



(11) **EP 3 879 627 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
31.07.2024 Bulletin 2024/31

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
H01Q 1/48 (2006.01) **H01Q 9/04** (2006.01)
H01Q 9/14 (2006.01) **H01Q 9/36** (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **21161201.5**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
H01Q 1/48; H01Q 9/0421; H01Q 9/145; H01Q 9/36

(22) Date de dépôt: **08.03.2021**

(54) **ANTENNE FIL-PLAQUE MONOPOLAIRE RECONFIGURABLE EN FRÉQUENCE**
FREQUENZ-REKONFIGURIERBARE MONOPOLARE DRAHT-PLATTENANTENNE
MONOPOLAR WIRE-PLATE ANTENNA RECONFIGURABLE IN FREQUENCY

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

(30) Priorité: **10.03.2020 FR 2002363**

(43) Date de publication de la demande:
15.09.2021 Bulletin 2021/37

(73) Titulaires:
• **Commissariat à l'énergie atomique
et aux énergies alternatives
75015 Paris (FR)**
• **Universite Brest Bretagne Occidentale
29200 Brest (FR)**

(72) Inventeurs:
• **DELAVEAUD, Christophe
38054 Grenoble Cedex 09 (FR)**
• **BATEL, Lotfi
38054 Grenoble Cedex 09 (FR)**
• **PINTOS, Jean-François
38054 Grenoble Cedex 09 (FR)**
• **MATTEI, Jean-Luc
29280 Locmaria-Plouzané (FR)**
• **CHEVALIER, Alexis
29870 Landéda (FR)**
• **LAUR, Vincent
29290 Milizac (FR)**

(74) Mandataire: **INNOV-GROUP
310, avenue Berthelot
69372 Lyon Cedex 08 (FR)**

(56) Documents cités:
US-A1- 2006 256 017

- **BATEL LOTFI ET AL: "Miniaturization strategy of compact antenna using magneto-dielectric material", 2019 13TH EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), EUROPEAN ASSOCIATION ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 31 March 2019 (2019-03-31), pages 1 - 5, XP033562276**
- **RONGAS DIMITRIOS K ET AL: "Towards 600 MHz LTE smartphones via tunable magnetodielectric Printed Inverted-F Antennas", 2017 INTERNATIONAL WORKSHOP ON ANTENNA TECHNOLOGY: SMALL ANTENNAS, INNOVATIVE STRUCTURES, AND APPLICATIONS (IWAT), IEEE, 1 March 2017 (2017-03-01), pages 111 - 114, XP033090567, DOI: 10.1109/IWAT.2017.7915331**
- **WU XU ET AL: "A Novel Compact Microstrip Antenna Embedded with Magneto-Dielectric Ferrite Materials For 433 MHz Band Applications", 2019 13TH EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), EUROPEAN ASSOCIATION ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 31 March 2019 (2019-03-31), pages 1 - 4, XP033562218**
- **CANNEVA F ET AL: "Miniature reconfigurable antenna with magneto dielectric substrate for DVB-H band", ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), PROCEEDINGS OF THE 5TH EUROPEAN CONFERENCE ON, IEEE, 11 April 2011 (2011-04-11), pages 2289 - 2292, XP031877746, ISBN: 978-1-4577-0250-1**

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).

EP 3 879 627 B1

Description

canal de communication, après sa fabrication.

Domaine technique

Exposé de l'invention

[0001] L'invention se rapporte au domaine technique des antennes fil-plaque monopolaires.

[0002] L'invention trouve notamment son application dans l'internet des objets IoT (acronyme pour « *Internet of Things* » en langue anglaise), la radio-identification RFID (acronyme pour « *Radio Frequency ID entification* » en langue anglaise), la communication pour des réseaux de capteurs, la communication entre machines M2M (acronyme pour « *Machine-to-Machine* » en langue anglaise), la communication dans les domaines de l'aéronautique et du spatial.

[0007] L'invention vise à remédier en tout ou partie aux inconvénients précités. A cet effet, l'invention a pour objet une antenne fil-plaque monopolaire reconfigurable dans une gamme de fréquences de fonctionnement selon la revendication 1.

Définitions**[0008]****État de l'art**

[0003] Le document de L. Batel et al, "Miniaturization strategy of compact using magneto-dielectric material", Conférence EuCap 2019 (European Conference on Antennas and Propagation), divulgue une antenne qui comprend un plan de masse, un toit capacitif et des fils de court-circuit enrobés de matériau MMD.

[0004] Une antenne fil-plaque monopolaire connue de l'état de la technique, notamment du document L. Batel et al., «Design of a mono polar wire-plate antenna loaded with magneto-dielectric material», Conférence EuCAP (Europeu Conférence on Antennas and Propagation), avril 2018, comporte :

- un plan de masse ;
- un toit capacitif ;
- une sonde d'alimentation, électriquement isolée du plan de masse, et s'étendant entre le plan de masse et le toit capacitif de manière à alimenter électriquement le toit capacitif ;
- un fil de court-circuit, agencé pour connecter électriquement le toit capacitif au plan de masse, et enrobé d'un matériau magnéto-diélectrique.

- Par « plan de masse », on entend une surface électriquement conductrice, de préférence métallique, formant un plan de masse électrique de manière à définir un potentiel électrique de référence.

- Par « toit capacitif », on entend une surface généralement plane, électriquement conductrice (de préférence métallique), pouvant être par exemple de forme rectangulaire ou circulaire, et créant un effet capacitif avec le plan de masse. Le terme « plane » s'entend dans les tolérances usuelles liées aux conditions expérimentales de formation du toit capacitif, et non comme une planéité parfaite au sens géométrique du terme.

- Par « sonde d'alimentation », on entend tout moyen d'alimentation électrique du toit capacitif. La sonde d'alimentation peut être une sonde d'excitation de l'antenne, classiquement reliée à une âme centrale d'un guide coaxial, et électriquement connectée au toit capacitif. La sonde d'alimentation est destinée à être connectée à une ligne de transmission, c'est-à-dire un élément permettant la propagation guidée d'ondes électromagnétiques (e.g. dans le domaine des radiofréquences), la ligne de transmission pouvant être un câble coaxial d'alimentation ou un autre guide d'onde. Le terme « sonde d'alimentation » peut également couvrir une boucle d'alimentation destinée à être reliée à une connexion différentielle, et qui permet de s'affranchir d'un balun entre la ligne de transmission et la boucle d'alimentation.

- Par « enrobé », on entend que le matériau magnéto-diélectrique recouvre (en contact) la totalité de la surface libre du fil de court-circuit.

- Par « matériau magnéto-diélectrique », on entend un matériau possédant, dans la gamme de fréquences de fonctionnement, une permittivité relative (ϵ_r) strictement supérieure à 1, et une perméabilité relative (μ_r) strictement supérieure à 1.

[0005] Une telle antenne de l'état de la technique, grâce au matériau magnéto-diélectrique enrobant le fil de court-circuit, peut avoir des dimensions réduites de l'ordre de 15% par rapport à une architecture sans matériau magnéto-diélectrique, et ce tout en conservant des performances similaires.

[0006] Toutefois, une telle antenne de l'état de la technique n'est pas toujours entièrement satisfaisante dans la mesure où sa taille réduite conduit généralement à une bande spectrale de fonctionnement étroite, qui est susceptible de ne pas couvrir entièrement la bande spectrale d'un standard de communication. Un besoin peut émerger pour élargir sa bande spectrale de fonctionnement via une agilité fréquentielle. Autrement dit, une telle antenne de l'état de la technique n'est pas reconfigurable au sens où sa réponse fréquentielle ne peut être modifiée au cours de son fonctionnement pour s'adapter à un

[0009] Ainsi, une telle antenne selon l'invention permet de déplacer la fréquence de résonance, et par là-même de modifier son point de fonctionnement, en faisant varier l'intensité d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique. Lorsque l'on augmente l'intensité du champ magnétique statique appliqué au

matériau magnéto-diélectrique, la partie réelle de la perméabilité magnétique complexe diminue, et la fréquence de résonance de l'antenne est déplacée vers les hautes fréquences. Réciproquement, lorsque l'on diminue l'intensité du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique, la partie réelle de la perméabilité magnétique complexe augmente, et la fréquence de résonance de l'antenne est déplacée vers les basses fréquences. Par conséquent, un tel matériau magnéto-diélectrique autorise la reconfiguration de la réponse fréquentielle de l'antenne. Il est possible de montrer que la fréquence de résonance varie en fonction de la perméabilité relative (μ_r) du matériau magnéto-diélectrique selon

$$\text{une loi du type } \frac{1}{\sqrt{\tan(\sqrt{\mu_r})}}$$

[0010] L'antenne selon l'invention peut comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes.

[0011] Selon l'invention, l'antenne comporte une source de courant continu configurée pour faire circuler un courant électrique dans le fil de court-circuit, via la sonde d'alimentation et le toit capacitif, de manière à appliquer le champ magnétique statique au matériau magnéto-diélectrique.

[0012] Ainsi, un avantage procuré est d'utiliser le ou les fils de court-circuit d'une antenne fil-plaque monopolaire pour créer un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique (suivant une direction orthoradiale, d'après la loi de Biot et Savart), et ce grâce à la source de courant continu permettant la circulation d'un courant électrique continu dans le ou les fils de court-circuit. Par conséquent, il est possible de piloter la fréquence de résonance de l'antenne en pilotant l'intensité de la source de courant continu.

[0013] Selon une caractéristique de l'invention, le champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique possède une intensité inférieure ou égale à 400 A.m⁻¹.

[0014] Ainsi, un avantage procuré est de pouvoir utiliser des sources de courant continu de faible intensité (inférieure à 5 A) pour la création du champ magnétique statique.

