

(19)



(11)

**EP 3 529 858 B1**

(12)

**FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention  
de la délivrance du brevet:  
**23.02.2022 Bulletin 2022/08**

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):  
**H01Q 1/52** <sup>(2006.01)</sup> **H01Q 1/28** <sup>(2006.01)</sup>  
**H01Q 19/02** <sup>(2006.01)</sup>

(21) Numéro de dépôt: **17804605.8**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):  
**H01Q 1/52; H01Q 1/28; H01Q 19/021**

(22) Date de dépôt: **24.10.2017**

(86) Numéro de dépôt international:  
**PCT/FR2017/052938**

(87) Numéro de publication internationale:  
**WO 2018/078282 (03.05.2018 Gazette 2018/18)**

(54) **REVÊTEMENT POUR LA DISSIMULATION D'OBJETS AU RAYONNEMENT  
ÉLECTROMAGNÉTIQUE D'ANTENNES**

BESCHICHTUNG ZUR VERBERGUNG VON OBJEKTEN VOR DER ELEKTROMAGNETISCHEN  
STRAHLUNG VON ANTENNEN

COATING FOR THE CONCEALMENT OF OBJECTS FROM THE ELECTROMAGNETIC RADIATION  
OF ANTENNAS

(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: **24.10.2016 FR 1660282**

(43) Date de publication de la demande:  
**28.08.2019 Bulletin 2019/35**

(73) Titulaire: **Airbus (S.A.S.)  
31700 Blagnac (FR)**

(72) Inventeurs:  
• **PIAU, Gérard-Pascal  
78790 Courgent (FR)**  
• **DE LUSTRAC, André  
92330 Sceaux (FR)**  
• **BORISOV, Tatiana  
91470 Limours (FR)**

(74) Mandataire: **Gicquel, Olivier Yves Gérard  
Airbus Opérations (S.A.S)  
XIF - M0101/1  
316, route de Bayonne  
31060 Toulouse Cedex (FR)**

(56) Documents cités:  
**US-A- 3 428 923 US-A1- 2010 110 559  
US-A1- 2013 017 348 US-A1- 2015 303 564**

- **BENITTA SHERLIN J ET AL: "RCS reduction with RF cloak", 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS, SIGNAL PROCESSING AND NETWORKING (WISPNET), IEEE, 23 mars 2016 (2016-03-23), pages 50-51, XP032959567, DOI: 10.1109/WISPNET.2016.7566087**
- **MATEKOVITS LADISLAU ET AL: "Anisotropic cloaking of a metallic cylinder", 2014 INTERNATIONAL WORKSHOP ON ANTENNA TECHNOLOGY: SMALL ANTENNAS, NOVEL EM STRUCTURES AND MATERIALS, AND APPLICATIONS (IWAT), IEEE, 4 mars 2014 (2014-03-04), pages 216-219, XP032683926, DOI: 10.1109/IWAT.2014.6958642 ISBN: 978-1-4799-2331-1 [extrait le 2014-11-14]**

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 3 529 858 B1**

## Description

## DOMAINE TECHNIQUE

- 5 **[0001]** La présente invention appartient au domaine de l'électromagnétisme.  
**[0002]** Plus particulièrement, l'invention appartient au domaine des antennes.  
**[0003]** Plus particulièrement, l'invention concerne un dispositif pour atténuer les effets d'un obstacle sur les caractéristiques de rayonnement d'une antenne radioélectrique.

## 10 ETAT DE L'ART

- [0004]** De manière générale, la présence d'un obstacle conducteur dans un champ électromagnétique entraîne des variations dudit champ électromagnétique, par exemple un déphasage, lesquelles variations sont révélatrices de la présence de l'obstacle.
- 15 **[0005]** Lorsqu'un tel obstacle se trouve à proximité d'une antenne radioélectrique, voir Figure 1, il en résulte en général une déformation du diagramme de rayonnement 302 de l'antenne, voir Figure 2b, qui en altère les performances dans certaines directions, par rapport au diagramme nominal 301 de l'antenne sans obstacle illustré sur la Figure 2a. L'expression « se trouve à proximité » doit être comprise ici comme correspondant aux cas dans lesquels la distance entre l'obstacle et l'antenne est inférieure à la longueur d'onde du rayonnement considéré.
- 20 **[0006]** Des dispositifs existent pour rendre invisible un objet à des ondes électromagnétiques. Ils consistent essentiellement à compenser les variations du champ électromagnétique pour effacer la marque de la présence de l'obstacle, et ainsi donner l'illusion que l'obstacle n'existe pas.
- [0007]** Le dispositif présenté dans la demande de brevet américain US 2014/0238734 par exemple, décrit un voile électromagnétique entourant l'objet à dissimuler. Le voile agit comme un guide d'ondes permettant aux ondes électromagnétiques de contourner l'obstacle avec une vitesse de phase plus importante qu'en absence dudit obstacle, afin de compenser la distance supplémentaire due à son contournement, laquelle distance entraîne un déphasage de l'onde par rapport à sa valeur en champ libre.
- 25 **[0008]** Le dispositif présenté dans la demande de brevet internationale WO 2014/182398 décrit une seconde technique utilisant une métasurface permettant de réduire ou annuler l'onde diffractée par l'obstacle.
- 30 **[0009]** Une autre technique décrite dans la demande de brevet américain US 2011/0163903 consiste à générer un champ électromagnétique interférant avec l'onde électromagnétique diffractée par l'obstacle, dans le but de le réduire ou de l'annuler. Pour cela, un maillage constitué d'un matériau conducteur électrique est placé autour de l'objet conducteur à dissimuler. L'onde électromagnétique incidente génère un champ électromagnétique dans la région située entre le maillage et l'objet, permettant d'atténuer fortement, voire d'annuler, l'onde diffractée par l'objet.
- 35 **[0010]** Deux configurations de revêtement pour la réduction de la Surface Equivalente Radar (SER) d'objets métalliques cylindriques sont décrites dans la publication « RCS reduction with RF cloak », Benitta Sherlin et al. Une première configuration de revêtement consiste en un ensemble de cônes métalliques disposés en périphérie d'un objet métallique cylindrique à section circulaire, et de manière périodique selon un axe longitudinal dudit objet. Deux cônes métalliques sont séparés entre eux par un diélectrique.
- 40 **[0011]** Une seconde configuration de revêtement consiste en un ensemble de motifs métalliques constitués de patches et d'une ligne micro-ruban, disposés de manière périodique selon un axe longitudinal d'un objet métallique cylindrique à section circulaire, en périphérie dudit objet métallique cylindrique. Deux motifs sont séparés entre eux par un diélectrique.
- [0012]** Une méta-surface pour la réduction de la Surface Equivalente Radar (SER) d'un objet métallique cylindrique à section circulaire, consistant en un arrangement quasi-périodique imprimé sur un diélectrique, et enveloppant ledit objet métallique, est décrite dans la publication « Anisotropic cloaking of a metallic cylinder », Ladislau Matekovits et al.
- 45 **[0013]** Le document US2015/303564 décrit des bobines d'arrêt afin de supprimer des signaux indésirables. Ces bobines d'arrêt sont notamment utilisées pour éviter les phénomènes d'interférence, par exemple, entre un câble coaxial et une antenne.
- 50 **[0014]** On connaît grâce au document US3428923 des bobines d'arrêt pour la suppression de courants induits par le rayonnement d'une antenne, dans une structure de support de l'antenne.
- [0015]** Enfin, le document US2013/017348 décrit un revêtement pour la dissimulation d'un obstacle, composé d'une enceinte entourée d'une enveloppe extérieure.
- [0016]** Les solutions présentées ci-dessus présentent les inconvénients suivants : ils sont difficiles à mettre en œuvre de par leur géométrie et / ou leur complexité, et peuvent être coûteux.
- 55

## EXPOSE DE L'INVENTION

**[0017]** Le dispositif selon l'invention apporte une solution efficace et économique à la dissimulation d'objet à une antenne.

**[0018]** Selon l'invention, un revêtement agencé sur l'obstacle permet de diminuer drastiquement, voire d'annuler, la surface équivalente radar de l'objet en générant une onde électromagnétique interférant avec l'onde diffractée par l'objet.

**[0019]** L'invention concerne un ensemble constitué d'un obstacle, d'une antenne et d'un dispositif, selon la revendication 1.

**[0020]** Dans une forme de réalisation, le revêtement diélectrique est formé dans un seul matériau diélectrique.

**[0021]** Dans une forme de réalisation, le revêtement diélectrique comporte une pluralité de matériaux diélectriques, dont une permittivité diélectrique relative et une épaisseur de chacun des matériaux diélectriques composant le revêtement déterminent la permittivité diélectrique relative équivalente  $\epsilon_{\text{req}}$ .

**[0022]** Dans une forme de réalisation, la hauteur  $h_p$  du revêtement diélectrique est optimisée par simulation électromagnétique directe pour ajuster ladite hauteur afin de rechercher une Surface Equivalente Radar minimale de l'obstacle.

**[0023]** Dans une forme de réalisation, une épaisseur du revêtement diélectrique est optimisée par simulation électromagnétique directe pour ajuster ladite épaisseur afin de rechercher une Surface Equivalente Radar minimale de l'obstacle.

**[0024]** Dans une forme de réalisation, l'obstacle est un cylindre elliptique et le revêtement diélectrique et le revêtement conducteur électrique ont sensiblement la forme de manchons cylindriques elliptiques. Le revêtement diélectrique est ajusté à l'obstacle et le revêtement conducteur est ajusté au manchon dudit revêtement diélectrique.

**[0025]** Dans une autre forme de réalisation, l'ellipse génératrice de l'obstacle est un cercle et le revêtement diélectrique et le revêtement conducteur électrique ont sensiblement la forme de manchons cylindriques circulaires.

**[0026]** Dans une forme de réalisation, l'obstacle, le revêtement diélectrique et le revêtement conducteur sont légèrement incurvés.

**[0027]** Dans une forme de réalisation, l'obstacle et ou le revêtement conducteur électrique sont constitués de métaux.

**[0028]** L'invention concerne également un véhicule, notamment véhicule marin, véhicule aérien ou véhicule terrestre comportant un ensemble selon l'invention.

## BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

**[0029]** L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit et à l'examen des figures qui l'accompagnent. Celles-ci ne sont présentées qu'à titre indicatif et nullement limitatif de l'invention.

La Figure 1 représente une antenne placée sur une surface, à proximité d'un obstacle.

La Figure 2a déjà citée représente le diagramme de rayonnement, dans un plan horizontal, d'une antenne omnidirectionnelle de type monopole, polarisée verticalement.

La Figure 2b déjà citée représente le diagramme de rayonnement, dans un plan horizontal, de l'antenne de la Figure 2a, en présence d'un obstacle.

La Figure 3 est une vue en perspective d'une première forme de réalisation de l'invention dans laquelle l'obstacle est sensiblement cylindrique de section circulaire, et le revêtement diélectrique et le revêtement métallique sont sensiblement cylindriques de section des couronnes circulaires.

La Figure 4 représente une vue en perspective d'un objet cylindrique de section circulaire, de hauteur infinie et de rayon  $r$ , exposé à un champ électromagnétique incident.

