

(19)



(11)

EP 4 550 578 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
07.05.2025 Bulletin 2025/19

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
H01Q 9/28 ^(2006.01) **H01Q 7/00** ^(2006.01)
H01Q 21/10 ^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **24209954.7**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
H01Q 7/00; H01Q 9/285; H01Q 21/10

(22) Date de dépôt: **30.10.2024**

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Etats d'extension désignés:
BA
Etats de validation désignés:
GE KH MA MD TN

(72) Inventeurs:
• **MUNOZ, Frédéric**
38054 GRENOBLE Cedex 09 (FR)
• **PINTOS, Jean-François**
38054 GRENOBLE Cedex 09 (FR)

(30) Priorité: **31.10.2023 FR 2311854**

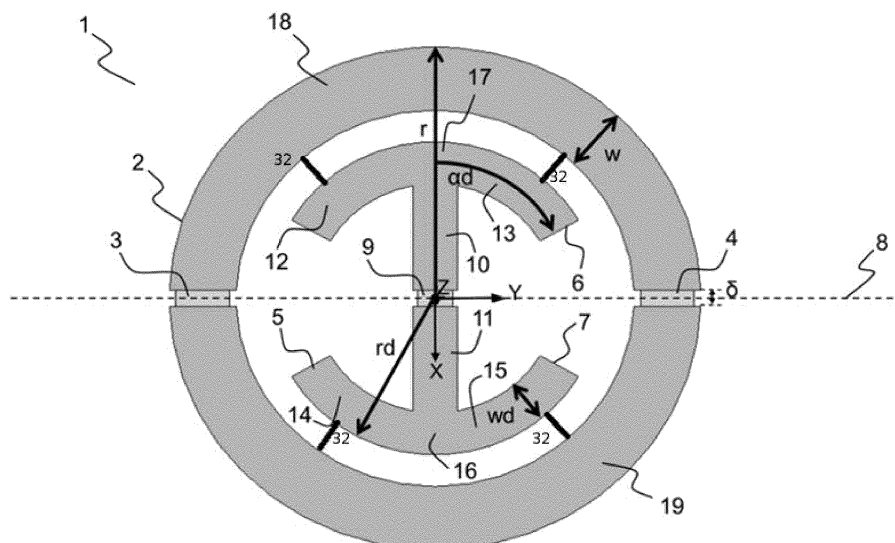
(74) Mandataire: **Atout PI Laplace**
Immeuble Up On
25 Boulevard Romain Rolland
CS 40072
75685 Paris Cedex 14 (FR)

(71) Demandeur: **Commissariat à l'Energie Atomique
et aux Energies
Alternatives**
75015 Paris (FR)

(54) ANTENNE BOUCLE SUPERDIRECTIVE

(57) L'invention se rapporte à une antenne (1), comprenant un élément rayonnant principal (2) de type antenne boucle, un premier port de connexion (3) et un deuxième port de connexion (4) disposés de part et d'autre de l'élément rayonnant principal (2), un élément central (5) de type dipôle électrique, circonscrit dans l'élément rayonnant principal (2), l'élément central (5) étant constitué de deux branches (6, 7) disposées de

façon symétrique par rapport à un axe de symétrie (8) passant par le premier port de connexion (3) et par le deuxième port de connexion (4), l'élément central (5) étant alimenté au niveau d'un troisième port de connexion (9) situé dans l'axe de symétrie (8), l'élément rayonnant principal (2) et l'élément central (5) étant coplanaires.

**FIG.3****EP 4 550 578 A1**

Description

Domaine technique

[0001] La présente invention se rapporte à une antenne, ainsi qu'à un système antenne et à un réseau d'antennes. L'invention est particulièrement adaptée aux systèmes de télécommunications sans fils, aux systèmes radar, ou à la métrologie radiofréquence, de façon non exhaustive.

[0002] La technologie de télécommunications 5G repose sur plusieurs bandes de fréquences. Parmi ces bandes de fréquences, la bande FR1-5G utilise des fréquences inférieures à 6 GHz. Dans cette bande sub-6 GHz, dans la mesure champ proche / champ lointain, les antennes directives à forte compacité apportent une focalisation de l'énergie rayonnée, une amélioration de la résolution angulaire, et une minimisation de l'espace occupé.

[0003] Dans un objectif de directivité, une des méthodes souvent utilisée consiste en la réalisation d'un réseau d'éléments résonants en mode « End-Fire », où l'axe du rayonnement maximal est aligné avec l'axe de duplication des éléments rayonnants, menant alors à une taille réduite mais avec peu de compacité dans l'orientation « End-Fire » du réseau. C'est le cas, par exemple, de l'antenne Yagi-Uda, bien connue de l'homme du métier.

[0004] Les antennes boucles sont des antennes élémentaires bien définies dans la littérature. Leurs dimensions peuvent être très petites devant la longueur d'onde. Un exemple d'antenne boucle est illustré par la figure 1. L'antenne boucle comprend un point d'excitation 21, et une boucle métallique 20, qui peut être constituée d'une ou plusieurs spires, ou être constituée d'une piste plane, d'un seul tenant.

[0005] En particulier, le passage d'un mode de rayonnement dans le plan (cf. diagramme de rayonnement 22 sur la figure 2) contenant la boucle, à un mode de rayonnement hors plan lorsque la circonférence C de la boucle s'approche de la longueur d'onde λ , est illustrée par la figure 2 (cf. diagrammes de rayonnement 23 et 24).

[0006] Les mesures de la figure 2 sont obtenues avec une valeur Ω constante, définie par :

$$\Omega = 2 \cdot \ln \left(\frac{2\pi a}{b} \right) = 10$$

a correspond au rayon de la boucle, et b correspond à l'épaisseur de la boucle selon l'axe z .

[0007] La courbe 31 correspond à la directivité selon l'axe z , en dBi, de l'antenne décrite dans [1], en fonction du rapport C/λ . Le ratio C/λ peut être modifié soit par un changement de taille de l'antenne (ici la circonférence) en fixant une fréquence donnée, soit pour une taille physique donnée, une variation de la fréquence à travers la longueur d'onde.

[0008] Lorsque la circonférence C de la boucle est faible par rapport à la longueur d'onde λ , typiquement lorsque $C/\lambda < 0.5$, le rayonnement maximal reste dans le plan de la boucle. En effet, le passage au mode fondamental de l'antenne s'accompagne d'une diminution de la directivité selon l'axe orthogonal au plan de la boucle, et le rayonnement a plutôt lieu dans le plan de la boucle.

[0009] Pour une mise en réseau des antennes boucle en mode « End-Fire » (superposition dans la direction de propagation orthogonale au plan de la boucle), il est nécessaire qu'il y ait une bonne directivité selon l'axe orthogonal au plan de la boucle.

[0010] Or, le problème du maintien de la directivité hors du plan d'une boucle se pose lors de la miniaturisation de l'antenne. Ce problème est clairement illustré sur la référence 22 de la figure 2, à travers un nul de rayonnement suivant l'axe Oz .

[0011] La diversité d'antenne miniature présente dans la littérature est conséquente et la conception d'un élément rayonnant directif et miniature représente un défi supplémentaire. Il existe différentes approches pour répondre à ce besoin.

[0012] Comme présenté dans [2], une partie des solutions propose d'utiliser des sources de Huygens (dipôle et boucle avec rayonnement dans le plan de la boucle), utilisant alors la directivité naturelle élevée de cet élément rayonnant.