[0015] Selon une caractéristique de l'invention, la perméabilité magnétique complexe possède une partie réelle, et le matériau magnéto-diélectrique est adapté pour que la partie réelle diminue, dans la gamme de fréquences de fonctionnement, entre 8% et 16% lorsque le champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique possède une intensité passant de 0 à 400 A.m⁻¹.

[0016] Ainsi, un avantage procuré est d'obtenir une modulation satisfaisante de la fréquence de résonance de l'antenne pour des intensités faibles de champ magnétique statique.

[0017] Selon une caractéristique de l'invention, la perméabilité magnétique complexe possède une partie réelle et une partie imaginaire, et le matériau magnéto-dié-

lectrique est adapté pour que le ratio entre la partie imaginaire et la partie réelle soit inférieur à 0,05 dans un intervalle de la gamme de fréquences de fonctionnement, lorsque le champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique possède une intensité inférieure ou égale à 400 A.m⁻¹.

[0018] Ainsi, un avantage procuré est d'avoir des pertes magnétiques très faibles dans ledit intervalle (i.e. une sous-gamme de fréquences) appartenant à la gamme de fréquences de fonctionnement.

[0019] Selon une caractéristique de l'invention, le matériau magnéto-diélectrique présente une permittivité diélectrique complexe constante en fonction du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique.

[0020] Ainsi, un avantage procuré est que la permittivité diélectrique complexe reste constante dans la gamme de fréquences de fonctionnement.

[0021] Selon une caractéristique de l'invention, l'antenne comporte un ensemble de fils de court-circuit, agencé parallèlement autour de la sonde d'alimentation de sorte que chaque fil de court-circuit connecte électriquement le toit capacitif au plan de masse, chaque fil de court-circuit étant enrobé d'un matériau magnéto-diélectrique présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique.

[0022] Ainsi, un avantage procuré par la mise en parallèle d'un ensemble de fils de court-circuit, enrobés chacun d'un tel matériau magnéto-diélectrique, est de permettre une meilleure interaction entre l'antenne et le matériau magnéto-diélectrique, et par conséquent une meilleure efficacité de miniaturisation de l'antenne chargée par le matériau magnéto-diélectrique.

[0023] Selon une caractéristique de l'invention, la sonde d'alimentation est agencée au centre du plan de masse, et l'ensemble de fils de court-circuit comporte au moins un couple de fils de court-circuit agencé autour de la sonde d'alimentation selon une symétrie centrale.

[0024] Ainsi, un avantage procuré est d'obtenir une symétrie pour le rayonnement de l'antenne, et de réduire la polarisation croisée (« *cross polarization* » en langue anglaise).

[0025] Selon une caractéristique de l'invention, la sonde d'alimentation est enrobée d'un matériau magnéto-diélectrique présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique.

[0026] Ainsi, un avantage procuré est d'augmenter la quantité de matériau magnéto-diélectrique dans l'antenne, et par là-même l'efficacité de chargement de l'antenne par le matériau magnéto-diélectrique pour réduire ses dimensions.

[0027] Selon une caractéristique de l'invention, l'antenne comporte une couche magnéto-diélectrique s'étendant entre le plan de masse et le toit capacitif de manière à enrober le ou les fils de court-circuit et la sonde d'alimentation, la couche magnéto-diélectrique étant

réalisée dans un matériau magnéto-diélectrique présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique.

[0028] Ainsi, un avantage procuré est la simplicité de fabrication de l'antenne.

[0029] Selon une caractéristique de l'invention, le toit capacitif et le plan de masse délimitent un volume cylindrique, et la couche magnéto-diélectrique s'étend dans tout ou partie du volume cylindrique.

Définition

[0030] Le terme « cylindrique » désigne la forme d'un cylindre dont la surface est engendrée par une famille de droites de même direction (génératrices). A titre d'exemples, la section droite du cylindre (i.e. l'intersection de la surface avec un plan perpendiculaire à la direction des génératrices) peut être circulaire ou quadrangulaire (e.g. rectangulaire).

[0031] Selon une caractéristique de l'invention, le matériau magnéto-diélectrique est choisi de sorte que la relation $\mu_r > \varepsilon_r > 1$ est vérifiée dans la gamme de fréquences de fonctionnement, où :

- μ_r est la perméabilité relative du matériau magnéto-diélectrique,
- ε_r est la permittivité relative du matériau magnéto-diélectrique.

[0032] Ainsi, un avantage procuré par un tel matériau magnéto-diélectrique est de contribuer à la miniaturisation de l'antenne en réduisant la longueur d'onde guidée (λ_g) dans le matériau selon la formule suivante :

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}$$

où λ est la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne.

[0033] On cherche donc un produit $\varepsilon_r \mu_r$ le plus élevé possible pour favoriser la miniaturisation de l'antenne.

[0034] Plus précisément, le fait que $\mu_r > \varepsilon_r > 1$ permet de privilégier un μ_r élevé par rapport à un ε_r élevé, car un ε_r trop élevé conduit généralement à une forte concentration du champ électromagnétique dans l'antenne, avec des problèmes potentiels d'adaptation d'impédance, et menant ainsi à une perte de transfert de puissance électromagnétique (e.g. radiofréquence) en espace libre. D'autre part, l'antenne fil-plaque monopolaire interagit efficacement avec les propriétés magnétiques du matériau magnéto-diélectrique par l'intermédiaire du ou des fils de court-circuit, ce qui lui confère un comportement magnétique spécifique en champ proche.

[0035] Selon une caractéristique de l'invention, le matériau magnéto-diélectrique est choisi parmi $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_{1-y}\text{Co}_{1-z}\text{Fe}_{2-\delta}\text{O}_4$, avec $0,5 < x < 0,8$; $0,2 < y < 0,8$;

$0 < z < 0,2$; $\delta < 0,5$.

[0036] Ainsi, de tels matériaux magnéto-diélectriques possèdent des propriétés avantageuses :

- (i) la relation $\mu_r > \varepsilon_r > 1$ est vérifiée,
- (ii) forte sensibilité de la perméabilité magnétique complexe en faisant varier un champ magnétique statique de faible intensité (inférieure à 400 A.m⁻¹),
- (iii) $\text{Fe}_{2-\delta}$ permet de limiter les pertes diélectriques,
- (iv) Ni_{1-x} permet de limiter les pertes électromagnétiques dans la gamme de fréquences de fonctionnement (en particulier [30 MHz-250 MHz]),
- (v) Co_{1-z} permet un piégeage de parois magnétiques au sein du matériau.

[0037] Selon une caractéristique de l'invention, le toit capacitif et le plan de masse présentent chacun une dimension caractéristique maximale telle que l'antenne est contenue dans une sphère avec un rayon électrique inférieur ou égal à $\lambda/2\pi$, où λ est la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne.

[0038] Ainsi, un avantage procuré est d'obtenir une antenne miniature. Par « miniature », on entend que l'antenne est contenue dans une sphère (dite de Wheeler), de rayon électrique inférieur ou égal à $\lambda/2\pi$. Par exemple, dans le cas d'un toit capacitif circulaire, le rayon de la sphère de Wheeler est l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont l'angle droit est formé par un rayon du toit capacitif et par la hauteur de l'antenne (distance euclidienne entre le plan de masse et le toit capacitif).

[0039] Selon une caractéristique de l'invention, la gamme de fréquences de fonctionnement est comprise entre 30 MHz et 250 MHz.

[0040] Ainsi, un avantage procuré par la bande VHF (acronyme pour « *Very High Frequency* » en langue anglaise) est d'être favorable aux liaisons mobiles et fixes avec de faibles puissances, par exemple pour des liaisons terrestres, maritimes ou aéronautiques.

Brève description des dessins

[0041] D'autres caractéristiques et avantages apparaîtront dans l'exposé détaillé de différents modes de réalisation de l'invention, l'exposé étant assorti d'exemples et de références aux dessins joints.

Figure 1 est une vue schématique en perspective d'une antenne fil-plaque monopolaire selon l'invention, illustrant un unique fil de court-circuit enrobé d'un matériau magnéto-diélectrique.

Figure 2 est une vue schématique en perspective d'une antenne fil-plaque monopolaire de l'état de la technique, illustrant un ensemble de fils de court-circuit, agencés parallèlement autour de la sonde d'alimentation de sorte que chaque fil de court-circuit connecte électriquement le toit capacitif au plan de masse, les fils de court-circuit n'étant pas enrobés d'un matériau magnéto-diélectrique.

Figure 3 est une vue schématique analogue à la figure 2, à l'échelle agrandie, d'une antenne fil-plaque monopolaire selon l'invention, où les fils de court-circuit sont enrobés d'un matériau magnéto-diélectrique.

Figure 4 est une vue schématique en perspective d'une antenne selon l'invention, illustrant un premier mode de réalisation de l'enrobage (enrobage individuel des fils de court-circuit) par le matériau magnéto-diélectrique.

Figure 5 est une vue schématique en perspective d'une antenne selon l'invention, illustrant un deuxième mode de réalisation de l'enrobage (enrobage individuel des fils de court-circuit et de la sonde d'alimentation) par le matériau magnéto-diélectrique.

Figure 6 est une vue schématique en perspective d'une antenne selon l'invention, illustrant un troisième mode de réalisation de l'enrobage (enrobage global des fils de court-circuit et de la sonde d'alimentation) par le matériau magnéto-diélectrique.

Figure 7 est une vue schématique de dessus (en transparence) d'un substrat magnéto-diélectrique dans lequel sont formés des trous d'interconnexion de manière à obtenir une antenne fil-plaque monopolaire conforme à l'invention.

Figure 8 est une vue schématique en coupe selon l'axe A-A du substrat magnéto-diélectrique illustré à la figure 7.

