

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 143 219

②1 N° d'enregistrement national : 22 12895

⑤1 Int Cl⁸ : H 01 Q 21/00 (2023.01)

①2

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 07.12.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 14.06.24 Bulletin 24/24.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : THALES Société anonyme — FR.

⑦2 Inventeur(s) : MALLEGOL Stéphane et CHEVAL
Nicolas.

⑦3 Titulaire(s) : THALES Société anonyme.

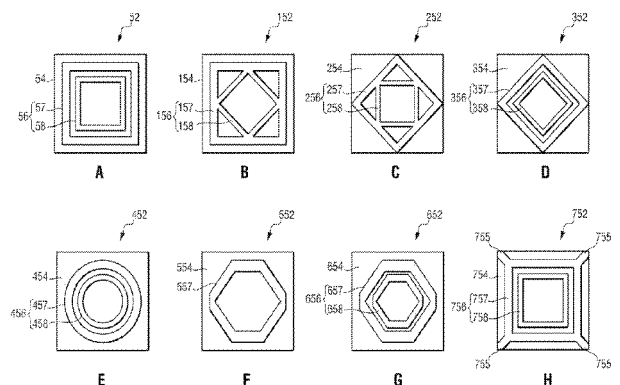
⑦4 Mandataire(s) : Lavoix.

⑤4 Système antenne amélioré et dispositif de découplage associé.

⑤7 Système antenne amélioré et dispositif de découplage associé

Ce système antenne comporte au moins une antenne élémentaire, un plan métallique prévu autour de l'antenne élémentaire, et un dispositif de découplage (150) 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 (152) comporte, empilées selon une direction normale au plan métallique, une embase (154) surmontée d'une paroi relevée, le système antenne étant caractérisé en ce que la paroi relevée (156) est conformée de manière à former un motif évidé de piégeage des ondes électromagnétique.

Figure pour l'abrégié : Figure 3



FR 3 143 219 - A1



Description

Titre de l'invention : Système antenne amélioré et dispositif de découplage associé

- [0001] La présente invention concerne les systèmes antennaires, et plus particulièrement, les systèmes antennaires 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 antennaires, 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 :
- [0005] - un couplage conduit, qui est quantifiable via les paramètres S ou paramètres de répartition, au niveau des accès (connecteurs, par exemple) ;
- [0006] - un couplage rayonné en champ proche / champ lointain.
- [0007] Ces couplages peuvent être amplifiés par la proximité physique entre ensembles antennaires, 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.
- [0008] Ces couplages engendrent les effets indésirables comme:
- [0009] - 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 antennaires 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 ;
- [0010] - 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 ;

- [0011] - un effet de désensibilisation de la chaîne de réception d'une antenne fonctionnant en réception par une antenne proche fonctionnant simultanément en émission.
- [0012] Il est connu de prévoir un dispositif de découplage entre ou autour d'un ensemble antennaire.
- [0013] Selon une première approche, le plan métallique porte des corrugations afin de piéger les ondes électromagnétiques à la surface de ce dernier.
- [0014] 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 : $W + g < \lambda/2$
- [0015] où λ est la longueur d'onde correspondant à la fréquence d'opération souhaitée de l'antenne élémentaire.
- [0016] Cette solution est donc efficace pour découpler les ensembles antennaires à une fréquence donnée ou à proximité immédiate de celle-ci. Elle présente cependant les inconvénients suivants :
- [0017] - 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 ;
- [0018] - l'épaisseur du plan métallique doit être supérieure à la profondeur des corrugations et l'espacement entre les ensembles antennaires 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 ;
- [0019] - pour des fréquences d'opération hautes, la réponse de l'antenne est sensible à la précision d'usinage mécanique des corrugations ;
- [0020] - 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.
- [0021] Selon une seconde approche, on ajoute sur le plan métallique, un absorbant électromagnétique – EM.
- [0022] 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 :

- [0023] - 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 ;
- [0024] - 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 ;
- [0025] - 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 ;
- [0026] - l'absorbant EM doit être protégé de l'environnement extérieur, par un radôme compatible. Or un radome participe au couplage que l'on cherche à atténuer. Il dégrade également la compacité en épaisseur recherchée ;
- [0027] - 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.
- [0028] 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.
- [0029] 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).
- [0030] Une telle structure est particulièrement difficile à réaliser puisqu'il faut maîtriser une double impression métal-diélectrique. Les dispersions de fabrication impactent d'autant plus les performances RF de l'absorbant que la fréquence de travail sera élevée.
- [0031] 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.

