

Réflecteur de Fresnel bi-bande pour communication drone-satellite

Oulève Ba ¹, Jérôme Lanteri ¹, Claire Migliaccio ¹, W. Menzel ².

¹ LEAT - UNS - CNRS UMR 7248, 06903 Sophia Antipolis.

²Institute of Microwave Techniques, Ulm University, Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm, Germany
Jerome.lanteri@unice.fr: correspondant principal

Résumé

Nous décrivons ici la conception d'un réseau réflecteur bi-bande (20-30 GHz) entièrement passif. Le changement de bande de fréquence sera effectué par commutation au niveau de la source primaire. La conception repose sur l'utilisation de cellules à résonances multiples que sont les cellules en anneaux ou disques imbriqués. Afin d'assurer le meilleur compromis entre la simplicité de conception et les performances en rayonnement, la correction de phase est effectuée en zones de Fresnel. Des mesures de gain et de diagramme de rayonnement valident le concept.

1. Introduction

Un nouveau service de télécommunications entre satellites et objets communicants est à l'étude. Ce dernier utilise de manière simultanée les fréquences de 20 GHz (liaison descendante bande K) et 30 GHz (liaison montante bande Ka) [1-2]. Une des applications envisagées est la communication avec des drones civils de surveillance (incendies, zones côtières..) qui remplaceraient les avions ou hélicoptères en environnement sévère. L'antenne de ce système de surveillance doit satisfaire à trois critères : légèreté, directivité et fréquence élevée. Les antennes quasi-optiques sont parfaitement adaptées aux deux derniers critères et si l'on utilise une antenne de type imprimé, le critère de légèreté est également rempli. C'est pourquoi notre choix s'est porté sur un réflecteur imprimé. Bien que des solutions actives aient récemment été proposées [3-4], nous cherchons une solution monocouche et entièrement passive, dans un souci de simplicité de réalisation, important pour le coût final de l'antenne. Pour ce faire, nous étudions des cellules élémentaires multi-résonantes [5-6]. Enfin, nous choisissons un réseau réflecteur [7] avec une correction de phase en zones de Fresnel afin d'allier simplicité de conception et performances. Nous décrivons dans un premier temps le schéma de fonctionnement de la cellule élémentaire, puis les impératifs de conception du réflecteur de Fresnel et enfin, nous présentons les simulations et les premières mesures en gain sur un réflecteur de taille réduite par rapport à l'application finale.

2. Cellule élémentaire

En préambule à la description de la cellule élémentaire, nous souhaitons rappeler la nomenclature utilisée dans cet article. Nous appelons cellule élémentaire la maille du réseau réflecteur. Celle maille contient un ou plusieurs éléments imprimés sur un substrat métallisé en face arrière que nous désignons par le terme de patch. Le réflecteur de Fresnel dont nous détaillons la conception est décomposé en cellules élémentaires de forme carrée, uniformes sur toute la surface de l'antenne et de dimension $\lambda/2$ de côté. En fonction du déphasage à compenser sur les deux fréquences de travail, chaque cellule élémentaire peut être constituée d'un unique patch comme le disque ou l'anneau, ou d'une combinaison de patches de type anneau+disque ou double anneau.

Les patches en anneau sont connus pour leurs résonances multiples. Un raisonnement simple nous conduit à imaginer de régler la fréquence basse par la dimension extérieure de l'anneau et celle haute par sa dimension intérieure. En tenant compte de nos contraintes de fabrication des antennes imprimées (pas de dimension inférieure à 100 μm), nous avons du complexifier la cellule en ajoutant soit un disque soit un anneau à l'intérieur de l'anneau initial. De la sorte, nous sommes en mesure de régler la phase réfléchi par le patch à 20 et à 30 GHz afin d'obtenir les lois de phase désirées. La figure 1 est une illustration du comportement en fréquences de ces cellules. La cellule est conçue sur substrat Duroïd de permittivité 2.2 et d'épaisseur 768 μm et possède une taille de $\lambda/2$ à 20 GHz.

L'évolution des courbes de résonance des motifs élémentaires de la figure 1 montre d'une part que le disque n'est résonant qu'en basse fréquence, d'autre part que les résonances de l'anneau sont trop éloignées. On montre qu'en ajoutant un élément supplémentaire plus petit, on rapproche la résonance haute. Dans cet exemple, la résonance à 30 GHz est obtenue en ajoutant le disque. Cependant pour couvrir les multiples déphasages du réflecteur de Fresnel, cette seule combinaison de patches est insuffisante, c'est pourquoi nous ajoutons un anneau et obtenons patch à double anneau.