Figure 9 est une vue schématique en coupe d'une antenne selon l'invention, illustrant une source de courant continu permettant la circulation d'un courant électrique continu dans les fils de court-circuit pour créer un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique.

Figure 10 est un graphique représentant en abscisses l'intensité (en Oersted) du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique, et en ordonnées la partie réelle de la perméabilité magnétique complexe du matériau magnéto-diélectrique, et ce pour différentes fréquences de fonctionnement de l'antenne (30 MHz, 50 MHz, 80 MHz, et 90 MHz).

Figure 11 est une vue schématique représentant en abscisses la fréquence (en MHz) et en ordonnées l'impédance de l'antenne (en ohms) lorsque la source de courant continu délivre 0 A ou 5 A. Les traits continus désignent la partie réelle de l'impédance tandis que les traits pointillés désignent la partie imaginaire de l'impédance.

[0042] Il est à noter que les dessins décrits ci-avant sont schématiques, et ne sont pas nécessairement à l'échelle par souci de lisibilité et pour en simplifier leur compréhension.

Exposé détaillé des modes de réalisation

[0043] Les éléments identiques ou assurant la même

fonction porteront les mêmes références pour les différents modes de réalisation, par souci de simplification.

[0044] Un objet de l'invention est une antenne fil-plaque monopolaire reconfigurable dans une gamme de fréquences de fonctionnement, comportant :

- un plan de masse 1 ;
- un toit capacitif 2 ;
- une sonde d'alimentation 3, électriquement isolée du plan de masse 1, et s'étendant entre le plan de masse 1 et le toit capacitif 2 de manière à alimenter électriquement le toit capacitif 2 ;
- au moins un fil de court-circuit 4, agencé pour connecter électriquement le toit capacitif 2 au plan de masse 1, et enrobé d'un matériau magnéto-diélectrique 5 présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5.

Plan de masse

[0045] Le plan de masse 1 peut être réalisé dans un matériau métallique, tel que le cuivre. Le plan de masse 1 peut être de forme circulaire, comme illustré aux figures 1 à 3. Cependant, d'autres formes sont envisageables pour le plan de masse 1, telles qu'une forme rectangulaire (illustrée aux figures 4 à 6) ou carrée.

[0046] Le plan de masse 1 peut être formé sur un substrat diélectrique (non illustré). Une ouverture est réalisée dans le plan de masse 1 (et le cas échéant dans le substrat diélectrique) pour permettre le passage de la sonde d'alimentation 3.

[0047] Il est possible d'équiper le plan de masse 1 de composants, par exemple un circuit de courant continu (DC), un circuit radiofréquences (RF) ou encore une pile d'alimentation, et ce sans altérer le fonctionnement de l'antenne.

Toit capacitif

[0048] Le toit capacitif 2 comporte une surface plane électriquement conductrice, de préférence métallique. Le toit capacitif 2 s'étend avantageusement parallèlement au plan de masse 1. Le terme « parallèlement » s'entend dans les tolérances usuelles liées aux conditions expérimentales de formation des éléments de l'antenne, et non comme un parallélisme parfait au sens mathématique (géométrique) du terme. Toutefois, le toit capacitif 2 peut présenter une inclinaison par rapport au plan de masse 1 dès lors qu'un effet capacitif est créé avec le plan de masse 1. L'angle d'inclinaison formé entre le toit capacitif 2 et le plan de masse 1 est préférentiellement inférieur ou égal à 30°.

[0049] Le toit capacitif 2 créé ainsi un effet capacitif avec le plan de masse 1 permettant d'abaisser la fréquence de résonance de l'antenne, ou réduire la longueur du monopôle (i.e. la sonde d'alimentation 3) pour

une fréquence de résonance donnée.

[0050] Le toit capacitif 2 est de préférence de forme circulaire, par exemple avec un rayon de l'ordre de $\lambda/11$, où λ est la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne. A titre d'exemple non limitatif, dans la bande des très hautes fréquences (VHF pour « *Very High Frequency* » en langue anglaise), à 135 MHz, le rayon du toit capacitif 2 est de l'ordre de 200 mm.

[0051] Toutefois, d'autres formes sont envisageables pour le toit capacitif 2, telles qu'une forme carrée, rectangulaire, elliptique, ou encore en étoile.

[0052] La gamme de fréquences de fonctionnement de l'antenne est avantageusement comprise entre 30 MHz et 250 MHz.

Sonde d'alimentation

[0053] La sonde d'alimentation 3 n'est pas en contact du plan de masse 1 de manière à être électriquement isolée du plan de masse 1. A titre d'exemple non limitatif, la sonde d'alimentation 3 peut être rendue solidaire du plan de masse 1 à l'aide d'une entretoise (non illustrée) qui n'est pas électriquement conductrice.

[0054] La sonde d'alimentation 3 s'étend avantageusement perpendiculairement au plan de masse 1, et donc perpendiculairement au toit capacitif 2, afin de s'affranchir de la perturbation du diagramme de rayonnement de l'antenne par le plan de masse 1. La sonde d'alimentation 3 peut être reliée à une âme centrale 30, métallique, d'un guide d'onde coaxial. La sonde d'alimentation 3 s'étend entre le plan de masse 1 et le toit capacitif 2, par exemple sur une hauteur de l'ordre de $\lambda/11$, où λ est la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne. A titre d'exemple non limitatif, dans la bande des très hautes fréquences (VHF pour « *Very High Frequency* » en langue anglaise), à 135 MHz, la hauteur de la sonde d'alimentation 3 (entre le plan de masse 1 et le toit capacitif 2) est de l'ordre de 200 mm.

[0055] La sonde d'alimentation 3 est préférentiellement agencée au centre du plan de masse 1, comme illustré aux figures 2 à 6. La sonde d'alimentation 3 est avantageusement enrobée d'un matériau magnéto-diélectrique 5 présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5, comme illustré aux figures 5 et 6.

[0056] La sonde d'alimentation 3 est destinée à être connectée à une ligne de transmission permettant la propagation guidée d'ondes électromagnétiques (e.g. dans le domaine des radiofréquences), la ligne de transmission pouvant être un câble coaxial d'alimentation ou un autre guide d'onde.

[0057] Selon une variante de réalisation non illustrée, la sonde d'alimentation 3 peut être réalisée sous la forme d'une boucle d'alimentation, destinée à être reliée à une connexion différentielle, et qui permet de s'affranchir d'un balun entre la ligne de transmission et la boucle d'alimentation.

Fil(s) de court-circuit

[0058] Le ou les fils de court-circuit 4 sont de préférence réalisés dans un matériau métallique. Le ou les fils de court-circuit 4 s'étendent avantageusement perpendiculairement au plan de masse 1, et donc perpendiculairement au toit capacitif 2. Lorsque l'antenne comporte un ensemble de fils de court-circuit 4, les fils de court-circuit 4 de l'ensemble sont avantageusement parallèles entre eux. Le ou les fils de court-circuit 4 sont agencés à distance de la sonde d'alimentation 3.

[0059] L'antenne comporte avantageusement un ensemble de fils de court-circuit 4, agencé parallèlement autour de la sonde d'alimentation 3 de sorte que chaque fil de court-circuit 4 connecte électriquement le toit capacitif 2 au plan de masse 1, chaque fil de court-circuit 4 étant enrobé d'un matériau magnéto-diélectrique 5 présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5.

[0060] Lorsque la sonde d'alimentation 3 est agencée au centre du plan de masse 1, l'ensemble de fils de court-circuit comporte avantageusement au moins un couple de fils de court-circuit 4 agencé autour de la sonde d'alimentation 3 selon une symétrie centrale.

[0061] Le toit capacitif 2 et le plan de masse 1 présentent chacun une dimension caractéristique maximale telle que l'antenne est contenue dans une sphère avec un rayon électrique inférieur ou égal à $\lambda/2\pi$, où λ est la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne. Plus précisément, lorsque l'antenne comporte un ensemble de fils de court-circuit 4, le nombre (noté N) de fils de court-circuit 4 est choisi de sorte que, pour une quantité donnée de matériau magnéto-diélectrique 5, le toit capacitif 2 et la sonde d'alimentation 3 présentent chacun une dimension caractéristique maximale telle que l'antenne est contenue dans une sphère avec un rayon électrique inférieur ou égal à $\lambda/2\pi$, où λ est la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne.

[0062] Si l'on considère que chaque fil de court-circuit 4 possède un rayon, noté a, et que chaque fil de court-circuit 4 est séparé d'une distance, notée b, de la sonde d'alimentation 3, les inventeurs ont montré que l'ensemble des fils de court-circuit 4 est équivalent à un unique fil possédant un rayon (dit rayon équivalent R_{eq}) vérifiant :

$$R_{eq} = (ab^{N-1})^{1/N}, \quad N \in \llbracket 1; 3 \rrbracket$$

[0063] Les inventeurs postulent que cette formule fonctionne quel que soit le nombre de fils de court-circuit 4 séparés d'une distance, notée b, de la sonde d'alimentation 3, c'est-à-dire que l'ensemble des fils de court-circuit 4 est équivalent à un unique fil possédant un rayon équivalent R_{eq} vérifiant :

$$R_{eq} = (ab^{N-1})^{1/N}, \quad N \in \mathbb{N}^*$$

[0064] Les inventeurs ont constaté qu'à quantité égale de matériau magnéto-diélectrique 5, la mise en parallèle d'un ensemble de N fils de court-circuit 4, enrobés chacun d'un matériau magnéto-diélectrique 5, permet de réduire la fréquence de résonance de l'antenne (indépendamment du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique) vers les basses fréquences de plus de 30% par rapport à un unique fil de court-circuit 4, enrobé du matériau magnéto-diélectrique 5, et possédant un rayon équivalent R_{eq} calculé par les formules précédentes. En d'autres termes, la mise en parallèle d'un ensemble de N fils de court-circuit 4, enrobés chacun d'un matériau magnéto-diélectrique 5, permet une meilleure efficacité du chargement de l'antenne par le matériau magnéto-diélectrique 5. Pour une architecture à un unique fil de court-circuit 4, il est estimé qu'il faudrait un volume de matériau magnéto-diélectrique 20 fois supérieur pour réduire la fréquence de résonance de l'antenne vers les basses fréquences de plus de 30%, ce qui conduirait à un encombrement substantiel, des pertes supplémentaires (liées à la quantité de matériau additionnel), et un poids supérieur de l'antenne.