- [0032] Une telle structure est plus facile à réaliser que la précédente, mais la gamme de fréquences sur laquelle l'absorptivité est élevée est réduite.
- [0033] Le but de cette 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.
- [0034] Pour cela l'invention a pour objet un système antenne comportant au moins une antenne élémentaire, un plan métallique prévu autour de l'antenne élémentaire, et un dispositif de découplage 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 comporte, empilées selon une direction normale au plan métallique, une embase surmontée d'une paroi relevée, 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.
- [0035] Suivant des modes particuliers de réalisation, l'antenne comporte une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :
- [0036] - le motif évidé est constitué de plusieurs cadres imbriqués.
- [0037] - le motif évidé comporte un cadre extérieur et un cadre intérieur, 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.
- [0038] - un côté de l'embase est d'environ $0,5\lambda_0$; une épaisseur de l'embase est d'environ $0,01\lambda_0$; selon le plan de l'embase, 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 $0,0425\lambda_0$ (pour le cadre extérieur) et environ $0,0275\lambda_0$ (pour le cadre intérieur), 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.
- [0039] - le matériau de l'embase et/ou de la paroi relevée est un thermoplastique avec adjuvant, de préférence un thermoplastique à dissipation statique.
- [0040] - la paroi relevée d'une cellule comporte un ergot apte à coopérer avec un ergot de la paroi relevée d'une cellule voisine, afin d'obturer, au moins partiellement, un canal formé entre les parois relevées de la cellule et de la cellule voisine.
- [0041] - les cellules sont identiques entre elles.
- [0042] - le dispositif de découplage est disposé entre deux antennes élémentaires 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 élé-

mentaire et le plan métallique.

- [0043] - le plan métallique est muni d'un évidement de réception du dispositif de découplage.
- [0044] - le système comporte au moins un radôme de protection.
- [0045] - le dispositif de découplage est intégré au radôme.
- [0046] - 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.
- [0047] - 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.
- [0048] L'invention a également pour objet un dispositif de découplage adapté pour être intégré dans le système antenne précédent.
- [0049] 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 :
- [0050] [Fig.1] La [Fig.1] représente en vue de dessus et en coupe axiale un premier mode de réalisation d'une antenne selon l'invention ;
- [0051] [Fig.2] La [Fig.2] est une représentation en perspective du dispositif de découplage de l'antenne de la [Fig.1] ;
- [0052] [Fig.3] La [Fig.3] représente différents modes de réalisation possibles d'une cellule du dispositif de découplage selon l'invention ;
- [0053] [Fig.4] La [Fig.4] représente, en vue de dessus et en coupe axiale, un second mode de réalisation d'une antenne selon l'invention ; et,
- [0054] [Fig.5] La [Fig.5] représente les gains en fonction du gisement d'une antenne selon l'état de la technique et d'une antenne selon l'invention, pour deux fréquences différentes de la plage de fréquence.
- [0055] L'objet de l'invention concerne un dispositif de découplage électromagnétique - EM 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.
- [0056] Selon l'invention 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.
- [0057] La [Fig.1] représente un premier mode de réalisation d'un système antenne selon l'invention.
- [0058] 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, sinueuse, log-périodique, etc.).

[0059] Le cornet de chaque antenne élémentaire est réalisé dans l'épaisseur du plan métallique 105 formant le plan de masse de l'antenne 100.

[0060] 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.

[0061] Les antennes élémentaires des première et deuxième rangées forment un premier ensemble antennaire 101 et les antennes élémentaires de la troisième rangée forment un second ensemble antennaire 102.

[0062] Le système antennaire 100 comporte un dispositif de découplage 150, 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}).

[0063] 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.

[0064] Le dispositif de découplage est de préférence disposé de manière à être positionné sensiblement affleurant au plan des ouvertures des cornets.

[0065] Le dispositif de découplage 150 est constitué d'un absorbant électromagnétique structuré tri-dimensionnellement (« absorbant EM 3D » dans ce qui suit), qui sera décrit en détail en référence à la [Fig.2].

[0066] Avantagusement, pour une protection contre les agressions extérieures, le système antennaire 100 comporte un ou plusieurs radôme(s).

[0067] Sur la [Fig.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 découplage 150.

[0068] 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 antennaire. Dans ce cas, le dispositif de découplage est exposé à l'environnement.

[0069] Avantagusement, comme représenté sur la [Fig.1], la face avant du plan métallique 105 est munie d'un évidement 107 adapté au dispositif de découplage 150, la profondeur de l'évidement étant sensiblement égale à la hauteur du dispositif de découplage.

