



(11) **EP 4 383 458 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
30.04.2025 Bulletin 2025/18

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
H01Q 1/52 (2006.01) H01Q 15/00 (2006.01)
H01Q 17/00 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **23214644.9**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
H01Q 1/525; H01Q 15/006; H01Q 17/00

(22) Date de dépôt: **06.12.2023**

(54) **SYSTÈME ANTENNAIRE AMÉLIORÉ ET DISPOSITIF DE DÉCOUPLAGE ASSOCIÉ**
VERBESSERTES ANTENNENSYSTEM UND ENTKOPPLUNGSVORRICHTUNG DAFÜR
IMPROVED ANTENNA SYSTEM AND ASSOCIATED DECOUPLING DEVICE

(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

(30) Priorité: **07.12.2022 FR 2212895**

(43) Date de publication de la demande:
12.06.2024 Bulletin 2024/24

(73) Titulaire: **THALES**
92190 Meudon (FR)

(72) Inventeurs:
• **MALLEGOL, Stéphane**
29238 Brest Cedex 3 (FR)
• **CHEVAL, Nicolas**
29238 Brest Cedex 3 (FR)

(74) Mandataire: **Lavoix**
2, place d'Estienne d'Orves
75441 Paris Cedex 09 (FR)

(56) Documents cités:
CN-A- 114 421 181 DE-A1- 10 034 547
US-A1- 2017 365 931 US-A1- 2019 165 468
US-A1- 2021 126 374 US-B2- 7 408 500

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 les systèmes antennes, et plus particulièrement, les systèmes antennes munis d'un dispositif de découplage électromagnétique - EM entre une antenne élémentaire et son environnement proche.

[0002] Un système antenne comporte un ou plusieurs ensembles antennes, chaque ensemble antenne comportant à son tour une ou plusieurs antennes élémentaires.

[0003] En émission ou en réception, un ensemble antenne est couplé électromagnétiquement avec son environnement, comme par exemple avec un autre ensemble antenne de l'antenne ou avec le plan métallique formant le plan de masse de l'antenne.

[0004] Deux sortes de couplage peuvent intervenir :

- un couplage conduit, qui est quantifiable via les paramètres S ou paramètres de répartition, au niveau des accès (connecteurs, par exemple) ;
- un couplage rayonné en champ proche / champ lointain.

[0005] Ces couplages peuvent être amplifiés par la proximité physique entre ensembles antennes, par leur proximité électromagnétique (présence d'un radôme commun, par exemple), par des discontinuités physiques et/ou électromagnétiques (effets de bord du plan métallique, par exemple), etc.

[0006] Ces couplages engendrent les effets indésirables comme :

- une remontée du phénomène de taux d'ondes stationnaires - TOS actif, qui correspond à la combinaison du TOS d'un ensemble antenne donné et des couplages de cet ensemble antenne avec les autres ensembles antennes de l'antenne (le TOS étant défini comme le module du coefficient de réflexion de l'ensemble antenne). Cela conduit à une possible altération des caractéristiques des chaînes radiofréquence - RF (génération d'instabilités, d'ondulations, ...), particulièrement en émission ;
- une altération de la qualité du diagramme de rayonnement complexe en champ lointain. Plus particulièrement, des effets ondulatoires prononcés sont susceptibles d'apparaître au niveau du lobe principal du diagramme de rayonnement de l'antenne élémentaire considérée avec comme impacts possibles : une dégradation du positionnement du lobe principal de rayonnement ; une altération de l'amplitude et de la phase du gain rayonné : plus forte dépendance en fréquence avec des creux de destructivité possibles, ainsi qu'une forte variation angulaire des diagrammes de gain dans un plan d'observation donné ; une altération de l'ouverture angulaire de lobe principal à -3 dB, dans la polarisation

principale de l'antenne considérée ; une remontée du niveau de gain rayonné en polarisation inverse ; cette remontée pouvant être localisée en fréquence ou non et dégradant de la pureté de polarisation ;

- un effet de désensibilisation de la chaîne de réception d'une antenne fonctionnant en réception par une antenne proche fonctionnant simultanément en émission.

[0007] Il est connu de prévoir un dispositif de découplage entre ou autour d'un ensemble antenne.

[0008] Selon une première approche, le plan métallique porte des corrugations afin de piéger les ondes électromagnétiques à la surface de ce dernier.

[0009] Habituellement, la géométrie des corrugations est basée sur celle des résonateurs quart d'onde : la profondeur des corrugations est d'environ $\lambda/4$; la largeur (W) des corrugations et le gap (g) entre deux corrugations successives vérifient la contrainte :

$$W + g < \lambda/2$$

où λ est la longueur d'onde correspondant à la fréquence d'opération souhaitée de l'antenne élémentaire.

[0010] Cette solution est donc efficace pour découpler les ensembles antennes à une fréquence donnée ou à proximité immédiate de celle-ci. Elle présente cependant les inconvénients suivants :

- elle fonctionne sur une bande de fréquences réduite autour de la fréquence de résonance (bande passante relative de la classe 15 % à 20 %) et hors de cette bande passante, les défauts liés au couplage restent présents ;
- l'épaisseur du plan métallique doit être supérieure à la profondeur des corrugations et l'espacement entre les ensembles antennes doit être suffisant pour pouvoir positionner un nombre de corrugations suffisant pour être efficace. Or ceci est parfois difficile au vu des contraintes d'intégration sur porteur ;
- pour des fréquences d'opération hautes, la réponse de l'antenne est sensible à la précision d'usinage mécanique des corrugations ;
- pour des raisons de tenue mécanique (pression, par exemple), il se peut également qu'il faille remplir les corrugations par une mousse diélectrique (ou par un autre matériau (magnéto-diélectrique), ou bien par le matériau constitutif du radôme en l'absence de mousse diélectrique (par exemple, lorsque le radôme est en contact direct du plan de masse). Dans ce cas, des contraintes d'usinage supplémentaires apparaissent, avec les coûts de réalisation associés.

[0011] Selon une seconde approche, on ajoute sur le plan métallique, un absorbant électromagnétique - EM.

[0012] Il peut s'agir d'un matériau volumique, par exemple, à base d'un composite matériau magnétique-

résine ou de mousse diélectrique poreuse chargée carbone. Cette solution peut présenter l'intérêt d'une grande efficacité dans la diminution des couplages entre ensembles antennaires, sur un large domaine d'incidence. Mais elle présente les inconvénients suivants :

- pour des applications industrielles, ces matériaux sont des produits commerciaux. Il n'existe alors pas de degré de liberté (constituants internes de l'absorbant, taux de charge, ...) pour accorder les propriétés de l'absorbant EM au besoin ;
- il est nécessaire que le matériau présente une épaisseur suffisante pour une forte efficacité de découplage. L'épaisseur de l'absorbant requise doit, classiquement, être supérieure ou égale au quart de longueur d'onde dans l'absorbant EM, à la fréquence minimale d'opération. Il s'en suit un absorbant EM de forte épaisseur, ce qui s'oppose aux contraintes d'intégration sur porteur, où une compacité d'épaisseur est recherchée ;
- les caractéristiques électromagnétiques (permittivité et perméabilité relatives complexes, notamment) de ces absorbants EM ne sont, habituellement, pas totalement maîtrisées de par leur procédé de réalisation et des inhomogénéités prononcées existent fréquemment entre lots d'absorbants EM, voire au sein d'un même lot d'absorbants EM. Ceci est antagoniste de performances système reproductibles ;
- l'absorbant EM doit être protégé de l'environnement extérieur, par un radôme compatible. Or un radôme participe au couplage que l'on cherche à atténuer. Il dégrade également la compacité en épaisseur recherchée ;
- la faible tenue en pression (notamment pour des matériaux souples) et la masse élevée du fait d'une forte densité volumique (par exemple, typiquement supérieure ou égale à 200 kg/m³ pour les mousses diélectriques imprégnées carbone) sont pénalisantes.

[0013] A la place d'un matériau volumique, un absorbant EM structuré 3D peut être utilisé, comme celui présenté dans l'article X. Lleshi, T. Q. Van Hoang, B. Loiseaux and D. Lippens, "Design and Full Characterization of a 3-D-Printed Hyperbolic Pyramidal Wideband Microwave Absorber," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 20, no. 1, pp. 28-32, Jan. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2020.3037718.

[0014] Il est obtenu par périodisation de cellules unitaires. Une cellule est constituée d'un empilement pyramidal de couches métal/diélectrique. Un absorbant EM est utilisable en bandes X et Ku, avec une absorptivité à incidence normale supérieure à 0,95 sur 8,2-17,2 GHz (l'absorptivité se dégradant avec l'incidence).