Afin de mieux illustrer le comportement de ces patchs en fréquence, nous représentons la distribution de courant de la cellule anneau+disque sur la figure 2 pour ses résonances à 20 et 30 GHz. Le champ électrique incident est vertical. Sur cet exemple, nous voyons que les courants sur le disque à 30 GHz sont parallèles au champ électrique incident. Cette distribution indique que l'anneau n'a pratiquement aucune influence à cette fréquence. En revanche à 20 GHz, les courants sont quasi-exclusivement concentrés sur l'anneau avec une distribution symétrique par rapport à deux nuls. Si l'anneau était seul, ces nuls se situeraient le long du champ électrique incident ce qui n'est pas le cas ici. A cette fréquence l'anneau et le disque interagissent.

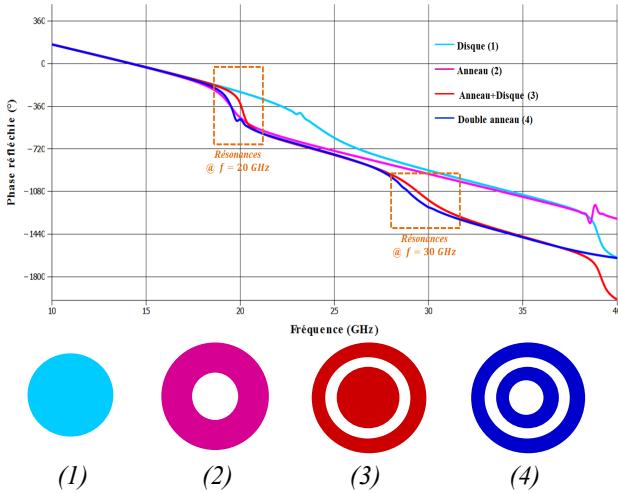


Figure 1. Cellule élémentaire multi-résonante

(1) Disque ; (2) Anneau ; (3) Anneau + Disque ;
(4) Double Anneau

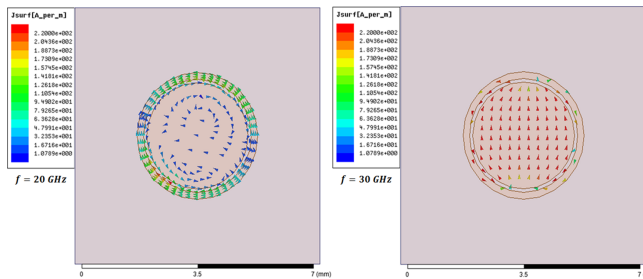


Figure 2. Lignes de courant du patch Anneau+Disque en fréquence (20 et 30 GHz)

3. Réflecteur de Fresnel

Nous rappelons ci-dessous les principales équations qui régissent la correction de phase en zones de Fresnel.

$$r_n = \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot f \cdot \lambda}{P}} + \left(n \cdot \frac{\lambda}{P}\right)^2 \quad (1)$$

Où : r_n est le rayon extérieur de la $n^{\text{ième}}$ zone,
 $n = 1, 2, 3, \dots$,
 f : Distance focale,
 P : Nombre de zones de Fresnel.

$$\varphi_n = \frac{(n-1) \cdot 2\pi}{P} \mod 2\pi \quad (2)$$

Où : φ_n est le déphasage au niveau de la $n^{\text{ième}}$ cellule,
 $n = 1, 2, 3, \dots$,
 P : Nombre de zones de Fresnel.

Plus P est grand, plus la correction de phase se rapproche de celle d'un réseau réflecteur classique tel que décrit dans [1] avec un optimum pour $P=8$ issue su compromis entre simplicité de conception et performances en rayonnement [6].

Cependant, comme nous travaillons à $f/D=0,5$, l'espace entre deux rayons consécutifs devient rapidement trop petit pour y loger les cellules nécessaires à une correction en $P=8$. Nous devons donc nous restreindre à $P=4$ (correction quart d'onde).

D'autre part, nous souhaitons avant tout valider notre concept. En pratique, cela signifie que nous devons être capables de simuler le réflecteur entièrement de manière rigoureuse. Nous avons choisi le logiciel de simulation électromagnétique Ansys-HFSS [8]. Les besoins en ressources informatiques devenant rapidement importantes, il nous est difficile de simuler un très grand réseau réflecteur. Nous sommes actuellement en mesure de simuler un réseau de 21×21 cellules avec ce logiciel.