[0065] A titre d'exemples non limitatifs, comme illustré aux figures 2 et 3, l'ensemble de fils de court-circuit 4 peut comporter trois couples de fils de court-circuit 4 agencés autour de la sonde d'alimentation 3 selon une symétrie centrale. Chaque fil de court-circuit 4 peut présenter un rayon (a) de l'ordre de 2,4 mm. Chaque couple de fils de court-circuit 4 peut être séparé d'une distance (b) de l'ordre de 80 mm de part et d'autre de la sonde d'alimentation 3 selon une symétrie centrale.

[0066] Les fils de court-circuit 4 sont avantageusement séparés de la sonde d'alimentation 3 d'une distance choisie pour adapter l'impédance d'entrée de l'antenne à 50 ohms.

[0067] Comme illustré aux figures 4 à 6, il est à noter que l'ensemble de fils de court-circuit 4 peut comporter un nombre impair de fils de court-circuit 4. Toutefois, cela peut conduire à une dissymétrie pour le rayonnement de l'antenne et à l'apparition d'une polarisation croisée (« *cross polarization* » en langue anglaise).

Matériau magnéto-diélectrique

[0068] L'antenne peut comporter des moyens d'application, agencés pour appliquer le champ magnétique statique au matériau magnéto-diélectrique 5. Les moyens d'application sont configurés pour faire varier l'intensité du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5.

[0069] L'antenne comporte avantageusement une source de courant continu 8 configurée pour faire circuler un courant électrique dans le ou les fils de court-circuit 4, via la sonde d'alimentation 3 et le toit capacitif 2, de manière à appliquer le champ magnétique statique au

matériau magnéto-diélectrique 5. Comme illustré à la figure 9, la source de courant continu 8 peut être séparée d'une source de courant alternatif 9 à l'aide d'un composant T, par exemple un composant T de type T de polarisation (« *Bias tee* » en langue anglaise). La source de courant alternatif 9 est configurée pour faire circuler un courant électrique alternatif dans le toit capacitif 2, via la sonde d'alimentation 3, de manière à émettre des ondes radioélectriques.

[0070] Le champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5 possède avantageusement une intensité inférieure ou égale à 400 A.m⁻¹. Comme illustré à la figure 10, la perméabilité magnétique complexe du matériau magnéto-diélectrique 5 possède une partie réelle, et le matériau magnéto-diélectrique 5 est avantageusement adapté pour que la partie réelle diminue, dans la gamme de fréquences de fonctionnement, entre 8% et 16% lorsque le champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5 possède une intensité passant de 0 à 400 A.m⁻¹ (comme illustré à la figure 10). La perméabilité magnétique complexe du matériau magnéto-diélectrique 5 possède une partie réelle et une partie imaginaire, et le matériau magnéto-diélectrique 5 est avantageusement adapté pour que le ratio entre la partie imaginaire et la partie réelle soit inférieur à 0,05 dans un intervalle de la gamme de fréquences de fonctionnement, lorsque le champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5 possède une intensité inférieure ou égale à 400 A.m⁻¹.

[0071] Comme illustré à la figure 11, il est possible de décaler de 10% la fréquence de résonance de l'antenne vers les hautes fréquences lorsque l'on fait varier la source de courant continu de 0 A à 5 A.

[0072] Le matériau magnéto-diélectrique 5 présente avantageusement une permittivité diélectrique complexe constante en fonction du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5.

[0073] Comme illustré à la figure 6, l'antenne peut comporter une couche magnéto-diélectrique 5 s'étendant entre le plan de masse 1 et le toit capacitif 2 de manière à enrober le ou les fils de court-circuit 4 et la sonde d'alimentation 3, la couche magnéto-diélectrique 5 étant réalisée dans un matériau magnéto-diélectrique 5 présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5. Le toit capacitif 2 et le plan de masse 1 délimitent un volume cylindrique, et la couche magnéto-diélectrique 5 peut s'étendre dans tout ou partie du volume cylindrique.

[0074] Comme illustré aux figures 4 et 5, le matériau magnéto-diélectrique 5 peut également être réalisé sous la forme d'un cylindre creux à l'intérieur duquel s'étend un fil de court-circuit 4 ou la sonde d'alimentation 3.

[0075] Le matériau magnéto-diélectrique 5 possède des parois magnétiques avec des zones de transition entre deux domaines magnétiques (dits domaines de Weiss). Un domaine magnétique est une région du matériau où les moments magnétiques sont orientés dans

la même direction. Les parois magnétiques du matériau magnéto-diélectrique 5 sont configurées de sorte que le matériau magnéto-diélectrique 5 présente une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5. Pour ce faire, les parois magnétiques du matériau magnéto-diélectrique 5 sont avantageusement formées de manière à obtenir des parois de Bloch, c'est-à-dire des parois magnétiques où la zone de transition entre deux domaines magnétiques s'effectue graduellement dans le plan de la paroi magnétique. De plus, les parois de Bloch peuvent se mouvoir de sorte que le matériau magnéto-diélectrique 5 présente une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction d'un champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5. Par ailleurs, le matériau magnéto-diélectrique 5 est avantageusement conformé géométriquement pour s'affranchir d'un effet démagnétisant, de sorte la perméabilité magnétique complexe varie sensiblement lorsque le champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique 5 possède une intensité inférieure ou égale à 400 A.m⁻¹.

[0076] Le matériau magnéto-diélectrique 5 est avantageusement choisi de sorte que la relation $\mu_r > \epsilon_r > 1$ est vérifiée dans la gamme de fréquences de fonctionnement, où :

- μ_r est la perméabilité relative du matériau magnéto-diélectrique 5,
- ϵ_r est la permittivité relative du matériau magnéto-diélectrique 5.

[0077] Le matériau magnéto-diélectrique 5 est avantageusement choisi parmi $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_{1-y}\text{Co}_{1-z}\text{Fe}_{2-\delta}\text{O}_4$, avec $0,5 < x < 0,8$; $0,2 < y < 0,8$; $0 < z < 0,2$; $\delta < 0,5$.

Procédé de fabrication de l'antenne

[0078] Comme illustré aux figures 7 et 8, un procédé de fabrication d'une antenne fil-plaque monopolaire, comporte les étapes :

- a) prévoir un substrat 6, réalisé dans un matériau magnéto-diélectrique 5, et présentant des première et seconde surfaces 60, 61 planes opposées ;
- b) former un premier trou d'interconnexion 7a à travers le substrat 6 de manière à obtenir une sonde d'alimentation 3 ;
- c) former un ensemble de trous d'interconnexion 7b à travers le substrat 6, agencés parallèlement autour du premier trou d'interconnexion 7a, de manière à obtenir un ensemble de fils de court-circuit 4 ;
- d) former un toit capacitif 2 à la première surface 60 du substrat 6 ;
- e) former un plan de masse 1 à la seconde surface 61 du substrat 6 ; l'étape e) étant exécutée de sorte que la sonde d'alimentation 3 est électriquement isolée du plan de masse 1.

[0079] Par « trou d'interconnexion » (« *via* » en langue anglaise), on entend un trou métallisé permettant d'établir une liaison électrique entre deux niveaux d'interconnexion.

5 [0080] Les trous d'interconnexion 7a, 7b peuvent être métallisés par pulvérisation cathodique (« *sputtering* » en langue anglaise).

10 [0081] A l'issue de l'étape e), l'ensemble de fils de court-circuit 4 et la sonde d'alimentation 3 sont enrobés du matériau magnéto-diélectrique 5 du substrat 6.

Procédé de fabrication du matériau magnéto-diélectrique

15 [0082] Le matériau magnéto-diélectrique 5 de type $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_{1-y}\text{Co}_{1-z}\text{Fe}_{2-\delta}\text{O}_4$ avec $0,5 < x < 0,8$; $0,2 < y < 0,8$; $0 < z < 0,2$; $\delta < 0,5$ peut être formé à partir de poudres synthétisées par voie de co-précipitation. Des sels de chlorures de Fer, de Cobalt, de Nickel, de Zinc sont pesés de manière à respecter la stoechiométrie des éléments métalliques du matériau final. Ces sels sont ajoutés à une solution basique de NaOH, portée à ébullition. Le pH de la solution basique de NaOH est optimisé par essais successifs. Le mélange est laissé à réagir pendant une durée d'environ 1 heure. Puis le mélange est laissé à refroidir à température ambiante. Le mélange est ensuite rincé plusieurs fois à l'eau, jusqu'à ce que son pH soit inférieur à 8. Le mélange est alors mis à l'étuve à une température de 55°C pendant environ 48 h, afin qu'il sèche. Le mélange séché obtenu forme une poudre sèche, qui est alors broyée, de préférence manuellement. Puis les poudres sèches broyées sont compressées et mises en forme par pressage uniaxial, de manière à obtenir un matériau compact. Le matériau compact obtenu est enfin fritté, de préférence à une température de frittage comprise entre 950°C et 1100°C.