La Figure 5 représente une vue en perspective d'un objet cylindrique de section circulaire, de hauteur infinie et de rayon  $r$ , recouvert par un dispositif selon la forme de réalisation de la Figure 3 de l'invention, et exposé au champ électromagnétique incident de la Figure 4.

La Figure 6 représente une vue en perspective d'un objet cylindrique de section circulaire, de hauteur infinie recouvert par un ensemble de trois revêtements électromagnétiques selon la forme de réalisation de la Figure 3 de l'invention.

La Figure 7a représente une vue en perspective d'une seconde forme de réalisation de l'invention recouvrant un obstacle présentant la forme d'un cylindre elliptique.

La Figure 7b représente une vue en perspective d'une troisième forme de réalisation de l'invention recouvrant un obstacle présentant la forme d'un cylindre à section hexagonale.

La Figure 7c représente une vue en perspective d'une quatrième forme de réalisation de l'invention recouvrant un obstacle tubulaire et légèrement incurvé.

La Figure 8a représente le diagramme de rayonnement dans un plan horizontal d'une antenne filaire polarisée suivant un axe vertical respectivement en absence d'obstacle, en présence d'un obstacle conducteur électrique ayant sensiblement la forme d'un cylindre elliptique d'axe vertical, et en présence dudit obstacle conducteur électrique recouvert partiellement par un dispositif selon la forme de réalisation de la Figure 7a.

La Figure 8b représente le diagramme de rayonnement dans un plan horizontal d'une antenne filaire polarisée suivant un axe vertical respectivement en absence d'obstacle, en présence d'un obstacle conducteur électrique sensiblement cylindrique de section hexagonal et d'axe vertical, et en présence dudit obstacle conducteur électrique recouvert partiellement par un dispositif selon la forme de réalisation de la Figure 7b.

La Figure 8c représente le diagramme de rayonnement dans un plan horizontal d'une antenne filaire polarisée suivant un axe vertical respectivement en absence d'obstacle, en présence d'un obstacle conducteur électrique sensiblement tubulaire et courbé, et en présence dudit obstacle conducteur électrique recouvert partiellement par un dispositif selon la forme de réalisation de la Figure 7c.

Les Figures 9a, 9b et 9c représentent le diagramme en trois dimensions de rayonnement d'une antenne filaire polarisée suivant un axe vertical respectivement en absence d'obstacle, en présence d'un obstacle conducteur électrique cylindrique de section circulaire et d'axe vertical, et en présence dudit obstacle conducteur électrique recouvert partiellement par un dispositif selon la forme de réalisation de la Figure 3.

**[0030]** Sur les dessins, des éléments similaires assurant les mêmes fonctions, même de forme différente, portent le même numéro de référence.

#### EXEMPLES DE MODES DE REALISATION

**[0031]** Dans toute la description en-dehors des équations, de même que sur les dessins, les vecteurs sont indiqués en gras afin d'alléger les notations.

**[0032]** Les composantes d'un vecteur sont identifiées par le biais de leur coordonnée placée en indice, par exemple un vecteur  $\mathbf{E}$  est défini en coordonnées cartésiennes par ses composantes ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ) et en coordonnées cylindriques par ses composantes ( $E_\rho$ ,  $E_\theta$ ,  $E_z$ ).

**[0033]** Lorsqu'un repère orthonormé ( $O$  ;  $\mathbf{e}_x$  ;  $\mathbf{e}_y$  ;  $\mathbf{e}_z$ ) est défini, sera désignée comme direction verticale celle donnée par l'axe  $\mathbf{e}_z$ . Ceci résulte d'un choix arbitraire basé sur une convention communément retenue, et ne limite pas l'invention. En conséquence, tout plan parallèle au plan ( $O$  ;  $\mathbf{e}_x$  ;  $\mathbf{e}_y$ ) est considéré comme un plan horizontal.

**[0034]** L'acronyme « OEM » sera utilisé dans toute la description pour désigner une Onde ElectroMagnétique. Lorsque cette OEM présente une longueur d'onde  $\lambda$ , toute grandeur physique  $\alpha$  ayant la dimension d'une longueur pourra être adimensionnée par rapport à cette longueur d'onde  $\lambda$  ou au nombre d'onde  $k = 2\pi/\lambda$ . La grandeur adimensionnée sera désignée par la même notation que la grandeur dimensionnée, assortie d'une astérisque en exposant et de la grandeur

adimensionnante en indice. Par exemple  $a_\lambda^* = a/\lambda$  ou  $a_k^* = ka$ . L'acronyme « SER » sera utilisé dans toute la description pour faire référence à une Surface Equivalente Radar d'un objet.

**[0035]** Pour les applications numériques, la vitesse de la lumière dans l'air est considérée comme étant égale à  $c = 3 \times 10^8$  m/s.

**[0036]** La description détaillée de l'invention est réalisée dans l'exemple d'une application à un aéronef. L'aéronef peut être par exemple un porteur dont une partie doit être rendue invisible au rayonnement d'une antenne installée sur ce porteur. Cet exemple n'est pas limitatif de l'invention qui trouve application dans toutes les situations, y compris pour des objets fixes, dans lesquelles le diagramme de rayonnement d'une antenne radioélectrique est perturbé par un obstacle.

**[0037]** La Figure 1 représente une surface  $\Sigma$ , par exemple une zone du fuselage d'un aéronef, comportant une antenne 50, typiquement une antenne omnidirectionnelle VHF conçue pour les fréquences entre 108MHz et 136MHz, et à proximité de laquelle une excroissance du fuselage forme un obstacle 10 susceptible de perturber les ondes radioélectriques émises ou reçues par l'antenne.

**[0038]** L'obstacle 10 est par exemple un support pour un équipement, non représenté sur la Figure, par exemple une antenne filaire de réception HF.

**[0039]** Les perturbations d'un diagramme de rayonnement de l'antenne par l'obstacle 10 dépendent de manière connue :

- des dimensions de l'obstacle 10 ;
- d'une distance dudit l'obstacle à l'antenne ;
- des propriétés radioélectriques des matériaux constituant ledit obstacle ;
- des longueurs d'onde considérées.

**[0040]** Les équations caractérisant la propagation des ondes radioélectriques sont connues de l'homme du métier, en particulier pour l'étude des antennes et de leur fonctionnement. Ces équations ne seront rappelées ici que pour l'exposé des principes de fonctionnement de l'invention.

**[0041]** La Figure 2a représente schématiquement un diagramme de rayonnement, le tracé 301 illustrant le rayonnement

d'une antenne omnidirectionnelle dans un plan horizontal, lorsque ladite antenne est en champ libre, c'est-à-dire qu'aucun obstacle ne perturbe le champ rayonné par l'antenne.

**[0042]** La Figure 2b représente un diagramme de rayonnement, le tracé 302 illustrant le rayonnement de l'antenne de la Figure 2a en présence d'un obstacle 10.

**[0043]** La déformation du diagramme résultant de la présence de l'obstacle 10 est naturellement plus ou moins importante suivant les conditions. Par exemple, plus un obstacle est proche de l'antenne, et de dimensions importantes, plus la perturbation est marquée.

**[0044]** La Figure 3 représente schématiquement un obstacle 10 conducteur électrique comportant un dispositif 20 et exposé à un champ électromagnétique incident ( $\mathbf{E}_{\text{inc}}$  ;  $\mathbf{H}_{\text{inc}}$ ) de longueur d'onde  $\lambda$  émise par une antenne 50, suivant un mode de réalisation de l'invention.  $\mathbf{E}_{\text{inc}}$  représente un vecteur champ électrique incident et  $\mathbf{H}_{\text{inc}}$  représente un vecteur champ magnétique incident.

**[0045]** Dans la forme de réalisation de la Figure 3, l'obstacle 10 est de forme sensiblement cylindrique, de section circulaire et d'axe longitudinal vertical, de hauteur  $h$  et de rayon  $r$ .

**[0046]** Un diamètre de l'obstacle 10 détermine une dimension transversale  $d$  maximale dudit obstacle. Dans la forme de réalisation de la Figure 3, le rapport du diamètre de l'obstacle 10 cylindrique sur la longueur d'onde  $\lambda$  est inférieur ou égal à 1.

**[0047]** Le dispositif 20 est mis en œuvre sur au moins une partie de la surface de l'obstacle 10 et comporte :

- un revêtement diélectrique 21 solide apposé sur ou collé à l'obstacle 10 ;
- un revêtement métallique 22 apposé sur ou collé au revêtement diélectrique 21.

**[0048]** Dans l'exemple de réalisation de la Figure 3, le revêtement diélectrique 21 est apposé sur la surface de l'obstacle 10 de sorte à épouser la forme dudit obstacle. Le revêtement diélectrique 21 présente une épaisseur  $t$ , une permittivité relative  $\epsilon_r$  constitutive dudit substrat, ainsi qu'une hauteur  $h_p$  tributaire de la longueur d'onde  $\lambda$  de l'OEM incidente.

**[0049]** Dans cet exemple non limitatif de réalisation, le revêtement diélectrique 21 a la forme d'un manchon sensiblement cylindrique de section une couronne circulaire, de rayon interne  $r$  et de rayon externe  $r+t$ .

**[0050]** Le revêtement métallique 22 est apposé sur la surface du revêtement diélectrique 21 de sorte à épouser la forme dudit revêtement diélectrique.

**[0051]** Dans l'exemple de réalisation de la Figure 3, le revêtement métallique 22 est de même hauteur  $h_p$  que le revêtement diélectrique 21 et présente une forme similaire. Le revêtement métallique présente un rayon interne  $r+t$ .

**[0052]** L'épaisseur du revêtement métallique doit être suffisante pour conduire les courants induits par le rayonnement de l'antenne.

**[0053]** Par ailleurs, des surfaces de vecteur normal unitaire  $\pm \mathbf{e}_z$  du revêtement diélectrique 21 ne sont pas recouvertes par le revêtement métallique 22 de sorte à permettre, lors de la mise en œuvre du dispositif 20, le rayonnement d'une OEM présente dans ledit revêtement diélectrique.

**[0054]** L'obstacle 10 et le dispositif 20 détermine ainsi une cavité électromagnétique remplie par le matériau diélectrique du revêtement diélectrique 21.

**[0055]** Les principes et fonctionnement du dispositif 20 seront mieux compris en regard du développement des fondements théoriques qui sous-tendent l'invention et qui sont présentés ci-après dans un cas simple et sous des hypothèses simplificatrices permises par le cas.

**[0056]** La Figure 4 illustre un obstacle 10, conducteur électrique parfait, cylindrique de hauteur infinie, de section circulaire de rayon  $r$ .

**[0057]** Un repère orthonormé ( $O$  ;  $\mathbf{e}_x$  ;  $\mathbf{e}_y$  ;  $\mathbf{e}_z$ ) est défini de sorte qu'un axe longitudinal de révolution de l'obstacle 10 cylindrique soit de direction sensiblement parallèle à celle de l'axe ( $Oz$ ). Un point  $M$  de l'espace peut ainsi être repéré par ses coordonnées cartésiennes ( $x, y, z$ ) ou ses coordonnées cylindriques ( $p, \theta, z$ ).