Un réflecteur de Fresnel quart d'onde de 21×21 cellules, à source primaire centrée et dont le rapport entre la distance focale et le diamètre vaut $\frac{1}{2}$, est conçu. Conformément à la loi de distribution des zones de Fresnel, le cycle de 360° est répété plus souvent à 30 qu'à 20 GHz pour une même taille de réseau. Deux conséquences : un nombre de zones plus grand à 30 GHz et, pour une position de cellule donnée, les phases à compenser à 20 et 30 GHz peuvent être différentes. En théorie un réflecteur de Fresnel quatre zones fonctionne avec 4 patchs différents mais ici nous aurons seize combinaisons possibles. Certaines d'entre elles sont représentées sur la figure 1. Les dimensions des patchs sont donc choisies de façon à avoir le meilleur compromis entre les phases souhaitées à 20 et 30 GHz.

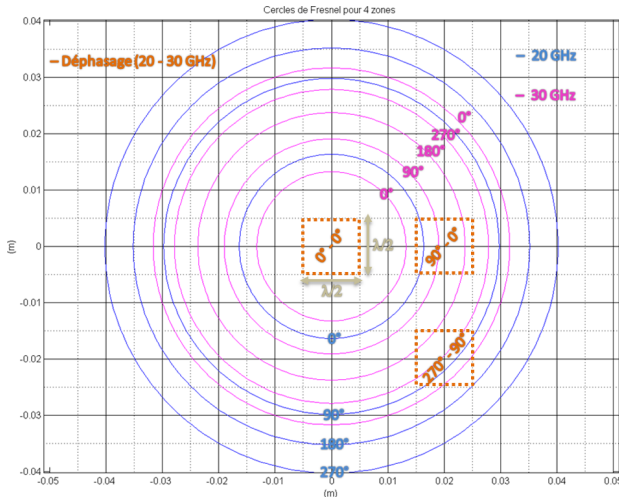
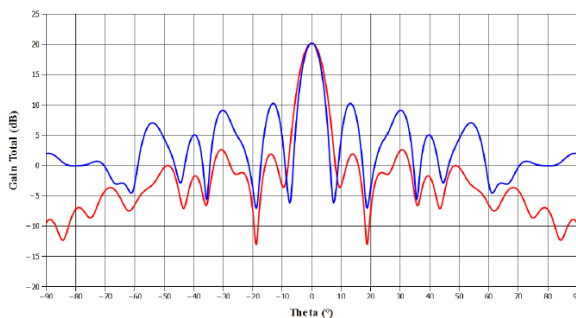


Figure 3. Zones de Fresnel bi-bande

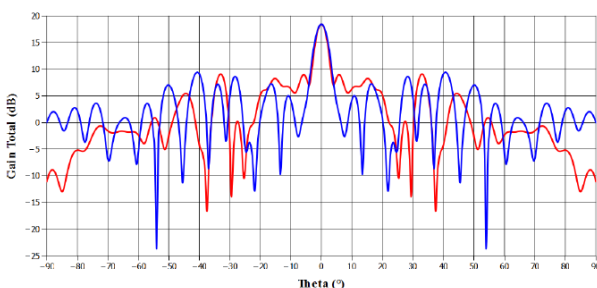
Dans sa configuration finale, le réflecteur possède des cellules de type anneau + disque et double anneau uniquement, respectivement au nombre de 358 et 83. Une étude des erreurs de phase par zone et par fréquence est conduite. Citons en exemple la zone où les erreurs de phases sont les plus élevées : zone (0-180°) qui possède 44 patchs avec une erreur de phase de 18° pour les patchs à 20 GHz et 38° pour ceux à 30 GHz. Dans les autres zones, les erreurs n'excèdent pas 25° soit environ un quart de la correction de phase, ainsi cette erreur devrait légèrement diminuer l'efficacité du réflecteur sans pour autant nuire à son bon fonctionnement.

4. Simulations

Le réflecteur de Fresnel précédent est simulé avec Ansys-HFSS (fig.3). La source primaire est un guide ouvert standard WR-42 à 20 GHz et WR-28 à 30 GHz. Les gains sont de 20 et 18,5 dBi à 20 et 30 GHz respectivement.