Revendications

1. Antenne fil-plaque monopolaire reconfigurable dans une gamme de fréquences de fonctionnement, comportant :

- un plan de masse (1) ;
- un toit capacitif (2) ;
- une sonde d'alimentation (3), électriquement isolée du plan de masse (1), et s'étendant entre le plan de masse (1) et le toit capacitif (2) de manière à alimenter électriquement le toit capacitif (2) ;
- au moins un fil de court-circuit (4), agencé pour connecter électriquement le toit capacitif (2) au plan de masse (1), et enrobé d'un matériau magnéto-diélectrique (5) ;

caractérisée en ce que :

- des moyens d'application sont agencés pour appliquer un champ magnétique statique au matériau magnéto-diélectrique (5) avec une intensité inférieure ou égale à 400 A.m^{-1} ;
 - le matériau magnéto-diélectrique (5) présente une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique (5).
2. Antenne selon la revendication 1, comportant une source de courant continu (8) configurée pour faire circuler un courant électrique dans chacun des au moins un fil de court-circuit (4), via la sonde d'alimentation (3) et le toit capacitif (2), de manière à appliquer le champ magnétique statique au matériau magnéto-diélectrique (5).
 3. Antenne selon la revendication 1 ou 2, dans laquelle la perméabilité magnétique complexe possède une partie réelle, et le matériau magnéto-diélectrique (5) est adapté pour que la partie réelle diminue, dans la gamme de fréquences de fonctionnement, entre 8% et 16% lorsque le champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique (5) possède une intensité passant de 0 à 400 A.m^{-1} .
 4. Antenne selon l'une des revendications 1 à 3, dans laquelle la perméabilité magnétique complexe possède une partie réelle et une partie imaginaire, et le matériau magnéto-diélectrique (5) est adapté pour que le ratio entre la partie imaginaire et la partie réelle soit inférieur à 0,05 dans un intervalle de la gamme de fréquences de fonctionnement, lorsque le champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique (5) possède une intensité inférieure ou égale à 400 A.m^{-1} .
 5. Antenne selon l'une des revendications 1 à 4, dans laquelle le matériau magnéto-diélectrique (5) présente une permittivité diélectrique complexe constante en fonction du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique (5).
 6. Antenne selon l'une des revendications 1 à 5, comportant un ensemble de fils de court-circuit (4), agencé parallèlement autour de la sonde d'alimentation (3) de sorte que chaque fil de court-circuit (4) connecte électriquement le toit capacitif (2) au plan de masse (1), chaque fil de court-circuit (4) étant enrobé d'un matériau magnéto-diélectrique (5) présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique (5).
 7. Antenne selon la revendication 6, dans laquelle la sonde d'alimentation (3) est agencée au centre du plan de masse (1), et l'ensemble de fils de court-circuit (4) comporte au moins un couple de fils de court-circuit (4) agencé autour de la sonde d'alimentation (3) selon une symétrie centrale.
 8. Antenne selon l'une des revendications 1 à 7, dans laquelle la sonde d'alimentation (3) est enrobée d'un matériau magnéto-diélectrique (5) présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique (5).
 9. Antenne selon l'une des revendications 1 à 8, comportant une couche magnéto-diélectrique (5) s'étendant entre le plan de masse (1) et le toit capacitif (2) de manière à enrober le ou les fils de court-circuit (4) et la sonde d'alimentation (3), la couche magnéto-diélectrique (5) étant réalisée dans un matériau magnéto-diélectrique (5) présentant une perméabilité magnétique complexe, variable en fonction du champ magnétique statique appliqué au matériau magnéto-diélectrique (5).
 10. Antenne selon la revendication 9, dans laquelle le toit capacitif (2) et le plan de masse (1) délimitent un volume cylindrique, et la couche magnéto-diélectrique (5) s'étend dans tout ou partie du volume cylindrique.
 11. Antenne selon l'une des revendications 1 à 10, dans laquelle le matériau magnéto-diélectrique (5) est choisi de sorte que la relation $\mu_r > \epsilon_r > 1$ est vérifiée dans la gamme de fréquences de fonctionnement, où :
 - μ_r est la perméabilité relative du matériau magnéto-diélectrique (5),
 - ϵ_r est la permittivité relative du matériau magnéto-diélectrique (5).
 12. Antenne selon l'une des revendications 1 à 11, dans laquelle le matériau magnéto-diélectrique (5) est choisi parmi $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_{1-y}\text{Co}_{1-z}\text{Fe}_{2-\delta}\text{O}_4$, avec $0,5 < x < 0,8$; $0,2 < y < 0,8$; $0 < z < 0,2$; $\delta < 0,5$.
 13. Antenne selon l'une des revendications 1 à 12, dans laquelle le toit capacitif (2) et le plan de masse (1) présentent chacun une dimension caractéristique maximale telle que l'antenne est contenue dans une sphère avec un rayon électrique inférieur ou égal à $\lambda/2\pi$, où λ est la longueur d'onde de fonctionnement de l'antenne.
 14. Antenne selon l'une des revendications 1 à 13, dans laquelle la gamme de fréquences de fonctionnement est comprise entre 30 MHz et 250 MHz.

Patentansprüche

1. Monopolare Draht-Plattenantenne, die in einem Betriebsfrequenzbereich rekonfigurierbar ist, umfassend:

- eine Masseebene (1);
- eine Dachkapazität (2);
- eine Versorgungssonde (3), die von der Masseebene (1) elektrisch isoliert ist und sich zwischen der Masseebene (1) und der Dachkapazität (2) erstreckt, sodass sie die Dachkapazität (2) mit Strom versorgt;
- mindestens einen Kurzschlussdraht (4), der dazu angeordnet ist, die Dachkapazität (2) mit der Masseebene (1) elektrisch zu verbinden, und von einem magneto-dielektrischen Material (5) umhüllt ist;

dadurch gekennzeichnet, dass:

- Anlegemittel dazu angeordnet sind, an das magneto-dielektrische Material (5) ein statisches Magnetfeld mit einer Stärke kleiner als oder gleich $400 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ anzulegen;
- das magneto-dielektrische Material (5) eine komplexe magnetische Permeabilität aufweist, die relativ zu dem an das magneto-dielektrische Material (5) angelegten statischen Magnetfeld variabel ist.

2. Antenne nach Anspruch 1, umfassend eine Gleichstromquelle (8), die dazu konfiguriert ist, in jedem des mindestens einen Kurzschlussdrahts (4) einen elektrischen Strom via die Versorgungssonde (3) und die Dachkapazität (2) fließen zu lassen, um das statische Magnetfeld an das magneto-dielektrische Material (5) anzulegen.

3. Antenne nach Anspruch 1 oder 2, wobei die komplexe magnetische Permeabilität einen Realteil besitzt und das magneto-dielektrische Material (5) dazu angepasst ist, dass der Realteil in dem Betriebsfrequenzbereich zwischen 8 % und 16 % abnimmt, wenn das an das magneto-dielektrische Material (5) angelegte statische Magnetfeld eine Stärke besitzt, die von 0 auf $400 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ansteigt.

4. Antenne nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die komplexe magnetische Permeabilität einen Realteil und einen Imaginärteil besitzt und das magneto-dielektrische Material (5) dazu angepasst ist, dass das Verhältnis zwischen dem Imaginärteil und dem Realteil in einem Intervall des Betriebsfrequenzbereichs kleiner als 0,05 ist, wenn das an das magneto-dielektrische Material (5) angelegte statische Magnetfeld eine Stärke kleiner als oder gleich $400 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ besitzt.

5. Antenne nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei das magneto-dielektrische Material (5) relativ zu dem an das magneto-dielektrische Material (5) angelegten statischen Magnetfeld eine konstante komplexe dielektrische Permittivität aufweist.

6. Antenne nach einem der Ansprüche 1 bis 5, umfassend einen Satz von Kurzschlussdrähten (4), die parallel um die Versorgungssonde (3) herum angeordnet sind, sodass jeder Kurzschlussdraht (4) die Dachkapazität (2) mit der Masseebene (1) elektrisch verbindet, wobei jeder Kurzschlussdraht (4) von einem magneto-dielektrischen Material (5) umhüllt ist, das eine komplexe magnetische Permeabilität aufweist, die relativ zu dem an das magneto-dielektrische Material (5) angelegten statischen Magnetfeld variabel ist.

7. Antenne nach Anspruch 6, wobei die Versorgungssonde (3) in der Mitte der Masseebene (1) angeordnet ist und der Satz von Kurzschlussdrähten (4) mindestens ein Paar von Kurzschlussdrähten (4) umfasst, das zentralsymmetrisch um die Versorgungssonde (3) herum angeordnet ist.

8. Antenne nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Versorgungssonde (3) von einem magneto-dielektrischen Material (5) umhüllt ist, das eine komplexe dielektrische Permeabilität aufweist, die relativ zu dem an das magneto-dielektrische Material (5) angelegten statischen Magnetfeld variabel ist.

9. Antenne nach einem der Ansprüche 1 bis 8, umfassend eine magneto-dielektrische Schicht (5), die sich zwischen der Masseebene (1) und der Dachkapazität (2) erstreckt, sodass sie den oder die Kurzschlussdrähte (4) und die Versorgungssonde (3) umhüllt, wobei die magneto-dielektrische Schicht (5) aus einem magneto-dielektrischen Material (5) hergestellt ist, das eine komplexe magnetische Permeabilität aufweist, die relativ zu dem an das magneto-dielektrische Material (5) angelegten statischen Magnetfeld variabel ist.

10. Antenne nach Anspruch 9, wobei die Dachkapazität (2) und die Masseebene (1) ein zylindrisches Volumen begrenzen und sich die magneto-dielektrische Schicht (5) in dem gesamten oder einem Teil des zylindrischen Volumens erstreckt.