[0013] D'autres solutions se basent sur une optimisation conjointe entre un dipôle et un plan réflecteur (parfois modifié dans un but de compacité, de bande d'adaptation large et de directivité, comme décrit dans [3]).

[0014] Dans le domaine des antennes à boucle, [4] propose d'inclure un espace de réglage d'impédance au niveau de la boucle.

[0015] Dans [5], le couplage entre éléments est utilisé, mais sans contrainte particulière sur le diagramme de rayonnement de l'antenne.

[0016] Ces solutions ne permettent pas de répondre au besoin de directivité et de contrôle du rayonnement évoqué précédemment.

[0017] Dans l'antenne décrite dans [6], l'utilisation des boucles proches du mode fondamental $C/\lambda < 0.5$ ne tire pas profit d'une compacité naturelle des boucles qui est liée à une utilisation des modes supérieurs, dans lesquels la boucle rayonne orthogonalement au plan qui la contient.

[0018] Dans [7], des antennes Yagi-Uda à boucles sont mis en réseau selon une disposition « End-Fire ». Cependant, les boucles utilisées ne sont pas de taille miniature ($C/\lambda \ll 1$) et présentent donc un rayonnement maximal orthogonal au plan.

[0019] Dans [8], un dipôle d'excitation est disposé à l'intérieur d'une antenne boucle situé hors du plan défini par le dipôle d'excitation, ce qui permet d'améliorer la directivité de l'antenne. Toutefois, le fait que l'antenne boucle soit située hors plan empêche une mise en réseau compacte selon une configuration « End-fire ».

[0020] Ainsi, l'invention vise à fournir un élément rayonnant compact et directif pour une utilisation seule ou en réseau.

Résumé de l'invention

[0021] Un objet de l'invention est donc une antenne, comprenant un élément rayonnant principal de type antenne boucle, un premier port de connexion et un deuxième port de connexion disposés de part et d'autre de l'élément rayonnant principal, un élément central de type dipôle électrique, circonscrit dans l'élément rayonnant principal, l'élément central étant constitué de deux branches disposées de façon symétrique par rapport à un axe de symétrie passant par le premier port de connexion et par le deuxième port de connexion, l'élément central étant alimenté au niveau d'un troisième port de connexion situé dans l'axe de symétrie, l'élément rayonnant principal et l'élément central étant coplanaires.

[0022] Avantageusement, les dimensions de l'élément rayonnant principal et de l'élément central sont déterminées de façon à ce que l'impédance du premier port de connexion et du deuxième port de connexion aient une partie réelle nulle.

[0023] Avantageusement, chaque branche de l'élément central comprend un brin principal qui s'étend orthogonalement à l'axe de symétrie, et deux brins auxiliaires, disposés de part et d'autre de l'extrémité du brin principal opposée au troisième port de connexion.

[0024] Avantageusement, l'élément rayonnant principal est composé de deux demi-cercles connectés au niveau du premier port de connexion et du deuxième port de connexion, et les brins auxiliaires ont une forme d'arc de cercle, et dans laquelle les paramètres suivants sont utilisés pour optimiser l'impédance du premier port de connexion et du deuxième port de connexion : le diamètre de l'élément rayonnant principal, la largeur de l'élément rayonnant principal, l'espacement entre chacun des demi-cercles, le diamètre des arcs de cercle, la largeur des arcs de cercle, et la longueur des arcs de cercle.

[0025] Avantageusement, l'impédance du premier port de connexion et l'impédance du deuxième port de connexion sont déterminées par application d'un algorithme de superdirectivité.

[0026] Avantageusement, l'algorithme de superdirectivité utilise une méthode des diagrammes de rayonnements.

[0027] Avantageusement, le premier port de connexion et le deuxième port de connexion comprennent chacun un circuit d'alimentation.

[0028] Avantageusement, le premier port de connexion comprend une charge, et le deuxième port de connexion comprend un circuit d'alimentation.

[0029] L'invention se rapporte également à un système antenne, comprenant une antenne précitée, et un élément réflecteur placé à proximité de l'élément rayonnant principal et parallèlement au plan de l'élément rayonnant principal.

[0030] L'invention se rapporte également à un réseau d'antennes comprenant au moins deux antennes précitées, les antennes étant mises en réseau selon une configuration de type « End-fire ».

Description des figures

[0031] D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins annexés donnés à titre d'exemple.

La figure 1, déjà décrite, illustre une antenne boucle selon l'état de la technique.

La figure 2, déjà décrite, illustre des diagrammes de rayonnements de l'antenne boucle selon la figure 1, pour différentes valeurs de C/λ .

La figure 3 illustre une antenne selon l'invention.

La figure 4 illustre des diagrammes de rayonnements de l'antenne boucle selon l'invention, et selon la figure 5, pour différentes valeurs de C/λ .

La figure 5 illustre une antenne boucle dépourvue d'élément central, et dont la boucle est excitée de part et d'autre au niveau de deux ports de connexion.

La figure 6 illustre un mode de réalisation d'un système antenne, comprenant une antenne et un élément réflecteur.

La figure 7 illustre un mode de réalisation d'une mise en réseau de type « End-fire » de plusieurs antennes selon l'invention.

La figure 8 illustre un mode de réalisation d'un système antenneur comprenant un élément réflecteur et une mise en réseau de type « End-fire » de plusieurs antennes selon l'invention.

Description détaillée de l'invention

[0032] L'antenne selon l'invention est présentée en figure 3.

[0033] L'antenne 1 comprend un élément rayonnant principal 2 de type antenne boucle. Sur la figure 3, la boucle est circulaire, mais d'autres formes peuvent être envisagées pour la boucle, notamment des formes carrées, rectangulaires, ou encore des boucles de formes plus complexes de type polygonales surfaciques ou volumiques. La forme spécifique dépend de l'application et des caractéristiques de performance souhaitées. L'élément rayonnant principal 2 est une boucle de fil conducteur ou une piste métallique imprimée sous forme de boucle.

[0034] La piste métallique imprimée, comprenant typiquement du cuivre, peut être réalisée sur un substrat diélectrique selon une technologie de type PCB (pour « Printed Circuit Board » ou circuit imprimé).

[0035] Le substrat peut être fabriqué à partir de matériaux tels que la fibre de verre époxy (FR-4) ou le polytétrafluoroéthylène (PTFE), bien que d'autres matériaux puissent être utilisés en fonction des exigences spécifiques de l'antenne.

[0036] L'élément rayonnant principal 2 est situé dans le plan xy, ce qui signifie que son épaisseur, selon l'axe z, est négligeable par rapport à la largeur de la boucle, dans le plan xy.

[0037] Un élément central 5 de type dipôle électrique est circonscrit dans l'élément rayonnant principal 2. L'élément central 5 est constitué d'une première branche 6 et d'une deuxième branche 7. Les deux branches sont disposées de façon symétrique par rapport à un axe de symétrie 8 qui passe par un premier port de connexion 3 et par un deuxième port de connexion 4.

[0038] L'élément central 5 de type dipôle électrique est alimenté par une ligne bifilaire équilibrée représentée par un point de connexion au centre du dipôle. Un des pôles est excité en opposition de phase par rapport au second pôle, qui peut être effectuée par une excitation équilibrée à la sortie d'un circuit symétriseur (dispositif de appelé « balun »).