[0015] Une telle structure est particulièrement difficile à réaliser puisqu'il faut maîtriser une double impression métal-diélectrique. Les dispersions de fabrication impac-

tent d'autant plus les performances RF de l'absorbant que la fréquence de travail sera élevée.

[0016] L'article de Ren J et al., "3D-Printed Low-Cost Dielectric-Resonator-Based Ultra-Broadband Microwave Absorber Using Carbon-Loaded Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymer", Materials (Basel), 2018 Jul 20, 11(7), 1249, décrit également un absorbant EM structuré 3D obtenu par périodisation de cellules unitaires. Chaque cellule est constituée d'une embase qui est surmontée d'un plot cylindrique plein.

[0017] Une telle structure est plus facile à réaliser que la précédente, mais la gamme de fréquences sur laquelle l'absorptivité est élevée est réduite.

[0018] Par ailleurs, le document CN 114 421 181 A décrit un matériau de construction adapté pour absorber les ondes électromagnétiques ambiante. Ce matériau est formé d'une plaque plane d'absorption des ondes électromagnétiques et d'une pluralité d'unités d'absorption des ondes électromagnétiques formant un motif. Chaque unité présente au moins une cavité, ouverte par au-dessus et délimitée latéralement par une paroi.

[0019] On connaît également le document US 2017/365931 A1 qui divulgue des surfaces à haute impédance et le document US 7 408 500 B2 qui divulgue une antenne radar pour véhicules automobiles.

[0020] Le but de la présente invention est de résoudre ces problèmes en proposant un dispositif de découplage du type absorbant EM structuré 3D alternatif ayant une efficacité accrue sur une plus large bande de fréquences.

[0021] Pour cela l'invention a pour objet un système antenne selon les revendications annexées.

[0022] L'invention et ses avantages seront mieux compris à la lecture de la description détaillée qui va suivre d'un mode de réalisation particulier, donné uniquement à titre d'exemple non limitatif, cette description étant faite en se référant aux dessins annexés sur lesquels :

La figure 1 représente, en vue de dessus et en coupe axiale, un premier mode de réalisation d'une antenne ;

La figure 2 est une représentation en perspective du dispositif de découplage de l'antenne de la figure 1 ; La figure 3 représente différentes alternatives de la forme des cellules d'un dispositif de découplage ;

La figure 4 représente, en vue de dessus et en coupe axiale, un second mode de réalisation d'une antenne ;

La figure 5 représente les gains en fonction du gisement d'une antenne selon l'état de la technique et d'une antenne selon le second mode de réalisation, pour deux fréquences différentes de la plage de fréquence ; et,

La figure 6 est une représentation en perspective du dispositif de découplage de l'antenne selon l'invention.

[0023] L'objet de l'invention concerne un dispositif de

découplage électromagnétique - EM amélioré, disposé entre un ou plusieurs ensemble(s) antenne(s) d'un système antenne, permettant de s'affranchir des défauts mentionnés ci-dessus, en supprimant, ou tout au moins en réduisant fortement, les couplages conduit et/ou rayonné.

[0024] Le dispositif de découplage est composé d'un absorbant électromagnétique structuré tri-dimensionnellement de manière à former un motif évidé adapté à l'absorption des ondes EM quel que soit leur angle d'incidence.

[0025] La figure 1 représente, de manière générale, un premier mode de réalisation d'un système antenne.

[0026] Dans ce mode de réalisation, le système antenne 100 comporte une pluralité d'antennes élémentaires. Chaque antenne élémentaire est une antenne cornet. En variante, chaque antenne élémentaire est une antenne d'un autre type comme par exemple une antenne Vivaldi ou une antenne planaire à large bande de fréquence (spirale, sinusoïdale, log-périodique, etc.).

[0027] Le cornet de chaque antenne élémentaire est réalisé dans l'épaisseur du plan métallique 105 formant le plan de masse de l'antenne 100.

[0028] Dans le mode de réalisation représenté, les antennes élémentaires sont disposées selon trois rangées. Elles portent respectivement les références 111, 112, 113 et 114 pour la première rangée, 123, 124 et 125 pour la deuxième rangée, et 131, 132, 133, 134 et 135 pour la troisième rangée.

[0029] Les antennes élémentaires des première et deuxième rangées forment un premier ensemble antenne 101 et les antennes élémentaires de la troisième rangée forment un second ensemble antenne 102.

[0030] Le système antenne 100 comporte un dispositif de découplage 15, qui est, dans ce mode de réalisation, positionné, entre les premier et second ensembles antennaires, sur une face avant du plan métallique 105, cette face avant étant orientée vers le demi-espace d'émission/réception de l'antenne (i.e. selon la direction normale $\vec{n}$).

[0031] Le dispositif de découplage a pour fonction d'atténuer le couplage principal, qui, dans ce premier mode de réalisation, est le couplage entre les premier et second ensembles antennaires.

[0032] Le dispositif de découplage est de préférence disposé de manière à être positionné sensiblement affleurant au plan des ouvertures des cornets.

[0033] Le dispositif de découplage 15 est constitué d'un absorbant électromagnétique structuré tri-dimensionnellement (« absorbant EM 3D » dans ce qui suit).

[0034] Avantageusement, pour une protection contre les agressions extérieures, le système antenne 100 comporte un ou plusieurs radôme(s).

[0035] Sur la figure 1, il s'agit d'un radôme 140 commun aux différents éléments antennaires, recouvrant l'intégralité de la face avant du plan métallique 105, non seulement les différents ensembles antennaires 101 et 102, mais également le dispositif de décou-

plage 15.

[0036] En variante, une partie seulement de la face avant du plan métallique est protégée par un ou plusieurs radômes, par exemple un radôme recouvrant chaque ensemble antenne. Dans ce cas, le dispositif de découplage est exposé à l'environnement.

[0037] Avantageusement, comme représenté sur la figure 1, la face avant du plan métallique 105 est munie d'un évidement 107 adapté au dispositif de découplage 15, la profondeur de l'évidement étant sensiblement égale à la hauteur du dispositif de découplage.

[0038] En variante, le dispositif de découplage est intégré au radôme commun. Il est alors portée par une face arrière du radôme destinée à venir en vis-à-vis de la face avant du plan métallique.

[0039] La figure 2 représente un mode de réalisation possible du dispositif de découplage du système antenne de la figure 1. Ce mode de réalisation ne fait pas partie de l'invention.

[0040] Le dispositif de découplage 150 est constitué d'une pluralité de cellules 152 formant un réseau.

[0041] Par exemple, une cellule est de forme parallélépipédique, de préférence rectangle. Les cellules sont reproduites spatialement de manière à constituer un réseau matriciel de rangs et de lignes de cellules.

[0042] Chaque cellule comporte une embase 154 et, sur cette embase, une paroi relevée 156 conformée selon un motif évidé.

[0043] Mécaniquement, une embase 154 sert de support à une paroi relevée 156, et les différentes embases permettent le montage sur le plan métallique du dispositif de découplage, par exemple par collage, ou par vissage, ou autre.

[0044] Electromagnétiquement, une embase est avantageusement réalisée en un matériau absorbant EM, pour renforcer l'effet global du dispositif d'absorption.

[0045] Les motifs que forme la paroi relevée des différentes cellules sont de préférence identiques.

[0046] Dans le mode de réalisation de la figure 2, la paroi relevée 1156 comporte un cadre extérieur 157, dont les côtés sont disposés parallèlement aux bords de l'embase 154, et un cadre intérieur 158, qui est tourné de 45° par rapport au cadre extérieur 157 et imbriqué à l'intérieur du cadre extérieur 157.

[0047] Les épaisseurs des cadres extérieur et intérieur peuvent être similaires ou différentes.

[0048] Dans le présent document, des valeurs numériques sont données afin de mieux comprendre l'invention. Cependant, ces valeurs dépendent *in fine* des propriétés électromagnétiques intrinsèques du matériau effectivement utilisé pour réaliser l'absorbant électromagnétique.

