

SYSTEME DE DEFLEXION ET DE POINTAGE D'UN FAISCEAU HYPERFREQUENCE

Le domaine de l'invention est celui des systèmes de déflexion et de pointage d'un faisceau hyperfréquence.

5

L'invention s'applique au traitement d'un faisceau hyperfréquence, correspondant à des fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz, de longueur d'ondes typiques de 1 mm à 1 m. De telles fréquences sont utilisées notamment dans le domaine :

- 10 - des télécommunications par satellite à partir de plateformes mobiles,
- des liaisons de données reconfigurables pour communications à haut-débit,
ou
- des radars bas coût à ondes millimétriques ou centimétriques.

Plusieurs systèmes nécessitent de pouvoir commander la
15 direction dans laquelle le faisceau est émis ou reçu. Cette propriété est dénommée le pointage. Parmi ces systèmes, on peut citer par exemple les radars embarqués, les autodirecteurs de missile, les systèmes « sense and avoid », les systèmes de communication, les brouilleurs et les systèmes radars de périscopes.

20 Pour le pointage l'antenne doit être configurée pour émettre et recevoir une onde dans une direction de l'espace donnée. Par exemple aujourd'hui, dans le domaine des télécommunications, on est de plus en plus amené à devoir rediriger une antenne, suite à la remise à jour de la couverture du territoire. Il est important de disposer d'antennes intelligentes
25 et télécommandées, intelligentes pour leur capacité à s'orienter pour couvrir des zones différentes dans l'espace et télécommandées pour leur capacité à être pilotables à distance à partir d'un central.

Pour le « tracking » ou poursuite, l'antenne doit être configurée pour suivre une cible telle qu'un satellite ou un avion.

30

En outre, on cherche de plus en plus à obtenir des antennes à faisceau orientable, compactes, de masse et d'encombrement réduits, faciles à utiliser et à intégrer dans une plateforme, et à coût réduit.

Différentes techniques connues permettent de réaliser une antenne à faisceau orientable, mais présentent certains inconvénients.

L'antenne parabolique de type Cassegrain est handicapée par des effets d'ombrage dus à la position de la source (plus spécifiquement par le réflecteur secondaire) devant le réflecteur. Aussi pour préserver une bonne efficacité, un grand rapport diamètre sur longueur d'onde est requis. A basse fréquence, cette antenne ne peut alors pas être intégrée dans un petit volume.

De plus, les solutions mécaniques traditionnelles pour orienter l'antenne utilisent un mécanisme fragile de cardan à 2 axes. Ce système de pointage nécessite un débattement mécanique important puisque le volume occupé par l'antenne varie en fonction de son orientation. Par ailleurs, pour éviter des parties mobiles à rayonnement RF actif, les signaux d'émission et de réception doivent traverser des joints tournants microondes qui dégradent les performances et peuvent être chers et encombrants lorsque de hauts niveaux de puissance (plusieurs dizaines de Watts) sont requis.

Ce type d'antenne souffre en outre de son domaine de débattement généralement limité à 60°.

Pour se débarrasser des parties mobiles, une solution connue consiste à utiliser une antenne active à balayage électronique qui permet d'éviter de recourir à une mécanique de pointage: son profil reste plat quelle que soit la direction d'orientation, ce qui procure un avantage majeur lors de l'intégration dans un carénage. L'orientation est commandée électriquement. Mais cette antenne présente des inconvénients en termes de prix, de consommation électrique, de complexité, de gestion de température d'échauffement, de maintien de puissance et également de domaine angulaire accessible qui reste limité à moins de 60°.

Une solution pour réaliser un système de déflexion RF est d'utiliser deux composants diffractifs pouvant effectuer une rotation autour d'un même axe, combinés à une lentille et une source RF. Un tel système est décrit dans le brevet FR 3 002 697. Ces composants diffractifs et la lentille présentent chacun une pluralité de microstructures MS sub-longueur d'onde périodiques formées dans un matériau diélectrique selon une configuration de balayage de Risley ; ces microstructures sont agencées de manière à former un matériau artificiel présentant une variation périodique

d'indice de réfraction effectif, cet agencement permettant de réaliser la fonction diffractive. Comme montré figure 15 du brevet FR 3 002 697, la structure du composant diffractif C1 peut être fabriquée sur une face du composant, la structure de la lentille L étant réalisée sur son autre face. Le pointage du faisceau émis par la source S est assuré par des rotations indépendantes (symbolisées par les flèches) du double composant lentille-réseau diffractif L+C1 et du composant diffractif C2 autour d'un axe Ω comme illustré figure 1 ; les composants L+C1 et C2 sont disposés dans un plan normal à l'axe de rotation Ω et l'axe de symétrie du faisceau émis par la source S et qui passe par son centre coïncide avec cet axe Ω . L'avantage d'un tel système de déflexion est d'être compact, avec une source d'alimentation S fixe et des capacités mécaniques d'orientation tout en assurant une haute efficacité. Par exemple pour une application à 30 GHz (bande Ka), en utilisant un matériau diélectrique d'indice de réfraction de 1.5 (constante diélectrique 2.25), l'épaisseur du composant diffractif est d'environ 30 mm. L'épaisseur totale du système de déflexion est donc d'environ 100 mm. Pour une source située dans le plan focal objet de la lentille L, soit à environ 200 mm de celle-ci, l'épaisseur totale de l'antenne agile est environ 300 mm. Mais cette épaisseur peut néanmoins être encore trop importante pour certaines applications embarquées sur plateformes mobiles.

