

Antenne en cosécante carrée pour la détection de débris sur pistes d'aéroport

Truc Phong NGUYEN¹, Claire MIGLIACCIO¹, Christian PICHOT¹, Wolfgang MENZEL², Peter FEIL³

¹LEAT, Université Nice Sophia Antipolis, CNRS UMR 7248, Campus Sophi@ Tech - bâtiment Forum, 930 route des Colles, 06903 Sophia Antipolis Cedex, France

²Institute of Microwave Techniques, Ulm University, Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm, Germany

³CASSIDIAN, Wörthstr. 85, 89077 Ulm, Germany

claire.migliaccio@unice.fr: correspondant principal

Résumé

Une antenne destinée à l'application de détection de débris sur pistes d'aéroport pour un radar fonctionnant dans la bande de fréquences 77 GHz $\pm$ 2,5GHz, est conçue et réalisée. C'est un système antennaire complexe reposant sur l'utilisation d'un réseau réflecteur à diagramme d'élévation en cosécante carrée et directif en azimuth. Le diagramme de rayonnement a été mesuré en champ lointain en extérieur avec une distance de 60 m entre les antennes d'émission et de réception. Nous avons également effectué des mesures en champ proche à l'aide d'un scanner plan pour comparer les résultats. L'antenne a été ensuite associée à une tête radar. Les premières mesures de petits objets effectuées dans un bâtiment montrent de bons résultats.

1. Antenne en cosécante carrée

Le sujet porte sur la conception et la réalisation d'une antenne insérée sur un radar de détection de débris sur pistes d'aéroport fonctionnant à la fréquence de 77 GHz $\pm$ 2,5 GHz [1]. Le schéma général de l'antenne est représenté en figure 1.

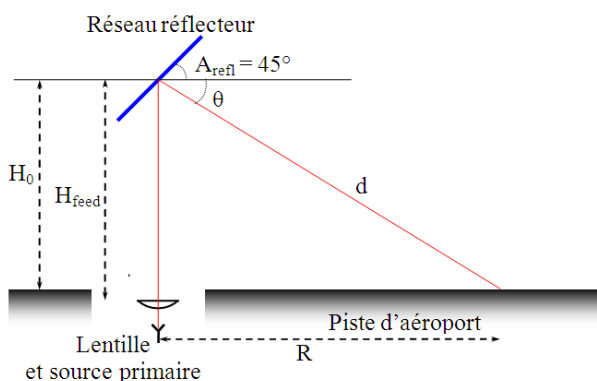


Figure 1. Configuration de l'antenne.

$H_0 = 0,6\text{m}$; $H_{\text{feed}} = 0,8\text{m}$; $R_{\text{min}} = 1\text{m}$; $R_{\text{max}} = 100\text{m}$

Le système antennaire complexe est composé :

- d'un réseau réflecteur (RR) imprimé [2] à diagramme formé,

- d'une lentille diélectrique qui sert de source primaire au RR,

- d'un corno *prolate* qui est la source primaire de la lentille diélectrique.

Dans le plan d'élévation, afin d'améliorer la détection, nous maintenons la puissance reçue constante pour une cible située dans une gamme de distance prédéfinie sur la piste. Pour satisfaire à cette condition, le diagramme de rayonnement doit avoir la forme d'une cosécante carrée [2,3]. Un diagramme de rayonnement directif en azimuth est nécessaire et sera commandé dans le futur par un balayage mécanique.

Pour un radar monostatique, la même antenne est utilisée en émission et en réception. La puissance reçue P_r est liée à la distance d comme suit :

$$P_r \sim \frac{G^2(\theta)}{d^4} \quad (1)$$

Pour maintenir un niveau de détection constant en fonction la distance entre l'antenne et une cible sur la piste, le gain de celle-ci peut être déterminé par :

$$P_r = \text{const.} \rightarrow G(\theta) \sim d^2 = \frac{H_0^2}{\sin^2(\theta)} = H_0^2 \cdot \text{cosec}^2(\theta) \quad (2)$$

Le diagramme de rayonnement en cosécante carrée est calculé par une méthode basée sur la synthèse du diagramme à partir de la synthèse de phase [3] des éléments rayonnants à une modélisation du rayonnement par une méthode d'ouverture équivalente. La conception par l'approche quasi-optique est utilisée. Un programme de simulation a été développé à l'aide du logiciel Scilab pour déterminer le profil de phase en cosécante carrée pour un réflecteur en une dimension (1D). Le profil de phase du diagramme focalisé est obtenu de manière classique par compensation des retards de phase. Le passage d'une à deux dimensions (2D) s'effectue par la correction du retard 1D et la compensation du retard 2D comme détaillé dans [4]. Cela permet de réaliser des antennes à diagrammes de rayonnements différents en

azimut et élévation, comme celles nécessaires à notre application.