**[0058]** L'obstacle 10 est placé dans le champ électromagnétique incident ( $\mathbf{E}_{\text{inc}}$  ;  $\mathbf{H}_{\text{inc}}$ ). Dans un souci de simplification de la description et des équations présentées, l'obstacle 10 est exposé à une onde électromagnétique, notée OEM dans la suite, plane progressive monochromatique, sans toutefois limiter la portée de l'invention à ce type d'onde. L'OEM est donc caractérisée par une pulsation  $\omega$  ou, de manière équivalente, par une fréquence  $f$  ou une longueur d'onde  $\lambda$ , compte-tenu d'une vitesse de propagation donnée dans le milieu considéré, par exemple de l'air.

**[0059]** Un trièdre orthogonal ( $\mathbf{k}_{\text{inc}}$  ;  $\mathbf{E}_{\text{inc}}$  ;  $\mathbf{H}_{\text{inc}}$ ) formé d'un vecteur d'onde  $\mathbf{k}_{\text{inc}}$  de l'OEM, du champ électrique incident  $\mathbf{E}_{\text{inc}}$  et du champ magnétique incident  $\mathbf{H}_{\text{inc}}$ , est représenté. Dans un souci de simplification de la description, l'OEM est polarisée selon l'axe ( $Oz$ ), le champ électrique incident  $\mathbf{E}_{\text{inc}}$  est donc de même direction que l'axe de révolution de l'obstacle 10. Le vecteur d'onde  $\mathbf{k}_{\text{inc}}$  et le champ magnétique incident  $\mathbf{H}_{\text{inc}}$  appartiennent donc au plan ( $Oxy$ ).

**[0060]** Le repère ( $O$  ;  $\mathbf{e}_x$  ;  $\mathbf{e}_y$  ;  $\mathbf{e}_z$ ) est orienté de telle sorte que le vecteur d'onde  $\mathbf{k}_{\text{inc}}$  et le champ magnétique  $\mathbf{H}_{\text{inc}}$  sont respectivement colinéaires aux axes  $\mathbf{e}_x$  et  $\mathbf{e}_y$ .

$$\vec{E}_{inc} = E_0 e^{i(\omega t - kx)} \vec{e}_z$$

$$\vec{H}_{inc} = H_y(x; t) \vec{e}_y$$

$$\vec{k}_{inc} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{e}_x = k \vec{e}_x$$

**[0061]** Un diamètre de l'obstacle 10 détermine une dimension transversale d maximale dudit obstacle. Dans la forme de réalisation de la Figure 4, le rapport du diamètre de l'obstacle 10 cylindrique sur la longueur d'onde  $\lambda$  est inférieur ou égal à 1.

**[0062]** L'étude de diffraction d'une OEM par un cylindre conducteur électrique parfait infini, sous les hypothèses citées précédemment, a déjà été menée précédemment par exemple dans les documents suivants : « Scattering of a Plane Electromagnetic Wave by a Small Conducting Cylinder », Kirk T. McDonald et « Recent Researches in Electricity and Magnetism », J. J. Thomson. Les principaux éléments, utiles à la compréhension de l'invention, sont repris ici.

**[0063]** Lorsque l'obstacle 10 conducteur électrique est placé dans le champ électromagnétique incident tel qu'illustré sur la Figure 4, ledit champ électromagnétique met en mouvement des charges dans l'obstacle 10 conducteur électrique, faisant ainsi apparaître un champ électromagnétique induit ( $\vec{E}_{ind}$  ;  $\vec{H}_{ind}$ ), dont un champ électrique induit  $\vec{E}_{ind}$  et un champ magnétique induit  $\vec{H}_{ind}$ . En régime établi, un champ électromagnétique total ( $\vec{E}$  ;  $\vec{H}$ ) constitué d'un champ électrique total  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique total  $\vec{H}$  dans l'environnement de l'obstacle 10 résulte donc de la somme des champs électromagnétiques incident et induit :

$$\vec{E} = \vec{E}_{inc} + \vec{E}_{ind}$$

$$\vec{H} = \vec{H}_{inc} + \vec{H}_{ind}$$

**[0064]** Par la suite, on ne s'intéresse qu'au champ électrique, dans la mesure où le champ magnétique peut toujours être déduit du champ électrique par le biais des équations de Maxwell.

**[0065]** Classiquement, la symétrie du problème entraîne que le champ électrique induit  $\vec{E}_{ind}$  présente une unique composante suivant l'axe  $\vec{e}_z$ . De même, le champ électrique induit  $\vec{E}_{ind}$  est indépendant de la coordonnée  $z$  :

$$\vec{E}_{ind} = E_{ind_z}(\rho, \theta, t) \vec{e}_z = E_{ind_0}(\rho, \theta) e^{i\omega t} \vec{e}_z$$

**[0066]** Où  $(\rho, \theta, z)$  désignent les coordonnées cylindriques.

**[0067]** Le champ électrique induit  $\vec{E}_{ind}$  est recherché sous la forme :

$$E_{ind_z}(\rho, \theta, t) = \left( \sum_{n=-\infty}^{+\infty} E_n(\rho) e^{in\theta} \right) e^{i\omega t}$$

**[0068]** Les composantes verticales du champ électrique induit  $\vec{E}_{ind}$  et du champ électrique total  $\vec{E}$  sont déduites de l'équation d'onde appliquée au champ électrique puis projetée sur l'axe  $\vec{e}_z$  :

$$E_{ind_z} = \left( \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n H_n^{(1)}(k\rho) e^{in\theta} \right) e^{i\omega t}$$

$$E_z = E_{inc_z} + E_{ind_z} = E_0 e^{i(\omega t - k\rho \cos \theta)} + \left( \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n H_n^{(1)}(k\rho) e^{in\theta} \right) e^{i\omega t}$$

Où :

- $H_n^{(1)}(k\rho)$  représente une fonction de Hankel du 1<sup>er</sup> ordre ;
- $A_n$  représente le coefficient de Fourier associé à la fonction de Hankel du 1<sup>er</sup> ordre  $H_n^{(1)}(k\rho)$ .

**[0069]** On utilisera dans la suite des grandeurs  $\rho_k^*$  et  $r_k^*$  adimensionnées par rapport au nombre d'onde  $k$  :

$$\rho_k^* = k\rho$$

$$r_k^* = kr$$

**[0070]** Avec les hypothèses de la Figure 4 :

- H1 : le rayon  $r$  du cylindre est petit devant la longueur d'onde  $\lambda$  ;
- H2 : l'obstacle 10 est un conducteur électrique parfait ;

il vient :

$$H1 : e^{-ik\rho \cos \theta} = e^{-i\rho_k^* \cos \theta} \approx (1 - i\rho_k^* \cos \theta) \quad \text{pour } \rho_k^* < 1$$

$$H2 : E_0 e^{-ir_k^* \cos \theta} + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n H_n^{(1)}(r_k^*) e^{in\theta} = 0$$

**[0071]** On a donc, au niveau de la surface du cylindre, c'est-à-dire en  $p = r$ , l'équation approchée :

$$E_0 (1 - ir_k^* \cos \theta) = - \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n H_n^{(1)}(r_k^*) e^{in\theta}$$

**[0072]** Par identification terme à terme, on en déduit que nécessairement :

$$\frac{A_0}{E_0} = - \frac{1}{H_0^{(1)}(r_k^*)}$$

$$\frac{A_1}{E_0} = - \frac{A_{-1}}{E_0} = - \frac{i}{2} \frac{r_k^*}{H_1^{(1)}(r_k^*)}$$

$$\frac{A_n}{E_0} = 0 \quad \forall n \in \mathbb{N} \setminus \{-1; 0; 1\}$$

**[0073]** Et l'expression de la composante verticale du champ électrique total  $E$  :

$$E_z = E_0 e^{i\omega t} \left( e^{-i\rho_k^* \cos \theta} + A_{-1} H_{-1}^{(1)}(\rho_k^*) e^{-i\theta} + A_0 H_0^{(1)}(\rho_k^*) + A_1 H_1^{(1)}(\rho_k^*) e^{i\theta} \right)$$

**[0074]** Sous l'hypothèse H1 et d'après les propriétés des fonctions de Hankel de première espèce, les expressions des coefficients  $A_0$ ,  $A_{-1}$  et  $A_1$ , peuvent être approchées :

$$\frac{A_0}{E_0} \sim \frac{i\pi}{2 \left( \ln \left( \frac{2}{r_k^*} \right) - 0.5772 \right)}$$

$$\frac{A_1}{E_0} = -\frac{A_{-1}}{E_0} \sim \frac{\pi r_k^{*2}}{4}$$

**[0075]** Les champs magnétiques incident  $\mathbf{H}_{\text{inc}}$ , induit  $\mathbf{H}_{\text{inc}}$ , et total  $\mathbf{H}$  se déduisent des équations de Maxwell.

**[0076]** La SER  $\sigma$  de l'obstacle 10 se déduit des résultats précédents :

$$\sigma = \frac{4}{k} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |A_n|^2 = \frac{4}{k} (|A_{-1}|^2 + |A_0|^2 + |A_1|^2)$$

dans l'hypothèse où les autres termes  $A_n$  pour  $|n| > 1$  sont négligeables devant  $A_0$ ,  $A_{-1}$  et  $A_1$ .

**[0077]** Or, sous l'hypothèse H1 :

$$\left| \frac{A_0}{E_0} \right| \sim \frac{\pi}{2 \left( \ln \left( \frac{2}{r_k^*} \right) - 0.5772 \right)} > \frac{\pi r_k^*}{4} \gg \frac{\pi r_k^{*2}}{4} \sim \left| \frac{A_1}{E_0} \right| = \left| \frac{A_{-1}}{E_0} \right|$$

**[0078]** En conséquence, sous l'hypothèse H1, la SER  $\sigma$  de l'obstacle 10 ne dépend que du coefficient  $A_0$  car les autres termes sont négligeables devant ce coefficient.

$$\sigma \approx \frac{4}{k} |A_0|^2$$

**[0079]** La Figure 5 illustre un obstacle 10 tel que décrit dans la Figure 4 et habillé du dispositif 20 selon la forme de réalisation de la Figure 3 de l'invention. L'obstacle 10 est exposé à une OEM telle que décrite dans la Figure 4.

**[0080]** L'onde électromagnétique incidente provoque l'apparition de courants électriques dans l'obstacle 10 ainsi que dans le revêtement métallique 22.

**[0081]** Le dispositif 20, formant une cavité électromagnétique, agit alors comme une antenne : un champ électromagnétique cavité ( $\mathbf{E}_{\text{cav}}$  ;  $\mathbf{H}_{\text{cav}}$ ) apparaît dans le matériau diélectrique, lequel champ électromagnétique cavité est ensuite amené à rayonner.