En outre certaines zones situées en particulier autour et en direction de l'axe de rotation Ω des composants sont difficiles à pointer de manière dynamique, notamment rapidement. En effet, de la même manière que pour les systèmes de pointage à cardans commandés en azimut et en élévation, dans cette direction, le système de pointage de l'antenne présente une zone singulière (« keyhole » en anglais) qui nécessite l'emploi de vitesses de rotation très élevées (voire infinies) des prismes au passage d'un objet pointé à proximité de l'axe de rotation Ω .

30

En conséquence, il demeure à ce jour un besoin pour un système de déflexion à faisceau orientable donnant simultanément satisfaction à l'ensemble des exigences précitées, notamment en termes de masse et d'encombrement réduits, de débattement, de facilité d'utilisation et d'intégration dans une plateforme, et de coût réduit.

35

Le système de déflexion selon l'invention met en œuvre deux dispositifs de déflexion dont l'un au moins comporte un composant diélectrique diffractif structuré à une échelle plus petite que la longueur d'onde. Combinée à une mécanique simple basée sur des rotations, cette
5 approche permet d'obtenir à moindre coût des débattements angulaires pouvant atteindre 120° avec une (des) source(s) hyperfréquence(s), soit une couverture d'angle solide de 3π sr, c'est-à-dire le triple de ce qui est accessible avec une antenne à balayage électronique, sans point singulier d'asservissement et sans partie micro-onde active mobile.

10

Plus précisément l'invention a pour objet un système de déflexion pilotable d'un faisceau hyperfréquence ayant une longueur d'onde comprise entre 1 mm et 1 m, qui comporte :

- un dispositif de formation configuré pour collimater ledit faisceau en mode émission ou focaliser ledit faisceau en mode réception,
15
- un premier dispositif de déflexion d'un faisceau hyperfréquence incident comprenant un premier composant diélectrique diffractif à microstructures sub-longueur d'onde agencées de manière à former un matériau artificiel présentant une variation périodique d'indice de réfraction effectif, désigné premier composant diffractif, ce premier
20 composant diélectrique diffractif étant associé à un premier mécanisme de rotation autour d'un premier axe pilotable.

Il est principalement caractérisé en ce qu'il comprend en amont du premier dispositif de déflexion en mode émission ou en aval du premier
25 dispositif de déflexion en mode réception :

- un deuxième dispositif de déflexion configuré pour défléchir un faisceau hyperfréquence incident vers le premier dispositif de déflexion en mode émission, ou issu du premier dispositif de déflexion en mode réception, ce deuxième dispositif de déflexion étant associé
30 à un deuxième mécanisme de rotation autour d'un deuxième axe pilotable,

en ce que l'angle formé par le premier et le deuxième axes de rotation est supérieur à 0° et inférieur ou égal à 90° , et en ce que le premier mécanisme de rotation est solidaire du deuxième mécanisme de rotation de
35 manière à ce qu'une rotation du deuxième mécanisme de rotation autour de

son axe pilotable entraîne une rotation du premier mécanisme de rotation autour de ce même axe.

Selon une caractéristique de l'invention, le premier dispositif de
5 déflexion comprend un autre composant diélectrique diffractif à
microstructures sub-longueur d'onde, disposé parallèlement au premier
composant diélectrique diffractif (désigné troisième composant
diélectrique diffractif), ce troisième composant diélectrique diffractif étant
associé à un troisième mécanisme de rotation autour du premier axe
10 pilotable, indépendant du premier mécanisme de rotation mais solidaire du
deuxième mécanisme de rotation.

Le second dispositif de déflexion peut comporter un deuxième
composant diélectrique diffractif à microstructures sub-longueur d'onde
(désigné deuxième composant diélectrique diffractif) et le dispositif de
15 formation du faisceau émis par les moyens d'émission ou reçu par les
moyens de réception peut comporter une lentille. Il comporte éventuellement
un quatrième composant diélectrique diffractif à microstructures sub-longueur
d'onde (désigné quatrième composant diélectrique diffractif) disposé
parallèlement au premier composant diélectrique diffractif.

20 Chaque composant diélectrique diffractif peut être typiquement un
prisme ou un réseau.

La lentille du dispositif de formation du faisceau et le deuxième
composant diélectrique diffractif sont avantageusement combinés pour
former un composant holographique non résonant à deux faces, à
25 microstructures sub-longueur d'onde formées sur une seule face selon un
agencement non périodique déterminé par un calcul d'interférences sur ladite
face entre un faisceau incident et un faisceau de sortie prédéterminé ; le
composant holographique est associé au deuxième mécanisme de rotation.

Les microstructures du composant holographique peuvent être
30 formées sur une surface 3D prédéterminée. Selon une alternative, elles sont
formées dans un volume prédéterminé qui s'appuie sur ladite face du
composant holographique, et implantées selon un agencement
tridimensionnel non périodique.