11. Antenne nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei das magneto-dielektrische Material (5) so gewählt ist, dass die Gleichung $\mu_r > \epsilon_r > 1$ in dem Betriebsfrequenzbereich erfüllt ist, wobei:

- μ_r die relative Permeabilität des magneto-dielektrischen Materials (5) ist,
- ϵ_r die relative Permittivität des magneto-dielek-

trischen Materials (5) ist.

12. Antenne nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei das magneto-dielektrische Material (5) aus $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$ mit $0,5 < x < 0,8$; $0,2 < y < 0,8$; $0 < z < 0,2$; $\delta < 0,5$ gewählt ist.
13. Antenne nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei die Dachkapazität (2) und die Masseebene (1) jeweils eine maximale charakteristische Größe aufweisen, derart, dass die Antenne in einer Kugel mit einem elektrischen Radius kleiner als oder gleich $\lambda/2\pi$ enthalten ist, wobei λ die Betriebswellenlänge der Antenne ist.
14. Antenne nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei der Betriebsfrequenzbereich zwischen 30 MHz und 250 MHz liegt.

Claims

1. Monopole wire-plate antenna that is reconfigurable in a frequency range of operation, comprising:

- a ground plane (1);
- a capacitive roof (2);
- a probe feed (3), which is electrically insulated from the ground plane (1), and which extends between the ground plane (1) and the capacitive roof (2) so as to electrically feed the capacitive roof (2);
- at least one shorting wire (4), which is arranged to electrically connect the capacitive roof (2) to the ground plane (1), and which is coated in a magneto-dielectric material (5);

characterized in that:

- applying means are arranged to apply a static magnetic field to the magneto-dielectric material (5) with a strength lower than or equal to 400 A.m^{-1} ;
 - the magneto-dielectric material (5) has a complex magnetic permeability, which varies as a function of the static magnetic field applied to the magneto-dielectric material (5).
2. Antenna according to Claim 1, comprising a DC current source (8) configured to make an electrical current flow through each of the at least one shorting wire (4), via the probe feed (3) and the capacitive roof (2), so as to apply the static magnetic field to the magneto-dielectric material (5).
3. Antenna according to Claim 1 or 2, wherein the complex magnetic permeability possesses a real part, and the magneto-dielectric material (5) is such that

the real part decreases, in the frequency range of operation, between 8% and 16% when the strength of the static magnetic field applied to the magneto-dielectric material (5) passes from 0 to 400 A.m^{-1} .

4. Antenna according to one of Claims 1 to 3, wherein the complex magnetic permeability possesses a real part and an imaginary part, and the magneto-dielectric material (5) is such that the ratio between the imaginary part and the real part is lower than 0.05 in an interval of the frequency range of operation, when the static magnetic field applied to the magneto-dielectric material (5) has a strength lower than or equal to 400 A.m^{-1} .
5. Antenna according to one of Claims 1 to 4, wherein the magneto-dielectric material (5) has a complex dielectric permittivity that remains constant as a function of the static magnetic field applied to the magneto-dielectric material (5).
6. Antenna according to one of Claims 1 to 5, comprising a set of shorting wires (4), which are arranged in parallel around the probe feed (3) so that each shorting wire (4) electrically connects the capacitive roof (2) to the ground plane (1), each shorting wire (4) being coated in a magneto-dielectric material (5) having a complex magnetic permeability that varies as a function of the static magnetic field applied to the magneto-dielectric material (5).
7. Antenna according to Claim 6, wherein the probe feed (3) is arranged at the centre of the ground plane (1), and the set of shorting wires (4) comprises at least one pair of shorting wires (4) that is arranged around the probe feed (3) in such a way as to exhibit central symmetry.
8. Antenna according to one of Claims 1 to 7, wherein the probe feed (3) is coated in a magneto-dielectric material (5) having a complex magnetic permeability that varies as a function of the static magnetic field applied to the magneto-dielectric material (5).
9. Antenna according to one of Claims 1 to 8, comprising a magneto-dielectric layer (5) extending between the ground plane (1) and the capacitive roof (2) so as to coat the one or more shorting wires (4) and the probe feed (3), the magneto-dielectric layer (5) being made of a magneto-dielectric material (5) having a complex magnetic permeability that varies as a function of the static magnetic field applied to the magneto-dielectric material (5).
10. Antenna according to Claim 9, wherein the capacitive roof (2) and the ground plane (1) delineate a cylindrical volume, and the magneto-dielectric layer (5) extends into all or part of the cylindrical volume.

11. Antenna according to one of Claims 1 to 10, wherein the magneto-dielectric material (5) is chosen such that the relationship $\mu_r > \epsilon_r > 1$ is respected in the frequency range of operation, where:

5

- μ_r is the relative permeability of the magneto-dielectric material (5);
- ϵ_r is the relative permittivity of the magneto-dielectric material (5).

10

12. Antenna according to one of Claims 1 to 11, wherein the magneto-dielectric material (5) is chosen from $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_{1-y}\text{Co}_{1-z}\text{Fe}_{2-\delta}\text{O}_4$, with $0.5 < x < 0.8$; $0.2 < y < 0.8$; $0 < z < 0.2$; $\delta < 0.5$.

15

13. Antenna according to one of Claims 1 to 12, wherein the capacitive roof (2) and the ground plane (1) each have a maximum characteristic dimension such that the antenna is contained in a sphere with an electric radius smaller than or equal to $\lambda/2\pi$, where λ is the wavelength of operation of the antenna.

20

14. Antenna according to one of Claims 1 to 13, wherein the frequency range of operation is comprised between 30 MHz and 250 MHz.