[0039] Le premier port de connexion 3 et le deuxième port de connexion 4 sont disposés de part et d'autre de l'élément rayonnant principal 2, c'est-à-dire de façon diamétralement opposée par rapport au centre de la boucle. La disposition de part et d'autre de l'élément rayonnant principal 2 (par rapport au centre de symétrie) peut s'appliquer aussi bien à une antenne boucle circulaire, qu'aux autres formes d'antennes boucles précitées.

[0040] Le nombre de ports de connexion peut être supérieur à deux, sous réserve que la symétrie par rapport à l'axe 8 soit respectée.

[0041] Selon un premier mode de réalisation, un des ports de connexion (par exemple le premier port de connexion 3) comprend une charge, et l'autre port de connexion (par exemple le deuxième port de connexion 4) comprend un circuit d'alimentation.

[0042] Le circuit d'alimentation sert de liaison électrique entre l'élément rayonnant principal 2 et l'électronique d'émission/réception de l'antenne. Les signaux électriques générés par l'antenne (en cas de réception) ou les signaux électriques destinés à être émis par l'antenne (en cas de transmission) sont transmis à travers le circuit d'alimentation.

[0043] Dans ce mode de réalisation, la charge est une charge dite passive, et peut comprendre une résistance. Mais des charges actives peuvent aussi être envisagées, permettant d'amener des impédances dont les parties réelles sont négatives.

[0044] Les charges peuvent être conçues avec circuits équivalents de type RLC série ou parallèle.

[0045] Selon un mode de réalisation particulièrement avantageux, chacun des ports de connexion comprend un circuit d'alimentation. La symétrie du dipôle par rapport à l'axe de symétrie 8 permet un couplage équilibré sur la boucle (deux points d'excitations par couplage). Ceci permet d'alimenter le dipôle au centre et de pondérer, avec le même jeu de charge, les deux ports de la boucle. L'application de deux charges symétriques au niveau de l'élément rayonnant principal permet de maintenir le rayonnement orthogonal au plan xy contenant la boucle.

[0046] L'antenne 1 selon l'invention comprend un élément central 5 de type dipôle électrique, circonscrit dans l'élément rayonnant principal 2. Par « circonscrit », on entend que l'élément central 5 est contenu dans des limites spécifiques définies par l'intérieur de la boucle de l'élément rayonnant principal 2.

[0047] L'élément central 5 est alimenté au niveau d'un troisième port de connexion 9 situé sur l'axe de symétrie 8. Le troisième port de connexion 9 comprend un circuit d'alimentation. Par ailleurs, le troisième port de connexion 9 peut comprendre un circuit d'adaptation d'impédance incluant des charges en série et/ou en parallèle.

[0048] L'élément central 5 est situé dans le même plan que l'élément rayonnant principal 2. Le fait qu'ils soient situés dans un même plan permet de réduire l'espace inter-élément, par rapport à une configuration dans laquelle l'un des deux éléments serait hors du plan. L'agencement, dans un même plan, de l'élément rayonnant principal 2 et de l'élément central

5 simplifie la mise en place du premier port de connexion 3 et du deuxième port de connexion 4.

[0049] Du fait du caractère coplanaire de l'élément central 5 et de l'élément rayonnant principal 2, il est possible de connecter un circuit de couplage complexe 32 entre l'élément central 5 et de l'élément rayonnant principal 2 (par exemple un circuit RLC série ou parallèle). Un tel couplage plus complexe serait difficile voire impossible à intégrer si l'élément rayonnant principal 2 était hors du plan de l'élément central 5 (dans ce cas, le couplage se fait uniquement par couplage capacitif via la capacité distribuée entre l'élément rayonnant principal 2 et l'élément central 5). Ainsi, en jouant sur les charges du circuit de couplage complexe, il est possible d'obtenir des rayonnements différents sans modifier la structure rayonnante initialement prévue.

[0050] La figure 4 illustre des diagrammes de rayonnement obtenus pour différentes valeurs de C/λ (C correspond à la circonférence de l'élément rayonnant principal 2 et λ correspond à la longueur d'onde de la porteuse), avec l'élément central 5 (diagrammes 20, 21 et 22) et sans l'élément central (diagrammes 23, 24 et 25). Chacun des diagrammes de rayonnement permet de visualiser la directivité de l'antenne, c'est-à-dire dans quelles directions l'antenne rayonne ou capte le mieux les signaux électromagnétiques.

[0051] La figure 4 illustre également la directivité de l'antenne suivant l'axe z de la figure 3, c'est-à-dire l'axe orthogonal au plan de la boucle (cf. courbe 26 avec l'élément central et courbe 27 sans l'élément central). La figure 5 illustre l'antenne boucle 31 dépourvue d'élément central, utilisée pour le tracé de la courbe 27, et dont la boucle est excitée de part et d'autre au niveau du premier port de connexion 3 et du deuxième port de connexion 4 avec la bonne distribution de phase.

[0052] Il apparaît que pour $C/\lambda < 1$ et $C/\lambda > 1,25$, et en particulier $C/\lambda = 0,25$ l'antenne équipée de l'élément central rayonne dans le plan orthogonal au plan de l'antenne (rayonnement dit « broadside »). Le diagramme de rayonnement 23 avec l'élément central, pour $C/\lambda = 0,25$, permet de constater qu'il y a une directivité maximale dans l'axe z et une bonne symétrie du diagramme.

[0053] Cette caractéristique de rayonnement, même pour des faibles valeurs de C/λ , permet d'envisager une mise en réseau du type « End-fire » de plusieurs antennes selon l'invention. Ainsi, à longueur d'onde constante, la circonférence de l'antenne peut être diminuée, sans que la directivité n'en soit affectée hors du plan.

[0054] La mise en réseau du type « End-fire » consiste à aligner une pluralité d'antennes selon l'axe orthogonal au plan de chaque antenne. En concentrant l'énergie dans une direction spécifique (qui correspond à l'axe orthogonal), les antennes du type « End-fire » offrent un gain élevé dans cette direction, ce qui améliore la puissance effective du signal émis ou reçu dans cette direction.

[0055] Un mode de réalisation de l'antenne selon l'invention est décrit en lien avec la figure 3. La branche 6 de l'élément central 5 comprend un brin principal 10 qui s'étend orthogonalement au plan (ou axe) de symétrie 8, et deux brins auxiliaires (12 et 13), disposés de part et d'autre de l'extrémité 17 du brin principal 10 opposée au troisième port de connexion 9.

[0056] Par « brin » (brin principal ou brin auxiliaire), on entend une partie allongée, et relativement fine.

[0057] Ainsi, chaque brin auxiliaire forme un arc de cercle qui s'étend depuis l'extrémité 17 du brin principal, selon un angle α compris entre 0° et 90° (à l'exclusion de ces valeurs), et l'élément rayonnant principal 2 est composé de deux demi-cercles. Si l'élément rayonnant principal 2 a une autre forme, chaque brin auxiliaire a une forme telle qu'il y ait un espace libre (dépourvu de piste métallique) entre le brin auxiliaire et l'intérieur de l'élément rayonnant principal 2, de façon à faire apparaître des zones de couplage entre l'élément rayonnant principal 2 et l'élément central 5. Par exemple, si l'élément rayonnant principal 2 a une forme carrée, les brins auxiliaires ont une forme rectiligne, de façon à être parallèle à l'élément rayonnant principal 2.

[0058] Par symétrie, la branche 7 de l'élément central 5 comprend un brin principal 11 qui s'étend orthogonalement au plan de symétrie 8, et deux brins auxiliaires (14 et 15), disposés de part et d'autre de l'extrémité 16 du brin principal 11 opposée au troisième port de connexion 9.