L'angle d'ouverture et la loi d'illumination jouent un rôle sur le diagramme de rayonnement en champ lointain. Dans notre structure, l'illumination de la source primaire sur le réflecteur a été choisie :

$$G_s(\theta_s) = \cos^n(\theta_s) \text{ avec } n = 900 \quad (3)$$

Pour satisfaire cette loi, la source primaire est constituée d'un cornet de section circulaire associé à une lentille diélectrique en PVC.

La lentille diélectrique est à profil hyperbolique. Les simulations du cornet seul et avec l'ajout de lentille diélectrique sont réalisées à l'aide du logiciel SRSR d'Orange Labs [5]. Il est destiné à la simulation d'antennes à symétrie de révolution. Enfin, la source est réalisée et mesurée sur la bande 76-81 GHz (figure 2).

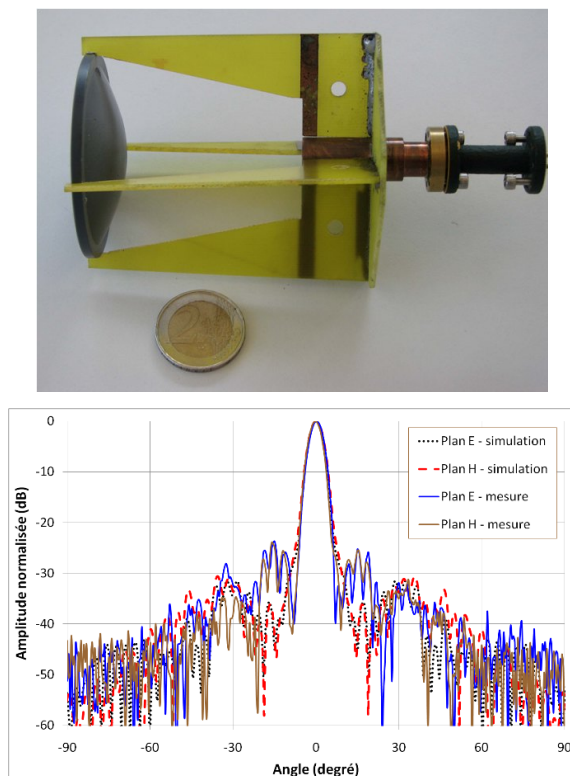


Figure 2. Source primaire et son diagramme de rayonnement à 77 GHz

2. Réalisations de l'antenne

Le réseau réflecteur possède un arrangement de cellules élémentaires complexe. Chaque cellule a une phase de réflexion calculée selon le principe exposé à la première partie. Une étude de la phase réfléchie des cellules permet d'obtenir le fonctionnement désiré du réseau réflecteur. Nous nous intéressons à l'influence de géométrie des cellules sur la phase réfléchie. Une conception de la phase réfléchie par rapport aux tailles des patches est conduite à l'aide du logiciel Ansoft-HFSS. Une plage de phase réfléchie de 360° est obtenue par l'utilisation conjointe de trois types de patches imprimés:

patch circulaire, patch annulaire et patch combiné (anneau et cercle).

Nous utilisons un substrat Duroïd de 0,508 mm d'épaisseur. Les cellules sont imprimées sur une face du substrat, l'autre étant métallisée. Le réflecteur a une taille de 30*20 cm. La cellule qui contient les patches est de forme carrée de côté 1,9 mm ($\lambda/2$ à $f = 77$ GHz). Il y a environ de 16600 patches imprimés à la surface du réflecteur. La première étape de la fabrication a consisté à automatiser le dessin du masque. Pour cela nous avons développé un programme sous Scilab, qui automatise le tracé en recherchant les patches dans une base de cellules simulées comprenant les paramètres géométriques en fonction de la phase souhaitée. La figure 3 représente le circuit imprimé du réseau réflecteur ainsi qu'un agrandissement d'une zone qui permet de reconnaître les formes de patches utilisés.

