



**HAL**  
open science

## Réseau d'Antennes à Polarisation Circulaire et à Forte Isolation Pour Liaisons "In-Band Full-Duplex" Pour CubeSats en Bande Ka

Hadi Hijazi, Allan Pen, Marc Le Roy, Raafat Lababidi, Denis Le Jeune, André Pérennec, Jean-Luc Issler, Kevin Elis

► **To cite this version:**

Hadi Hijazi, Allan Pen, Marc Le Roy, Raafat Lababidi, Denis Le Jeune, et al.. Réseau d'Antennes à Polarisation Circulaire et à Forte Isolation Pour Liaisons "In-Band Full-Duplex" Pour CubeSats en Bande Ka. 23èmes Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan-Les-Pins France, France. hal-04606998

**HAL Id: hal-04606998**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-04606998>**

Submitted on 10 Jun 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Réseau d'Antennes à Polarisation Circulaire et à Forte Isolation Pour Liaisons "In-Band Full-Duplex" Pour CubeSats en Bande Ka

Hadi Hijazi<sup>1,2</sup>, Allan Pen<sup>2</sup>, Marc Le Roy<sup>2</sup>, Raafat Lababidi<sup>1</sup>, Denis Le Jeune<sup>1</sup>, André Pérennec<sup>2</sup>,

Jean-Luc Issler<sup>3</sup>, Kevin Elis<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ENSTA-Bretagne, <sup>2</sup> Univ Brest, Lab-STICC, UMR 6285, CNRS, F-29200 Brest

<sup>3</sup> Centre National d'Études Spatiales (CNES), Toulouse

[hadi.hijazi@ensta-bretagne.org](mailto:hadi.hijazi@ensta-bretagne.org)

*Résumé – Cet article présente un réseau de 8 x 8 patches circulaires présentant un fort niveau d'isolation entre émission et réception pour cibler une liaison exploratoire In-Band Full-Duplex pour CubeSats en bande Ka. Ce réseau compact peut être installé sur la surface d'un CubeSat 1U. En simulation, le réseau atteint 90 dB d'annulation de l'auto-interférence de TX vers RX et un excellent taux d'ellipticité (< 1 dB) de 25 à 27 GHz grâce à la mise en œuvre d'une rotation séquentielle multi-niveaux. Le réseau présente également une large bande passante sur la même bande passante et atteint un gain supérieur à 20 dBi avec une efficacité de rayonnement supérieure à 84 %.*

## I. INTRODUCTION

Les CubeSats sont des satellites miniatures aux dimensions standardisées qui ont révolutionné l'exploration spatiale en permettant, pour un coût moindre que des satellites de moyenne et grande taille, de développer la recherche scientifique, l'observation de la Terre et la démonstration et validation de technologies en environnement spatial. L'un des défis majeurs en matière de communication CubeSat est de parvenir à un transfert fiable et efficace de données, compte tenu du nombre croissant de CubeSats occupant l'Orbite Terrestre Basse.

Actuellement, les ressources spectrales disponibles pour les applications CubeSat sont limitées et partagées entre tous les membres d'une constellation, ce qui signifie que certaines fréquences doivent être réutilisées par plusieurs satellites. Cela peut entraîner des problèmes de couplage mutuel et d'interférence entre les différents satellites, sans parler du couplage avec d'autres satellites situés sur des orbites plus élevées, ce qui affecte la qualité des communications et détériore la sensibilité du récepteur du satellite.

Traditionnellement, les satellites évitaient l'auto-interférence en séparant l'émission de la réception soit par répartition du spectre de fréquences (duplexage fréquentiel), soit par alternance temporelle (duplexage temporel). Dans ce contexte, la communication In-Band Full-Duplex (IBFD) apparaît comme une technologie prometteuse, permettant l'émission et la réception simultanées sur la même bande de fréquences, ce qui

double en théorie les ressources spectrales disponibles. La communication in-band full-duplex offre donc l'avantage d'utiliser plus efficacement le spectre disponible, d'améliorer les taux de transfert de données et de réduire les temps de latence.