- [0070] 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.
- [0071] La [Fig.2] représente plus spécifiquement le dispositif de découplage 150 du système antenne de la [Fig.1].
- [0072] Le dispositif de découplage 150 est constitué d'une pluralité de cellules 152 formant un réseau.
- [0073] 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.
- [0074] Chaque cellule comporte une embase 154 et, sur cette embase, une paroi relevée 156 conformée selon un motif évidé.
- [0075] 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.
- [0076] Electromagnétiquement, une embase est avantageusement réalisée en un matériau absorbant EM, pour renforcer l'effet global du dispositif d'absorption.
- [0077] Les motifs que forme la paroi relevée des différentes cellules sont de préférence identiques.
- [0078] Dans le mode de réalisation de la [Fig.2], la paroi relevée 156 comporte un cadre extérieur 157, dont les côtés sont disposés parallèlement aux bords de l'embase 154, et un cadre intérieur 158, qui tourné de 45° par rapport au cadre extérieur 157 et imbriqué à l'intérieur du cadre extérieur 157.
- [0079] Les épaisseurs des cadres extérieur et intérieur peuvent être similaires ou différentes.
- [0080] 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.
- [0081] 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 supérieure 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 ($L_1 \diamond 0,425\lambda_0$) ; 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 $0,0275\lambda_0$.

- [0082] 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).
- [0083] 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.
- [0084] 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.
- [0085] 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.
- [0086] En variante, des matériaux diélectriques ou magnéto-diélectriques pourraient être utilisés.
- [0087] 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.
- [0088] 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'absorbant EM 3D.
- [0089] 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.
- [0090] 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 ».

- [0091] 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.
- [0092] 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.
- [0093] Dans le mode de réalisation de la [Fig.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.
- [0094] La [Fig.3] représente différentes formes possibles du motif des cellules de l'absorbant EM 3D du dispositif d'absorption selon l'invention.
- [0095] 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.
- [0096] 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 des figures 1 et 2.
- [0097] 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.

- [0098] Sur la figure 3D, la cellule 352 comporte une embase 354 et une paroi relevée 356. Cette dernière est composée d'un cadre extérieur 237 carré, dont les côtés font un angle de 45° par rapport aux bords de l'embase, et d'un cadre intérieur 238 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.
- [0099] 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.
- [0100] 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.
- [0101] Sur la figure 3G, la cellule 652 comporte une embase 654 et une paroi relevée 656. Cette dernière est composée d'un cadre extérieur 357 en hexagone, et d'un cadre intérieur 658 également en hexagone, reçu à l'intérieur du cadre extérieur et orienté comme le cadre extérieur.
- [0102] Sur la figure 3H, la cellule 752 comporte une embase 754 et une paroi relevée 756. Cette dernière est composée d'un cadre extérieur 757 et d'un cadre intérieur 758. Le cadre extérieur est muni d'ergots 755 se projetant radialement vers les cellules voisines. Par exemple, le cadre extérieur est de forme carrée. Chacun de ses sommets est muni d'un ergot 755, qui s'étend en direction du coin correspondant de l'embase 754. Un ergot vient en contact d'un ou plusieurs ergots portés par les cellules adjacentes à la cellule considérée.
- [0103] Les ergots des différentes cellules permettent de fermer une extrémité d'un canal (comme par exemple le canal 159 de la [Fig.2]) s'étendant entre le côté du cadre extérieur d'une cellule et le côté en vis-à-vis du cadre extérieur d'une cellule adjacente.
- [0104] Cela permet de piéger les ondes électromagnétiques qui risqueraient sinon de se propager le long d'une enfilade de tels canaux selon les rangs et/ou les lignes du réseau que forment les cellules du dispositif de découplage.
- [0105] En variante, un intervalle est ménagé entre un ergot et le ou les ergot(s) voisin(s).
- [0106] Il est à noter que d'autres types de cellule peuvent être envisagés, par exemple, à base de nids d'abeille et que les longueurs et les largeurs des motifs imbriqués peuvent être différentes. Par exemple, des motifs rectangulaires peuvent être envisagés.
- [0107] La [Fig.4] représente un second mode de réalisation du système antenne selon l'invention.
- [0108] 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.

- [0109] Le plan métallique 205 est ici une plaque de faible épaisseur par rapport à celle de l'élément rayonnant.
- [0110] Le système antennaire 200 comporte un dispositif de découplage 250. Il est positionné sur le plan métallique 205 de manière à entourer l'antenne élémentaire 211. Avantageusement, la face avant du dispositif de découplage affleure le plan antennaire.
- [0111] Il est par exemple fixé sur le plan métallique 205 au moyen de vis 272 passant dans des trous traversant 271.
- [0112] Le dispositif de découplage 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 antennaire donné et son environnement physique proche (plan métallique et/ou radôme). Ainsi, en variante, le système antennaire pourrait comporter une pluralité d'antennes élémentaires, mais qui seraient suffisamment distantes les unes 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.
- [0113] Le dispositif de découplage 250 est composé d'un absorbant électromagnétique structuré tri-dimensionnellement à motif évidé. Une cellule 52 du dispositif de découplage 250 est identique à celui du mode de réalisation A de la [Fig.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 antennaire 200. En variante, le dispositif de découplage est structuré selon l'une quelconque des alternatives représentées à la [Fig.3].
- [0114] Avantageusement, pour une protection contre les agressions extérieures, le système antennaire 200 comporte un ou plusieurs radôme(s) (non représenté sur la [Fig.4]).
- [0115] La [Fig.5] illustre la réponse RF mesurée sur un ensemble antennaire 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.
- [0116] Sur chacun de ces graphes, la courbe C1 correspond au dispositif antennaire de la [Fig.1] ou à celui de la [Fig.4] mais sans le dispositif de découplage selon l'invention et la courbe C2 correspond au dispositif antennaire de la [Fig.1] ou à celui de la [Fig.4]

avec le dispositif de découplage selon l'invention.