Selon une autre caractéristique de l'invention, le dispositif de formation du faisceau et le second dispositif de déflexion sont combinés pour former un système de miroirs de type Cassegrain.

- 5 De préférence, le deuxième dispositif de déflexion est configuré pour défléchir le faisceau sur le premier dispositif de déflexion avec une incidence normale.

- 10 Le premier dispositif de déflexion défléchit le faisceau avec un premier angle de déflexion par rapport au premier axe, le deuxième dispositif de déflexion défléchit le faisceau avec un deuxième angle de déflexion par rapport au deuxième axe. Le premier angle de déflexion est avantageusement supérieur ou égal au deuxième angle de déflexion.

- 15 L'invention a aussi pour objet une antenne à faisceau orientable qui comporte des moyens d'émission/réception d'un faisceau hyperfréquence ayant une longueur d'onde comprise entre 1 mm et 1 m et un système de déflexion du faisceau tel que décrit.

- 20 Les moyens d'émission/réception, le dispositif de mise en forme et le second dispositif de déflexion peuvent être combinés pour former un ensemble apte à former un faisceau incident sur le premier dispositif de déflexion en mode émission ou à recevoir un faisceau issu du premier dispositif de déflexion en mode réception ; cet ensemble est associé au deuxième mécanisme de rotation. Cet ensemble est par exemple une
25 antenne réseau.

- D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui suit, faite à titre d'exemple non
30 limitatif et en référence aux dessins annexés dans lesquels :

la figure 1 représente schématiquement une antenne orientable selon l'état de la technique,

- les figures 2 représentent schématiquement vu en coupe une antenne orientable équipée d'un premier exemple de réalisation d'un
35 système de déflexion selon l'invention, à deux prismes et avec une lentille de mise en forme du faisceau émis par la source (fig 2a), à un prisme et avec un

composant holographique combinant le deuxième prisme et la lentille de mise en forme (fig 2b),

la figure 3 représente schématiquement vu en coupe une antenne orientable équipée d'un deuxième exemple de réalisation d'un système de
5 déflexion selon l'invention, à trois prismes,

la figure 4 représente schématiquement vu en coupe une antenne orientable équipée d'un troisième exemple de réalisation d'un système de déflexion selon l'invention, à quatre prismes,

la figure 5a représente schématiquement vu de dessus un premier
10 exemple d'implémentation de microstructures sub-longueur d'onde d'un composant holographique, à sections constantes sur leur hauteur selon un maillage cartésien carré détaillé à une échelle plus grande figure 5b, et vu en perspective (fig 5c),

la figure 6a représente schématiquement vu de dessus un autre
15 exemple d'implémentation de microstructures sub-longueur d'onde d'un composant holographique, selon un maillage à lignes iso-phase et lignes à gradient de phase, détaillé à une échelle plus grande figure 6b,

les figures 7 représentent schématiquement vu en coupe une antenne orientable équipée d'un quatrième exemple de réalisation d'un
20 système de déflexion selon l'invention, dont le second dispositif de déflexion comporte une configuration de type Cassegrain à deux miroirs, avec un miroir primaire concave (fig 7a) et un miroir primaire à réflecteurs (fig 7b),

les figures 8 représentent schématiquement vu en coupe une antenne orientable comportant une antenne réseau à patchs (fig 8a) et un
25 antenne réseau blazée (fig 8b).

D'une figure à l'autre, les mêmes éléments sont repérés par les mêmes références.

Dans la suite de la description, les expressions « avant », « arrière » sont utilisées en référence à l'orientation des figures décrites. De
30 même le sens « amont-aval » est celui du faisceau ; sur les figures le sens du faisceau indiqué par des flèches est celui du mode émission. Dans la mesure où le dispositif peut être positionné selon d'autres orientations, la terminologie directionnelle est indiquée à titre d'illustration et n'est pas limitative.

Dans la mesure où le système de déflexion selon l'invention est destiné à être utilisé en collaboration avec une source apte à émettre (et/ou avec un récepteur apte à recevoir) un faisceau hyperfréquence, une source est montrée sur les figures pour illustrer les déflexions du faisceau. La description est faite en considérant que l'antenne est en mode émission ;
5 mais bien sûr l'invention s'applique au mode réception. On va prendre des prismes diélectriques comme exemple de composants diélectriques diffractifs ; mais on pourrait tout aussi bien considérer des réseaux diélectriques. L'expression « composant diffractif » est bien sûr utilisée avec
10 la même signification que celle indiquée en préambule en référence au brevet FR 3 002 697, c'est-à-dire un composant à microstructures sub-longueur d'onde agencées de manière à former un matériau artificiel présentant une variation périodique d'indice de réfraction effectif pour ainsi réaliser la fonction diffractive.