(a) Plans E et H à 20 GHz

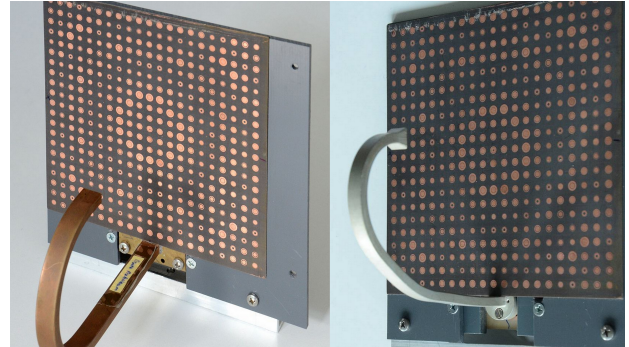


(b) Plans E et H à 30 GHz

Figure 4. Simulations 21 × 21 cellules

5. Mesures

Enfin, le réflecteur a été fabriqué. Les mesures ont été effectuées à l'Université d'Ulm. De nouvelles sources primaires ont été utilisées comme indiqué sur la figure 5. En particulier la source primaire de la bande Ka est un petit cornet.



(a) Bande K

(b) Bande Ka

Figure 5. Banc de mesures réflecteur de Fresnel

Les mesures de gain sont présentées en figure 6 et confirment le fonctionnement bi-bande du réflecteur. Les gains mesurés sont en très bon accord avec les simulations puisque nous avons 20,5 dBi à 20 GHz et 18,5 à 30 GHz. La valeur du gain mesuré à 20 GHz diffère de 0,5 dB de celle simulée mais cette différence reste dans la marge d'erreur des simulations et des mesures. La figure 7 montre les plans E à 20 et 30 GHz du réseau réflecteur ainsi que la comparaison avec les simulations.

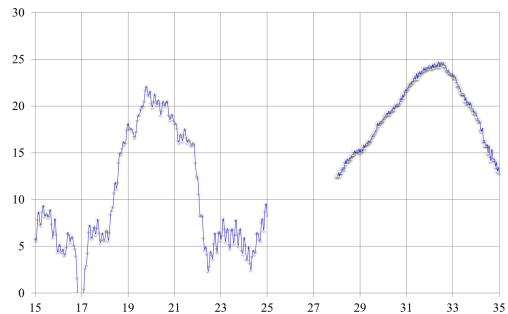
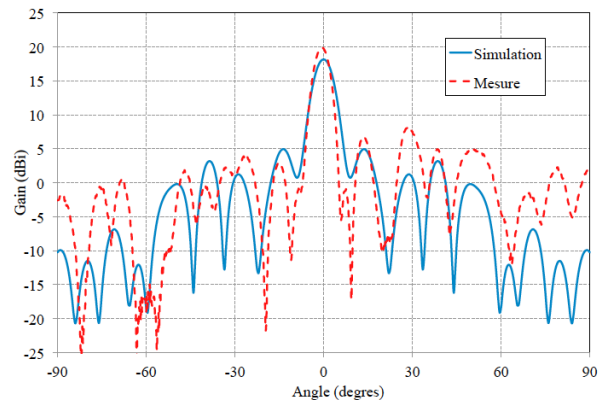
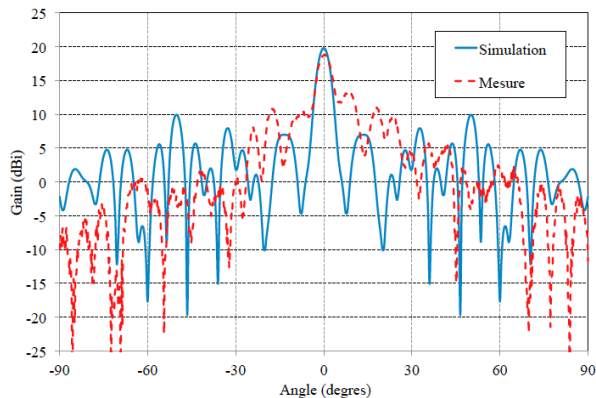


Figure 6. Mesures de gain



(a) Plans E à 20 GHz



(b) Plans E à 30 GHz

Figure 7. Simulations et mesures 21 × 21 cellules

La différence entre les mesures et les simulations à 30 GHz sont dues d'une part, à l'utilisation de sources primaires légèrement différentes en mesures et simulations. D'autre part, étant donnée le nombre important d'éléments à simuler (21×21 patches) sur deux fréquences, de leurs tailles et formes variant selon leur position sur l'antenne, ainsi que de la valeur de la distance focale (5.25λ), la simulation de ce réflecteur demande des ressources informatiques et un temps de simulation extrêmement important. Afin de réduire ce temps et les besoins informatiques, il est possible d'utiliser les symétries de notre structure et ainsi de ne simuler qu'un quart du réflecteur (plans de symétrie XoZ et YoZ). L'inconvénient de cette méthode est que nous ne pouvons pas obtenir la polarisation croisée.