[0059] Les dimensions de l'élément rayonnant principal 2 et de l'élément central 5 sont déterminées de façon à ce que l'impédance du premier port de connexion 3 et du deuxième port de connexion 4 ait une partie réelle la plus faible possible, en particulier une partie réelle nulle ou quasi-nulle. Par « quasi-nulle », on entend une partie réelle très inférieure à la résistance de rayonnement de l'antenne (de l'ordre d'au moins cent fois inférieure).

[0060] Ceci permet d'alimenter l'élément central 5 au centre et de pondérer avec le même jeu de charge les deux ports de connexion (3, 4) de l'élément rayonnant principal 2. Ainsi, les plans de phases de l'élément rayonnant principal 2 et de l'élément central 5 sont co-localisés.

[0061] Par ailleurs, le fait d'ajouter un élément central 5 au centre de l'élément rayonnant principal 2 permet d'optimiser l'impédance du premier port de connexion 3 et du deuxième port de connexion 4, en jouant sur une pluralité de paramètres, et non pas uniquement sur la largeur de piste w de l'élément rayonnant principal 2, comme c'est le cas dans les antennes boucles de l'état de la technique.

[0062] Ainsi, lors de la conception de l'antenne, le concepteur peut régler au moins l'un des paramètres suivants, de façon à pondérer avec le même jeu de charge les deux ports de connexion : le diamètre r de l'élément rayonnant principal 2, la largeur w de l'élément rayonnant principal 2, l'espacement δ entre chacun des demi-cercles (18, 19) qui constituent l'élément rayonnant principal, le diamètre r_d des arcs de cercle (12, 13, 14, 15), la largeur w_d des arcs de cercle (12, 13, 14,

15), et la longueur αd des arcs de cercle (12, 13, 14, 15).

[0063] Par exemple, une antenne selon l'invention peut être implémentée avec les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous (unités indiquées entre parenthèses) :

λ (m)	r (m)	w (m)	δ (m)	r_d (m)	w_d (m)	αd (°)
0,3	$0,25 \cdot \lambda / 2\pi$	$\lambda / 100$	$\lambda / 400$	$\lambda \cdot (r - 2,5w)$	$\lambda / 300$	70

[0064] Pour ces valeurs, on obtient les impédances suivantes (en Ω), respectivement au niveau du premier point de connexion 3 et du deuxième point de connexion 4 :

$$Z_3 = 0 + 1j \cdot 535$$

$$Z_4 = 0 + 1j \cdot 535$$

[0065] Les impédances au niveau des points de connexion sont identiques, ce qui garantit un couplage équilibré au niveau de l'élément rayonnant principal 2, et un rayonnement qui demeure orthogonal au plan de la boucle, même avec une faible valeur de C/λ ($C/\lambda = 0.25$).

[0066] L'optimisation des charges peut être mise en oeuvre par application d'un algorithme de superdirectivité, qui permet d'obtenir analytiquement (i.e. par la résolution d'un système linéaire d'équations) les amplitudes complexes aux connexions de l'antenne, c'est-à-dire directement au niveau des charges et/ou des points d'alimentation.

[0067] Un exemple d'algorithme de superdirectivité est décrit dans [9].

[0068] De préférence, l'algorithme de superdirectivité utilise une méthode des diagrammes de rayonnements, qui est facilement implémentable. En effet, il ne nécessite pas d'itération, ou encore de décomposition dans une base particulière.

[0069] En variante, l'optimisation des charges peut être mise en oeuvre par d'autres méthodes, notamment par la méthode des modes sphériques, ou encore par la méthode des modes caractéristiques.

[0070] La figure 6 illustre un système antenne, comprenant une antenne 1 telle que définie précédemment, et un élément réflecteur 28 placé à proximité de l'élément rayonnant principal et parallèlement au plan de l'élément rayonnant principal.

[0071] Cette configuration apporte une augmentation de la directivité dans le plan orthogonal à l'antenne. En particulier, l'augmentation de la directivité peut être d'un facteur 2 si le réflecteur est un bon conducteur métallique et de diamètre supérieur à la longueur d'onde.

[0072] Le réflecteur est plat et peut avoir un diamètre de l'ordre de la longueur d'onde du signal d'émission/réception. Les effets sur la directivité sont importants à mesure que l'antenne se rapproche de l'élément réflecteur 28 (par exemple d'une distance égale à $0,1\lambda$). Toutefois, plus l'antenne 1 se rapproche de l'élément réflecteur 28, plus l'adaptation d'impédance de l'élément réflecteur 28 devient difficile. Un compromis entre amélioration de la directivité et adaptation d'impédance doit donc être fait.

[0073] La figure 7 illustre un réseau d'antennes 29 selon l'invention. Il comprend au moins deux antennes décrites précédemment, mises en réseau selon une configuration de type « End-fire ». Il n'est pas nécessaire que les éléments centraux des différentes antennes soient alignés. Les antennes ont un rayonnement selon l'axe orthogonal au plan de la boucle, ce qui est particulièrement compatible avec une mise en réseau.

[0074] En effet, l'axe du rayonnement maximal est aligné avec l'axe de duplication des éléments rayonnants, et l'espace entre les antennes peut être fortement réduit du fait du caractère plan de l'antenne et de l'élément central. Cela permet d'obtenir un réseau très compact et très directif.

[0075] Les modes de réalisation du système avec réflecteur et de la mise en réseau des antennes selon la configuration de type « End-fire » peuvent être combinés, comme l'illustre la figure 8. Le réseau d'antennes 30 comprend une pluralité d'antennes 1 mises en réseau, placées face à un réflecteur 28.

Références citées :

[0076]

[1] Balanis, C., 2005. Antenna theory. New York: Wiley-Interscience.

[2] Pigeon, M., Delaveaud, C., Rudant, L., & Belmkaddem, K. (2014). Miniature directive antennas. International

Journal of Microwave and Wireless Technologies, 6(1), 45-50. doi:10.1017/S1759078713001098

[3] R. W. Ziolkowski, M. -C. Tang and N. Zhu, "An efficient, electrically small antenna with large impedance bandwidth simultaneously with high directivity and large front-to-back ratio," 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory, Hiroshima, Japan, 2013, pp. 885-887

[4] EP2178166A1, « Antenne à boucle incluant un espace de réglage d'impédance et procédés associés »

[5] US7298343B2, « RFID tag with enhanced readability »

[6] O. S. Kim, S. Pivnenko and O. Breinbjerg, "Superdirective Magnetic Dipole Array as a First-Order Probe for Spherical Near-Field Antenna Measurements," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 10, pp. 4670-4676, Oct. 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2207363

[7] S. Ito, N. Inagaki and T. Sekiguchi, "An investigation of the array of circular-loop antennas," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 19, no. 4, pp. 469-476, July 1971, doi: 10.1109/TAP.1971.1139954

[8] F. Munoz et al. "Compact Superdirective Electric Dipole Array for Far-field Measurement in a Semi-Anechoic Environment," 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 2023, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133657.