**[0082]** La fréquence de résonance du champ électromagnétique dans une cavité entièrement cylindrique ( $\mathbf{E}_{\text{cav}}$  ;  $\mathbf{H}_{\text{cav}}$ ) est donnée par l'expression :

$$f_{mn} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left( \frac{m}{r+t} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{h_p} \right)^2}$$

**[0083]** Où :

- $r$  est le rayon de l'obstacle 10 ;
- $t$  est l'épaisseur du revêtement diélectrique 21 ;
- $\varepsilon_r$  est la permittivité diélectrique relative dudit revêtement diélectrique ;
- $h_p$  est la hauteur du dispositif 20 ;

-  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

**[0084]** En particulier, la fréquence du mode transverse magnétique  $TM_{01}$  du champ électromagnétique cavité ( $\mathbf{E}_{cav}$  ;  $\mathbf{H}_{cav}$ ) a pour expression :

$$f_{01} = \frac{c}{2h_p\sqrt{\epsilon_r}}$$

**[0085]** On a vu précédemment dans l'exemple de réalisation de la Figure 4 que, lorsque le cylindre seul est soumis à une OEM dont le champ électrique incident  $\mathbf{E}_{inc}$  est polarisé suivant l'axe de révolution de l'obstacle 10 cylindrique circulaire et dont la longueur d'onde est au moins dix fois supérieur au rayon dudit obstacle, la SER  $\sigma$  de l'obstacle 10 ne dépend sensiblement que du coefficient  $A_0$  et que le champ électrique total  $\mathbf{E}$  présente une unique composante suivant l'axe de révolution dudit objet cylindrique.

**[0086]** Le dispositif 20 de la Figure 5 est dimensionné pour rayonner le champ électromagnétique cavité ( $\mathbf{E}_{cav}$  ;  $\mathbf{H}_{cav}$ ) transverse magnétique selon le mode  $TM_{01}$  à la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde incidente. Un champ électrique cavité  $\mathbf{E}_{cav}$  d'un tel champ électromagnétique cavité présente en effet une composante non nulle suivant l'axe  $\mathbf{e}_z$  ; il est en mesure d'interférer avec le champ électromagnétique induit ( $\mathbf{E}_{ind}$  ;  $\mathbf{H}_{ind}$ ) rayonné par l'obstacle 10, dans le but d'annuler la SER  $\sigma$  dudit obstacle.

**[0087]** La hauteur  $h_p$  du dispositif 20 doit donc être sensiblement égale à :

$$h_p = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

**[0088]** En pratique, une fois établie théoriquement, la valeur de la hauteur  $h_p$  peut être optimisée par simulation électromagnétique

**[0089]** Dans l'exemple de réalisation de la Figure 5, les champs électromagnétiques incident ( $\mathbf{E}_{inc}$  ;  $\mathbf{H}_{inc}$ ) et induit ( $\mathbf{E}_{ind}$  ;  $\mathbf{H}_{ind}$ ) sont polarisés suivant l'axe  $\mathbf{e}_z$ . Le champ électrique cavité  $\mathbf{E}_{cav}$  doit donc être également polarisé sensiblement suivant le même axe sans quoi le champ électrique total  $\mathbf{E}$  lors de la mise en œuvre du dispositif sur l'obstacle 10 sera sensiblement différent du champ électrique total  $\mathbf{E}$  en absence d'obstacle. Le dispositif 20 est dimensionné afin que le mode transverse magnétique  $TM_{01}$  soit le mode fondamental du champ électromagnétique cavité ( $\mathbf{E}_{cav}$  ;  $\mathbf{H}_{cav}$ ).

**[0090]** Il découle nécessairement une condition sur l'épaisseur  $t$  du revêtement diélectrique 21 et sur sa permittivité diélectrique relative  $\epsilon_r$  :

$$\frac{h_p}{r+t} > \pi \quad (2)$$

Soit encore :

$$r+t < \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

**[0091]** Pour une longueur d'onde  $\lambda$  et un matériau diélectrique de permittivité relative  $\epsilon_r$  donnés, l'équation (1) donne la hauteur du dispositif 20.

**[0092]** La condition de l'équation (3) contraint l'épaisseur radiale du revêtement diélectrique 21. En pratique, le rapport entre :

- la hauteur du dispositif 20 et
- la somme du rayon de l'obstacle 10 cylindrique et de l'épaisseur du revêtement diélectrique 21

est nécessairement supérieur à  $\pi$ , soit environ 3.

**[0093]** Il résulte que l'épaisseur du revêtement diélectrique 21 n'est pas contrainte à une valeur. Le revêtement diélectrique 21 peut ainsi être dimensionné pour optimiser l'efficacité du dispositif 20. Cette optimisation peut par exemple

être réalisée par simulation électromagnétique, dans le but de minimiser autant que possible la SER  $\sigma$  de l'obstacle 10.

**[0094]** Une fois dimensionné en épaisseur et en hauteur, le dispositif 20 permet d'agir sur la valeur du module du coefficient de Fourier  $A_0$ , afin de le réduire fortement, permettant ainsi de réduire la SER  $\sigma$  de l'obstacle 10.

**[0095]** En pratique, la SER  $\sigma$  de l'obstacle 10 est réduite sur une bande de fréquence centrée sur  $f$ , correspondant sensiblement à la bande passante de la cavité. L'atténuation la plus importante se fait à la fréquence  $f$ .

**[0096]** L'énergie du champ électromagnétique cavité ( $E_{cav}$  ;  $H_{cav}$ ) peut, dans certains cas, par exemple dans le cas d'obstacles de grandes hauteurs, être insuffisante pour compenser suffisamment l'énergie du champ électromagnétique induit ( $E_{ind}$  ;  $H_{ind}$ ) et réduire efficacement la SER  $\sigma$  de l'obstacle 10 lors de la mise en œuvre du dispositif 20. Il est alors avantageux de placer en série, suivant l'axe de l'obstacle 10, plusieurs dispositifs similaires au dispositif 20 comme illustré sur la Figure 6. De préférence, le ou les dispositifs 20 recouvrent toute la surface de l'obstacle pour réduire au maximum la SER  $\sigma$  de l'obstacle et rendre l'obstacle 10 sensiblement invisible au rayonnement de l'antenne.

**[0097]** Il convient de noter qu'une fois le dispositif 20 dimensionné comme décrit précédemment pour la fréquence  $f$  associée à la longueur d'onde  $\lambda$ , ledit dispositif reste utilisable pour toute fréquence située dans la bande passante de la cavité électromagnétique formée par l'obstacle 10 et le dispositif 20.

**[0098]** Par souci de clarté et de simplification des expressions mathématiques, il a été considéré précédemment un cylindre de hauteur infinie. Les équations (1), (2) et (3) restent valables dans le cas d'un cylindre de hauteur finie et le raisonnement précédent est similaire *mutatis mutandis*.

**[0099]** L'invention n'est pas limitée à la dissimulation d'un objet sensiblement cylindrique à section circulaire comme celui qui a servi de support au raisonnement et permettant des simplifications des équations.

**[0100]** Dans des variantes de la forme de réalisation de la Figure 3 illustrées sur les Figures 7a, 7b et 7c, le dispositif 20 est utilisé pour la dissimulation d'objets 10 de formes variables :

- sur la Figure 7a, le revêtement diélectrique 21 et le revêtement métallique 22 du dispositif 20 sont des manchons sensiblement cylindriques de section une couronne elliptique et sont mis en œuvre sur un obstacle 10 conducteur électrique ayant sensiblement la forme d'un cylindre elliptique ;
- sur la Figure 7b, le revêtement diélectrique 21 et le revêtement métallique 22 du dispositif 20 sont des manchons sensiblement cylindriques de section une couronne sensiblement circulaire et sont mis en œuvre sur un obstacle 10 conducteur électrique sensiblement cylindrique à section hexagonale à la forme duquel le revêtement diélectrique est adapté ;
- sur la Figure 7c, le revêtement diélectrique 21 et le revêtement métallique 22 du dispositif 20 forment des manchons sensiblement cylindriques de section une couronne annulaire, dans laquelle ledit revêtement diélectrique et ledit revêtement métallique sont courbés et sont mis en œuvre sur un obstacle 10 conducteur électrique tubulaire et légèrement incurvé.

**[0101]** Les exemples de réalisation présentés sur les figures ne sont pas limitatifs et d'autres géométries d'objets 10 à dissimuler peuvent être envisagées.

**[0102]** L'homme du métier mettra alors en œuvre les équations complètes et les simulations en fonction du cas d'espèce pour calculer les caractéristiques du dispositif suivant l'invention.

**[0103]** Dans une forme de réalisation, le revêtement diélectrique 21 est composé d'une pluralité de matériaux diélectriques, solides ou non. La permittivité diélectrique relative  $\epsilon_r$  à prendre en considération est alors une permittivité diélectrique relative équivalente  $\epsilon_{req}$ , laquelle doit être comprise comme étant une permittivité diélectrique qu'aurait un matériau homogène se substituant à la pluralité de matériaux diélectriques du revêtement 21, tout en gardant, avec les mêmes dimensions, des propriétés physiques identiques en terme de réponses à un champ électrique.

**[0104]** Dans un mode de mise en œuvre, le champ électromagnétique incident ( $E_{inc}$  ;  $H_{inc}$ ) est rayonné par une antenne située à proximité de l'obstacle 10.

**[0105]** Les Figures 8a, 8b et 8c représentent chacune les diagrammes de rayonnement 30 dans un plan horizontal d'une antenne filaire du type monopole, isotrope, polarisée suivant un axe vertical, dans les trois cas suivants :

- le tracé pointillé 301 illustre le rayonnement de l'antenne en absence d'obstacle ;
- le tracé 302 illustre le rayonnement de l'antenne en présence de l'obstacle conducteur 10 électrique ;
- le tracé 303 illustre le rayonnement de l'antenne en présence dudit obstacle conducteur électrique sur lequel est mis en œuvre le dispositif 20.

**[0106]** Les formes de l'obstacle 10 conducteur électrique et du dispositif 20 dans les cas des Figures 8a, 8b et 8c sont respectivement celles des formes de réalisation des Figures 7a, 7b et 7c.

**[0107]** Les Figures 8a, 8b et 8c montrent que le diagramme de rayonnement est fortement affecté par la présence de l'obstacle : le tracé 302 en présence de l'obstacle 10 conducteur électrique se distingue nettement du tracé 301. Dans les trois formes de réalisation illustrées sur ces figures, le tracé 303 est sensiblement identique au tracé 301, ce qui

montre que la mise en œuvre du dispositif 20 sur l'obstacle 10 conducteur électrique permet de retrouver le diagramme de rayonnement obtenu en absence d'obstacle. L'obstacle conducteur 10 électrique est ainsi rendu invisible au rayonnement de l'antenne, au moins pour la longueur d'onde  $\lambda$  considérée.

**[0108]** Les Figures 9a, 9b et 9c illustrent chacune un diagramme 40 en trois dimensions de rayonnement d'une antenne filaire du type monopole, isotrope et polarisée suivant un axe vertical respectivement en absence d'obstacle, en présence de l'obstacle 10 conducteur électrique, d'axe vertical, et en présence dudit obstacle conducteur électrique sur lequel est mis en œuvre le dispositif 20 selon la forme de réalisation de la Figure 3.

**[0109]** La comparaison des Figures 9a et 9 b montrent l'impact de la présence de l'obstacle sur le rayonnement de l'antenne.

**[0110]** Les Figures 9a et 9 c montrent que le diagramme 40 de rayonnement en absence d'obstacle ou en présence de l'obstacle 10 conducteur électrique revêtu au moins partiellement du dispositif 20 est sensiblement identique dans les deux cas ; la présence du dispositif 20 permet donc de rendre l'obstacle 10 conducteur électrique transparent au rayonnement de l'antenne, au moins pour la longueur d'onde  $\lambda$  considérée.