[0049] Les dimensions caractéristiques d'une cellule sont par exemple les suivantes : la longueur L_0 d'un côté de l'embase carrée est d'environ $0,5\lambda_0$, avec λ_0 longueur d'onde dans le vide pour la fréquence minimum à partir de laquelle l'absorptivité de l'absorbant EM est supéri-

eure ou égale à 0,9 ; l'épaisseur e_0 de l'embase est d'environ $0,01\lambda_0$ (il s'agit d'un degré de liberté pour augmenter l'absorptivité, mais une épaisseur d'embase trop élevée réduira, à un moment, l'absorptivité puisque l'on tendra vers une cellule à motif plein) ; la longueur L_1 de la paroi relevée est légèrement plus faible que celle de l'embase ($L_1 \approx 0,425\lambda_0$) ; l'épaisseur e_1 de la paroi relevée est d'environ $0,1\lambda_0$ (sachant que l'on cherche à dimensionner l'absorbant pour qu'il vienne affleurer la surface supérieure de l'élément rayonnant lorsqu'il est positionné autour de celui-ci) ; la largeur l_1 de la paroi du cadre extérieur carré est d'environ $0,0425\lambda_0$; et la largeur l_2 de la paroi du cadre intérieur carré est d'environ $0,0275\lambda_0$.

[0050] L'embase et la paroi relevée d'une cellule permettent d'absorber les ondes EM. En particulier l'imbrication de plusieurs cadres (deux ou plus) permet d'améliorer l'absorption, notamment en piégeant les ondes EM et ceci, au premier ordre, quel que soit le plan d'incidence et l'angle d'incidence dans ce plan d'incidence (évalué par rapport à la direction normale $\vec{n}$) (il y a en fait une dégradation de l'absorptivité avec l'incidence).

[0051] Cet effet est principalement lié aux absorptions multiples de l'onde EM (et de ses réflexions multiples éventuelles) interagissant avec les différentes parois, suivant son angle d'incidence par rapport à la normale au plan métallique.

[0052] De plus, il a été constaté par différents essais que cette forme permet d'élargir la bande de fréquence sur laquelle il y a une absorption efficace.

[0053] Les matériaux utilisés pour l'absorbant EM 3D peuvent être des thermoplastiques avec adjuvant, de préférence avec des propriétés électriques sélectionnées de manière adaptée, notamment des thermoplastiques à dissipation statique - ESD (« electrostatic dissipative thermoplastics »), comme par exemple le « ABS ESD », le « PEEK ESD », le « PEKK ESD », le « PEI ESD », le « PLA ESD »,... Ce sont des ESD avec des propriétés particulières. Ce sont des thermoplastiques suffisamment chargés en carbone pour engendrer une résistivité diélectrique élevée, mais insuffisamment chargés en carbone pour ne pas devenir conducteurs. Dans la présente invention, c'est cette résistivité élevée et donc les pertes diélectriques correspondantes qui est mise à profit. Ces thermoplastiques se présentent souvent sous forme de fils pour l'impression 3D.

[0054] En variante, des matériaux diélectriques ou magnéto-diélectriques pourraient être utilisés.

[0055] Pour structurer l'absorbant EM 3D, il est également possible d'associer différents matériaux, comme par exemple un motif imbriqué en thermoplastique ESD et une embase avec un matériau magnéto-diélectrique.

[0056] La fabrication du dispositif de découplage peut se faire directement par impression 3D notamment de co-impression de deux matériaux lorsque l'on réalise un dispositif de découplage intégré à un radôme. Dans ce dernier cas, on utilise par exemple, un thermoplastique pour le radôme et un thermoplastique ESD pour l'absor-

bant EM 3D.

[0057] Le plan métallique (ou le radôme) est usiné de manière à le munir de l'évidement 107 de réception du dispositif de découplage 150. Pour l'assemblage, l'absorbant EM 3D est par exemple collé sur le fond de cet évidement. Le fait de ménager un évidement dans le plan métallique permet de réduire d'avantage l'épaisseur du système antenne, ainsi que sa masse.

[0058] Pour des contraintes de tenue en environnement (pression, humidité, ...), les parties évidées de l'absorbant EM 3D sont avantageusement remplies d'un matériau complémentaire. Par exemple, il est possible d'utiliser un thermoplastique ESD pour la fonction d'absorption EM et un thermoplastique compatible, pour sécuriser la tenue en environnement. Comme exemples de thermoplastique compatible on peut citer l'« ABS », le « PLA », le « PA ».

[0059] Le matériau complémentaire étant léger, cet ajout présente l'intérêt de ne pas augmenter significativement la masse du dispositif de découplage, tout en offrant un degré de liberté supplémentaire pour accorder l'absorptivité suivant la fréquence de travail, ainsi que pour améliorer l'effet de piégeage des ondes EM au sein de l'absorbant EM 3D.

[0060] Le dimensionnement des cellules (notamment forme des motifs, dimensions des motifs dans les trois directions, épaisseur de l'embase et distance entre cellules) est avantageusement optimisé par simulation EM 3D avec, comme critère de convergence, une absorptivité A préférentiellement supérieure ou égale à 0,9 dans la bande de fréquence de travail souhaitée ($A = 1 - |S_{11}|^2$, avec $|S_{11}|$ la réflectivité simulée au niveau d'un plan de référence donné), qui correspond à une réflectivité inférieure ou égale à -10 dB.

[0061] Dans le mode de réalisation de la figure 2 (motif constitué de deux cadres carrés à 45° l'un de l'autre), il est possible de pré-dimensionner d'abord les côtés des cadres connaissant les propriétés électromagnétiques effectives du matériau constitutif et d'optimiser ensuite les dimensions de l'absorbant EM 3D pour obtenir l'absorptivité désirée.

[0062] La figure 3 représente différentes modes de réalisation alternatifs du dispositif de découplage d'un système antenne. Ces différents modes de réalisation diffèrent uniquement dans la forme du motif des cellules de l'absorbant EM 3D du dispositif d'absorption. Ces différents modes de réalisation ne font pas partie de l'invention.

[0063] Sur la figure 3A, la cellule 52 comporte une embase 54 et une paroi relevée 56. Cette dernière est composée d'un cadre extérieur 57 de forme un carré, dont les côtés sont parallèles aux bords de l'embase, et d'un cadre intérieur 58 de forme également carré, reçu à l'intérieur du cadre extérieur, et dont les côtes sont parallèles aux bords de l'embase.

[0064] Sur la figure 3B, la cellule 152 comporte une embase 154 et une paroi relevée 156. Cette dernière est composée d'un cadre extérieur 157 carré, dont les côtés

sont parallèles aux bords de l'embase, et d'un cadre intérieur 158 également carré, reçu à l'intérieur du cadre extérieur, et dont les côtes font un angle de 45° par rapport aux bords de l'embase. Les coins du cadre intérieur sont confondus avec le cadre extérieur. C'est le mode de réalisation de la figure 2.

[0065] Sur la figure 3C, la cellule 252 comporte une embase 254 et une paroi relevée 256. Cette dernière est composée d'un cadre extérieur 257 carré, dont les côtés font un angle de 45° par rapport aux bords de l'embase, et d'un cadre intérieur 258 également carré, reçu à l'intérieur du cadre extérieur, et dont les côtes sont parallèles aux bords de l'embase.

[0066] Sur la figure 3D, la cellule 352 comporte une embase 354 et une paroi relevée 356. Cette dernière est composée d'un cadre extérieur 357 carré, dont les côtés font un angle de 45° par rapport aux bords de l'embase, et d'un cadre intérieur 258 également carré, reçu à l'intérieur du cadre extérieur, et dont les côtes font un angle de 45° par rapport aux bords de l'embase.

[0067] Sur la figure 3E, la cellule 452 comporte une embase 454 et une paroi relevée 456. Cette dernière est composée d'un cadre extérieur 457 en anneau circulaire, et d'un cadre intérieur 458 également en anneau circulaire, reçu à l'intérieur du cadre extérieur.

[0068] Sur la figure 3F, la cellule 552 comporte une embase 554 et une paroi relevée, qui est composée d'un seul cadre 557, en l'occurrence de forme polygonale, notamment hexagonale.

[0069] Sur la figure 3G, la cellule 652 comporte une embase 654 et une paroi relevée 656. Cette dernière est composée d'un cadre extérieur 657 en hexagone, et d'un cadre intérieur 658 également en hexagone, reçu à l'intérieur du cadre extérieur et orienté comme le cadre extérieur.

[0070] La figure 4 représente un second mode de réalisation d'un système antenne.

[0071] Dans ce second mode de réalisation, le système antenne 200 comporte une antenne élémentaire 211, qui est par exemple une antenne planaire à large bande de fréquence. Il s'agit, dans ce second mode de réalisation, d'une antenne sinueuse à double polarisation, formant un disque de rayon R et d'épaisseur E, disposée sur le plan métallique 205 de l'antenne 200.