[9] E. E. Altshuler, T. H. O'Donnell, A. D. Yaghjian, and S. R. Best, "A Monopole Superdirective Array", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 53, no. 8, August 2005

Revendications

1. Antenne (1), comprenant un élément rayonnant principal (2) de type antenne boucle, un premier port de connexion (3) et un deuxième port de connexion (4) disposés de part et d'autre de l'élément rayonnant principal (2), un élément central (5) de type dipôle électrique, circonscrit dans l'élément rayonnant principal (2), l'élément central (5) étant constitué de deux branches (6, 7) disposées de façon symétrique par rapport à un axe de symétrie (8) passant par le premier port de connexion (3) et par le deuxième port de connexion (4), l'élément central (5) étant alimenté au niveau d'un troisième port de connexion (9) situé dans l'axe de symétrie (8), **caractérisée en ce que** l'élément rayonnant principal (2) et l'élément central (5) sont coplanaires.
2. Antenne selon la revendication 1, dans laquelle les dimensions de l'élément rayonnant principal (2) et de l'élément central (5) sont déterminées de façon à ce que l'impédance du premier port de connexion (3) et du deuxième port de connexion (4) aient une partie réelle nulle.
3. Antenne selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle chaque branche (6, 7) de l'élément central (5) comprend un brin principal (10, 11) qui s'étend orthogonalement à l'axe de symétrie (8), et deux brins auxiliaires (12, 13, 14, 15), disposés de part et d'autre de l'extrémité (16, 17) du brin principal (10, 11) opposée au troisième port de connexion (9).
4. Antenne selon la revendication 3, dans laquelle l'élément rayonnant principal (2) est composé de deux demi-cercles (18, 19) connectés au niveau du premier port de connexion (3) et du deuxième port de connexion (4), et les brins auxiliaires (12, 13, 14, 15) ont une forme d'arc de cercle, et dans laquelle les paramètres suivants sont utilisés pour optimiser l'impédance du premier port de connexion et du deuxième port de connexion : le diamètre (r) de l'élément rayonnant principal (2), la largeur (w) de l'élément rayonnant principal (2), l'espacement (δ) entre chacun des demi-cercles (18, 19), le diamètre (rd) des arcs de cercle (12, 13, 14, 15), la largeur (wd) des arcs de cercle (12, 13, 14, 15), et la longueur (αd) des arcs de cercle (12, 13, 14, 15).
5. Antenne selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle l'impédance du premier port de connexion (3) et l'impédance du deuxième port de connexion (4) sont déterminées par application d'un algorithme de superdirectivité.
6. Antenne selon la revendication 5, dans laquelle l'algorithme de superdirectivité utilise une méthode des diagrammes de rayonnements.

EP 4 550 578 A1

7. Antenne selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle le premier port de connexion (3) et le deuxième port de connexion (4) comprennent chacun un circuit d'alimentation.
8. Antenne selon l'une des revendications 1 à 6, dans laquelle le premier port de connexion (3) comprend une charge, et le deuxième port de connexion (4) comprend un circuit d'alimentation.
9. Antenne selon l'une des revendications 1 à 8, dans laquelle un circuit de couplage est connecté entre l'élément central (5) et l'élément rayonnant principal (2).
10. Antenne selon la revendication 9, dans laquelle le circuit de couplage est un circuit RLC série ou parallèle.
11. Système antenne, comprenant une antenne (1) selon l'une des revendications précédentes, et un élément réflecteur (28) placé à proximité de l'élément rayonnant principal et parallèlement au plan de l'élément rayonnant principal.
12. Réseau d'antennes (29), **caractérisé en ce qu'il** comprend au moins deux antennes selon l'une des revendications 1 à 10, les antennes étant mises en réseau selon une configuration de type « End-fire ».