**[0111]** Les mêmes conclusions s'imposent lorsque le champ électromagnétique est reçu par l'antenne.

**[0112]** A titre d'exemple d'application de l'invention, considérons une antenne 50 de type monopole, de hauteur 57cm. Un obstacle 10 cylindrique de section circulaire, de hauteur 70cm, de rayon  $r=10$ cm, est situé à 50cm de l'antenne 50. Il est exposé à une OEM de fréquence  $f=125$ MHz émise par l'antenne, soit une longueur d'onde  $\lambda=2,40$ m.

**[0113]** L'hypothèse «  $r$  petit devant la longueur d'onde » est alors bien vérifiée puisque :

$$\frac{r}{\lambda} = \frac{0,10}{2,40} = 0,042 < 1$$

**[0114]** Le dispositif 20 selon l'invention est placé sur l'obstacle 10 pour rendre ledit obstacle invisible à l'OEM. Le dispositif 20 est composé d'un revêtement diélectrique 21 de permittivité relative  $\epsilon_r = 2,9$ , par exemple du polycarbonate, de hauteur :

$$h_p = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{2,40}{2\sqrt{2,9}} \approx 70,5 \text{ cm}$$

**[0115]** La condition (2) implique :

$$r + t < 22,4 \text{ cm}$$

$$t < 12,4 \text{ cm}$$

**[0116]** Un revêtement diélectrique 21 d'épaisseur 10mm, par exemple, convient donc pour être placé dans le dispositif 20.

**[0117]** Pour une fréquence  $f = 135$ MHz, soit une longueur d'onde  $\lambda=2,22$ m, la hauteur  $h_p$  du revêtement doit être d'environ 65cm.

**[0118]** Des simulations électromagnétiques menées en parallèle permettent d'optimiser les dimensions du dispositif 20 pour rendre l'obstacle invisible à l'antenne.

**[0119]** Dans le cas exposé ci-dessus, les hauteurs optimales de revêtement obtenues sont :

$$h_p = 68 \text{ cm} \text{ à } f = 125 \text{ MHz}$$

$$h_p = 64 \text{ cm} \text{ à } f = 135 \text{ MHz}$$

**[0120]** Ces valeurs sont proches des valeurs obtenues par la théorie.

**[0121]** Le dispositif selon l'invention présente les avantages suivants vis-à-vis de l'art antérieur :

- simplicité de réalisation ;
- bas coût de la solution ;

- adaptabilité à des formes complexes.

**[0122]** Au sujet de ce dernier point, il convient de noter que si l'invention telle que décrite précédemment présente sensiblement la forme d'un manchon cylindrique, éventuellement courbé, il s'agit d'exemples de réalisation non limitatifs de l'invention, et celle-ci peut être adaptée à des objets de formes variées.

**[0123]** A titre d'exemple, l'invention peut être adaptée à des objets cubiques, coniques ou sphériques, ou résultant d'une combinaison de ces formes.

**[0124]** Le dispositif selon l'invention est par exemple mis en œuvre sur un longeron d'aéronef, ou sur une autre structure formant un masque pour une antenne VHF proche.

## Revendications

1. Ensemble comprenant un obstacle (10), une antenne (50) configurée pour émettre et/ou recevoir des ondes électromagnétiques de longueur d'onde  $\lambda$  et un dispositif (20), destiné à être soumis à une onde électromagnétique incidente de longueur d'onde  $\lambda$  émise par ladite antenne (50) dans lequel

- l'obstacle (10) est formé dans un matériau conducteur électrique et a une forme sensiblement cylindrique d'axe longitudinal (O ; ez), lequel axe longitudinal est sensiblement perpendiculaire à une direction de propagation de l'onde électromagnétique incidente, ledit obstacle ayant par ailleurs une dimension transversale maximale d telle que le rapport  $d/\lambda$  est inférieur à 1 ;

- le dispositif (20) est placé sur tout ou partie d'une surface de l'obstacle (10) pour diminuer une Surface Equivalente Radar dudit obstacle et comporte :

- o un manchon d'un revêtement diélectrique (21), de permittivité diélectrique relative équivalente  $\epsilon_{req}$ , de

hauteur  $h_p$ , suivant un axe longitudinal dudit manchon, sensiblement égale à  $\frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{req}}}$  ;

- o un manchon d'un revêtement conducteur (22) électrique placé sur la périphérie du revêtement diélectrique (21), de même hauteur  $h_p$  suivant un axe longitudinal dudit manchon que la hauteur du manchon de revêtement diélectrique.

2. Ensemble selon la revendication 1 dans lequel le revêtement diélectrique (21) est formé dans un seul matériau diélectrique.

3. Ensemble selon la revendication 1 dans lequel le revêtement diélectrique (21) comporte une pluralité de matériaux diélectriques, dont une permittivité diélectrique relative et une épaisseur de chacun des matériaux diélectriques composant ledit revêtement déterminent la permittivité diélectrique relative équivalente  $\epsilon_{req}$ .

4. Ensemble selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel la hauteur  $h_p$  du revêtement diélectrique (21) est optimisée par simulation électromagnétique directe pour ajuster ladite hauteur afin de rechercher une Surface Equivalente Radar minimale de l'obstacle (10).

5. Ensemble selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel une épaisseur du revêtement diélectrique (21) est optimisée par simulation électromagnétique directe pour ajuster ladite épaisseur afin de rechercher une Surface Equivalente Radar minimale de l'obstacle (10).

6. Ensemble selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel :

- l'obstacle (10) est un cylindre elliptique ; et
- le revêtement diélectrique (21) et le revêtement conducteur (22) électrique ont sensiblement la forme de manchons cylindriques elliptiques ; et
- le revêtement diélectrique (21) est ajusté à l'obstacle (10) et le revêtement conducteur (22) est ajusté au manchon dudit revêtement diélectrique.

7. Ensemble selon la revendication 6 dans lequel l'ellipse génératrice de l'obstacle (10) est un cercle et en ce que le revêtement diélectrique (21) et le revêtement conducteur (22) électrique ont sensiblement la forme de manchons

cylindriques circulaires.

8. Ensemble selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel l'obstacle (10), le revêtement diélectrique (21) et le revêtement conducteur (22) sont légèrement incurvés.
9. Ensemble selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel l'obstacle (10) et/ou le revêtement conducteur (22) électrique sont constitués de métaux.
10. Véhicule, notamment véhicule marin, véhicule aérien ou véhicule terrestre, comportant un ensemble selon l'une des revendications précédentes.

## Patentansprüche

1. Anordnung umfassend ein Hindernis (10), eine Antenne (50), die dazu ausgebildet ist, elektromagnetische Wellen einer Wellenlänge  $\lambda$  zu senden und/oder zu empfangen, und eine Vorrichtung (20), die dazu bestimmt ist, einer einfallenden elektromagnetischen Welle einer Wellenlänge  $\lambda$  ausgesetzt zu sein, die von der Antenne (50) gesendet wird, wobei

- das Hindernis (10) aus einem elektrisch leitenden Material gebildet ist und eine im Wesentlichen zylindrische Form mit einer Längsachse (0; ez) aufweist, wobei die Längsachse im Wesentlichen senkrecht zu einer Ausbreitungsrichtung der einfallenden elektromagnetischen Welle verläuft, wobei das Hindernis darüber hinaus eine maximale Querabmessung d aufweist, so dass das Verhältnis  $d/\lambda$  niedriger als 1 ist;
- die Vorrichtung (20) auf der gesamten oder einem Abschnitt einer Fläche des Hindernisses (10) platziert ist, um eine Radarrückstrahlfläche des Hindernisses zu verringern, und Folgendes aufweist:

- o eine Hülse aus einer dielektrischen Umhüllung (21) mit einer dielektrischen Permittivität  $\epsilon_{\text{req}}$  mit einer

Höhe  $h_p$  entlang einer Längsachse der Hülse, die im Wesentlichen gleich  $\frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{\text{req}}}}$  ist;

- o eine Hülse aus einer elektrisch leitenden Umhüllung (22), die auf dem Umfang der dielektrischen Umhüllung (21) platziert ist, mit derselben Höhe  $h_p$  entlang einer Längsachse der Hülse wie die Höhe der dielektrischen Umhüllungshülse.

2. Anordnung nach Anspruch 1, wobei die dielektrische Umhüllung (21) aus einem einzigen dielektrischen Material gebildet ist.
3. Anordnung nach Anspruch 1, wobei die dielektrische Umhüllung (21) eine Mehrzahl von dielektrischen Materialien aufweist, von denen eine relative dielektrische Permittivität und eine Dicke jedes der dielektrischen Materialien, die die Umhüllung bilden, die relative äquivalente dielektrische Permittivität  $\epsilon_{\text{req}}$  bestimmen.
4. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Höhe  $h_p$  der dielektrischen Umhüllung (21) durch direkte elektromagnetische Simulation optimiert wird, um die Höhe anzupassen, um eine minimale Radarrückstrahlfläche des Hindernisses (10) anzustreben.
5. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Dicke der dielektrischen Umhüllung (21) durch direkte elektromagnetische Simulation optimiert wird, um die Dicke anzupassen, um eine minimale Radarrückstrahlfläche des Hindernisses (10) anzustreben.
6. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
  - das Hindernis (10) ein ellipsenförmiger Zylinder ist; und
  - die dielektrische Umhüllung (21) und die elektrisch leitende Umhüllung (22) im Wesentlichen die Form ellipsenförmiger zylindrischer Hülse aufweisen; und
  - die dielektrische Umhüllung (21) an das Hindernis (10) und die leitende Umhüllung (22) an die Hülse aus der dielektrischen Umhüllung angepasst ist.

7. Anordnung nach Anspruch 6, wobei die erzeugende Ellipse des Hindernisses (10) ein Kreis ist, und dadurch, dass die dielektrische Umhüllung (21) und die elektrisch leitende Umhüllung (22) im Wesentlichen die Form kreisförmiger zylindrischer Hülsen aufweisen.
8. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Hindernis (10), die dielektrische Umhüllung (21) und die leitende Umhüllung (22) leicht gekrümmt sind.
9. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Hindernis (10) und/oder die elektrisch leitende Umhüllung (22) aus Metallen gebildet sind.
10. Fahrzeug, insbesondere Wasser-, Luft- oder Landfahrzeug, aufweisend eine Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

## Claims

1. Assembly comprising an obstacle (10), an antenna configured to transmit and/or receive electromagnetic waves of wavelength  $\lambda$ , and a device (20), intended to be subjected to an incident electromagnetic wave of wavelength  $\lambda$  transmitted by said antenna (50), wherein:

- the obstacle (10) is formed of an electrically conductive material and takes a substantially cylindrical shape of longitudinal axis (0; ez), which longitudinal axis is substantially perpendicular to a direction of propagation of the incident electromagnetic wave, said obstacle furthermore having a maximum transverse dimension d such that the ratio  $d/\lambda$  is lower than 1;

- the device (20) is placed over all or part of a surface of the obstacle (10) so as to decrease a radar cross section of said obstacle, and includes:

- o a sleeve of a dielectric coating (21), of equivalent relative dielectric permittivity  $\epsilon_{\text{req}}$ , of height  $h_p$ , along a longitudinal axis of said sleeve, which is substantially equal to

$$\frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{\text{req}}}} ;$$

- o a sleeve of an electrically conductive coating (22) placed around the periphery of the dielectric coating (21), of the same height  $h_p$  along a longitudinal axis of said sleeve as the height of the dielectric coating sleeve.