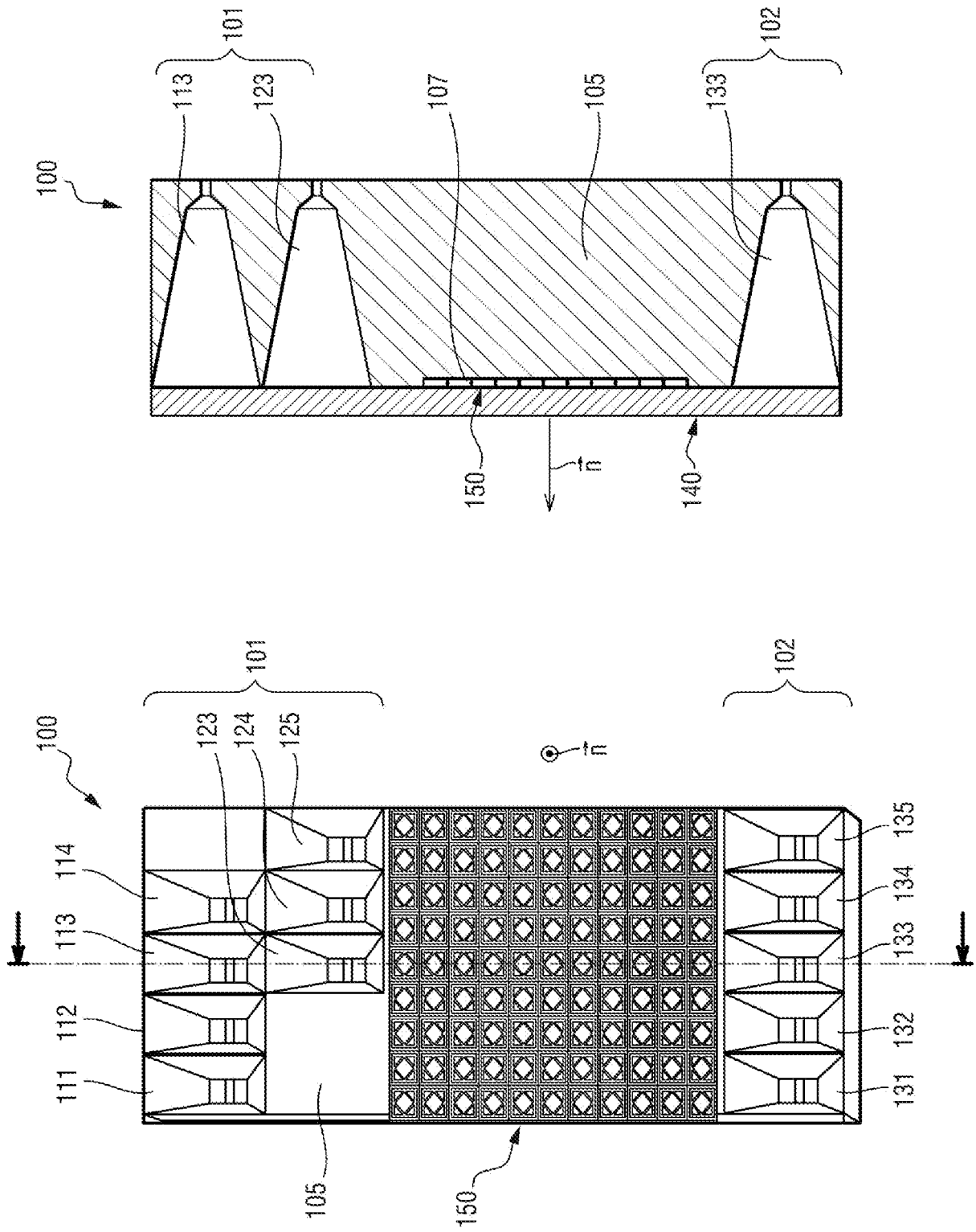
- [0117] Par exemple, le premier graphe correspond à une fréquence F1 proche de la fréquence FMIN et le second graphe correspond à une fréquence F2 proche de la fréquence FMAX.
- [0118] Les fréquences FMIN et FMAX sont les bornes de la bande de fréquences utile de l'antenne sur laquelle une absorptivité élevée (par exemple supérieure à 0,9) est obtenue.
- [0119] L'homme du métier constatera une amélioration du gain avec la mise en œuvre 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).
- [0120] 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 proposée ici autorise une absorptivité de 0,9 au moins sur une bande utile très large, typiquement avec un rapport FMAX/FMIN de 10.
- [0121] 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

