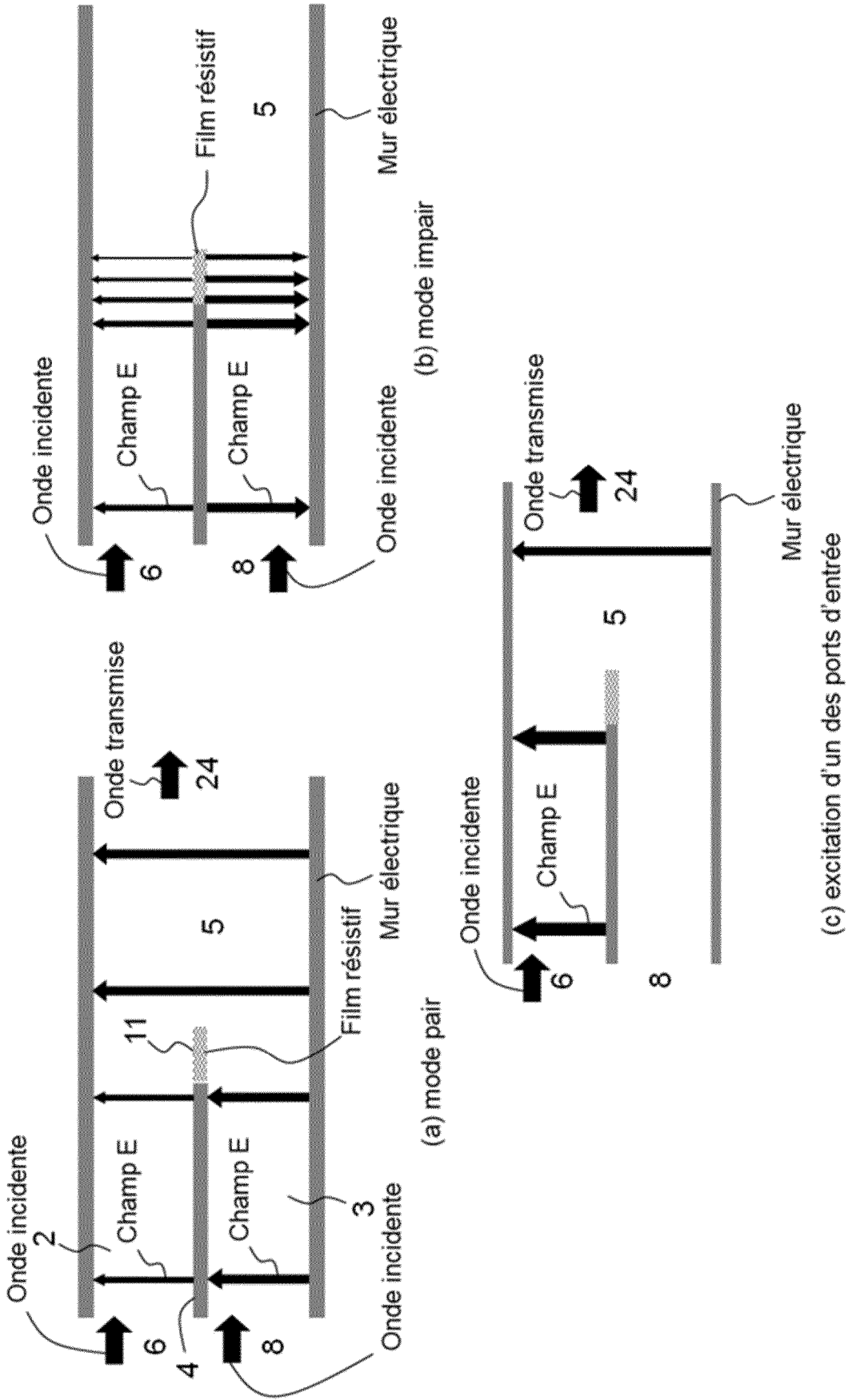


FIG. 7

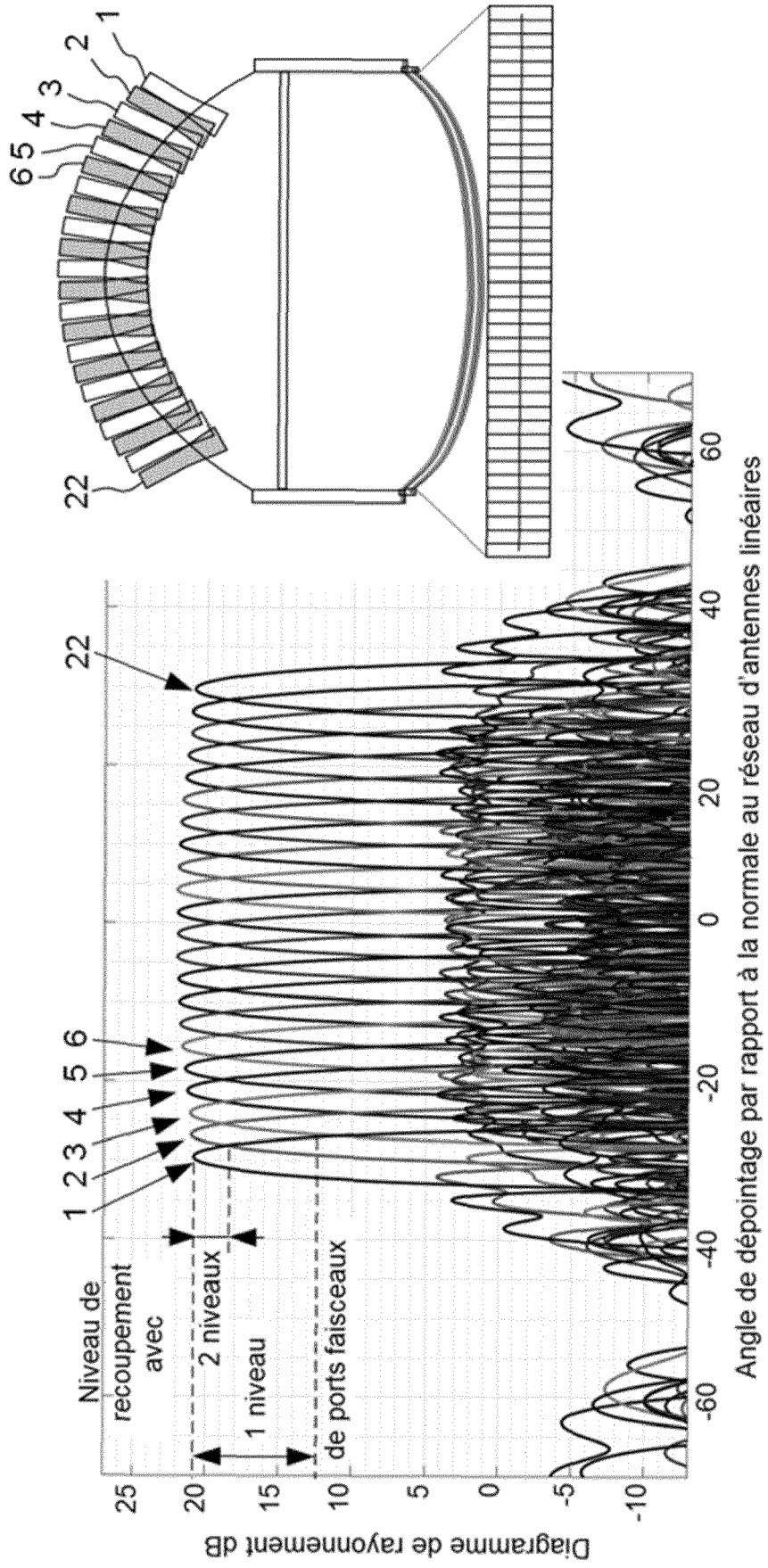


FIG. 8

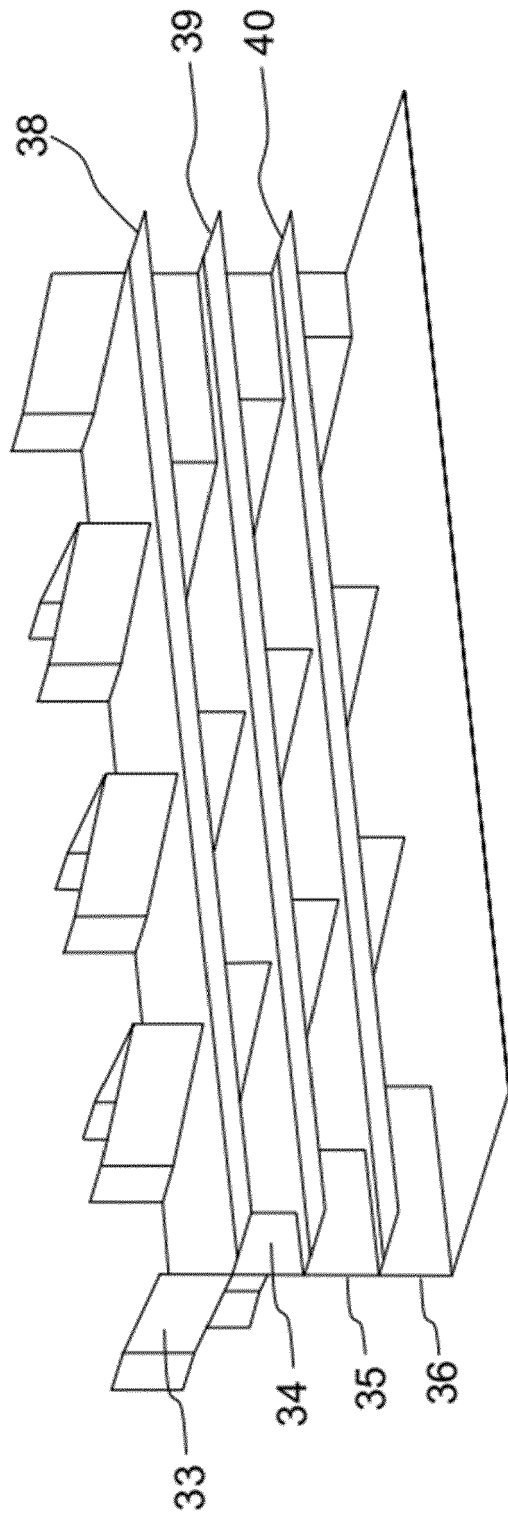


FIG. 9

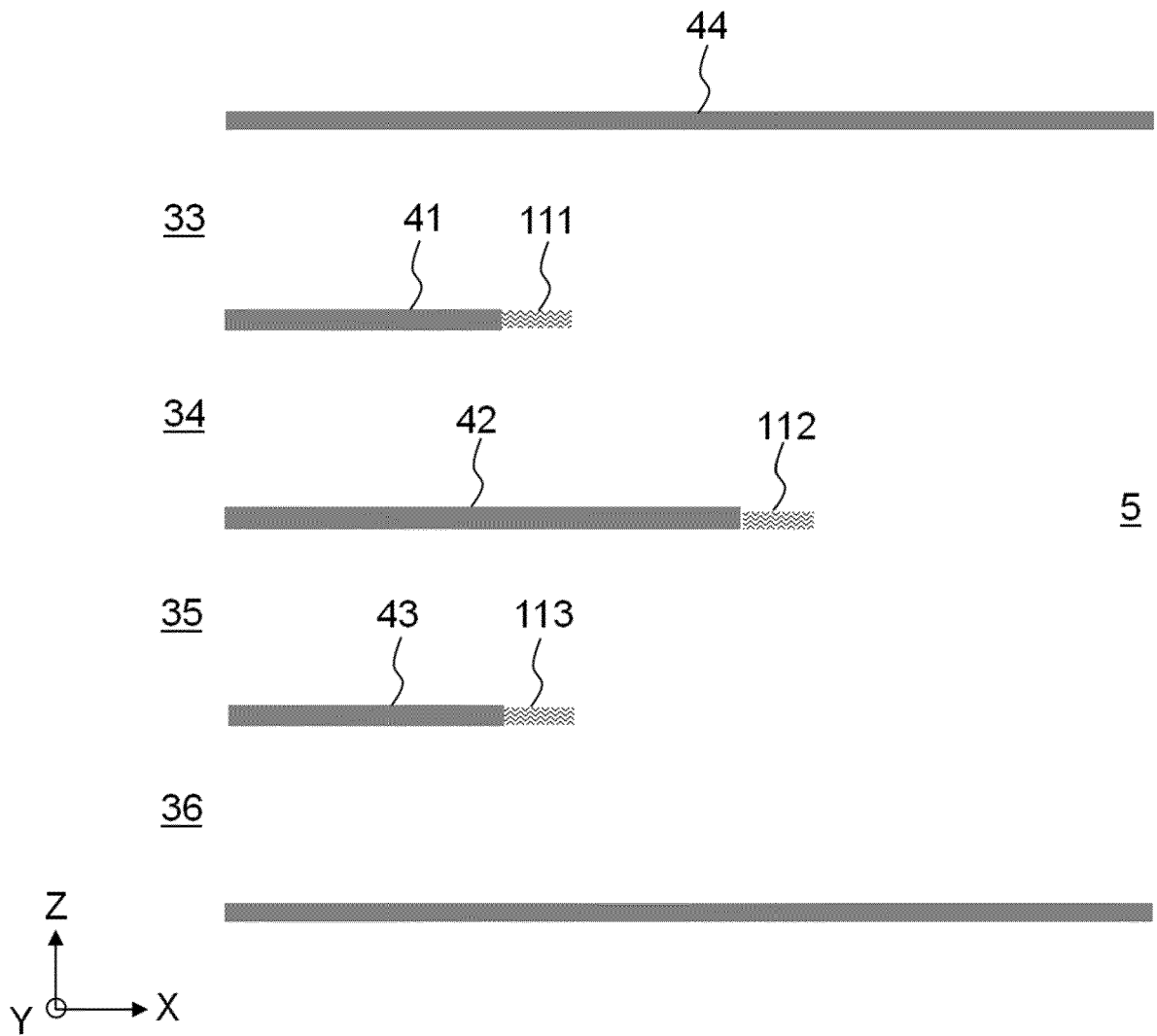


FIG. 10

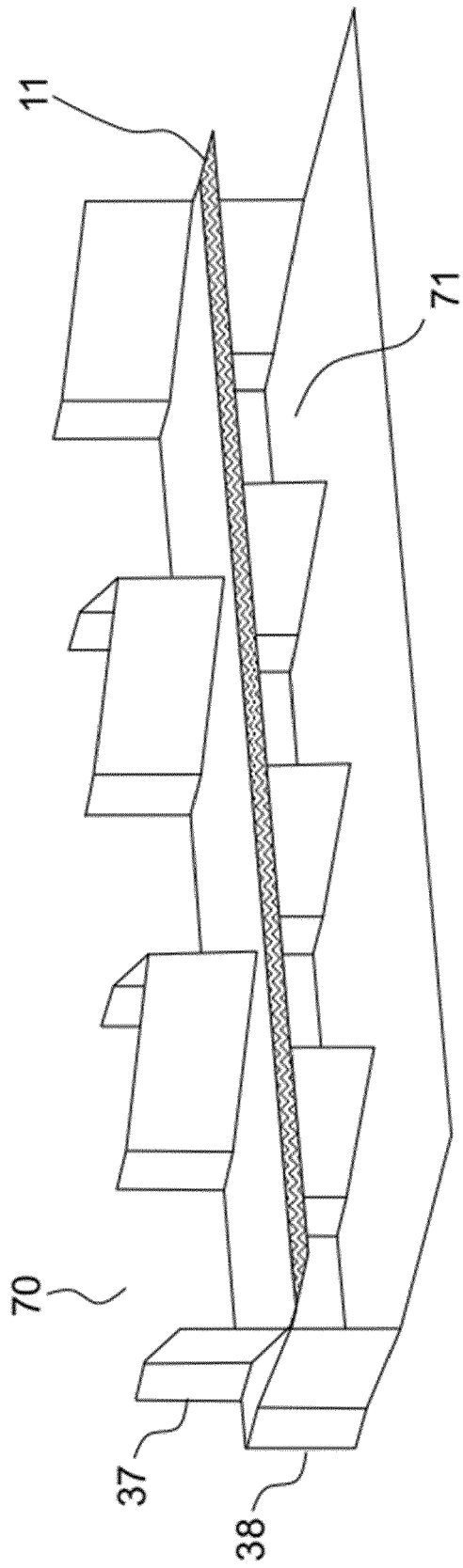


FIG. 11

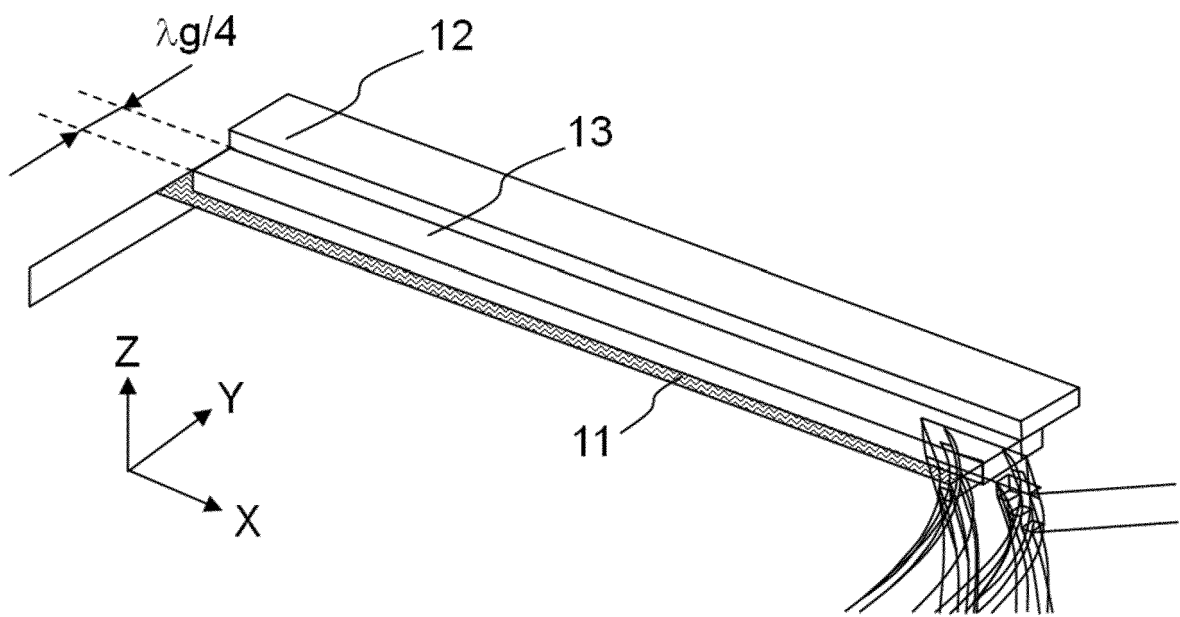


FIG. 12

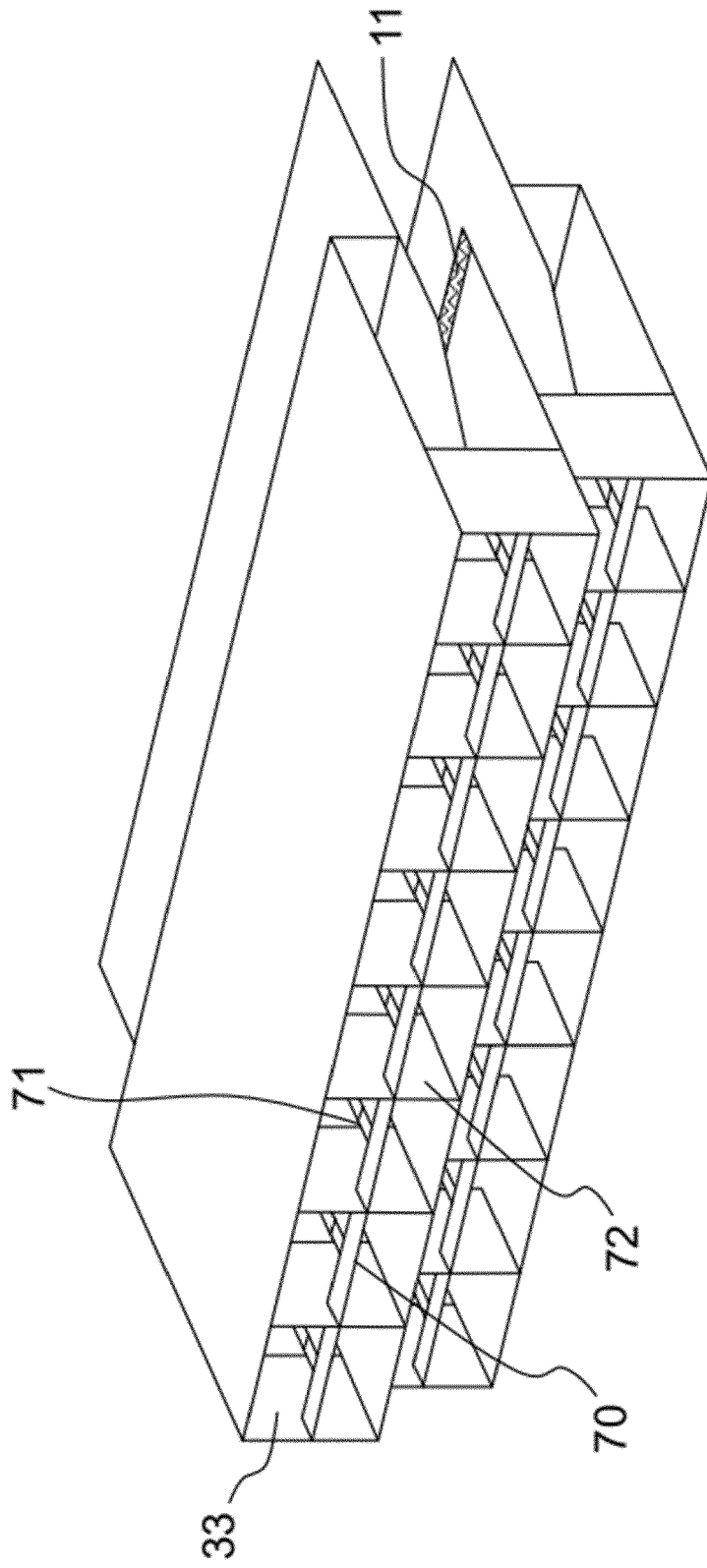


FIG. 13