25

30

35

40

45

50

55

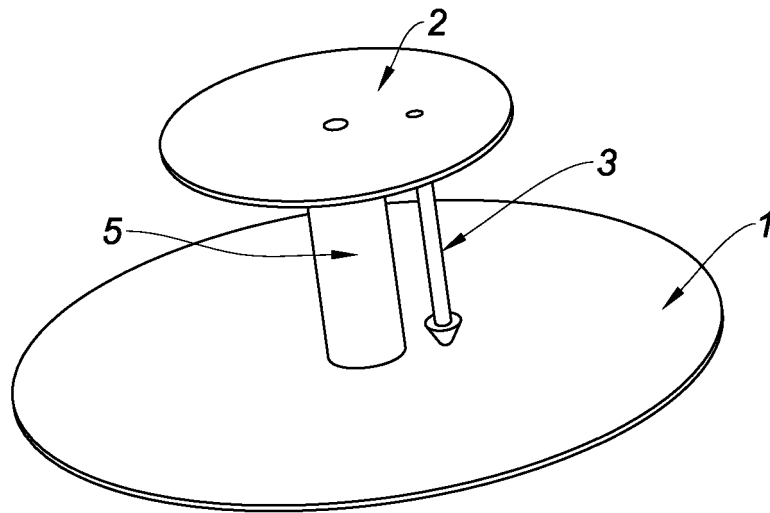


Fig. 1

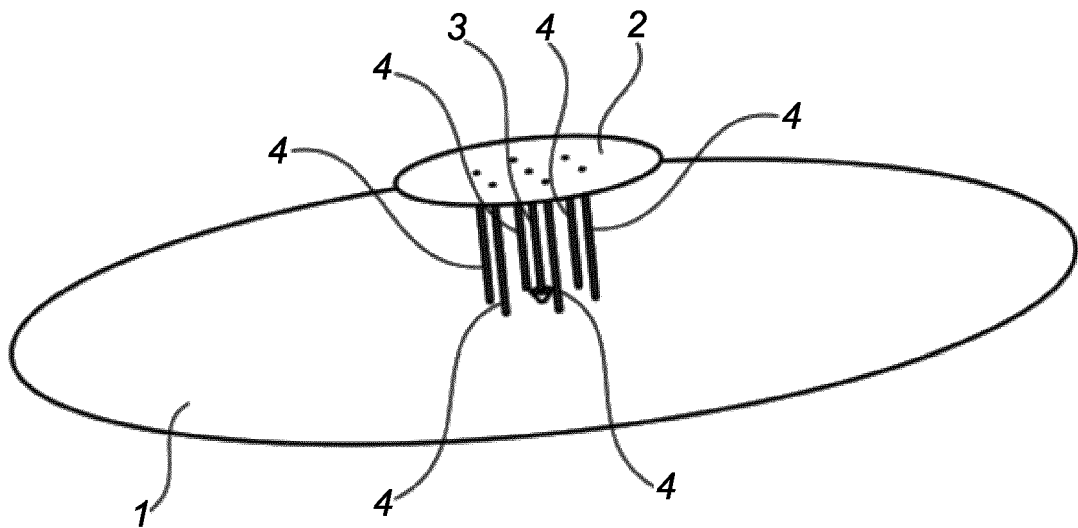


Fig. 2

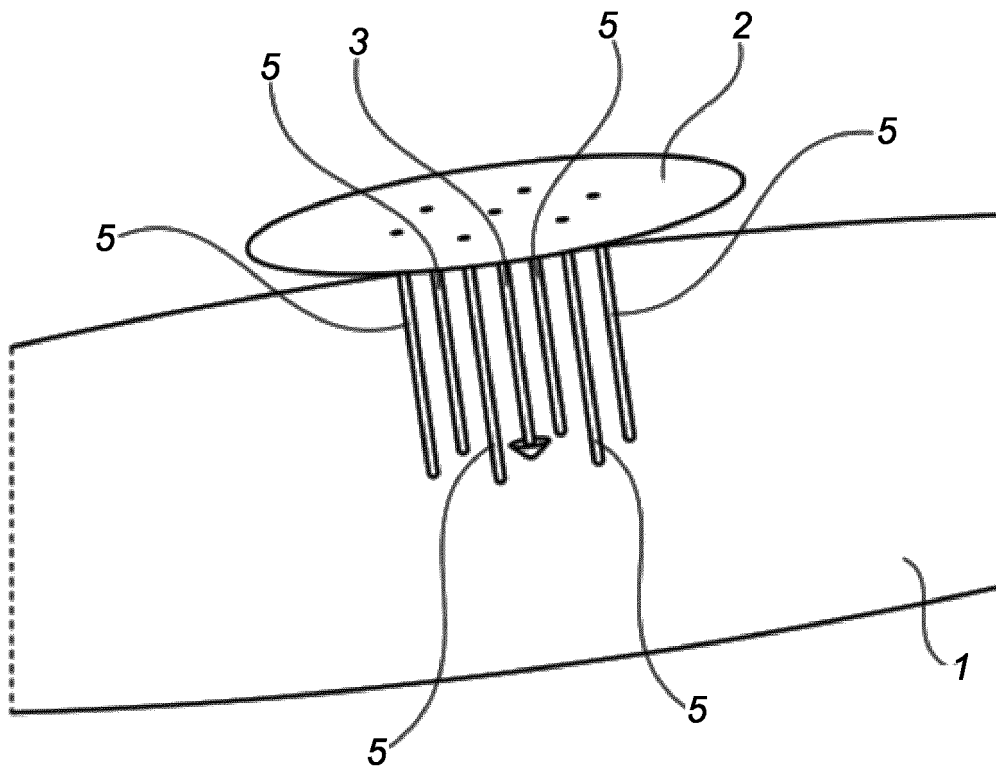


Fig. 3

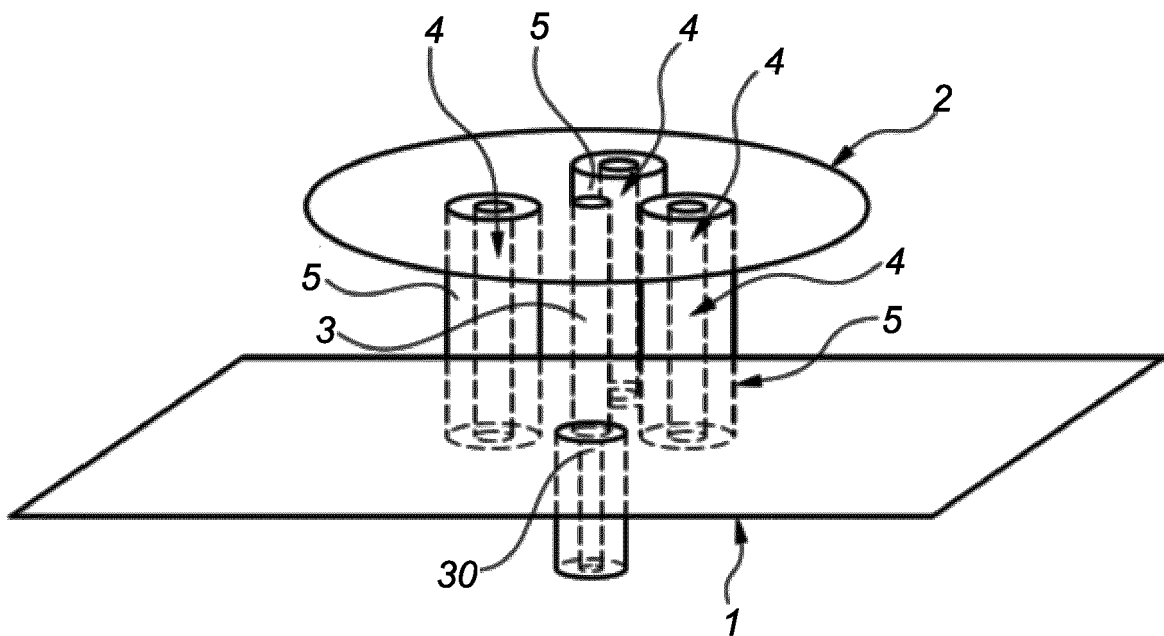


Fig. 4

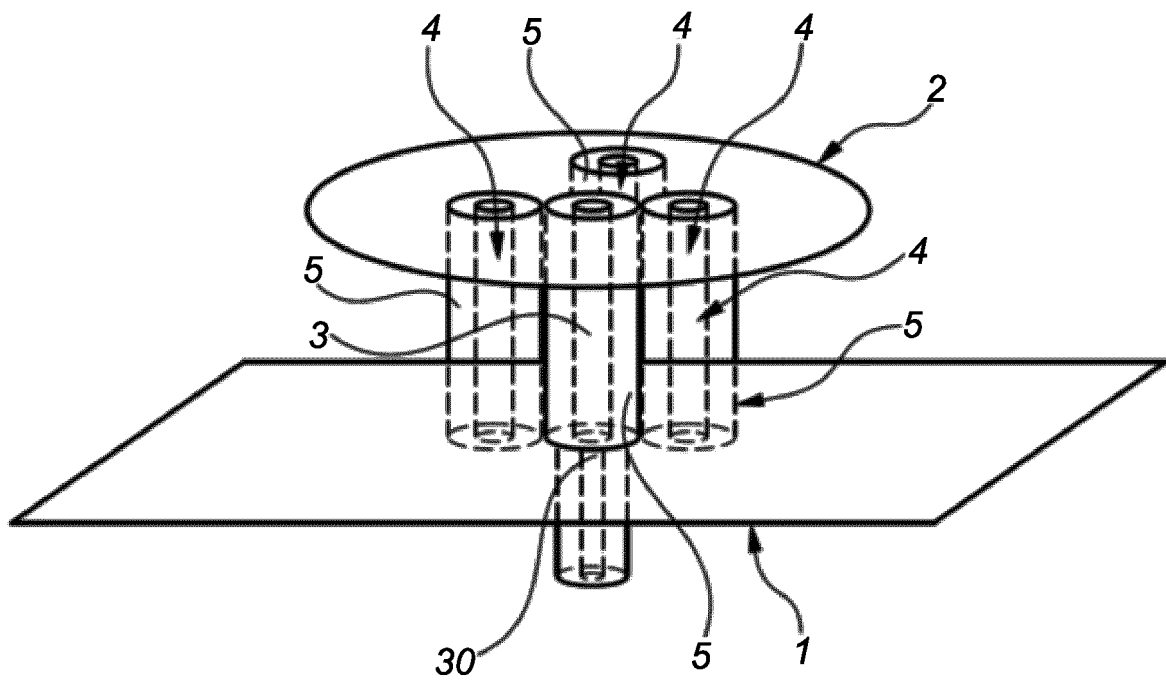


Fig. 5

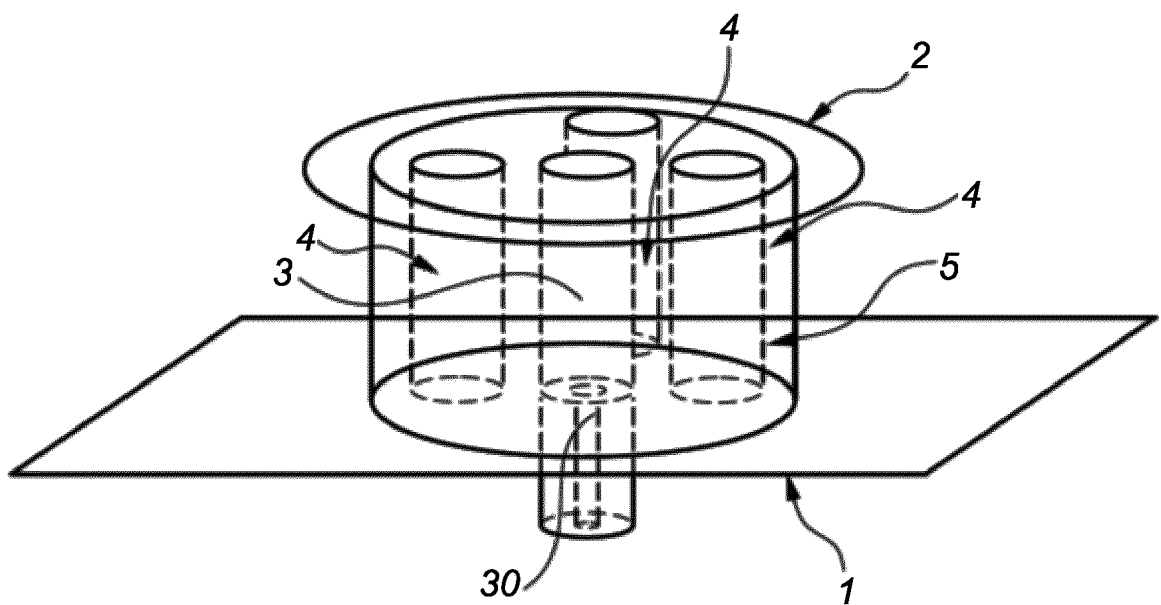


Fig. 6

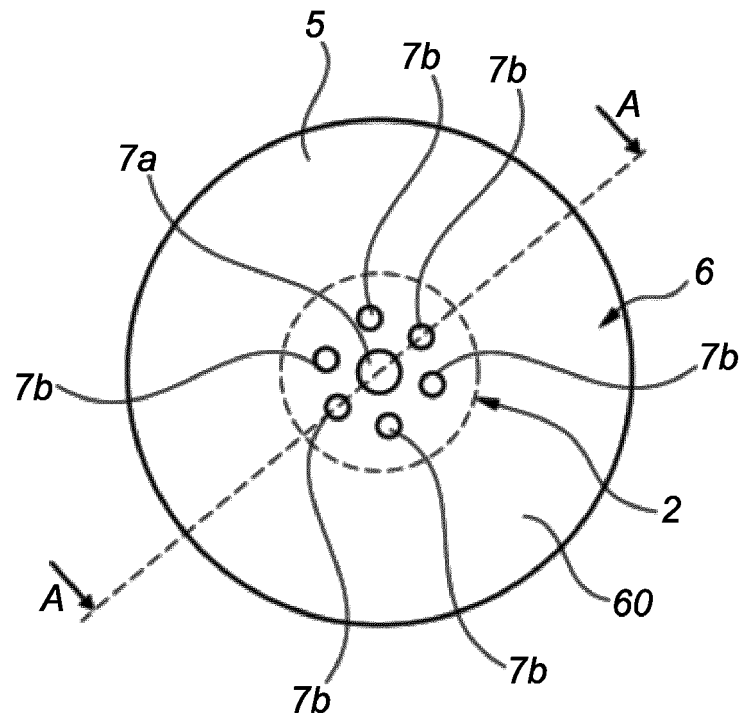


Fig.7

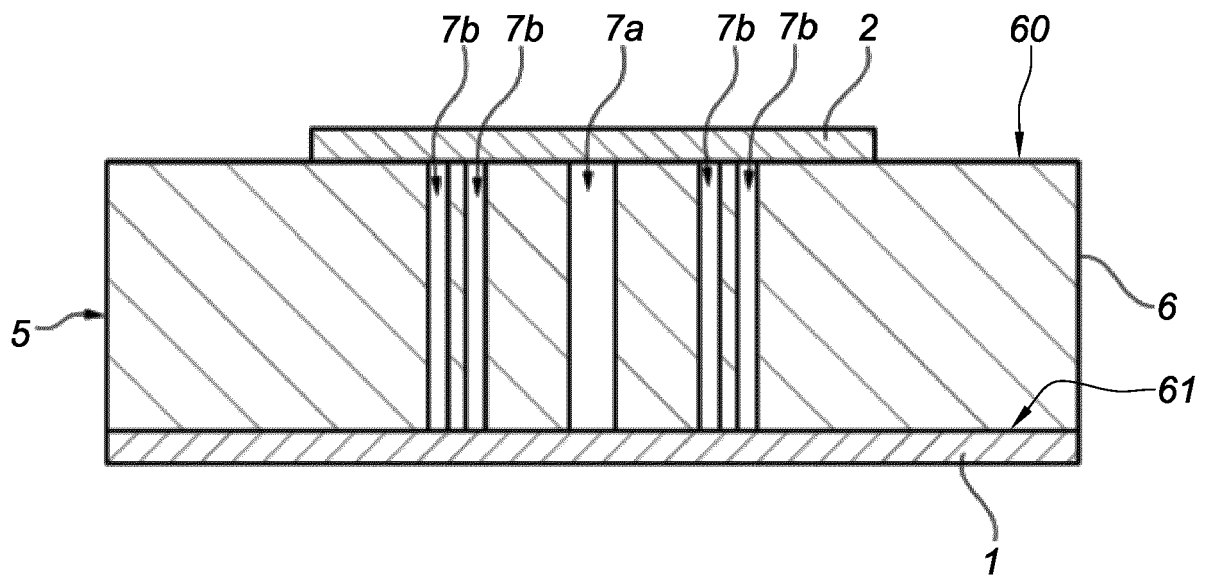
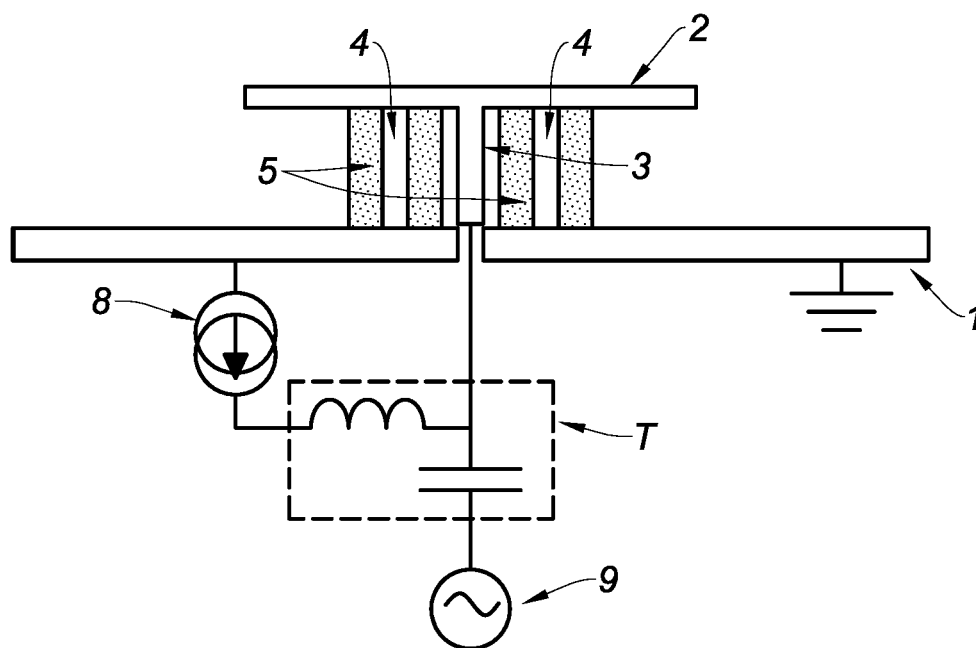
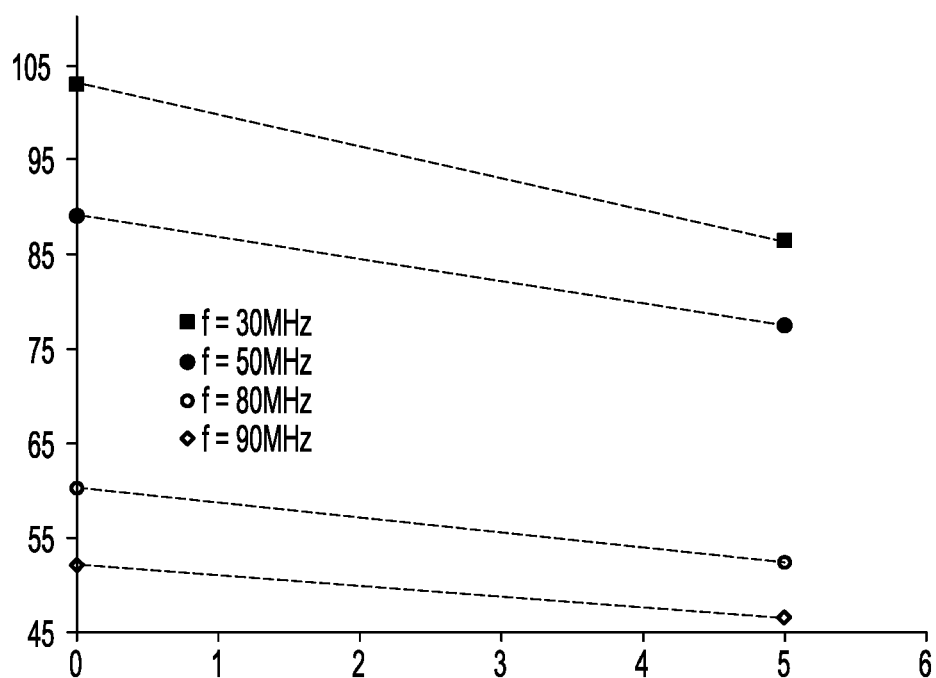


Fig.8

*Fig. 9**Fig. 10*