Bien que cette technologie offre des avantages significatifs, sa mise en œuvre dans les applications CubeSat pose de multiples défis : le premier est lié aux contraintes de taille et de puissance inhérentes aux CubeSats. La réalisation d'une communication in-band full-duplex respectant ces contraintes nécessite des solutions d'ingénierie innovantes. En outre, les réglementations spectrales constituent également un autre défi pour la communication in-band full-duplex dans les applications CubeSats. Il est impératif d'assurer une conformité avec les réglementations internationales en matière de spectre et de coordonner l'utilisation des fréquences afin d'éviter les interférences avec d'autres systèmes satellitaires et les communications terrestres.

Toutefois, le principal défi consiste à atténuer l'auto-interférence, afin d'éviter que le signal transmis n'interfère avec les signaux reçus sur la même bande de fréquences. On peut y parvenir en mettant en œuvre diverses techniques d'annulation de l'auto-interférence afin de la ramener en dessous du seuil de bruit du récepteur, de sorte qu'elle n'affecte pas son rapport signal/bruit [1]. Un simple calcul du bilan de liaison révèle que le niveau d'annulation nécessaire est de l'ordre de 110-130 dB.

Pour atteindre ce niveau d'annulation, des circuits d'annulation multiples doivent être mis en œuvre successivement à différents stades du front-end radio du satellite : au niveau de l'antenne, analogique et numérique. Il est essentiel d'atteindre des niveaux élevés d'annulation au niveau de l'antenne (>50 dB) pour éviter que les auto-interférences résiduelles ne saturent le récepteur et ne dégradent le convertisseur analogique-numérique. Les 60 à 80 dB restants sont obtenus à l'étage analogique et logiciel suivant. Cet article se concentre ainsi principalement sur l'annulation au niveau antennaire.