15 On décrit en relation avec la figure 2a, un exemple de système de déflexion selon l'invention.

Le système de déflexion d'un faisceau hyperfréquence ayant une longueur d'onde comprise entre 1 mm et 1 m destiné à être associé à des
20 moyens d'émission S - réception comporte :

- Un dispositif de mise en forme (ou dispositif de formation) du faisceau incident configuré pour collimater en mode émission (le front d'onde émis par la source qui est quasi sphérique dans le cas d'une source S ponctuelle, est mis sous forme d'une onde plane), ou pour
25 focaliser en mode réception.
- Un premier dispositif de déflexion du faisceau hyperfréquence qui comprend un premier prisme C1 diélectrique à microstructures sub-longueur d'onde. Ce prisme C1 est associé à un premier mécanisme R1 de rotation (indiquée par la flèche) autour d'un premier axe $\Omega 1$
30 normal au plan du prisme C1. Ce premier dispositif de déflexion est ainsi configuré pour défléchir le faisceau incident d'un premier angle $\theta 1$ fixe non nul par rapport à l'axe de rotation $\Omega 1$. La rotation de C1 autour de l'axe $\Omega 1$ assurée par le premier mécanisme de rotation R1 pilotable, permet au faisceau de décrire un cercle autour de $\Omega 1$. Par
35 construction cet angle $\theta 1$ peut être fixé entre 0 et 60°.

- Entre les moyens d'émission-réception et le premier dispositif de déflexion, un deuxième dispositif de déflexion associé à un deuxième mécanisme R2 de rotation autour d'un deuxième axe Ω_2 (indiquée par la flèche) pilotable. Il est configuré pour, en mode émission, défléchir vers le premier dispositif de déflexion d'un angle θ_2 fixe non nul par rapport à l'axe de rotation Ω_2 , le faisceau hyperfréquence incident issu de la source, et pour en mode réception, défléchir vers le dispositif de formation d'un angle θ_2 fixe non nul par rapport à l'axe de rotation Ω_2 , le faisceau hyperfréquence incident issu du premier dispositif de déflexion. L'angle (Ω_1, Ω_2) formé par les premier et deuxième axes de rotation est supérieur à 0° et inférieur ou égal à 90° : $0^\circ < (\Omega_1, \Omega_2) \leq 90^\circ$; dit autrement le prisme C1 du premier dispositif de déflexion est incliné par rapport à Ω_2 .
- Le premier mécanisme de rotation R1 est monté sur le deuxième mécanisme de rotation R2. Ainsi le premier mécanisme de rotation R1 est solidaire du deuxième mécanisme de rotation R2 : la rotation du deuxième dispositif de déflexion autour de l'axe Ω_2 entraîne le premier dispositif de déflexion dans une rotation autour de Ω_2 . Mais la rotation du premier dispositif de déflexion autour de l'axe Ω_1 est indépendante de la rotation autour de l'axe Ω_2 : elle n'entraîne pas la rotation du deuxième dispositif de déflexion.

Afin d'assurer une couverture angulaire complète, il est alors nécessaire que le prisme C1 et le deuxième dispositif de déflexion défléchissent le faisceau avec $\theta_1 \geq \theta_2$. La rotation de C1 autour de l'axe Ω_1 assurée par le premier mécanisme de rotation R1, permet au faisceau de décrire un cercle autour de Ω_1 , ce qui combiné avec une rotation du deuxième dispositif de déflexion autour de l'axe de roulis Ω_2 assurée par le deuxième mécanisme de rotation R2, permet de placer le faisceau dans un cône d'angle solide d'une valeur de $2\pi(1-\cos(2\theta_1))$.

Le second dispositif de déflexion peut lui-même comporter un ou plusieurs prismes diélectriques à microstructures sub-longueurs d'onde, comme montré sur les figures 2a, 2b, 3 et 4.

Selon un premier mode de réalisation décrit en relation avec la figure 2a, le second dispositif de déflexion comporte un seul prisme diélectrique C2 à microstructures sub-longueur d'onde, désigné deuxième prisme, de même que le premier dispositif de déflexion ne comporte qu'un
5 seul prisme C1. Cela permet d'améliorer la compacité de l'antenne.

Ce deuxième prisme permet de pré-défléchir le faisceau en amont du premier dispositif de déflexion en mode émission, d'un angle θ_2 fixe non nul par rapport à l'axe Ω_2 normal au plan du prisme C2. L'angle entre les axes Ω_1 et Ω_2 peut aussi être égal à θ_2 comme montré sur les figures ; dans
10 ce cas le faisceau défléchi par ce deuxième prisme C2 a avantageusement une incidence normale sur le prisme C1 en mode émission. Par construction cet angle θ_2 peut être fixé entre 0 et 60°. Combiné au premier prisme C1, ceci permet d'atteindre une déflexion maximale $\theta_1 + \theta_2$ de 120°. Pour que la couverture angulaire soit complète (c'est-à-dire incluant la direction de Ω_2), il
15 est nécessaire que l'angle θ_1 soit supérieur ou égal à l'angle θ_2 . L'ajout d'une mécanique de rotation roulis autour de l'axe Ω_2 mène à un domaine de pointage d'angle solide 3π sr.

20 Selon un deuxième mode de réalisation décrit en relation avec la figure 3, le second dispositif de déflexion comporte un seul prisme désigné deuxième prisme C2, et le premier dispositif de déflexion comporte en plus du premier prisme C1, un autre prisme désigné troisième prisme C3.