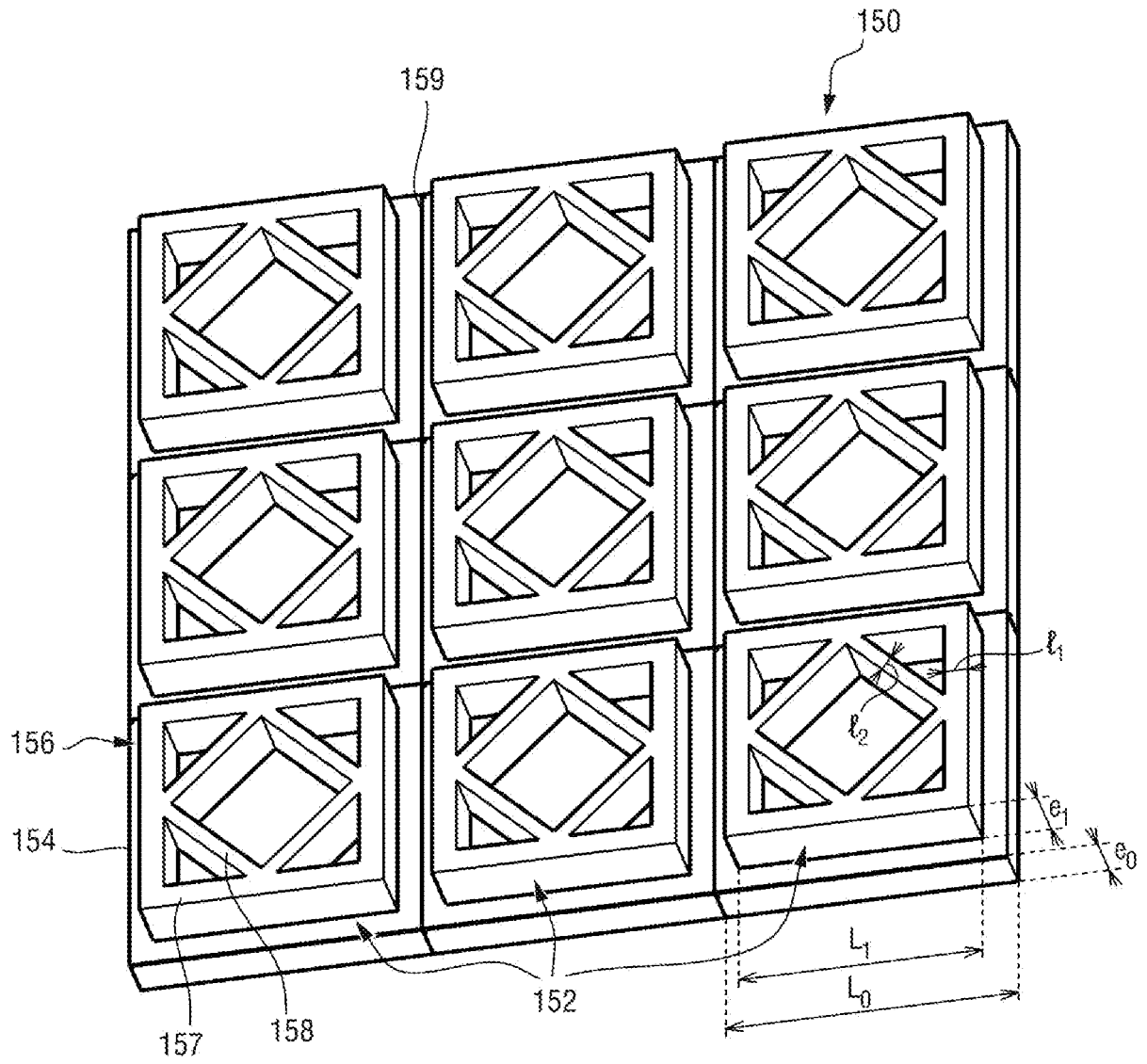
- [Revendication 1] Système antenne (100) comportant au moins une antenne élémentaire (125), un plan métallique (105) prévu autour de l'antenne élémentaire, et un dispositif de découplage (150) disposé sur le plan métallique, le dispositif de découplage étant du type structure d'absorption électromagnétique tridimensionnelle constituée d'une pluralité de cellules disposées en réseau, chaque cellule (152) comporte, empilées selon une direction normale au plan métallique, une embase (154) surmontée d'une paroi relevée, 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.
- [Revendication 2] Système antenne selon la revendication 1, dans lequel le motif évidé est constitué de plusieurs cadres (157, 158) imbriqués.
- [Revendication 3] Système antenne selon la revendication 2, dans lequel le motif évidé comporte un cadre extérieur (157) et un cadre intérieur (158), 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.
- [Revendication 4] 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.
- [Revendication 5] Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le matériau de l'embase et/ou de la paroi relevée est un thermoplastique avec adjuvant, de préférence un thermoplastique à dissipation statique.
- [Revendication 6] Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la paroi relevée (756) d'une cellule (752) comporte un ergot (755) apte à coopérer avec un ergot de la paroi relevée d'une cellule voisine, afin d'obtenir, au moins partiellement, un canal (159) formé entre les parois relevées de la cellule et de la cellule voisine.