2. Assembly according to Claim 1, wherein the dielectric coating (21) is formed of a single dielectric material.
3. Assembly according to Claim 1, wherein the dielectric coating (21) includes a plurality of dielectric materials, a relative dielectric permittivity and a thickness of each of the component dielectric materials of said coating determining the equivalent relative dielectric permittivity  $\epsilon_{\text{req}}$ .
4. Assembly according to any one of the preceding claims, wherein the height  $h_p$  of the dielectric coating (21) is optimized by means of direct electromagnetic simulation so as to adjust said height for the purpose of seeking a minimum radar cross section for the obstacle (10) .
5. Assembly according to any one of the preceding claims, wherein a thickness of the dielectric coating (21) is optimized by means of direct electromagnetic simulation so as to adjust said thickness for the purpose of seeking a minimum radar cross section for the obstacle (10) .
6. Assembly according to any one of the preceding claims, wherein:
  - the obstacle (10) is an elliptical cylinder;
  - the dielectric coating (21) and the electrically conductive coating (22) substantially take the shape of elliptical cylindrical sleeves; and
  - the dielectric coating (21) is adjusted to fit the obstacle (10) and the conductive coating (22) is adjusted to fit

the sleeve of said dielectric coating.

7. Assembly according to Claim 6, wherein the generatrix ellipse of the obstacle (10) is a circle and wherein the dielectric coating (21) and the electrically conductive coating (22) substantially take the shape of circular cylindrical sleeves.
8. Assembly according to any one of the preceding claims, wherein the obstacle (10), the dielectric coating (21) and the conductive coating (22) are slightly incurved.
9. Assembly according to any one of the preceding claims, wherein the obstacle (10) and/or the electrically conductive coating (22) consist of metals.
10. Vehicle, in particular a sea vehicle, an air vehicle or a land vehicle, including an assembly according to one of the preceding claims.