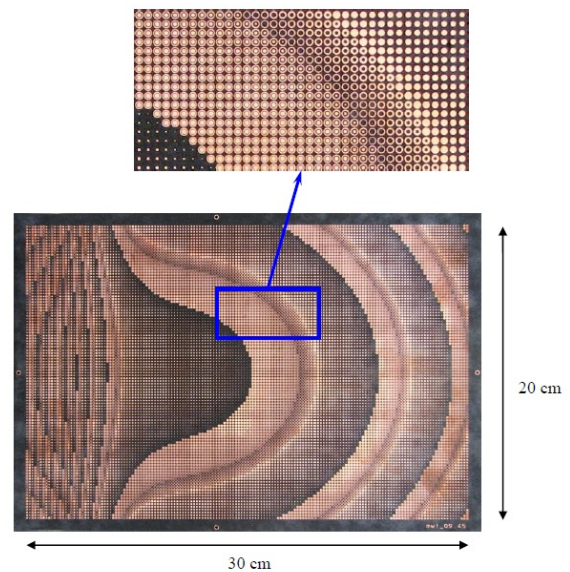


Figure 3. Surface du réseau réflecteur contenant les éléments imprimés

L'antenne réalisée est présentée en figure 4. La position de la source primaire peut être ajustée selon les 3 directions sur une course de quelques millimètres pour se placer dans les conditions de focalisation optimale.

3. Mesures de l'antenne

Les mesures en champ lointain de l'antenne ont été réalisées à l'extérieur. Un système de mesure de diagramme de rayonnement original a été mis en place à cette occasion (figure 5). En effet, en considérant la taille de l'antenne et les fréquences de travail, nous obtenons une distance de Fraunhofer de 48m. Afin de pouvoir tout de même effectuer une mesure en champ lointain, nous avons opté pour une mesure en extérieur où l'antenne sous test (AST) est placée en haut d'une tour de l'Université d'Ulm et le cornet émetteur sur une autre tour située à 60m. L'antenne d'émission est fixe. L'AST est placée sur un socle motorisé afin d'effectuer l'acquisition des diagrammes. Un analyseur de spectre (8565EC d'Agilent Technologies) est utilisé en réception

pour la mesure d'amplitude. Avec ce système, seule la mesure en amplitude est accessible.