Ce prisme C3 diélectrique à microstructures sub-longueur d'onde, est disposé parallèlement au premier prisme C1 (il est donc normal à l'axe Ω_1) et sur celui-ci ; il est apte à défléchir le faisceau incident d'un angle θ_3 fixe non nul par rapport à l'axe Ω_1 . Par construction cet angle θ_3 peut être fixé entre 0 et 60°. Il est associé à un troisième mécanisme R3 de rotation
25 autour de l'axe Ω_1 (indiquée par la flèche) pilotable, indépendant du premier mécanisme de rotation R1 associé à C1. Comme le premier mécanisme de rotation R1, ce troisième mécanisme de rotation R3 est monté sur le deuxième mécanisme de rotation R2. Ainsi les premier et troisième mécanismes de rotation R1 et R3 sont solidaires du deuxième mécanisme de rotation R2. Ce premier dispositif de déflexion à deux prismes
30 diélectriques structurés C1 et C3 en rotations indépendantes autour de l'axe
35

$\Omega 1$, permet de dépointer dynamiquement le faisceau dans un cône d'angle solide avec un angle de déflexion (par rapport à $\Omega 1$) variable $\theta_{13} = \theta_3 + \theta_1$, pouvant atteindre un angle $\theta_{13\max}$. En fonction de la configuration de C1 et C3, par construction, $\theta_{13\max}$ peut atteindre 60° à 70° en fonction du niveau de performance recherché. Les sens de rotation du premier et du troisième mécanismes de rotation R1, R3 peuvent éventuellement être opposés ; on parle alors de prismes C1 et C3 contra-rotatifs.

La combinaison de ces deux dispositifs de déflexion permet d'atteindre une déflexion maximale $\theta_{13\max} + \theta_2$ de 120°. Pour que la couverture angulaire soit complète, il est nécessaire que l'angle $\theta_{13\max}$ soit supérieur ou égal à l'angle θ_2 . Combiné au mécanisme de rotation roulis autour de l'axe $\Omega 2$, on obtient un domaine de pointage d'angle solide 3π sr.

Les mécanismes de rotation R1, R2 et R3 sont pilotables par exemple manuellement ou de préférence par un moteur commandé par un servomécanisme.

Selon un troisième mode de réalisation décrit en relation avec la figure 4, le second dispositif de déflexion comporte en plus du prisme C2, un deuxième prisme à microstructures sub-longueur d'onde, désigné quatrième prisme C4. Ce quatrième prisme C4 est disposé parallèlement au prisme C1 du premier dispositif de déflexion et juste avant (=en amont) en mode émission comme montré sur la figure, et est donc normal à l'axe $\Omega 1$; par conséquent, il est incliné par rapport au prisme C2 d'un angle formé par les axes $\Omega 1$ et $\Omega 2$. Il est configuré pour défléchir le faisceau incident (issu du prisme C2 et donc déjà défléchi d'un angle θ_2) d'un angle θ_4 fixe non nul. Ce prisme est associé au mécanisme de rotation R2 du second dispositif de déflexion, autour de l'axe $\Omega 2$. Par construction cet angle θ_4 peut être fixé entre 0 et 60°. L'angle de déflexion du second dispositif de déflexion est alors égal à $\theta_2 + \theta_4$ par rapport à l'axe $\Omega 2$. Sur la figure l'angle formé par les axes $\Omega 1$ et $\Omega 2$ est aussi égal à $\theta_2 + \theta_4$: ainsi le faisceau issu de C4 a une incidence normale sur C1.

Pour tous ces modes de réalisation, le dispositif de formation du faisceau issu de la source comporte une lentille au foyer de laquelle sont

placés les moyens d'émission S. Cette lentille permet de mettre en forme le front d'onde quasi sphérique émis par une source S ponctuelle. La lentille L de mise en forme peut être fixe et indépendante du deuxième prisme C2 et de son mécanisme de rotation comme montré sur les figures 2a, 3, 4. Dans
5 ce cas, l'ensemble source S et lentille L de mise en forme est fixe par rapport aux rotations autour de Ω_1 et de Ω_2 et permet une interconnexion aisée avec les circuits microonde d'émission et/ou de réception.

Cette lentille L de mise en forme peut être une lentille diélectrique:

- diffractive massive à profil hyperbolique, ou
- 10 - à microstructures comme décrit dans les brevets FR 2 980 648 ou FR 3 002 697, et peut être diffractive ou réfractive.

Selon une variante qui s'applique aux modes de réalisation précédemment décrits, la lentille L de mise en forme du faisceau émis par
15 les moyens d'émission S (ou vers les moyens de réception) est combinée au deuxième prisme C2 en un composant holographique CH, pour obtenir un seul composant qui assure une double fonction de mise en forme et de déviation du faisceau émis par la source S, comme illustré figure 2b. Dans ce cas, les microstructures sub-longueur d'onde sont implantées sur une
20 seule face du composant CH selon un agencement non périodique déterminé par un calcul d'interférences sur ladite face, entre le faisceau émis par la source incident sur cette face et le faisceau de sortie (de ce composant CH) souhaité, en l'occurrence une onde plane défléchie avec un angle θ_2 . On rappelle que les microstructures sont qualifiées de sub-longueur d'onde lorsque la condition suivante pour les cellules (ou mailles)
25 où elles sont implantées, est remplie :

$$(\text{Distance entre les centres de cellules adjacentes}) < \lambda/n$$

avec λ la longueur d'onde cible choisie dans la plage de longueurs d'onde correspondant aux ondes hyperfréquences, soit une longueur d'onde
30 typiquement comprise entre 1mm et 1m, et n l'indice de réfraction du matériau diélectrique dans lequel les microstructures sont formées.