[0072] Le plan métallique 205 est ici une plaque de faible épaisseur par rapport à celle de l'élément rayonnant.

[0073] Le système antenne 200 comporte un dispositif de découplage 25. Il est positionné sur le plan métallique 205 de manière à entourer l'antenne élémentaire 211. Avantagusement, la face avant du dispositif de découplage affleure le plan antenne.

[0074] Il est par exemple fixé sur le plan métallique 205 au moyen de vis 272 passant dans des trous traversant 271.

[0075] Le dispositif de découplage 25 a pour fonction d'atténuer le couplage principal, qui est, dans ce second mode de réalisation, le couplage entre l'élément rayonnant

et le plan métallique 205. En effet, lorsque les ensembles antennaires sont suffisamment séparés physiquement les uns des autres, le couplage rayonné qui peut exister entre eux est réduit et le couplage principal est celui entre un ensemble antenne donné et son environnement physique proche (plan métallique et/ou radôme). Ainsi, en variante, le système antenne pourrait comporter une pluralité d'antennes élémentaires, mais qui seraient suffisamment distantes les uns des autres pour que le couplage principal soit celui entre une antenne élémentaire et le plan métallique. On peut dire que ce second mode de réalisation est relatif à un ou plusieurs élément(s) rayonnant(s) isolés les uns des autres.

[0076] Le dispositif de découplage 25 est composé d'un absorbant électromagnétique structuré tridimensionnellement à motif évidé. Par exemple, le dispositif de découplage 25 est structuré conformément au mode de réalisation A de la figure 3, à un facteur d'échelle près, ce facteur d'échelle étant une fonction de la gamme de fréquence de travail prévue pour le fonctionnement du système antenne 200. En variante, le dispositif de découplage 25 est structuré selon un autre mode de réalisation, l'un quelconque des modes de réalisation de la figure 3 ou le mode de réalisation de la figure 6.

[0077] Avantagusement, pour une protection contre les agressions extérieures, le système antenne 200 comporte un ou plusieurs radôme(s) (non représenté sur la figure 4).

[0078] La figure 5 illustre la réponse RF mesurée sur un ensemble antenne à large bande de fréquence, au moyen de deux graphes, chaque graphe donnant le gain (exprimé en décibel isotropique - dBi) rayonné suivant l'angle de gisement (exprimé en degré - Deg), à angle de site nul et en polarisation principale.

[0079] Sur chacun de ces graphes, la courbe C1 correspond au dispositif antenne de la figure 1 ou à celui de la figure 4 mais sans dispositif de découplage et la courbe C2 correspond au dispositif antenne de la figure 1 ou à celui de la figure 4 avec dispositif de découplage.

[0080] Par exemple, le premier graphe correspond à une fréquence F1 proche de la fréquence FMIN et le second graphe correspond à une fréquence F2 proche de la fréquence FMAX.

[0081] Les fréquences FMIN et FMAX sont les bornes de la bande de fréquences utile de l'antenne sur laquelle une absorptivité élevée (par exemple supérieure à 0,9) est obtenue.

[0082] L'homme du métier constatera une amélioration du gain avec la mise en oeuvre de l'invention, ainsi qu'une stabilisation de celui-ci en fonction de l'angle de gisement (suppression de l'effet d'ondulation du gain).

[0083] De plus, ces essais ont permis de prouver l'efficacité de la solution sur une large gamme de fréquences. Par rapport à l'état de la technique présenté dans l'article de Ren J. et al., dont la bande de fréquence utile présente un rapport FMAX/FMIN de 3, la solution pro-

posée ici autorise une absorptivité de 0,9 au moins sur une bande utile très large, typiquement avec un rapport FMAX/FMIN de 10.

[0084] La figure 6 représente un mode de réalisation, conforme à l'invention, d'un dispositif de découplage, que ce soit le dispositif 15 du système antenne de la figure 1 ou le dispositif 25 du système antenne de la figure 4.

[0085] Sur la figure 6, le dispositif de découplage 750 est constitué d'une pluralité de cellules 752 formant un réseau.

[0086] Par exemple, une cellule est de forme parallélogramme, de préférence rectangle. Les cellules sont reproduites spatialement de manière à constituer un réseau matriciel de rangs et de lignes de cellules.

[0087] Chaque cellule comporte une embase 754 et, sur cette embase, une paroi relevée 756 conformée selon un motif évidé.

[0088] Les motifs que forme la paroi relevée des différentes cellules sont de préférence identiques.

[0089] Dans ce mode de réalisation, une paroi relevée 756 est composée d'un cadre extérieur 757 et d'un cadre intérieur 758.

[0090] Le cadre extérieur 757 est muni, sur sa périphérie, d'au moins un ergot faisant saillie radialement vers l'extérieur du cadre extérieur 757, c'est-à-dire vers les cellules voisines.

[0091] Par exemple, le cadre extérieur 757 est de forme carrée.

[0092] Chacun des sommets du cadre extérieur 757 est muni d'un ergot de coin 755. Un ergot de coin vient en contact d'un ou plusieurs ergots de coin portés par les cadres extérieurs de cellules adjacentes à la cellule considérée.

[0093] En variante ou en combinaison, chacun des côtés du cadre extérieur 757 est muni d'un ergot central 755. Un ergot central vient en contact d'un ergot central porté par le cadre extérieur de la cellule adjacente en vis-à-vis à la cellule considérée de manière à former une liaison entre ces cadres extérieurs de cellules voisines.

[0094] En variante ou en combinaison des variantes précédentes, le cadre intérieur 758 est également muni d'au moins un ergot faisant saillie radialement vers l'extérieur du cadre intérieur 758 vers le cadre voisin, c'est-à-dire vers le cadre extérieur 757 de la cellule considérée.

[0095] Par exemple, sur la figure 6, le cadre intérieur 758 est de forme carrée.

[0096] Chacun des sommets du cadre intérieur 757 est muni d'un ergot de coin 759. Un ergot de coin vient en contact du cadre extérieur, par exemple du coin du cadre extérieur.

[0097] En variante ou en combinaison, le cadre intérieur pourrait porter des ergots centraux formant autant de liaisons avec le cadre extérieur de la même cellule.

[0098] Les ergots des différentes cellules permettent de fermer les canaux entre parois en vis-à-vis, comme par exemple le canal 760 entre deux rangs de cellules, le canal 761 entre deux lignes de cellules, ou encore

comme le canal 762 entre la paroi intérieure du cadre extérieur 757 et la paroi extérieure du cadre intérieur 758 de la même cellule.

[0099] Cela permet de piéger les ondes électromagnétiques, notamment les ondes rampantes, qui risqueraient sinon de se propager le long de tels canaux.

[0100] En fait, le niveau de piégeage des ondes rampantes est amélioré en augmentant la hauteur des cadres au-dessus de l'embase. La présence d'ergots permet d'atteindre un même niveau de piégeage, mais sans augmenter la hauteur. Dit autrement, pour une même hauteur de la paroi relevée, la présence d'ergots permet d'augmenter significativement le piégeage des ondes rampantes.

[0101] A ce propos, une augmentation de l'épaisseur d'embase conduirait à une dégradation de la réflectivité. L'invention proposée permet un compromis entre la réflectivité souhaitée (typiquement inférieure à -10 dB) sur une large bande de fréquence, tout en piégeant les ondes rampantes (entre cellules unitaires, au niveau de l'interface absorbant-plan métallique).

[0102] Ainsi, le dispositif de découplage selon l'invention est particulièrement efficace tout en restant de faible épaisseur.

[0103] Plus généralement, le niveau de piégeage des ondes électromagnétiques recherché pour un dispositif de découplage résulte d'un compromis entre dimensionnement des ergots (jointifs versus non-jointifs) et hauteur des cadres constitutifs de la paroi relevée.

[0104] En variante, un intervalle est ménagé entre un ergot et soit le ou les ergot(s) voisin(s), soit le cadre voisin. Le canal correspondant n'est alors pas obturé (cas où les ergots sont jointifs) mais présente un rétrécissement (cas où les ergots sont non jointifs).

[0105] En variante, un cadre adopte une forme polygonale autre qu'un simple carré (par exemple un hexagone comme dans le mode de réalisation de la figure 3G), les cadres sont imbriqués mais avec une orientation différente (par exemple avec une rotation de 45°, comme dans le mode de réalisation de la figure 3C), et/ou avec des hauteurs différentes.