Enfin, la courbe de gain mesuré indique clairement que la fréquence haute optimale d'utilisation est de 32 GHz avec un gain correspondant de 25 dBi. Ce résultat s'explique si l'on se rappelle que les patches ont été choisis en raison du meilleur compromis entre les phases réfléchies par les cellules à 20 et 30 GHz, ce qui implique des erreurs par rapport à valeur exacte dans les zones de Fresnel correspondantes (paragraphe 3). En particulier les erreurs sont de 38° pour 10% des patches à 30 GHz. Le compromis pénalise donc davantage la fréquence haute d'utilisation et il n'est pas surprenant que 30 GHz ne soit pas la fréquence optimale. La figure 8 montre les diagrammes mesurés à 32 GHz.

6. Conclusion

Un réflecteur de Fresnel original, entièrement passif, a été conçu et réalisé pour une application de communication bi-bande par satellite. Le caractère bi-bande est obtenu grâce au réglage des dimensions de cellules multi-résonantes de type double anneaux ou anneau + disque. Ces cellules ont l'avantage d'être monocouche, donc faciles à fabriquer. Les mesures de gain attestent du bon fonctionnement du réflecteur à 20 et 30 GHz avec des différences mineures par rapport à la simulation. La nécessité d'avoir un compromis entre les valeurs de phases réfléchies par les cellules à 20 et 30 GHz, conduit à un décalage de la fréquence où le gain est maximal en bande haute. Une des pistes à explorer est

l'ajout de petits décrochages dans les cellules [9] afin de diminuer ce décalage.

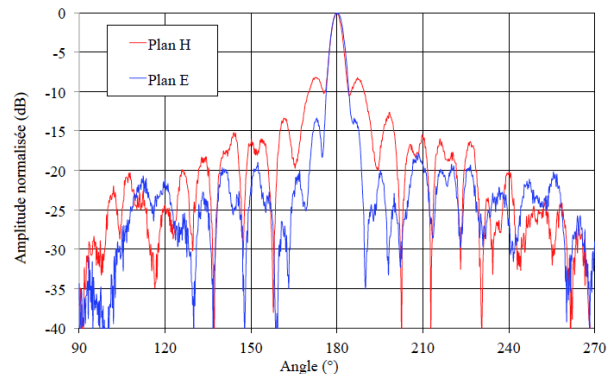


Figure 8. Diagrammes de rayonnement du réseau réflecteur de Fresnel 21 × 21 cellules à 32 GHz

7. Bibliographie

- [1] J.M. Baracco, P. P. Ratajczak, P. Barachat, and G. Toso, "Dual Frequency Ka-Band Fresnel Reflectors", Proceedings of AP-S/URSI 2011, pp. 2187-2190, July 2011.
- [2] A. Kohmura, J. Lanteri, F. Ferrero, C. Migliaccio, S. Futatsumori, N. Yonemoto, "Ka-band Beam Switchable Fresnel Reflector", ISAP 2012, Nagoya-Japan.
- [3] S.V. Hum, M. Okoniewski and R.J. Davies, "Realizing an Electronically Tunable Reflectarray Using Varactor Diode-Tuned Elements", IEEE Vol. 15, Issue 6, pp. 422 – 424, June 2005.
- [4] C. Guclu, J. Perruisseau-Carrier and O. Aydin Civi. In, "Proof of Concept of a Dual-band Circularly-polarized RF MEMS Beam-Switching Reflectarray".
- [5] N.Misran, R.Cahill, and V.F.Fusco, "Design optimisation of ring elements for broadband reflectarray antenna", Proc.Inst.Elect.Eng.-Microw.AntennasPropag.,vol.150,no.6,pp.440–444, Dec.2003.
- [6] B. D. Nguyen, C. Migliaccio, Ch. Pichot, N. Yonemoto, K. Yamamoto : "W-band Fresnel Zone Plate Reflector for Helicopter Collision Avoidance Radar", IEEE Trans. Antennas Propagat. Vol. 55, n°5, pp. 1452-1456, May 2007.
- [7] D. M. Pozar, S. D. Targonski, and H. D. Syrigos, "Design of millimeter wave microstrip reflectarrays", IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 45, pp. 287–296, Feb. 1997.
- [8] Ansys-HFSS.
<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/High-Performance+Electronic+Design/ANSYS+HFSS>
- [9] P. Grüner, W. Menzel, "Single-Layer Dual-Frequency Reflectarray", IWAT-2013, Karlsruhe, Germany, 4-6 March 2013, pp. 318-321.