Dans le cas où ce composant holographique est à face plane (surface 2D) comme montré sur la figure 2b, il s'agit d'un calcul d'interférences sur cette face plane entre le faisceau incident émis par la
35 source et le faisceau de sortie qui, dans le cas d'une antenne à faisceau orientable, est une onde plane avec un angle de sortie (en mode émission)

correspondant à l'angle d'orientation du faisceau. La hauteur et la taille de chaque microstructure MS de CH (que l'on peut voir aussi figure 5c) sont déterminées expérimentalement ou calculées de manière à faire correspondre le retard de phase modulo 2π introduit localement par chaque
5 microstructure, au conjugué de la phase de l'hologramme en ce même point.

L'implémentation sub-longueur d'onde des microstructures MS est réalisée à partir d'un maillage géométrique M généralement à base cartésienne, c'est-à-dire à base rectangulaire voire carrée, comme montré figures 5a, 5b et 5c. Un maillage hexagonal, voire circulaire peut aussi être
10 envisagé. Au sein de ce maillage, la base d'une microstructure ne peut bien sûr dépasser une maille (ou cellule) du maillage, mais peut ne l'occuper que partiellement. Certaines mailles peuvent être vides, d'autres entièrement occupées par la base de la microstructure et pour d'autres enfin, la base de la microstructure n'occupe que partiellement la maille correspondante, selon
15 l'implémentation déterminée.

Cette implémentation simple à réaliser provoque cependant une erreur de phase due à la résolution de l'échantillonnage et donc à une réduction de l'efficacité d'ouverture de l'antenne. Pour résoudre ce problème on choisit une base de maillage dans un système de coordonnées adapté
20 pour ajuster la phase au mieux. On réalise une structure géométrique sub-longueur d'onde à partir d'un maillage M qui coïncide avec des lignes iso-phases dans une direction et avec des lignes à gradient de phase dans des directions respectivement perpendiculaires aux lignes iso-phases comme illustré figure 6a et 6b.

Afin d'améliorer l'efficacité d'orientation pour des angles à faible élévation (angle θ élevé), les microstructures du composant holographique peuvent être formées sur une surface non plane c'est-à-dire sur une surface 3D prédéterminée, telle qu'une surface à symétrie de révolution comme un cône, une sphère ou n'importe quelle surface 3D arbitraire.
25

Les microstructures sont toutes formées dans un matériau diélectrique selon des formes déterminées a priori, soit en saillie sous forme de piliers, soit en creux sous forme de trous. Une combinaison de trous et de piliers est également possible. Les microstructures sont de forme quelconque, préférentiellement avec des axes de symétrie. Elles ont une section carrée,
30 hexagonale ou circulaire, ou une combinaison de différentes géométries, ou
35

une section conforme à des lignes iso-phases et des lignes à gradient de phase. Elles peuvent être de section constante sur leur hauteur ou variable comme dans le cas d'une structure pyramidale, conique, etc. La hauteur des microstructures MS est généralement identique (comme illustré figure 5c),
5 mais pas nécessairement. Elles peuvent être perpendiculaires à la surface du composant ou inclinées, par exemple à 30°. On peut également avoir une inclinaison variable sur un même composant. L'inclinaison est déterminée expérimentalement, typiquement en fonction de la direction d'inflexion ou d'incidence du faisceau.

10

Selon une généralisation du mode de réalisation précédent, et toujours pour réaliser la fonction de collimation ou de focalisation (selon le mode émission ou réception) et de déflexion du faisceau, le composant holographique CH, comporte des superpositions de couches de
15 microstructures MS sub-longueur d'onde, formées dans le volume de celui-ci, et implantées selon un agencement tridimensionnel non périodique déterminé par un calcul d'interférences sur ledit volume, entre le faisceau émis par la source incident dans ce volume et le faisceau de sortie souhaité. Ce volume s'appuie bien sûr sur la face du composant CH sur laquelle sont
20 formées les microstructures ; ce volume est délimité notamment par cette face. Le calcul de l'interférence volumique peut être réalisé expérimentalement par ajustements successifs ou par calcul par exemple en transformant le volume de CH en un empilement de K surfaces 2D ou 3D parallèles entre elles (avec K un entier typiquement compris entre 2 et 100)
25 sur chacune desquelles une figure d'interférences surfacique est calculée. L'empilement de couches de microstructures est obtenu par exemple en faisant correspondre pour chaque point de calcul du volume, une microstructure de hauteur réduite d'un facteur K et dont la section permet de générer un retard de phase local correspondant au conjugué de la phase de
30 l'hologramme en ce même point réduite d'un facteur K.

Un autre mode pour obtenir la distribution de microstructures 3D consiste à partir du calcul d'interférences obtenu sur la face du composant CH entre le faisceau incident émis par la source et le faisceau de sortie, à projeter la section de chacune des microstructures dans le volume du
35 composant en suivant les courbes résultant de l'intersection entre les plans

isophase de l'hologramme volumique et les plans contenant les gradients de phase.