[0106] Si les ergots sont de préférence venus de matière avec la paroi relevée, en variante, les ergots sont ajoutés et peuvent donc ne pas être réalisés avec le même matériau que celui formant les cellules unitaires absorbantes.

[0107] Dans encore une autre variante, un ergot présente un gradient d'absorption. Ceci est obtenu, par exemple, par variation du taux de charge volumique du matériau utilisé ou encore par de l'impression multi-matériaux.

[0108] Selon les points chauds d'ondes rampantes (identifiable en calculant le vecteur de Poynting ou la densité d'énergie électromagnétique en différents points), ce gradient peut être associé à une variation d'épaisseur et de largeur de l'ergot.

[0109] Selon l'invention le dispositif de découplage est composé d'un absorbant électromagnétique structuré tri-

dimensionnellement qui est efficace sur une large gamme de fréquences, compact en épaisseur, de masse faible, et à dispersion contrôlée, tout en étant passif.

Revendications

1. Système antenne (100) comportant au moins une antenne élémentaire (125), un plan métallique (105) prévu autour de l'antenne élémentaire, et un dispositif de découplage (750) disposé sur le plan métallique, le dispositif de découplage étant du type structure d'absorption électromagnétique tridimensionnelle constituée d'une pluralité de cellules disposées en réseau, chaque cellule (752) comportant, empiilées selon une direction normale au plan métallique, une embase (754) surmontée d'une paroi relevée (756), le système antenne étant **caractérisé en ce que** la paroi relevée est conformée de manière à former un motif évidé de piégeage des ondes électromagnétique, le motif évidé étant constitué de plusieurs cadres (757, 758) imbriqués, et **en ce qu'**au moins un cadre de chaque motif est muni d'au moins un ergot (755, 759), ledit au moins un ergot s'étendant latéralement à l'écart du cadre et étant apte à coopérer avec un cadre voisin de la même cellule ou d'une cellule voisine, afin d'obturer, au moins partiellement, un canal entre le cadre et ledit cadre voisin.
2. Système antenne selon la revendication 1, dans lequel le motif évidé comporte un cadre extérieur (757) et un cadre intérieur (758), le cadre extérieur ayant une forme sélectionnée parmi : un carré, un rectangle, un anneau, ou un polygone, et le cadre intérieur ayant une forme sélectionnée parmi : un carré, un rectangle, un anneau, ou un polygone.
3. Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel : un côté de l'embase est d'environ $0,5\lambda_0$; une épaisseur de l'embase est d'environ $0,01\lambda_0$; une extension caractéristique de la paroi relevée est d'environ $0,425\lambda_0$; une épaisseur de la paroi relevée est d'environ $0,1\lambda_0$; une largeur de la paroi relevée est entre environ $0,0425\lambda_0$ et environ $0,0275\lambda_0$, où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide pour la fréquence minimum à partir de laquelle l'absorptivité de l'absorbant électromagnétique est supérieure ou égale à 0,9.
4. Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le matériau de l'embase et/ou la paroi relevée est un thermoplastique avec adjuvant, de préférence un thermoplastique à dissipation statique.
5. Système antenne selon l'une quelconque des

revendications précédentes, dans laquelle les cellules sont identiques entre elles.

6. Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le dispositif de découplage est disposé entre deux antennes élémentaires (125, 135) pour une atténuation d'un couplage entre lesdites deux antennes élémentaires ou autour d'une antenne élémentaire pour une atténuation d'un couplage entre ladite antenne élémentaire et le plan métallique (205).
7. Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le plan métallique (150) est muni d'un évidement (107) de réception du dispositif de découplage (750).
8. Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant au moins un radôme (140).
9. Système antenne selon la revendication 8, dans lequel le dispositif de découplage est intégré au radôme.
10. Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel une partie évidée du motif d'une cellule du dispositif de découplage est remplie d'un matériau complémentaire, de préférence compatible du matériau utilisé pour l'embase et la paroi relevée de ladite cellule.
11. Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'antenne élémentaire est une antenne cornet, une antenne Vivaldi, ou une antenne planaire à large bande de fréquence, comme une antenne spirale, sinueuse, ou log-périodique.

Patentansprüche

1. Antennensystem (100), umfassend mindestens eine Elementarantenne (125), eine Metallebene (105), die um die Elementarantenne herum bereitgestellt ist, und eine Entkopplungsvorrichtung (750), die auf der Metallebene angeordnet ist, wobei die Entkopplungsvorrichtung von der Art einer dreidimensionalen elektromagnetischen Absorptionsstruktur ist, die aus einer Vielzahl von Zellen besteht, die in einem Netz angeordnet sind, jede Zelle (752) umfassend gestapelt in einer Richtung senkrecht zu der Metallebene, eine Basis (754), auf der eine erhabene Wand (756) montiert ist, wobei das Antennensystem **dadurch gekennzeichnet ist, dass** die erhabene Wand geformt ist, um ein ausgehöhltes Muster zum Einfangen von elektromagnetischen Wellen zu bilden, wobei das ausgehöhlte Muster aus mehreren

- ineinandergreifenden Rahmen (757, 758) besteht, und dass mindestens ein Rahmen von jedem Muster mit mindestens einem Vorsprung (755, 759) versehen ist, wobei sich der mindestens eine Vorsprung seitlich vom Rahmen weg erstreckt und mit einem benachbarten Rahmen derselben Zelle oder einer benachbarten Zelle zusammenwirken kann, um einen Kanal zwischen dem Rahmen und dem benachbarten Rahmen zumindest teilweise zu verschließen.
2. Antennensystem nach Anspruch 1, wobei das ausgehöhlte Muster einen äußeren Rahmen (757) und einen inneren Rahmen (758) umfasst, der äußere Rahmen eine Form aufweist, die aus Folgendem ausgewählt ist: einem Quadrat, einem Rechteck, einem Ring oder einem Polygon, und der innere Rahmen eine Form aufweist, die aus Folgendem ausgewählt ist: einem Quadrat, einem Rechteck, einem Ring oder einem Polygon.
 3. Antennensystem nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei: eine Seite der Basis ungefähr $0,5 \lambda_0$ ist; eine Stärke der Basis ungefähr $0,01 \lambda_0$ ist; eine charakteristische Erstreckung der erhabenen Wand ungefähr $0,425 \lambda_0$ ist; eine Stärke der erhabenen Wand ungefähr $0,1 \lambda_0$ ist; eine Breite der erhabenen Wand zwischen ungefähr $0,0425 \lambda_0$ und ungefähr $0,0275 \lambda_0$ ist; wobei λ_0 die Vakuumwellenlänge bei der Mindestfrequenz ist, ab der das Absorptionsvermögen des elektromagnetischen Absorptionsmittels größer als oder gleich wie 0,9 ist.
 4. Antennensystem nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei das Material der Basis und/oder der erhabenen Wand ein Thermoplast mit Zusatzstoff ist, vorzugsweise ein statisch dissipativer Thermoplast.
 5. Antennensystem nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Zellen untereinander identisch sind.
 6. Antennensystem nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Entkopplungsvorrichtung zwischen zwei Elementarantennen (125, 135) für eine Dämpfung einer Kopplung zwischen den zwei Elementarantennen oder um eine Elementarantenne für eine Dämpfung einer Kopplung zwischen der Elementarantenne und der Metallebene (205) angeordnet ist.
 7. Antennensystem nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Metallebene (150) mit einer Aussparung (107) zum Aufnehmen der Entkopplungsvorrichtung (750) versehen ist.
 8. Antennensystem nach einem der vorherigen An-

sprüche, umfassend mindestens ein Radom (140).

9. Antennensystem nach Anspruch 8, wobei die Entkopplungsvorrichtung in das Radom integriert ist.
10. Antennensystem nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei ein ausgehöhlter Abschnitt des Musters einer Zelle der Entkopplungsvorrichtung mit einem Material gefüllt ist, das komplementär zu, vorzugsweise kompatibel mit dem Material ist, das für die Basis und die erhabene Wand der Zelle verwendet wird.
11. Antennensystem nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Elementarantenne eine Hornantenne, eine Vivaldi-Antenne oder eine planare Breitbandantenne ist, wie beispielsweise eine spiralförmige, sinusförmige oder logarithmisch-periodische Antenne ist.