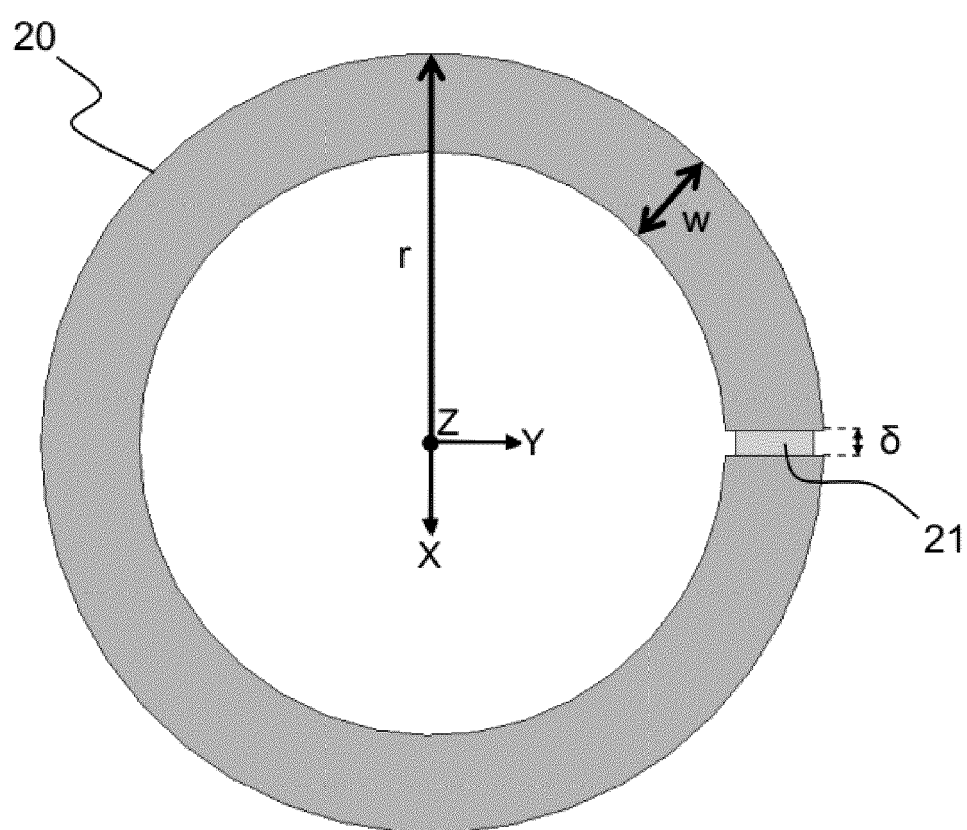


FIG.1

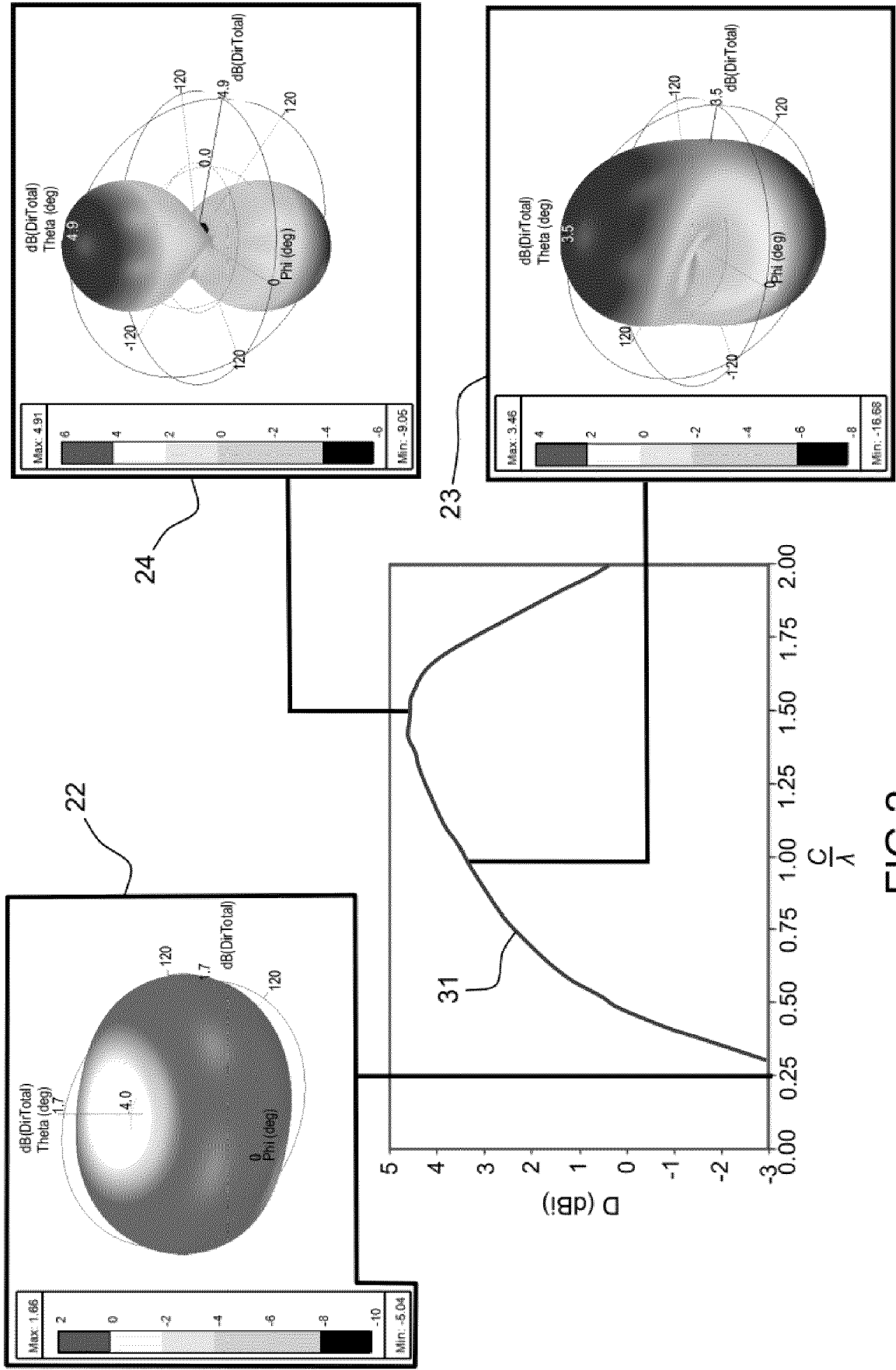
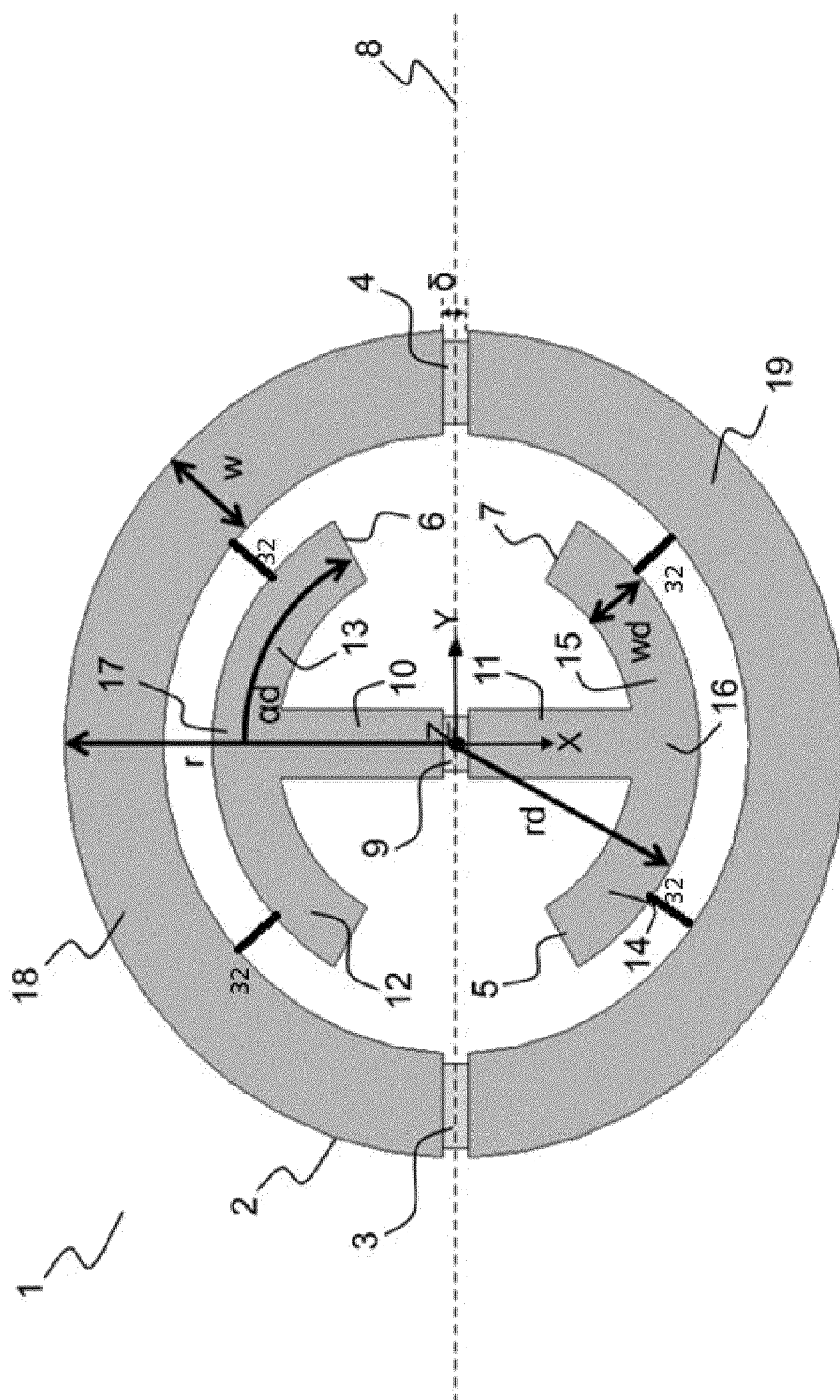