Dit autrement, ce calcul d'interférences sur ledit volume peut-être effectué :

- 5 - de manière discrète pour différentes valeurs de z (dimension de l'empilement) ; il s'agit en quelque sorte d'une réitération pour plusieurs surfaces d'implémentation considérées à différentes valeurs de z , du calcul d'interférences 2D précédemment décrit pour une seule surface d'implémentation. La hauteur et la section des microstructures est alors à déterminer sur chacune de ces surfaces comme indiqué précédemment, ou
- 10 - de manière continue sur z , la hauteur et la section des microstructures étant alors déterminée par le calcul lui-même.

15 Ce composant CH est hébergé par le deuxième dispositif de déflexion et est donc soumis à rotation autour de l'axe Ω_2 par le deuxième mécanisme de rotation. Ce composant holographique CH permet un gain de poids et d'efficacité.

Un exemple de configuration avec un composant holographique CH est montré figure 2b : un seul prisme C1 défléchissant le faisceau d'un angle θ_1 fixe par rapport à son axe de rotation Ω_1 , est utilisé dans l'ouverture de l'antenne. Comme déjà indiqué, afin d'assurer une couverture angulaire complète, il est alors nécessaire que le prisme C1 et le composant holographique CH défléchissent le faisceau avec $\theta_1 \geq \theta_2$. La rotation de C1

20 autour de l'axe Ω_1 assurée par le premier mécanisme de rotation, permet au faisceau de décrire un cercle autour de Ω_1 , ce qui combiné avec une rotation de l'ensemble C1 et CH autour de l'axe de roulis Ω_2 assurée par le deuxième mécanisme de rotation, permet de placer le faisceau dans un cône d'angle solide d'une valeur de $2\pi(1-\cos(2\theta_1))$.

30

Il est également possible d'ajouter aux configurations précédentes, une mécanique de translation des moyens d'émission S/réception suivant l'axe vertical (parallèlement à l'axe Ω_2) pour maîtriser l'ouverture du faisceau émis et reçu.

Pour seconder les deux dispositifs de déflexion, et/ou pour compenser la variation de déflexion de C2 lorsque la fréquence de l'onde émise par la source S est modifiée, il est également possible d'ajouter aux configurations précédentes une mécanique de translation des moyens
5 d'émission S/réception dans le plan normal à l'axe $\Omega 2$. Ceci est particulièrement utile pour générer de petits angles de déflexion et cela évite d'effectuer un tour complet de roulis (= un tour complet du deuxième mécanisme de rotation) notamment autour de points singuliers tels que ceux dans la direction de $\Omega 2$ par exemple. Cela permet ainsi une maîtrise aisée et
10 totale du faisceau (position et ouverture).

Dans les exemples précédents, le second dispositif de déflexion comportait un ou plusieurs prismes, mais il peut ne pas comporter de prisme. Cette alternative aux modes de réalisation précédemment décrits, qui permet
15 de gagner de la place est basée sur une combinaison du dispositif de mise en forme du faisceau émis par la source et du second dispositif de déflexion, en utilisant des configurations de type antennes à réflecteurs ; cette combinaison reste associée au deuxième mécanisme de rotation R2 autour de l'axe $\Omega 2$. Le faisceau émis par la source est par exemple défléchi et
20 distribué sur le premier dispositif de déflexion par :

- une configuration de type Cassegrain hors d'axe avec un miroir primaire parabolique M1 et un miroir secondaire concave M2, comme on peut le voir figure 7a,
- une configuration de type Cassegrain dans laquelle le miroir M1
25 est un miroir à réseau de réflecteurs (« reflectarray mirror » en anglais), comme on peut le voir figure 7b.

Pour ces deux variantes à réflecteurs, le miroir secondaire concave M2 peut être remplacé par tout autre type de réflecteur afin de réaliser des configurations du type Grégorienne, ADE (acronyme de
30 l'expression anglo-saxonne « Axially Displaced Ellipse ») ou Dielguide (configuration également connue sous le nom anglosaxon de Splashplate).

L'invention a aussi pour objet une antenne orientable comprenant un système de déflexion tel que décrit, et des moyens d'émission S/réception hyperfréquence ponctuels disposés au foyer du
35 dispositif de mise en forme comme montré sur les figures déjà décrites.

Dans toutes les configurations décrites, la source S peut être monopulse, connectée ou non à un 'T magique' permettant l'extraction directe de signaux monopulse (somme et différences selon les deux axes du cornet). Ces signaux permettent de connaître l'écart d'angle entre la cible et
5 l'angle de pointage du faisceau somme, lequel est connu par l'ajout de codeurs sur les trois axes de rotation du dispositif. Cela permet donc de mesurer l'écartométrie d'une cible dans le lobe principal de rayonnement du diagramme de rayonnement de la source.