Claims

1. Antenna system (100) including at least one elementary antenna (125), a metal plane (105) provided around the elementary antenna, and a decoupling device (750) arranged on the metal plane, the decoupling device being of a three-dimensional electromagnetic absorption structure consisting of a plurality of cells arranged in an array, each cell (752) including, stacked along a direction normal to the metal plane, a base (754) and a raised wall (756) on top of the base, the antenna system being **characterized in that** the raised wall is shaped to form a recessed pattern for trapping electromagnetic waves, the recessed pattern consisting of a plurality of frames (757, 758) interlocked one inside the other, and **in that** at least one frame of each pattern is provided with at least one lug (755, 759), said at least one lug extending laterally away from the frame and cooperating with an adjacent frame of the same cell or of an adjacent cell, in order to close, at least partially, a channel between the frame and said adjacent frame.
2. Antenna system according to claim 1, wherein the recessed pattern includes an outer frame (757) and an inner frame (758), the outer frame having a shape selected from among: a square, a rectangle, a ring, or a polygon, and the inner frame having a shape selected from: a square, a rectangle, a ring, or a polygon.
3. Antenna system according to any one of the previous claims, wherein : a side of the base is about $0.5\lambda_0$; a thickness of the base is about $0.01\lambda_0$; an extension, characteristic of the raised wall is about $0.425\lambda_0$; a thickness of the raised wall is about $0.1\lambda_0$; a width of

the raised wall is between about $0.0425\lambda_0$ and about $0.0275\lambda_0$, where λ_0 is a wavelength in vacuum for a minimum frequency from which an absorptivity of the decoupling device is greater than or equal to 0.9.

5

4. Antenna system according to any one of the previous claims, wherein the material of the base and/or the raised wall is a thermoplastic with additive, preferably a statically dissipative thermoplastic.

10

5. Antenna system according to any one of the previous claims, wherein the cells are identical to each other.

6. Antenna system according to any one of the previous claims, wherein the decoupling device is arranged between two elementary antennas (125, 135) for attenuation of a coupling between said two elementary antennas or around one elementary antenna for attenuation of a coupling between said elementary antenna and the metal plane (205).

15

20

7. Antenna system according to any one of the previous claims, wherein the metal plane (150) is provided with a recess (107) for receiving the decoupling device (750).

25

8. Antenna system according to any one of the previous claims, including at least one radome (140).

9. Antenna system according to claim 8, wherein the decoupling device is integrated into the radome.

30

10. Antenna system according to any one of the previous claims, wherein a recessed portion of one cell of the decoupling device is filled with a material complementary to, and preferably compatible with, the material used for the base and the raised wall of said cell.

35

11. Antenna system according to any one of the previous claims, wherein the elementary antenna is a horn antenna, a Vivaldi antenna, or a wide frequency band planar antenna, such as a spiral, sinuous, or log-periodic antenna.