FIG.2



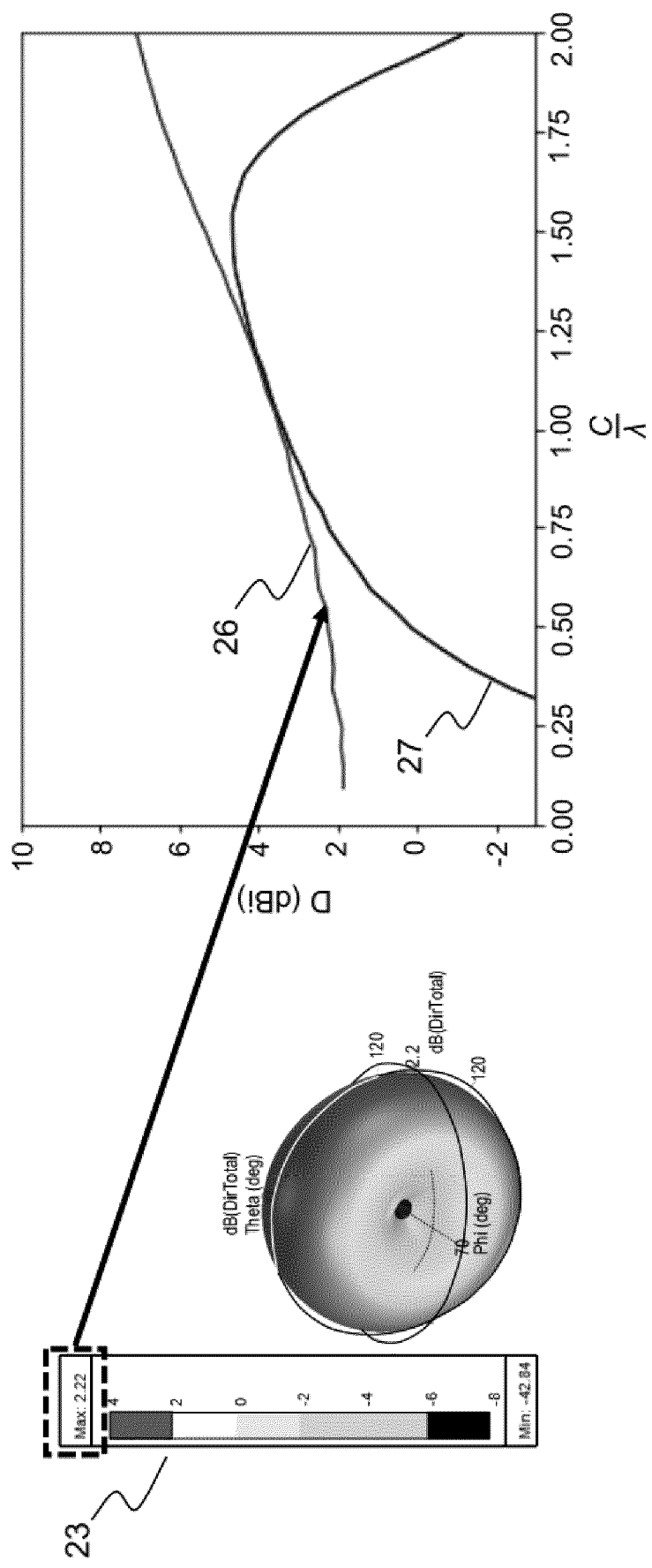


FIG.4

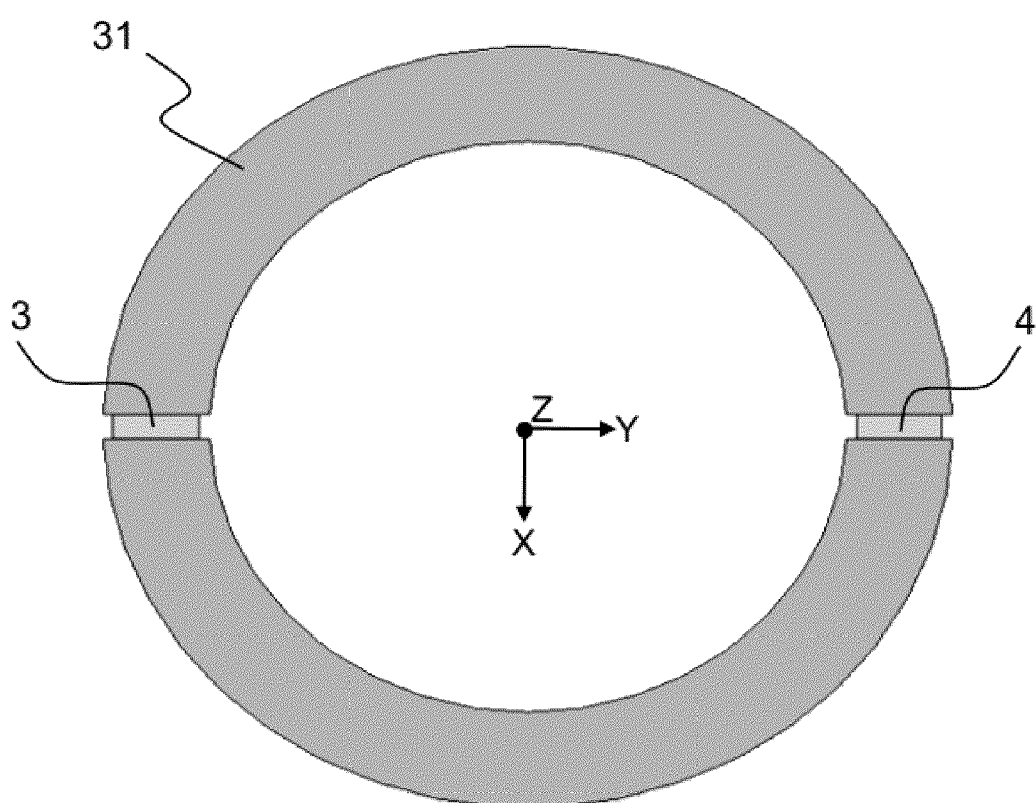


FIG.5

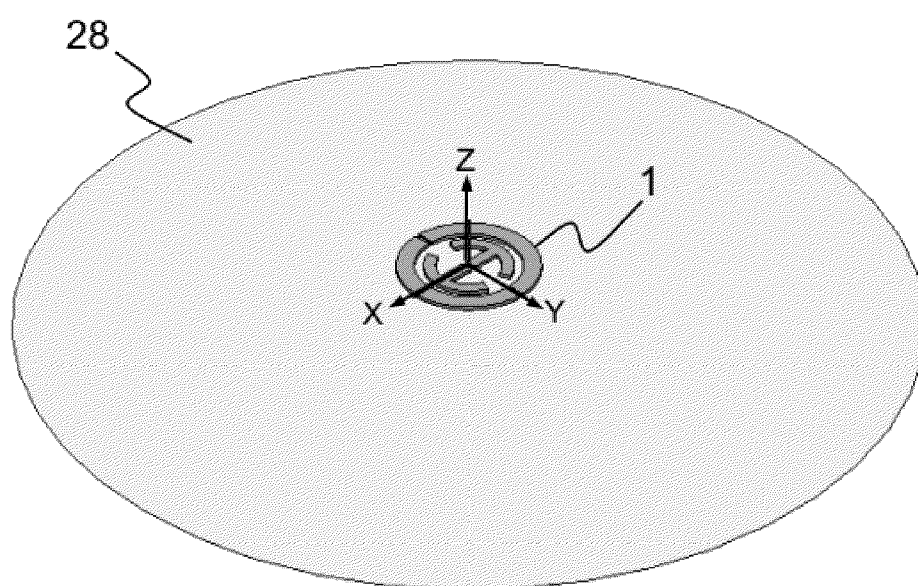


FIG.6

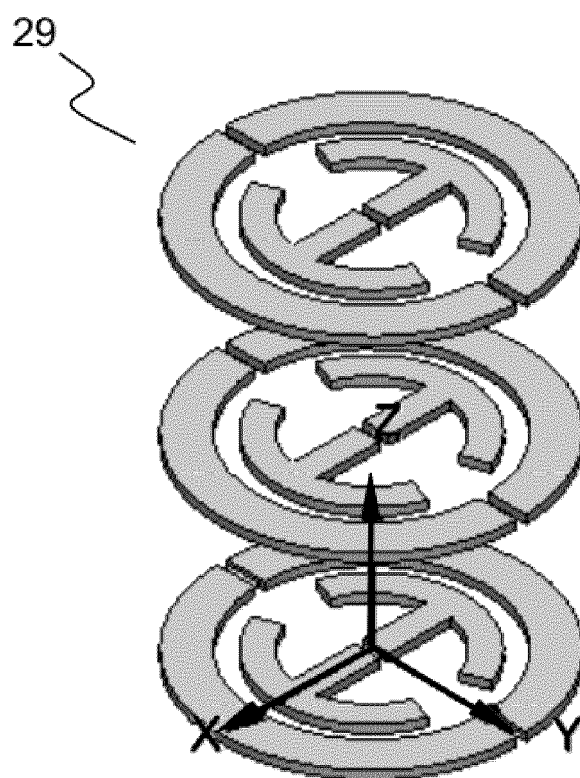


FIG.7

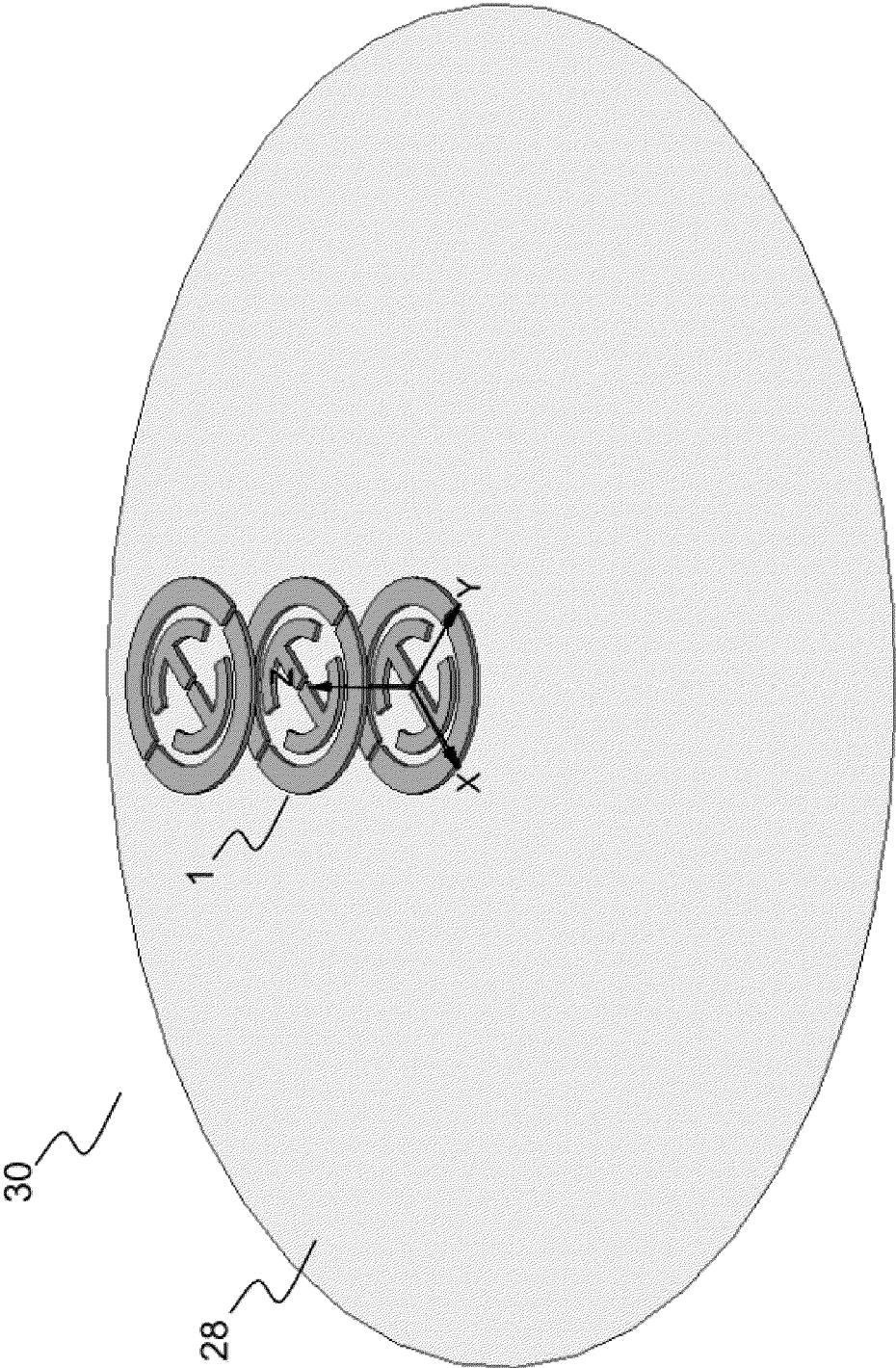


FIG. 8



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 24 20 9954

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X,D	MUNOZ FREDERIC ET AL: "Compact Superdirective Electric Dipole Array for Far-field Measurement in a Semi-Anechoic Environment", 2023 17TH EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), EUROPEAN ASSOCIATION FOR ANTENNAS AND PROPAGATION, 26 mars 2023 (2023-03-26), pages 1-5, XP034351646, DOI: 10.23919/EUCAP57121.2023.10133657 * figure 3 * * figure 4 * * figure 7 * * Section II * * Section III.A * * Section III.B * * Section III.C * * Section IV.A * * Section IV.B * * tableau II *	1-12	INV. H01Q9/28 H01Q7/00 H01Q21/10
A	----- MING-CHUN TANG ET AL: "Two-element Egyptian axe dipole arrays emphasising their wideband and end-fire radiation performance", IET MICROWAVES, ANTENNAS & PROPAGATION, THE INSTITUTION OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, UNITED KINGDOM, vol. 9, no. 13, 1 octobre 2015 (2015-10-01), pages 1363-1370, XP006106556, ISSN: 1751-8725, DOI: 10.1049/IET-MAP.2014.0278 * figure 1 * * Section 2.1 * -----	10	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) H01Q
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 31 janvier 2025	Examineur Kalialakis, Christos