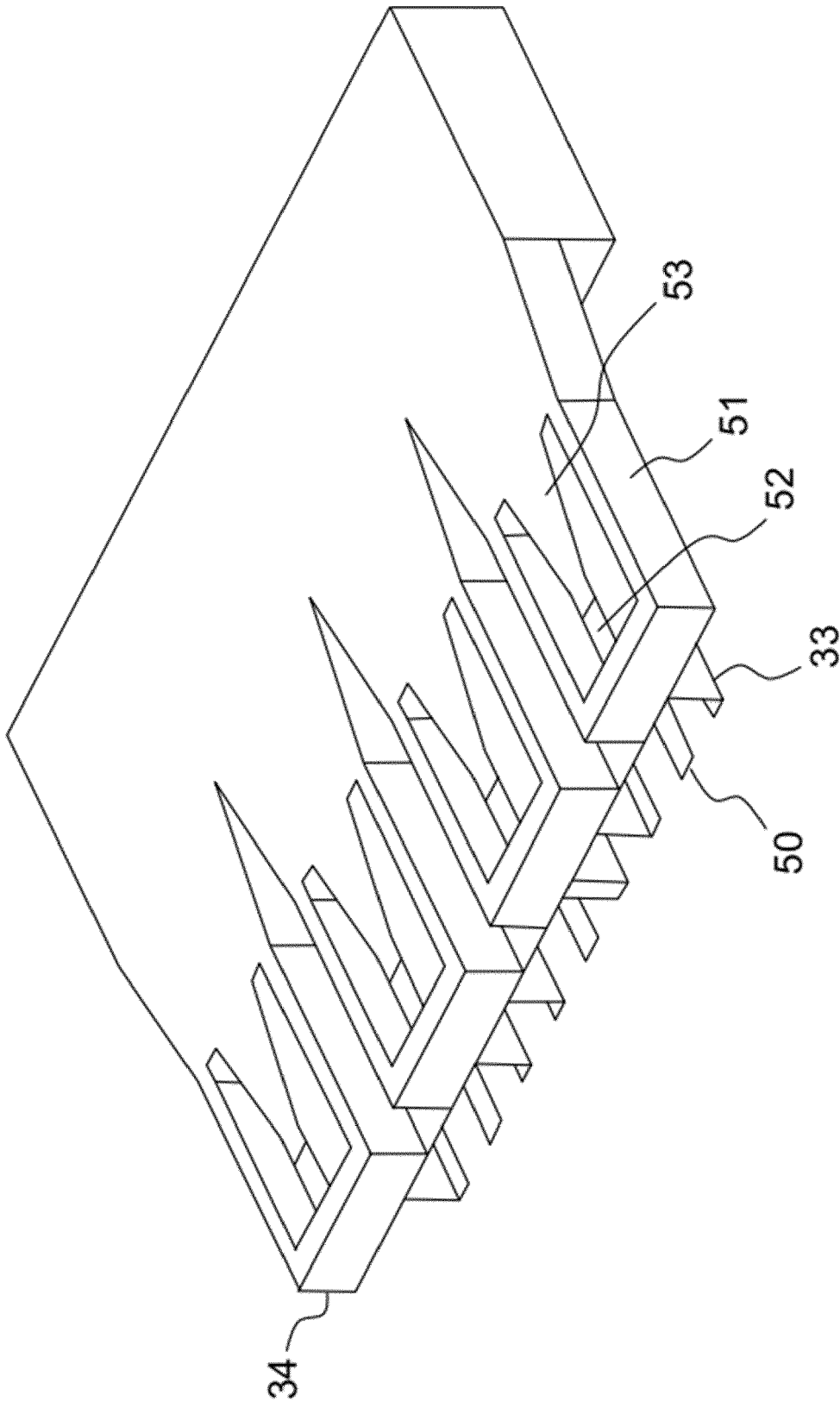


FIG. 14

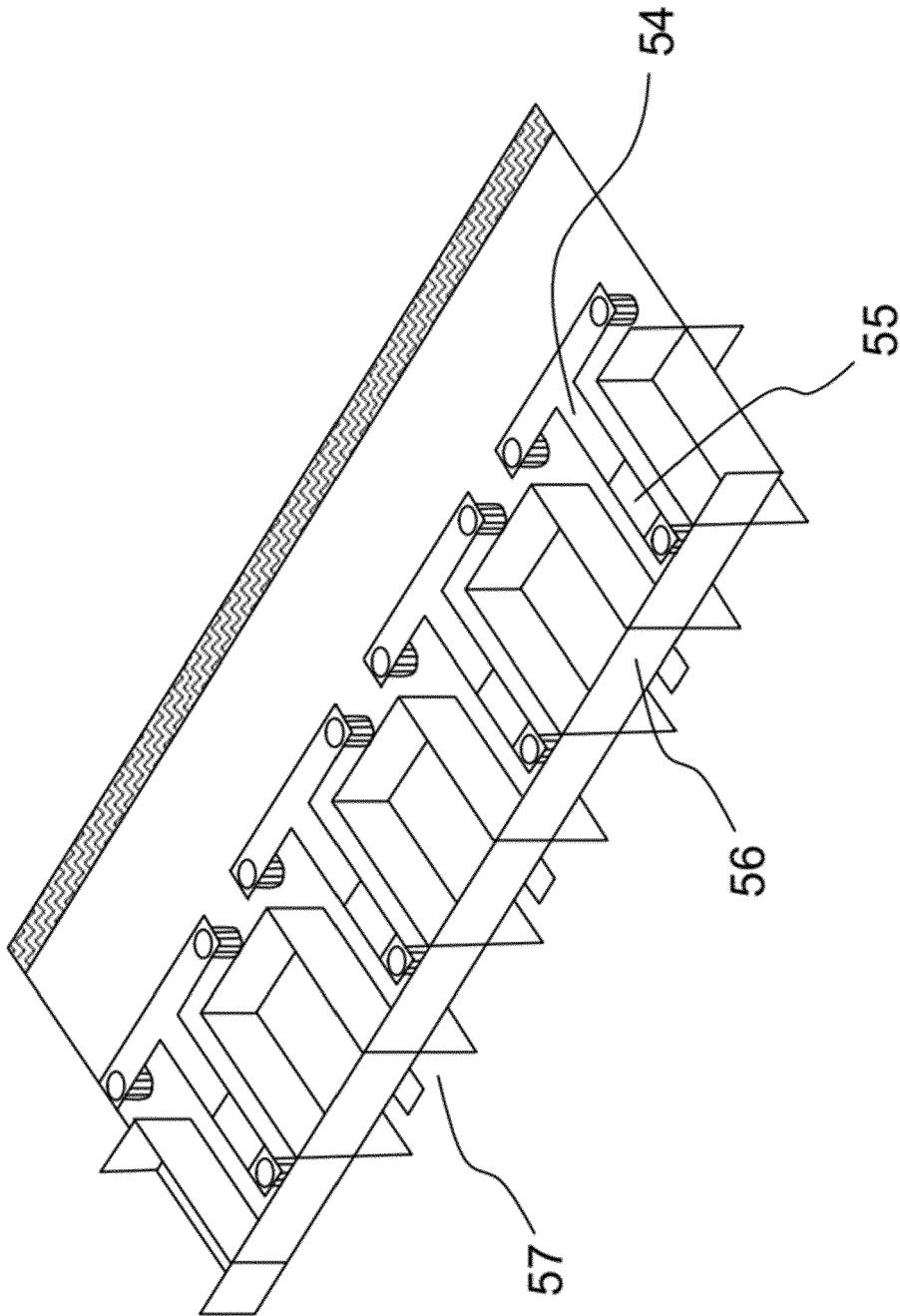


FIG. 15

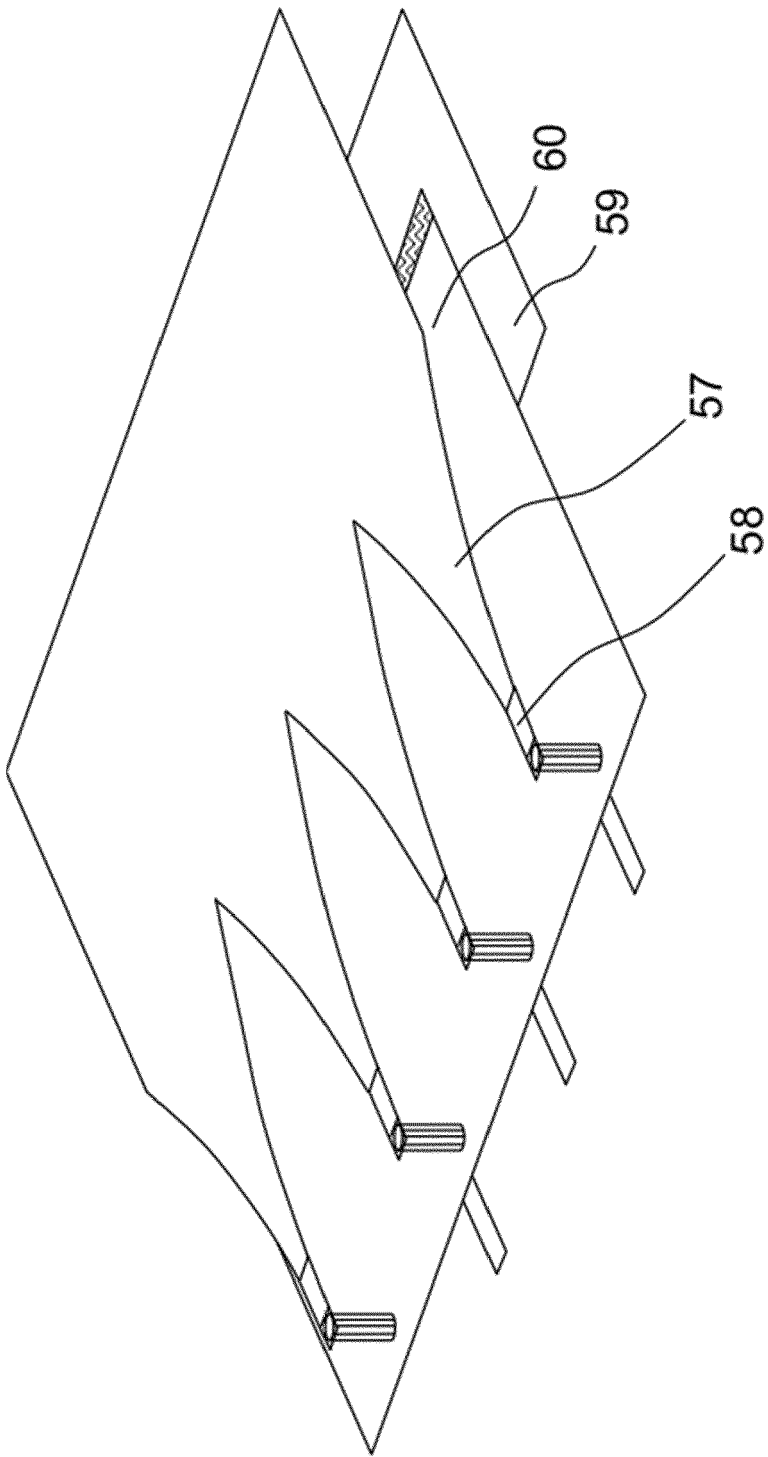


FIG. 16

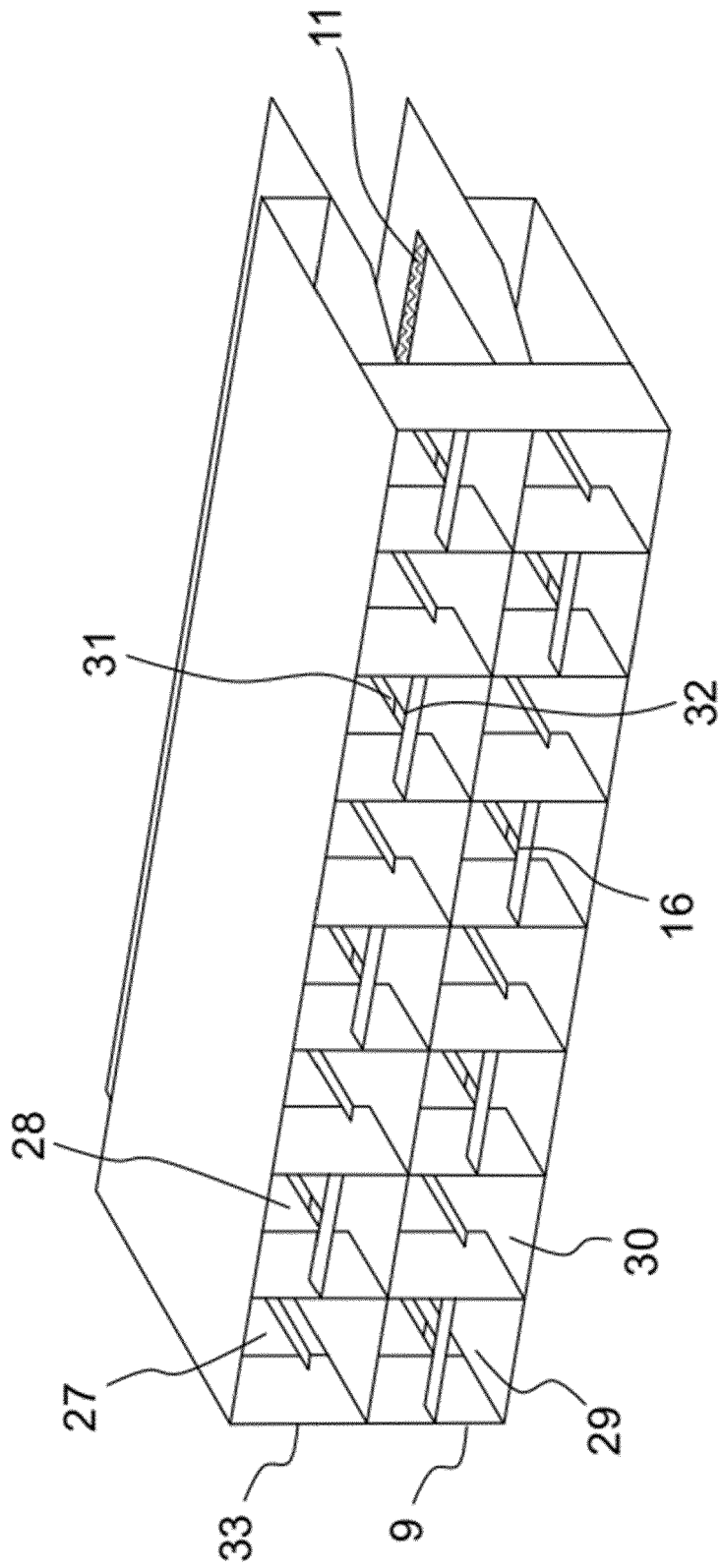


FIG. 17



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 23 15 3543

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	US 2016/285165 A1 (LEGAY HERVÉ [FR] ET AL) 29 septembre 2016 (2016-09-29) * alinéas [0037] - [0048]; figures 1-11 * -----	1-15	INV. H01Q3/26 H01Q25/00
A,D	WO 2013/110793 A1 (THALES SA [FR]; UNIV RENNES [FR]; CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]) 1 août 2013 (2013-08-01) * pages 1-32; figures 1-9 * -----	1-15	ADD. H01Q21/00
A	US 2012/092224 A1 (SAULEAU RONAN [FR] ET AL) 19 avril 2012 (2012-04-19) * alinéas [0094] - [0205]; figures 1-18 * -----	1-15	
A	US 7 724 197 B1 (HARDIE GEORGE S [US] ET AL) 25 mai 2010 (2010-05-25) * colonnes 1-8; figures 1-10 * -----	1-15	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			H01Q
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 12 mai 2023	Examineur El-Shaarawy, Heba
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

1
EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

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

EP 23 15 3543

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

12-05-2023

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2016285165 A1	29-09-2016	EP 3073569 A1	28-09-2016
		FR 3034262 A1	30-09-2016
		US 2016285165 A1	29-09-2016
WO 2013110793 A1	01-08-2013	CA 2862729 A1	01-08-2013
		EP 2807702 A1	03-12-2014
		ES 2628633 T3	03-08-2017
		FR 2986377 A1	02-08-2013
		JP 6127067 B2	10-05-2017
		JP 2015505229 A	16-02-2015
		US 2014354499 A1	04-12-2014
		WO 2013110793 A1	01-08-2013
US 2012092224 A1	19-04-2012	EP 2415120 A1	08-02-2012
		FR 2944153 A1	08-10-2010
		JP 5913092 B2	27-04-2016
		JP 2012523149 A	27-09-2012
		US 2012092224 A1	19-04-2012
WO 2010112443 A1	07-10-2010		
US 7724197 B1	25-05-2010	AUCUN	

EPC FORM P0460

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

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

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

Documents brevets cités dans la description

- WO 2013110793 A1 [0009]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **J.L. ALLEN.** A theoretical limitation on the formation of lossless multiple beam antennas. *IRE Trans.*, 1961, 350-352 [0010]
- **M. ETTORRE ; R. SAULEAU.** Reconfigurable Multi-Beam Pillbox Antenna for Millimeter Wave Automotive Radars. *Proc. ITST*, 2009, 87-90 [0012]