40

45

50

55

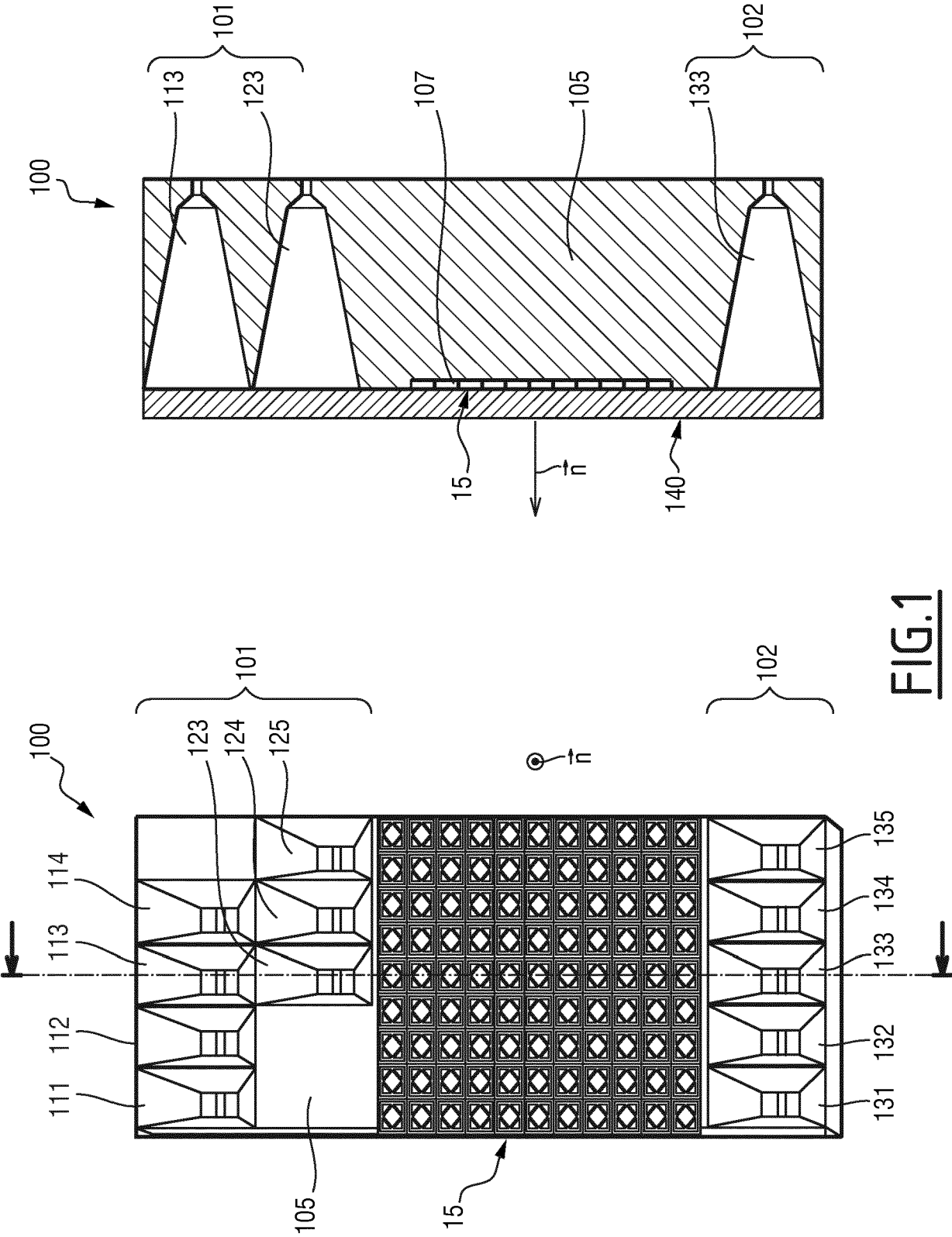


FIG. 1

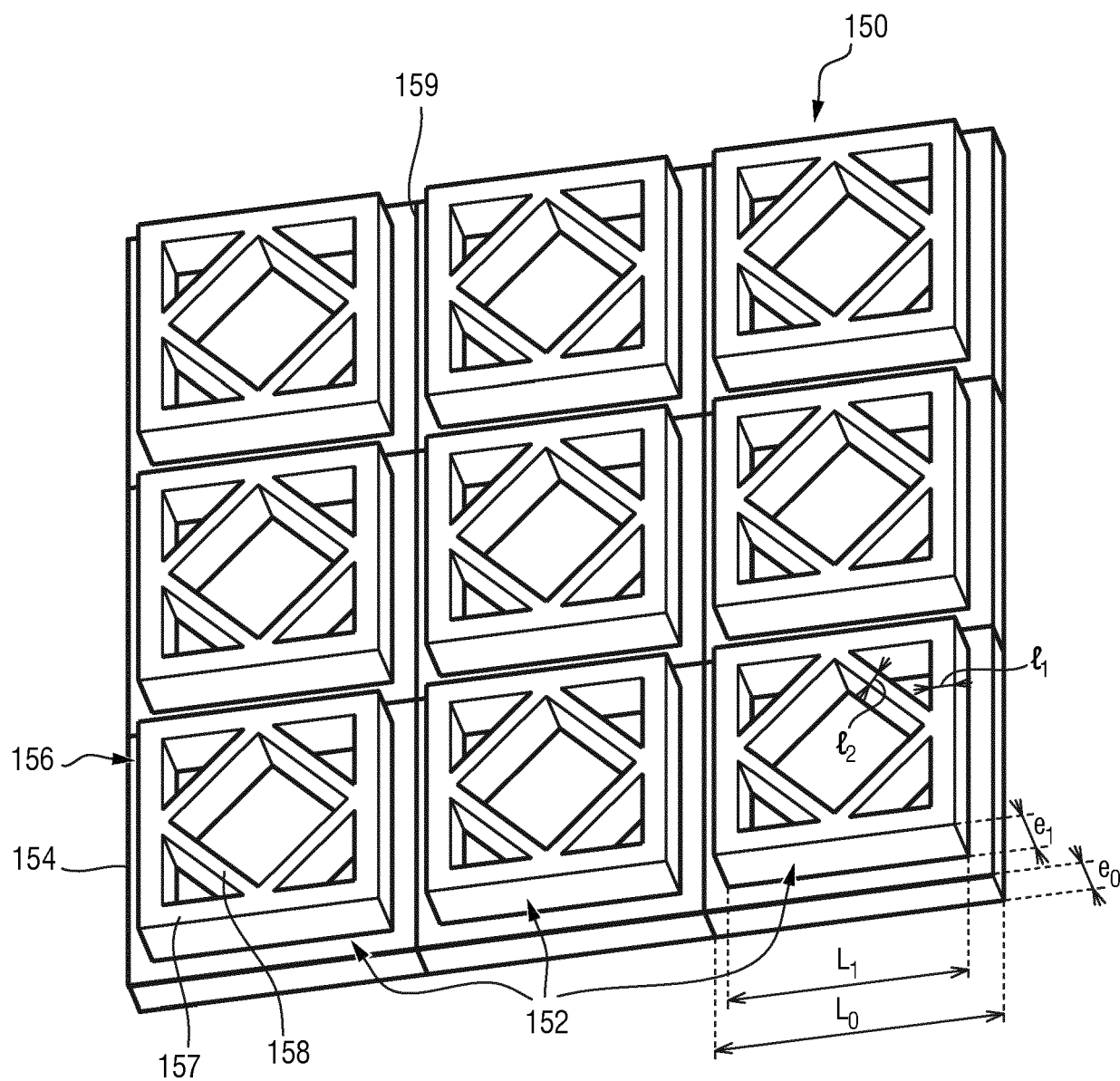


FIG.2

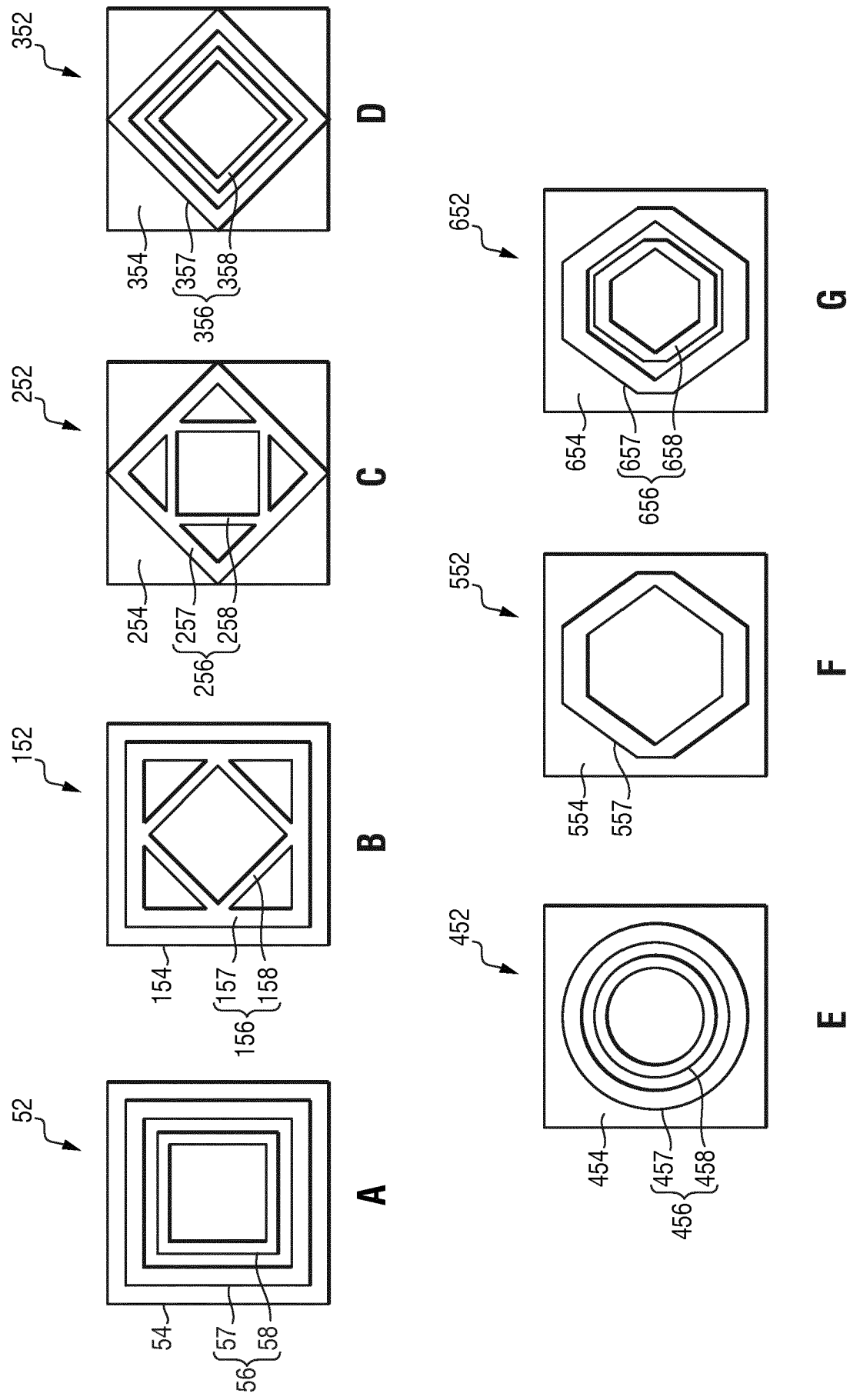


FIG. 3

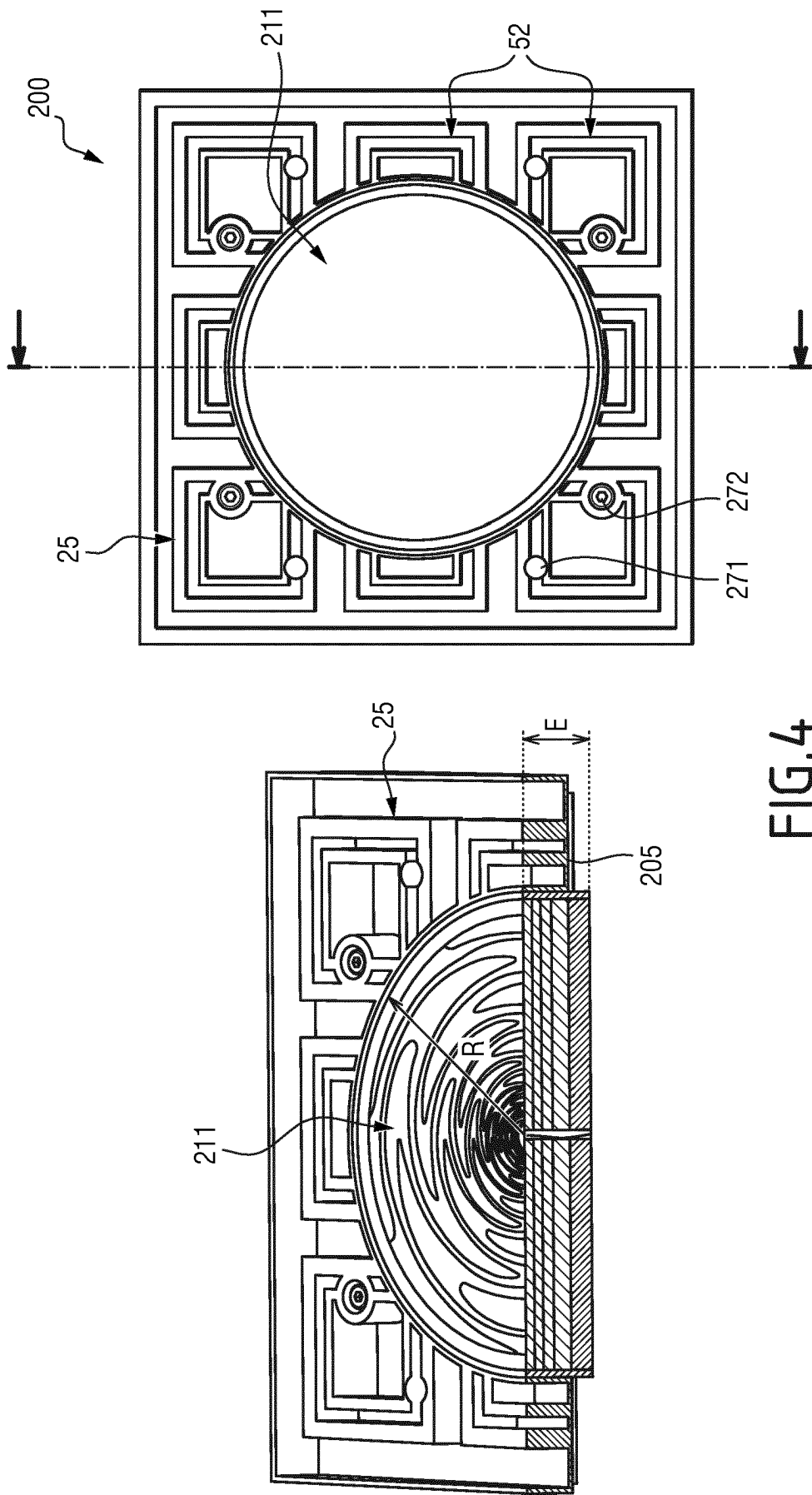


FIG. 4

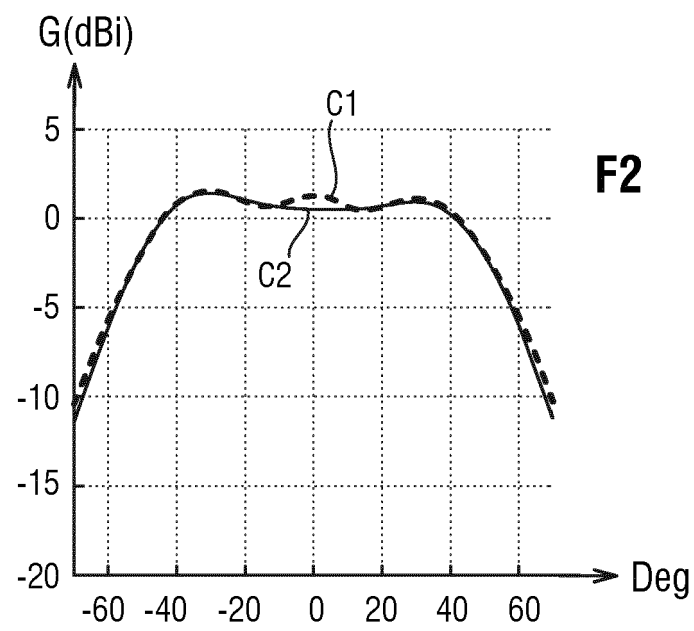
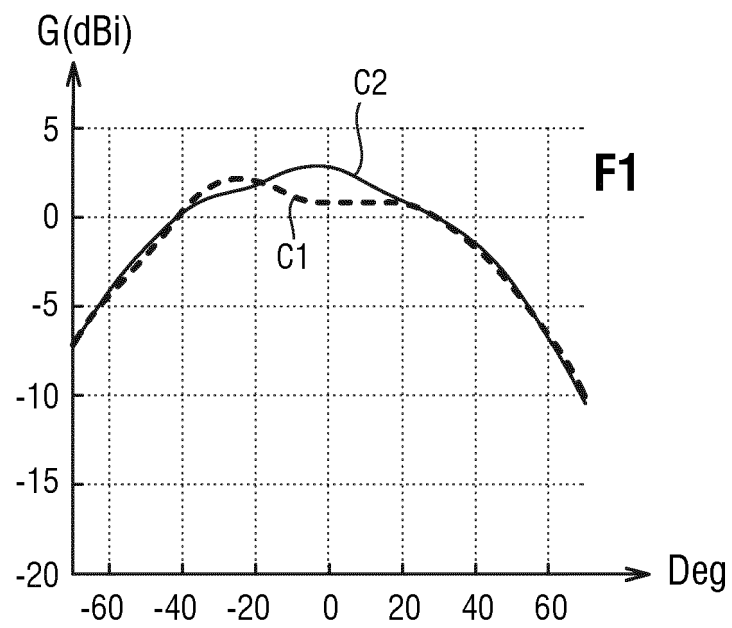


FIG.5

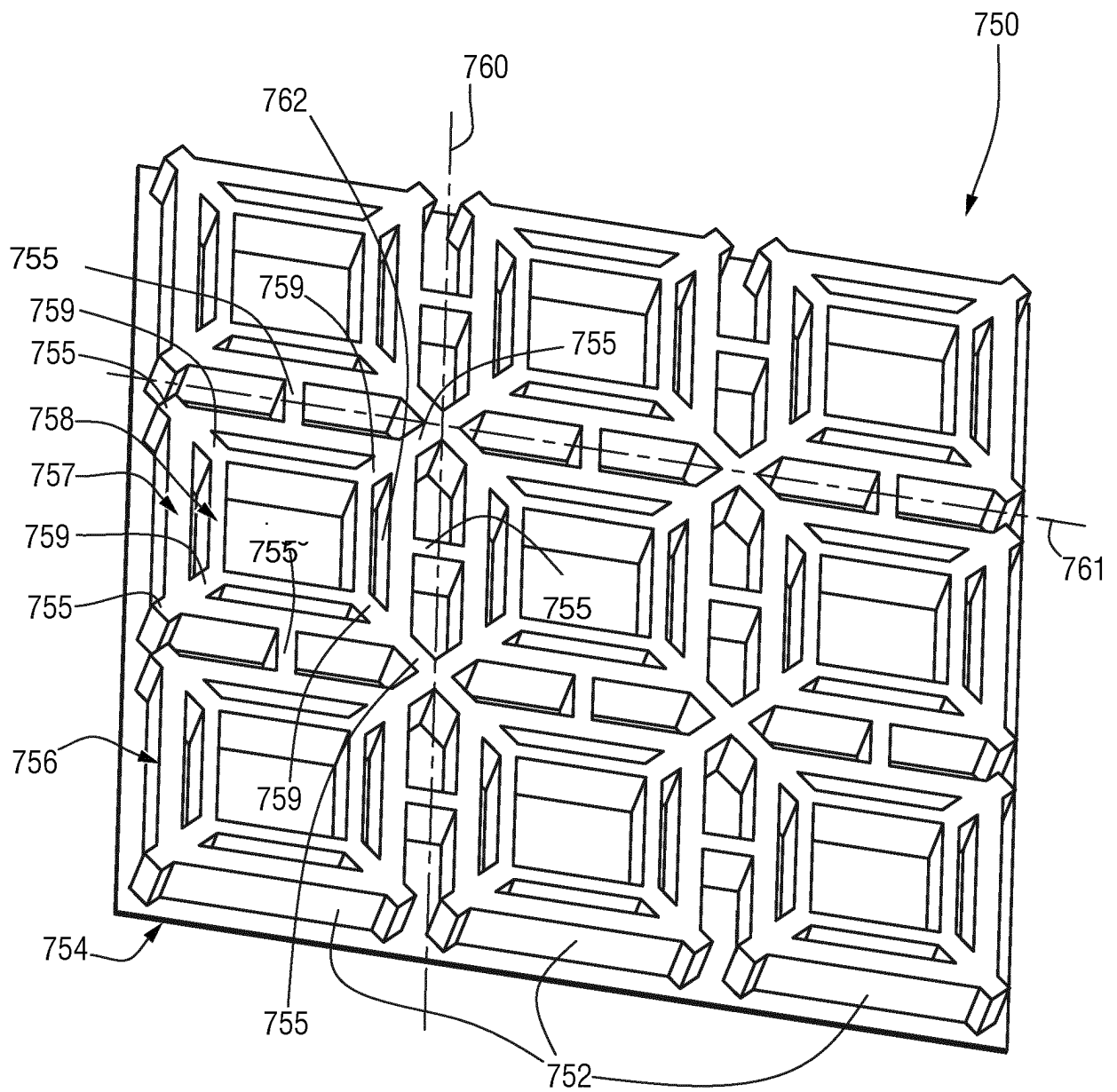


FIG.6

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

- CN 114421181 A [0018]
- US 2017365931 A1 [0019]
- US 7408500 B2 [0019]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **X. LLESHI ; T. Q. VAN HOANG ; B. LOISEAUX ; D. LIPPENS.** Design and Full Characterization of a 3-D-Printed Hyperbolic Pyramidal Wideband Microwave Absorber. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, January 2021, vol. 20 (1), 28-32 [0013]
- **REN J et al.** 3D-Printed Low-Cost Dielectric-Resonator-Based Ultra-Broadband Microwave Absorber Using Carbon-Loaded Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymer. *Materials (Basel)*, 20 July 2018, vol. 11 (7), 1249 [0016]