- [Revendication 7] Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle les cellules sont identiques entre elles.
- [Revendication 8] Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le dispositif de découplage (150) 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 (211) pour une atténuation d'un couplage entre ladite antenne élémentaire et le plan métallique (205).
- [Revendication 9] 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 (150).
- [Revendication 10] Système antenne selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant au moins un radôme (140).
- [Revendication 11] Système antenne selon la revendication 10, dans lequel le dispositif de découplage est intégré au radôme.
- [Revendication 12] 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.
- [Revendication 13] 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.
- [Revendication 14] Dispositif de découplage (1050) adapté pour être intégré dans un système antenne (100) selon l'une quelconque des revendications précédentes.

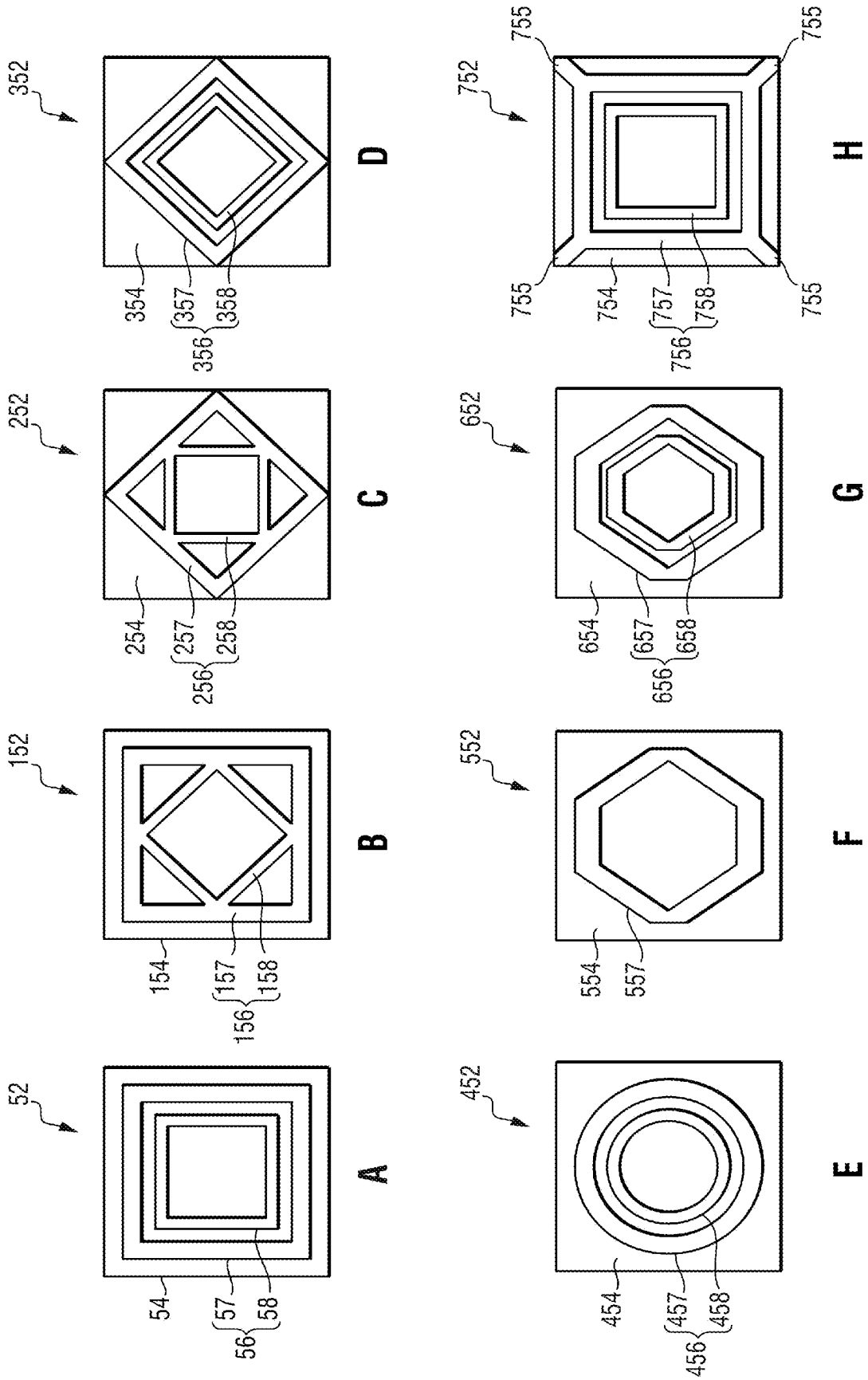
[Fig. 1]



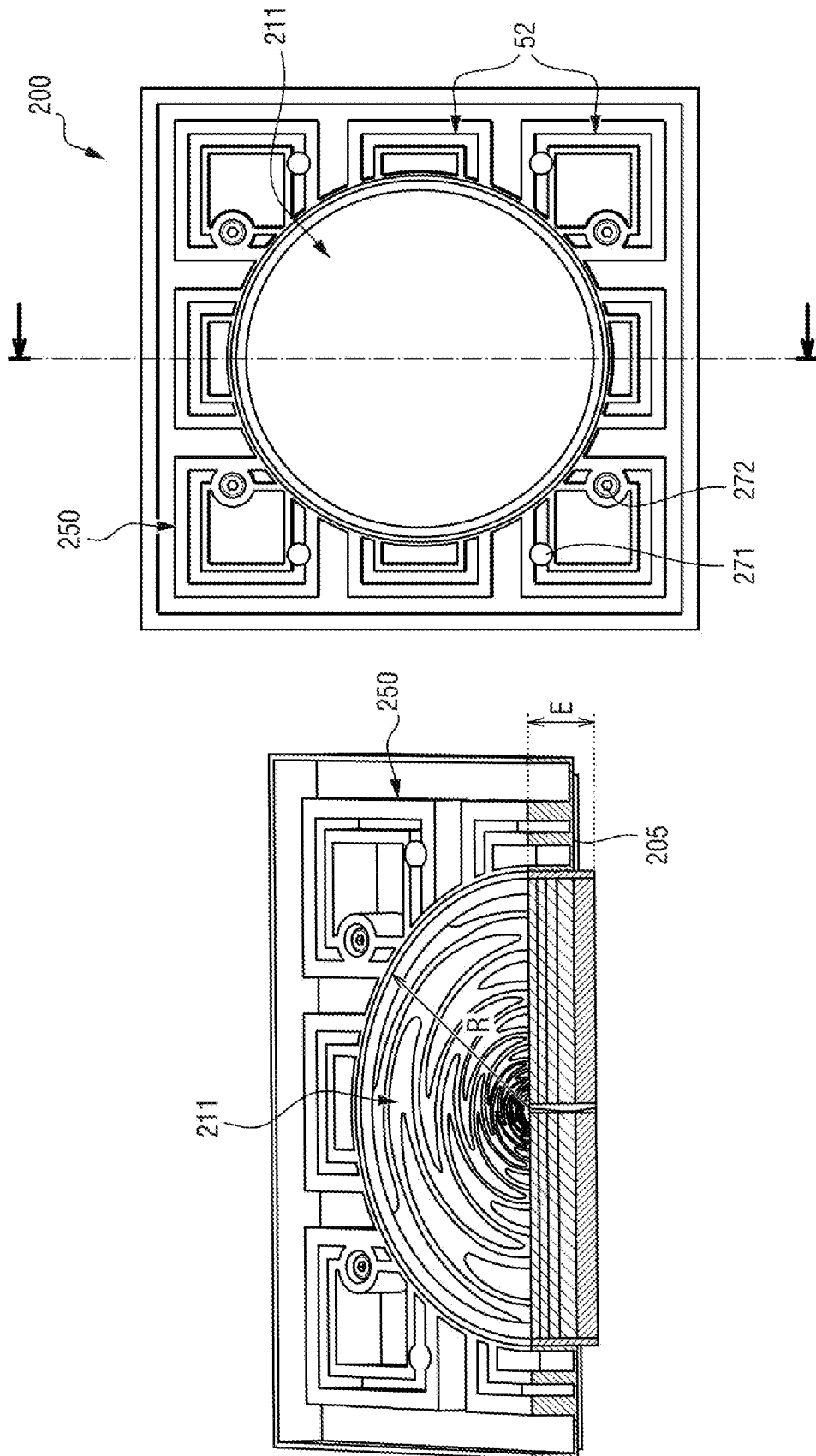
[Fig. 2]