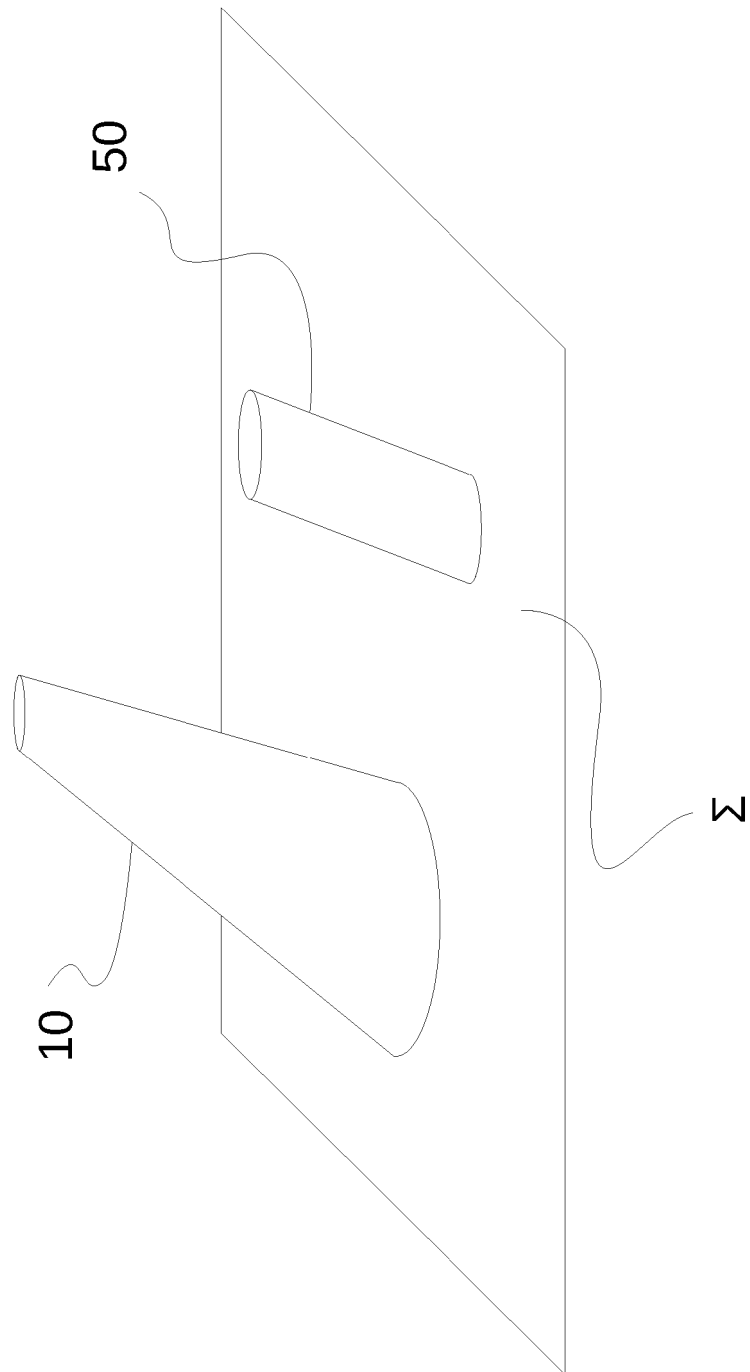


FIG. 1

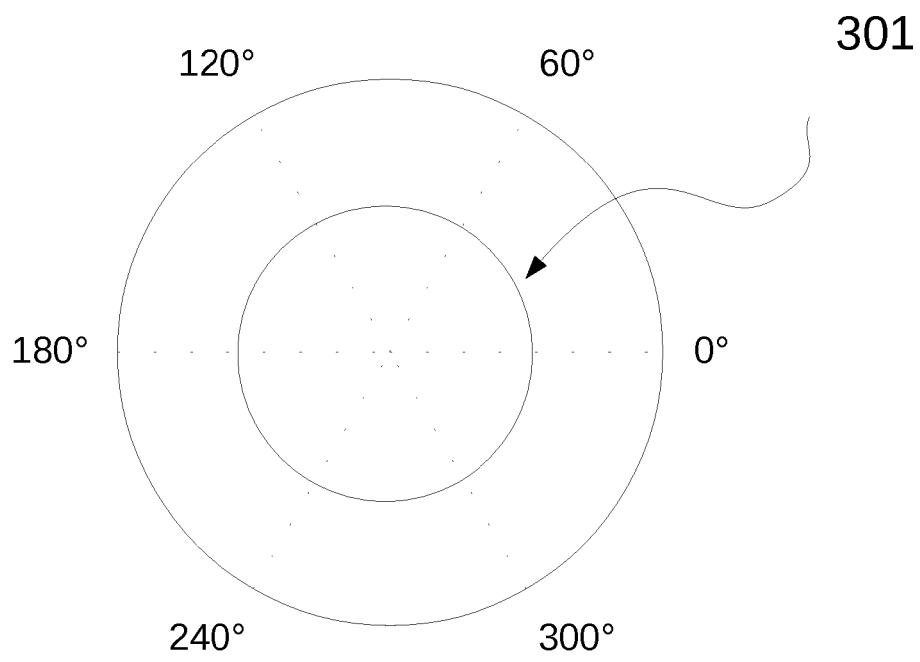


FIG. 2a

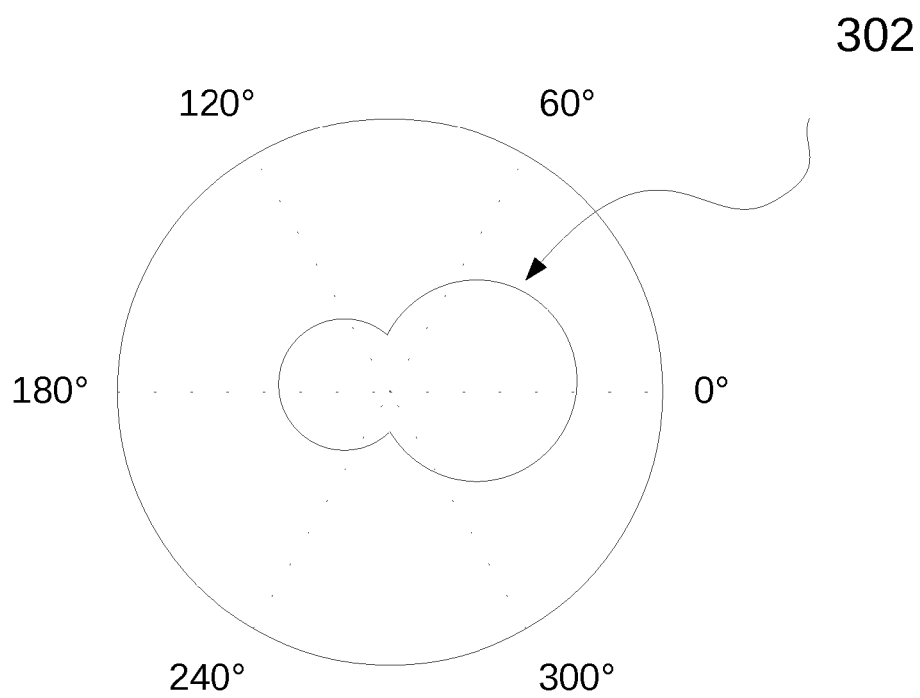


FIG. 2b

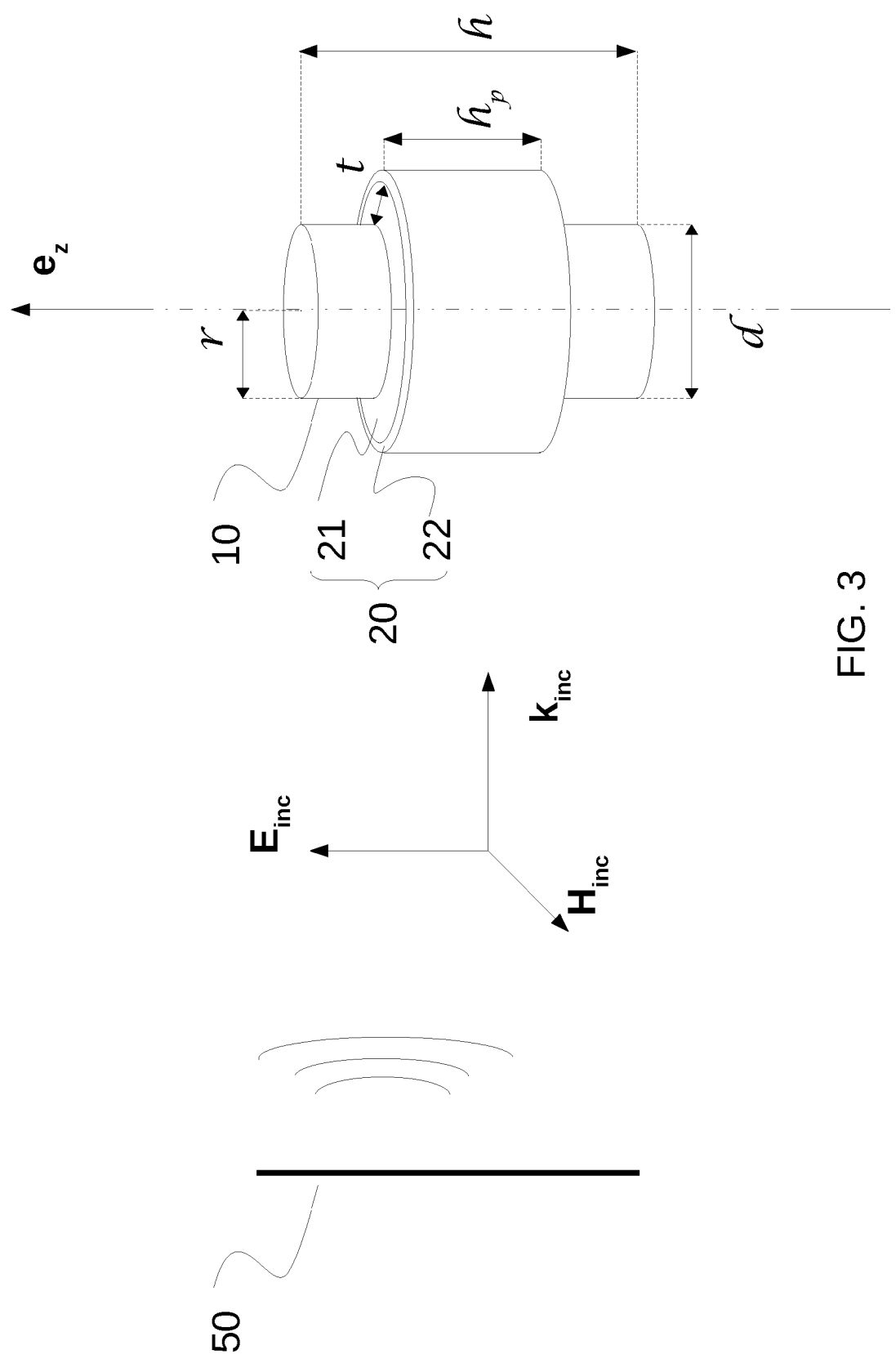


FIG. 3

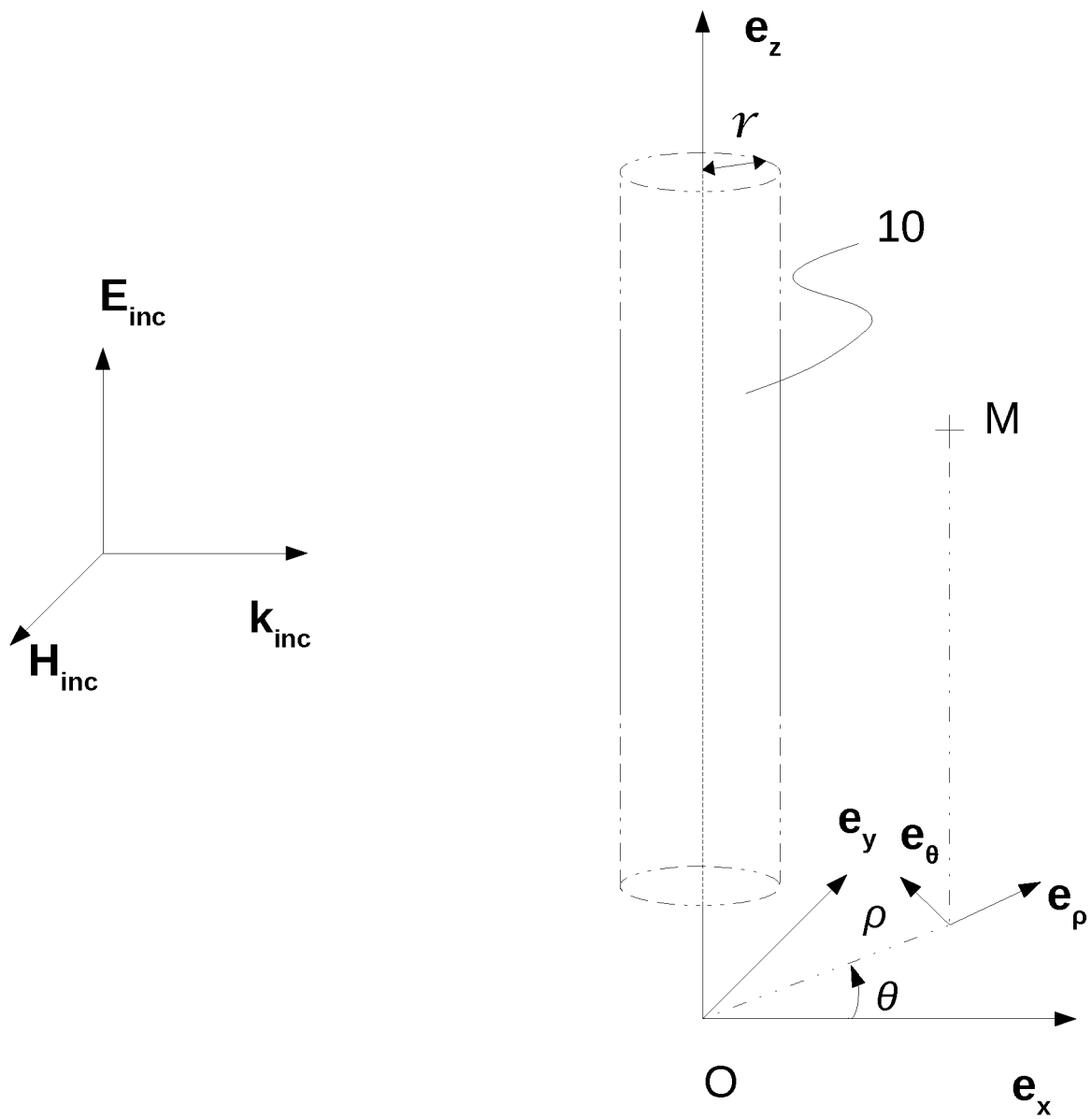


FIG. 4

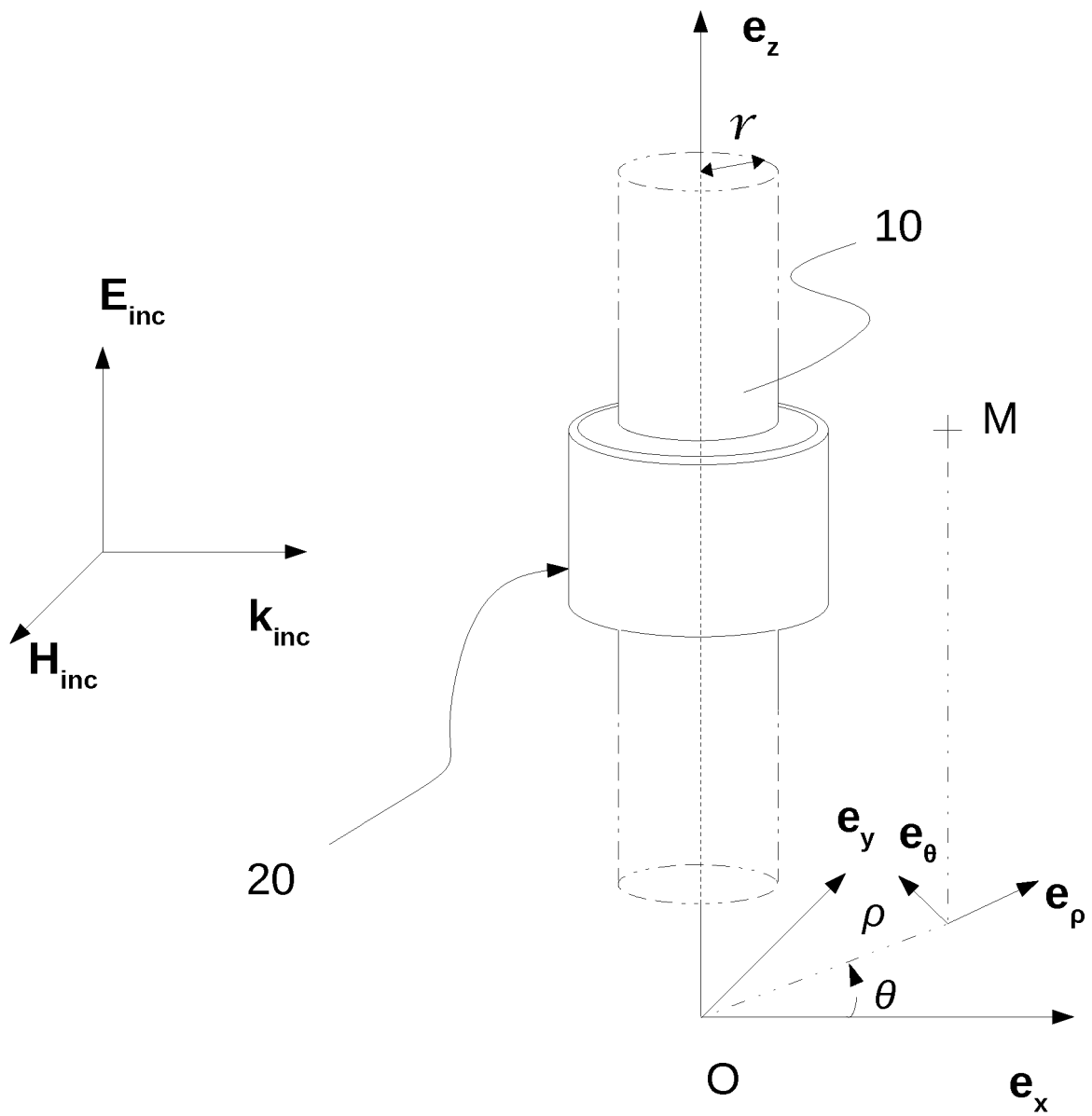


FIG. 5

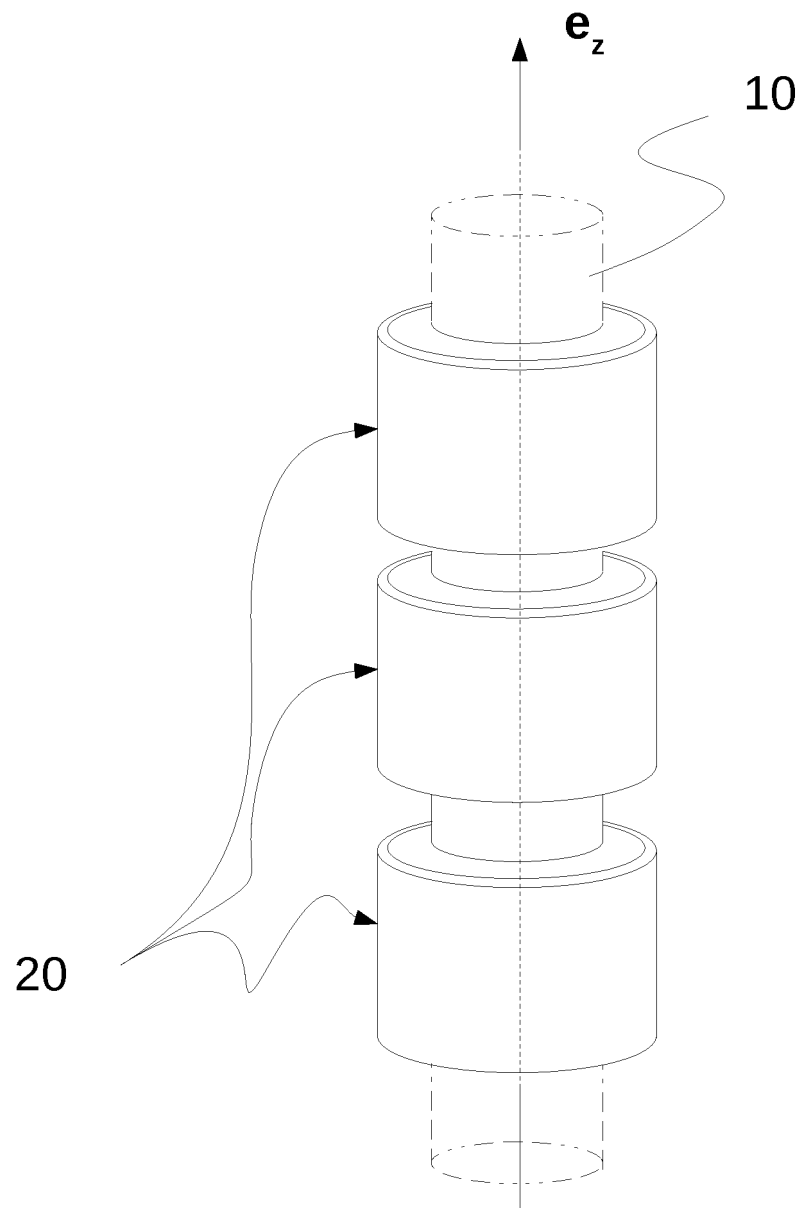


FIG. 6

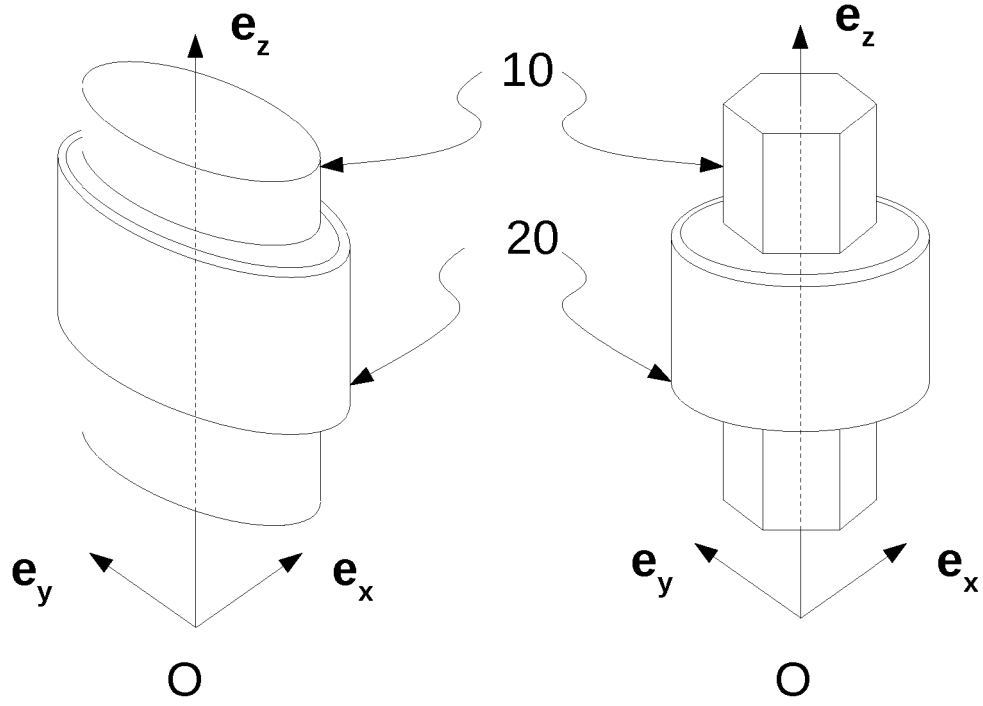


FIG. 7a

FIG. 7b

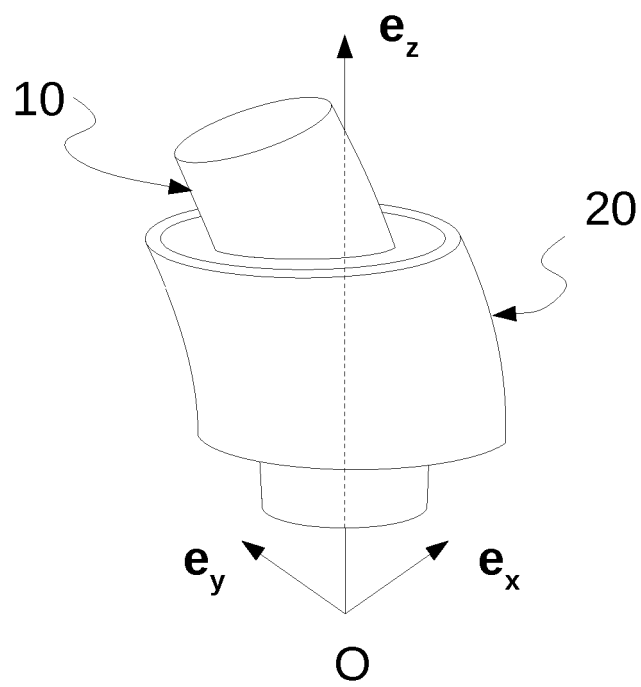
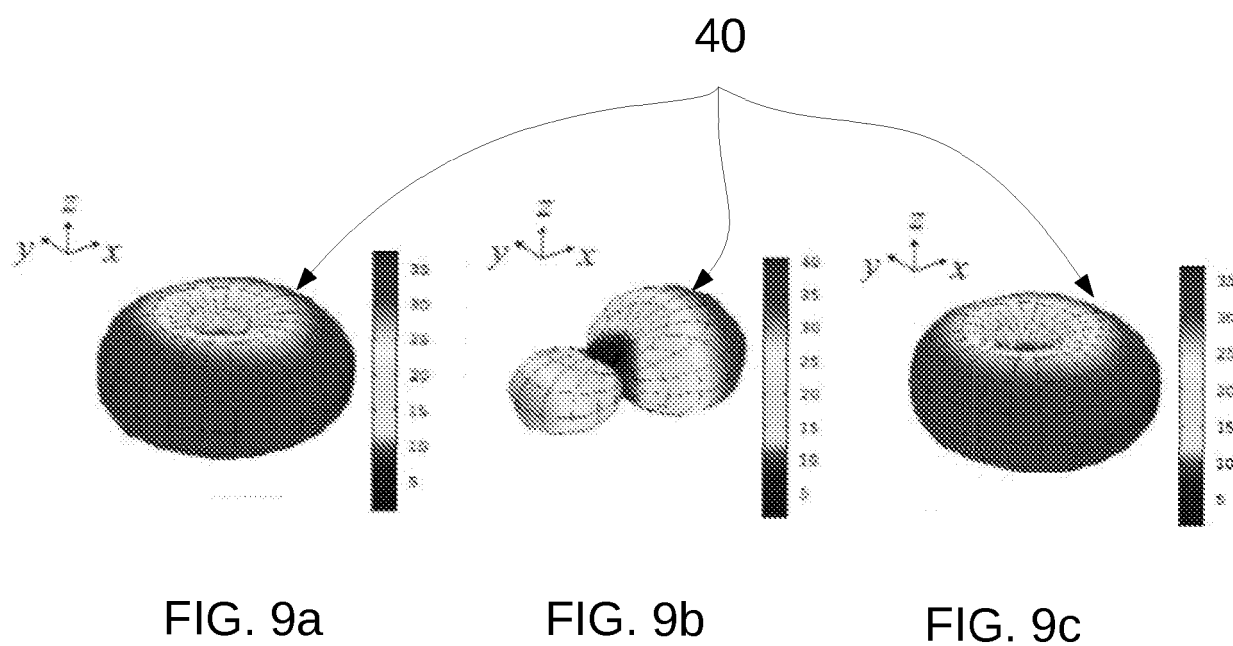
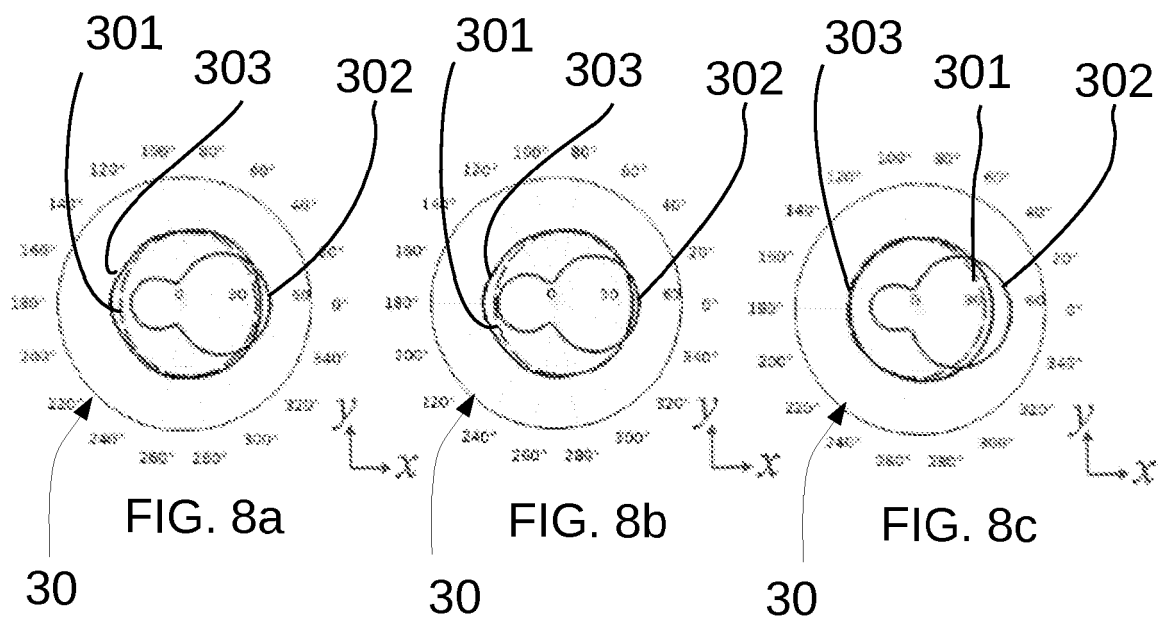


FIG. 7c



## RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

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

### Documents brevets cités dans la description

- US 20140238734 A [0007]
- WO 2014182398 A [0008]
- US 20110163903 A [0009]
- US 2015303564 A [0013]
- US 3428923 A [0014]
- US 2013017348 A [0015]

### Littérature non-brevet citée dans la description

- **BENITTA SHERLIN.** *RCS reduction with RF cloak* [0010]
- **LADISLAU MATEKOVITS.** *Anisotropic cloaking of a metallic cylinder* [0012]
- **KIRK T. MCDONALD.** *Scattering of a Plane Electromagnetic Wave by a Small Conducting Cylinder* [0062]
- **J. J. THOMSON.** *Recent Researches in Electricity and Magnetism* [0062]