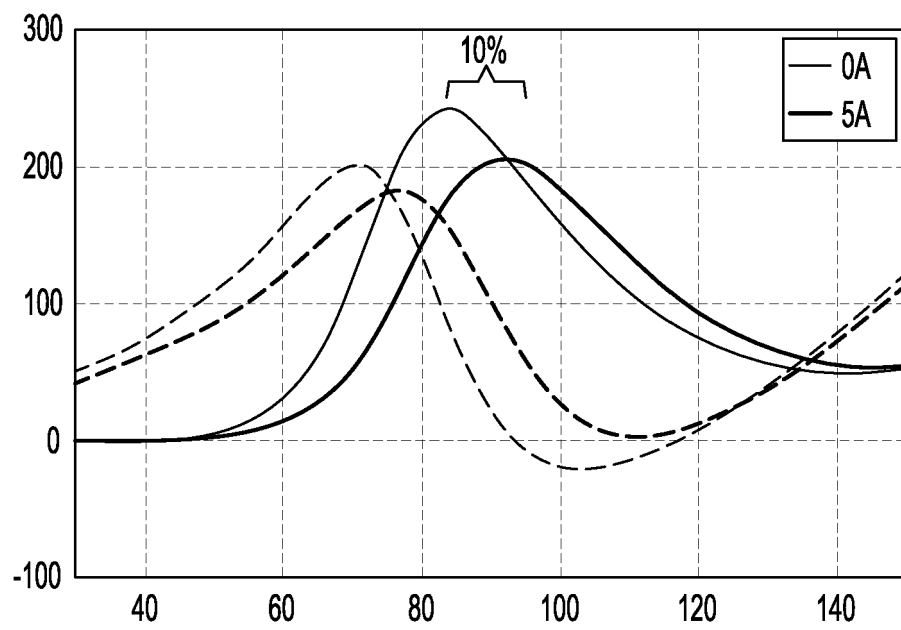


Fig. 11

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

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

Littérature non-brevet citée dans la description

- **L. BATEL et al.** Miniaturization strategy of compact using magneto-dielectric material. *Conférence Eu-Cap*, 2019 [0003]
- **L. BATEL et al.** Design of a mono polar wire-plate antenna loaded with magneto-dielectric material. *Conférence EuCAP (Europeau Conférence on Antennas and Propagation)*, Avril 2018 [0004]