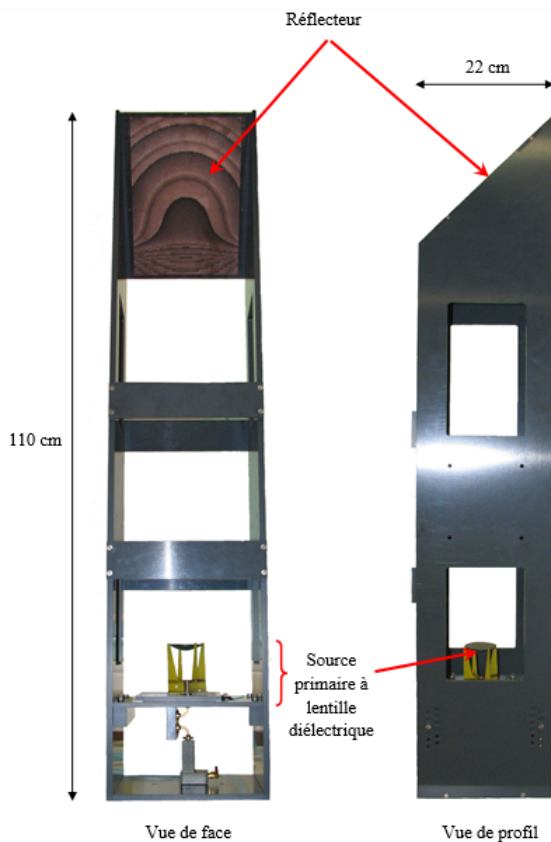


Figure 4. Antenne en cosécante carrée

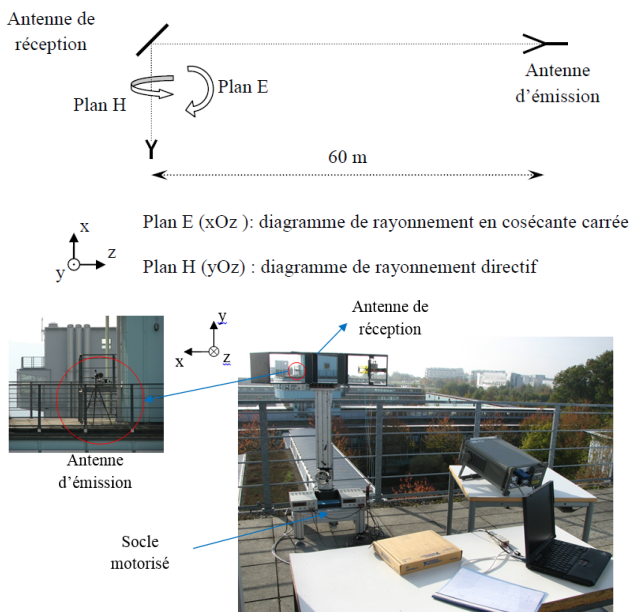


Figure 5. Système de mesure en champ lointain

Le diagramme de rayonnement en cosécante carrée correspond à une rotation l'antenne dans le plan E (xOz), et celui directif à une rotation dans le plan H (yOz).

Afin d'analyser plus avant le comportement de l'antenne, en particulier en dehors du lobe principal, nous avons également effectué des mesures en champ proche [5] à l'aide d'un scanner plan (figure 6). Cette mesure présente l'avantage d'avoir accès à l'amplitude et à la phase du champ proche puis, par application d'une transformée de Fourier rapide bi-dimensionnelle (FFT), à celles du champ lointain.

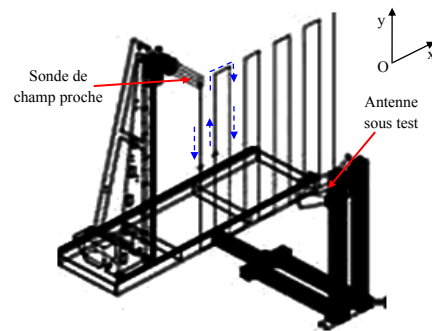


Figure 6. Système de mesure en champ lointain

Les diagrammes de rayonnement de l'antenne complète sont montrés en figures 7 et 8 ainsi que la comparaison entre les simulations, les mesures en champ lointain et le champ lointain issu des mesures en champ proche.

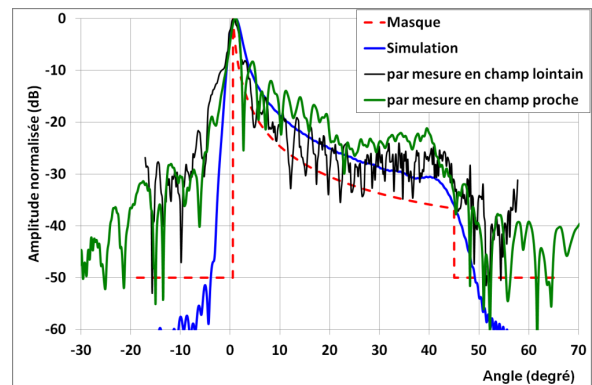


Figure 7. Diagramme en élévation à 77 GHz.

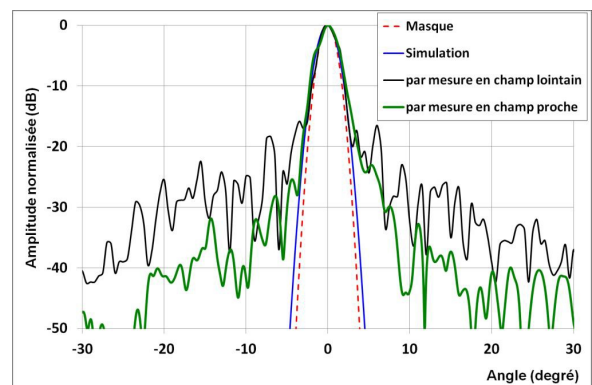


Figure 8. Diagramme en azimuth à 77 GHz.

Pour le diagramme de rayonnement en cosécante carrée (plan E), il y a beaucoup d'ondulations. Mais la forme du diagramme en mesure est assez proche celle obtenue en simulation. En dehors de la zone cosécante (de 0° à 45°), le rayonnement reste à un niveau assez élevé contrairement aux simulations. L'angle d'ouverture de -3dB est 2° . Deux causes possibles à ces dégradations:

- Les erreurs liées à la fabrication et à l'assemblage de l'antenne qui comporte un nombre très élevés d'éléments imprimés et un double alignement (source primaire-lentille et lentille/RR).