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

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

- EP 2178166 A1 [0076]
- US 7298343 B2 [0076]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **BALANIS, C.** Antenna theory. Wiley-Interscience, 2005 [0076]
- **PIGEON, M. ; DELAVEAUD, C ; RUDANT, L. ; BELMKADDEM, K.** Miniature directive antennas. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2014, vol. 6 (1), 45-50 [0076]
- **R. W. ZIOLKOWSKI ; M. -C. TANG ; N. ZHU.** An efficient, electrically small antenna with large impedance bandwidth simultaneously with high directivity and large front-to-back ratio. *2013 International Symposium on Electromagnetic Theory*, 2013, 885-887 [0076]
- **O. S. KIM ; S. PIVNENKO ; O. BREINBJERG.** Superdirective Magnetic Dipole Array as a First-Order Probe for Spherical Near-Field Antenna Measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, October 2012, vol. 60 (10), 4670-4676 [0076]
- **S. ITO ; N. INAGAKI ; T. SEKIGUCHI.** An investigation of the array of circular-loop antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, July 1971, vol. 19 (4), 469-476 [0076]
- **F. MUNOZ et al.** Compact Superdirective Electric Dipole Array for Far-field Measurement in a Semi-Anechoic Environment. *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Florence, Italy, 2023, 1-5 [0076]
- **E. E. ALTSHULER ; T. H. O'DONNELL ; A. D. YAGHJIAN ; S. R. BEST.** A Monopole Superdirective Array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, August 2005, vol. 53 (8) [0076]