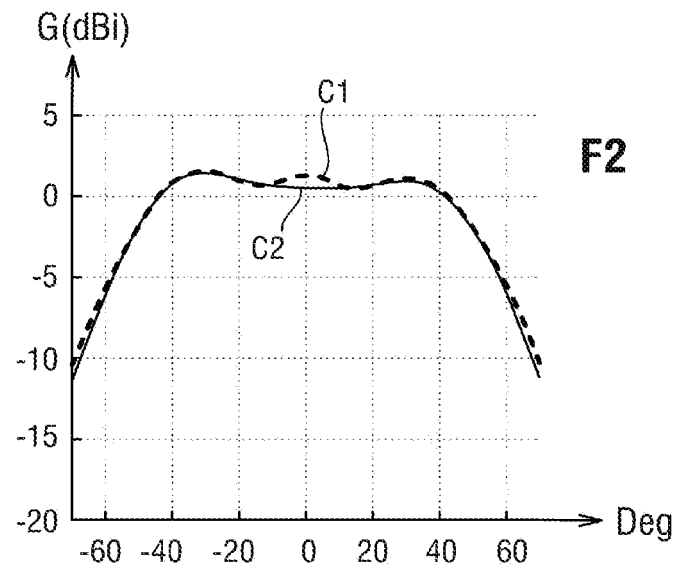
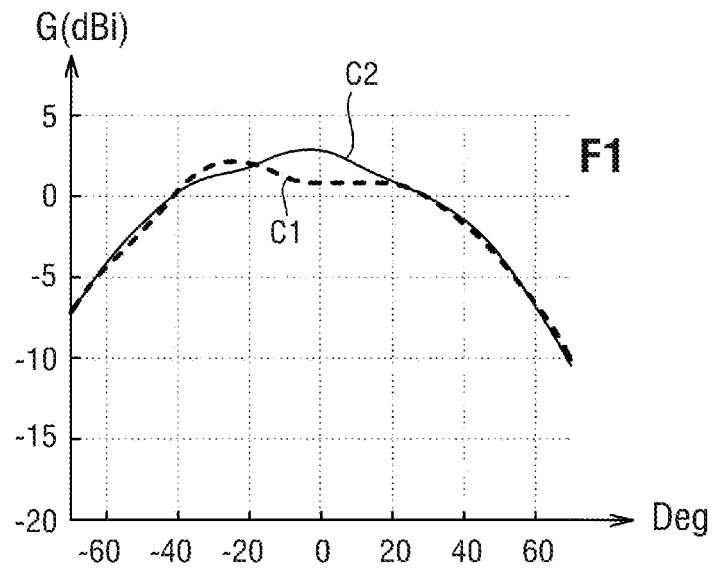
[Fig. 3]



[Fig. 4]



[Fig. 5]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 916667
FR 2212895

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI	
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes			
X	CN 114 421 181 A (BEIJING SANDI SCIENCE AND TECH CO LTD) 29 avril 2022 (2022-04-29)	14	H01Q 21/00	
Y A	* abrégé; figures 1-3 *	1-3, 5-13 4		
Y A	----- US 2017/365931 A1 (MARTEL CÉDRIC [FR]) 21 décembre 2017 (2017-12-21) * abrégé; figures 1-6 *	1-3, 5-9, 12, 13 4, 10, 11, 14		
Y A	----- US 7 408 500 B2 (HITACHI LTD [JP]) 5 août 2008 (2008-08-05) * abrégé; figure 6 *	10, 11 1-9, 12-14		
A	----- US 2019/165468 A1 (XU SU [CN] ET AL) 30 mai 2019 (2019-05-30) * abrégé; figure 1 *	1-14		
A	----- US 2021/126374 A1 (MALLEGOL STÉPHANE [FR] ET AL) 29 avril 2021 (2021-04-29) * abrégé; figure 3 *	1-14		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
A	----- DE 100 34 547 A1 (UNIV KARLSRUHE [DE]) 24 janvier 2002 (2002-01-24) * abrégé; figure 1 *	1-14		H01Q

Date d'achèvement de la recherche		Examineur		
21 août 2023		Vial, Antoine		
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention		
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure		
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.		
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande		
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons		
P : document intercalaire			
		& : membre de la même famille, document correspondant		

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2212895 FA 916667**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **21-08-2023**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CN 114421181	A	29-04-2022	AUCUN	

US 2017365931	A1	21-12-2017	CA 2967732 A1	09-06-2016
			EP 3227963 A1	11-10-2017
			ES 2694280 T3	19-12-2018
			FR 3029694 A1	10-06-2016
			US 2017365931 A1	21-12-2017
			WO 2016087749 A1	09-06-2016

US 7408500	B2	05-08-2008	EP 1471598 A1	27-10-2004
			JP 2004325160 A	18-11-2004
			US 2005001757 A1	06-01-2005
			US 2005128134 A1	16-06-2005

US 2019165468	A1	30-05-2019	CN 107706529 A	16-02-2018
			EP 3487001 A1	22-05-2019
			US 2019165468 A1	30-05-2019
			WO 2018028162 A1	15-02-2018

US 2021126374	A1	29-04-2021	EP 3788674 A1	10-03-2021
			FR 3080959 A1	08-11-2019
			US 2021126374 A1	29-04-2021
			WO 2019211446 A1	07-11-2019

DE 10034547	A1	24-01-2002	AUCUN	