- L'approximation dans la synthèse de la loi de phase car cette dernière a consisté à utiliser une synthèse 1D et à l'étendre en 2D par simple jeu de compensation sur les phases des chemins. Une synthèse en 2D, bien que beaucoup plus couteuse en temps de calcul, est aussi plus précise.

Dans le diagramme de rayonnement directif (plan H), les résultats en mesures sont conformes à la simulation pour le lobe principal. Le niveau des lobes secondaires est d'environ -15dB. L'angle d'ouverture de -3dB est $2,3^\circ$.

L'antenne est ensuite connectée à un module Radar FM-CW [7]. Ce dernier fonctionne en gamme millimétrique dans la bande $77 \text{ GHz} \pm 2,5 \text{ GHz}$. Cet ensemble est déporté de l'électronique BF de commande, pilotée par un PC. Les images sont acquises sur le PC.

Le logiciel d'acquisition, de traitement et d'affichage des images est développé en environnement Matlab.

Des mesures préliminaires ont été conduites dans le bâtiment du LEAT. Dans un premier temps, 6 objets sont placés le long d'un couloir. Ces objets, presque tous métalliques, sont choisis en raison de leurs dimensions et de leurs formes. En effet, les objets plats sont particulièrement difficiles à détecter (objets 5 et 6). La bande passante de la tête RF est choisie à 1GHz afin de réaliser un compromis satisfaisant entre le temps de mesure et la résolution en distance. L'objet 6 est particulièrement difficile à détecter en raison de sa faible épaisseur. Ce dernier est de plus très sensible à l'angle d'incidence et n'a été détecté que dans certaines configurations et avec un niveau très faible.

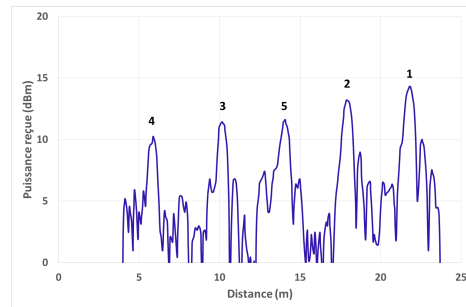


Figure 9. Mesures Radar

Le signal radar délivrant la puissance mesurée en fonction de la distance est représenté sur la figure 9. Nous voyons que tous les objets sont vus par le radar à l'exception de l'objet 6. De plus, la faible variation de la puissance reçue en fonction de la distance correspond au bon fonctionnement de l'antenne en cosécante carrée.

4. Conclusion

Une antenne en cosécante carrée est étudiée et fabriquée pour l'application radar de détection de petits objets au sol (FOD) dans la bande 76-81 GHz. L'antenne, électriquement grande, est difficile à mesurer en champ lointain en raison d'une distance d'obtention de ce dernier de 48m. Un système de mesure en champ lointain en extérieur a été mis en place et les mesures de diagramme issues de ce système ont été corroborées par des mesures en champ proche. Des mesures radar ont été conduites avec cette antenne sur des distances courtes (max. 25m) sur des objets tests relativement petits. Les résultats constituent une première validation du concept antennaire qui va être poursuivie avec des mesures en extérieur sur des distances plus grandes.

5. Bibliographie

- [1] M. J. O'Donnell, *Foreign Object Debris/Damage (FOD) Detection Equipment*, Advisory circular of U.S department of transportation, Federal Aviation Administration, August 10 2009
- [2] D. Pozar, S. D. Targonski, and H. D. Syrigos, "Design of millimeter wave microstrip reflectarrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 45, pp. 287–295, Feb. 1997.
- [3] O. M. Bucci, G. Mazzarella, G. Panariello, "Reconfigurable Phase Arrays by Phase-Only Control", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 39 n°7, pp. 919–925, July 1991.
- [4] Armin Zeitler *et al.*, "Folded Reflectarrays with Shaped Beam Pattern for Foreign Object Debris Detection on Runways", *IEEE Trans. Antennas Propagat.* Vol.58 n°9, pp. 3065-3068, 2010.
- [5] A. Berthon, R.P. Bills, "Integral equation analysis of radiating structures of revolution", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 37, pp. 159-170, February 1989.
- [6] Xueyang Duan, "Planar and Cylindrical Near Field Measurement of Antenna with Probe Correction", Master thesis, Mars 2006, Université d'Ulm.
- [7] P. Feil, "Broadband mm-Wave Sensor for Industrial and Security Applications", doctorat en co-tutelle Université d'Ulm et Université Nice Sophia Antipolis, 2012.