10 On peut aussi réaliser des variantes à tous ces modes de réalisation d'antenne orientable en combinant une source non ponctuelle (ou plus généralement des moyens d'émission-réception non ponctuels), son dispositif de mise en forme, et le second dispositif de déflexion pour former un ensemble configuré pour émettre une onde plane sur le premier dispositif
15 de déflexion en mode émission ou recevoir une onde plane issue du premier dispositif de déflexion en mode réception. Cet ensemble est par exemple lui-même une antenne réseau A (à plaques (« patches antenna » en anglais) comme montré figure 8a, à fente, à Vivaldi, ...), sans déphaseurs ou à déphaseurs fixes. En effet, cette antenne réseau n'a pas à être munie de
20 déphaseurs puisque le dépointage d'angle $\theta_2 + \theta_{13}$ est réalisé par le système de déflexion. En revanche, elle peut comporter plusieurs voies afin de réaliser des traitements radars avancés. L'antenne réseau peut être placée perpendiculairement par rapport à l'axe Ω_2 comme montré sur les figures 8a et 8b, mais ce n'est pas nécessaire. Elle peut également être placée
25 directement contre le prisme C1. Quelle que soit sa configuration, cette antenne réseau A est associée au deuxième mécanisme de rotation R2 autour de l'axe Ω_2 .

Il est possible de blazer l'antenne réseau A comme montré figure 8b. L'angle de blaze θ_2 permet de ne pas perdre le rendement des plaques
30 (« patches » en anglais) dans la direction de pointage fixe de l'antenne.

Cet ensemble configuré pour émettre une onde plane défléchiée vers le premier dispositif de déflexion en mode émission (ou pour recevoir une onde plane défléchiée par le premier dispositif de déflexion en mode réception), peut aussi être une antenne à réflecteur, un cornet grand gain, ou
35 autre.

Ces alternatives décrites en relation avec les figures 7a, 7b, 8a, 8b, s'appliquent également avec un premier dispositif de déflexion ne comportant qu'un seul prisme C1.

5

Pour ces modes de réalisation, chaque prisme (C1 et éventuellement C3) du premier dispositif de déflexion est associé à un mécanisme de rotation autour de Ω_1 (R1 et éventuellement R3), alors qu'un seul mécanisme de rotation autour de Ω_2 (R2) est associé au deuxième
10 dispositif de déflexion qui comporte un ou plusieurs prismes (C2 ou CH et éventuellement C4), ou une configuration de type Cassegrain, ou une antenne réseau. Et on a : $0^\circ < (\Omega_1, \Omega_2) \leq 90^\circ$.

Un carénage est avantageusement utilisé pour englober la
15 source et éventuellement le dispositif de mise en forme voire aussi le premier dispositif de déflexion. Ce carénage est soit recouvert à l'extérieur, soit tapissé à l'intérieur d'absorbant permettant d'absorber les ondes émises par la source S mais non interceptées par la lentille L, ainsi que les réflexions parasites dans le dispositif. Ceci contribue à améliorer le diagramme de rayonnement de l'antenne et à réduire sa surface équivalente radar. Cet
20 absorbant peut être constitué de matériau diélectrique et/ou magnétique (ou de composite), structuré à une échelle sub-longueur d'onde afin de réduire le niveau des réflexions aux interfaces air/absorbant.

Cette structuration peut se faire de deux manières :

- 25
- Soit à l'aide d'une couche comportant des microstructures sub-longueur d'onde pour que la structure soit localement adaptée en hauteur et en épaisseur pour présenter l'indice effectif équivalent (tel que présenté dans le brevet FR 2 980 648) qui permet de réaliser une couche antireflet adaptée localement à l'incidence et à
30 la fréquence de l'onde incidente.
 - Soit en utilisant une structuration tridimensionnelle de type pyramidal par exemple, (cf. article de W. H. Southwell "Pyramid-array surface-relief structures producing antireflection index matching on optical surfaces", J. Opt. Soc. A., Vol 8, No 3, March
35 1991) à l'interface en orientant, par exemple, les microstructures sub-longueur d'onde en fonction de l'incidence du faisceau. Cette

orientation n'est pas indispensable, on peut conserver une orientation normale à la surface du carénage.

En fonction de la longueur d'onde de fonctionnement du dispositif, la taille des microstructures est donc différente. La réalisation de ces surfaces structurées peut se faire par usinage, par fabrication additive, ou par gravure chimique.

Les avantages de l'invention sont les suivants :

❖ La mécanique à mettre en place pour ce genre de système de déflexion est plus fiable que les biellettes (moteurs annulaires). La masse tournante est faible car l'utilisation de matériaux diélectriques plastiques permet l'utilisation de techniques de fabrication additive, et assure un poids raisonnable pour une mécanique rapide et légère. Le dimensionnement des actionneurs et la commande d'asservissement des mécanismes de rotation ne dépendent pas de la répartition de masse dans la partie émetteur, ce qui facilite la modularité.

❖ Le domaine angulaire accessible par le système en émission/réception est de 3π sr (déflexion max 120°) contre moins de π sr (déflexion max 60°) pour les autres systèmes.

❖ L'utilisation de prismes diélectriques assure la largeur de bande et rend ce système accessible aux plus hautes fréquences.

❖ L'utilisation d'un émetteur central permet de réduire les coûts par l'utilisation d'un émetteur à puissance centralisée (ex : tube à onde progressive – TOP) pour les hautes fréquences ; il n'y a pas besoin d'avoir recours à des joints tournants pour passer le signal hyperfréquence.

❖ La maîtrise du positionnement de la source par rapport à la lentille suivant l'axe perpendiculaire permet de contrôler l'ouverture du faisceau.