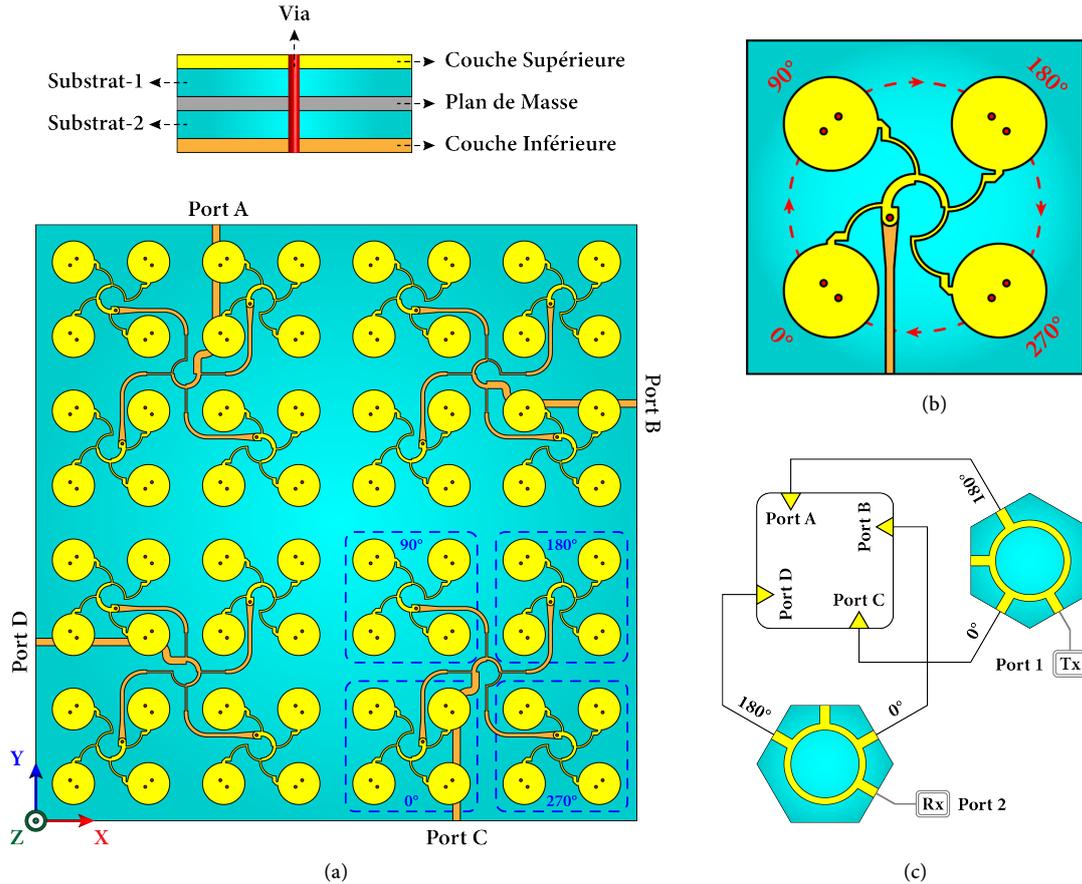


Figure 1 : (a) réseau de 64 patches circulaires à polarisation circulaire pour les applications in-band full-duplex, (b) sous-réseau de 4 éléments et (c) réseau d'alimentation du réseau à 64 éléments composé de deux anneaux hybrides.

Le système d'antenne envisagé doit fonctionner dans la bande Ka (à 26 GHz), la bande normalisée pour les communications par satellite, et doit atteindre au moins 50 dB d'annulation des interférences. Il doit également être à polarisation circulaire, avec un taux d'ellipticité inférieur à 3 dB, et avoir un gain supérieur à 20 dBi. Tout cela en veillant à ce que l'antenne puisse être installée sur la surface d'un CubeSat 1U, c'est-à-dire que l'antenne doit avoir une surface plus petite que  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ .

## II. CONCEPTION DU SYSTÈME

Notre système est composé d'un réseau de patches et de deux anneaux hybrides, structuré sur un PCB constitué d'un empilement de deux substrats, soit trois niveaux métalliques. Le réseau est illustré à la Figure 1 et est basé sur un patch circulaire alimenté par une ligne microruban. Les patches circulaires sont plus symétriques que d'autres formes de patches et contribuent ainsi à accroître la symétrie géométrique globale du réseau, qui est un facteur important pour une bonne annulation de l'auto-interférence.

Le gain simulé d'un patch individuel est de 7 dBi à 26 GHz. Il faut donc au moins un réseau de 64 patches (32 pour TX et 32 pour RX) pour obtenir un gain supérieur à 20 dBi. La taille de chaque patch est de 4,8 mm et la séparation entre les patches (centre à centre) est de 8 mm. La taille totale du réseau est donc de  $6,4 \times 6,4 \text{ cm}^2$ , ce qui

signifie qu'il est suffisamment petit pour être installé sur la surface d'un CubeSat de 1U.

Les patches sont placés sur la couche supérieure métallique et sont court-circuités par deux vias pour générer une polarisation circulaire. Si l'axe des vias est incliné de  $45^\circ$  par rapport à la ligne microruban, une polarisation circulaire gauche est générée, et si l'axe est incliné de  $-45^\circ$ , une polarisation circulaire droite est générée. Ici, une polarisation circulaire gauche est adoptée et le taux d'ellipticité simulé d'un patch est de 1 dB à 26 GHz.

Bien que ce taux soit assez bon pour le patch individuel, il peut être encore amélioré au niveau du réseau. Prenons par exemple le sous-réseau à quatre patches de la figure 1(b). Les quatre patches sont placés autour du centre du sous-réseau de sorte à être tournés séquentiellement de  $90^\circ$  les uns par rapport aux autres. Les quatre patches sont ensuite alimentés par un diviseur de puissance séquentiel, placé sur la couche supérieure, ce qui assure un déphasage progressif de  $90^\circ$  entre eux [2].

Une progression de phase dans le sens horaire génère une polarisation circulaire gauche, et dans le sens anti-horaire génère une polarisation circulaire droite. La rotation séquentielle des patches autour du centre du sous-réseau ainsi que la phase progressive de  $90^\circ$  entre eux

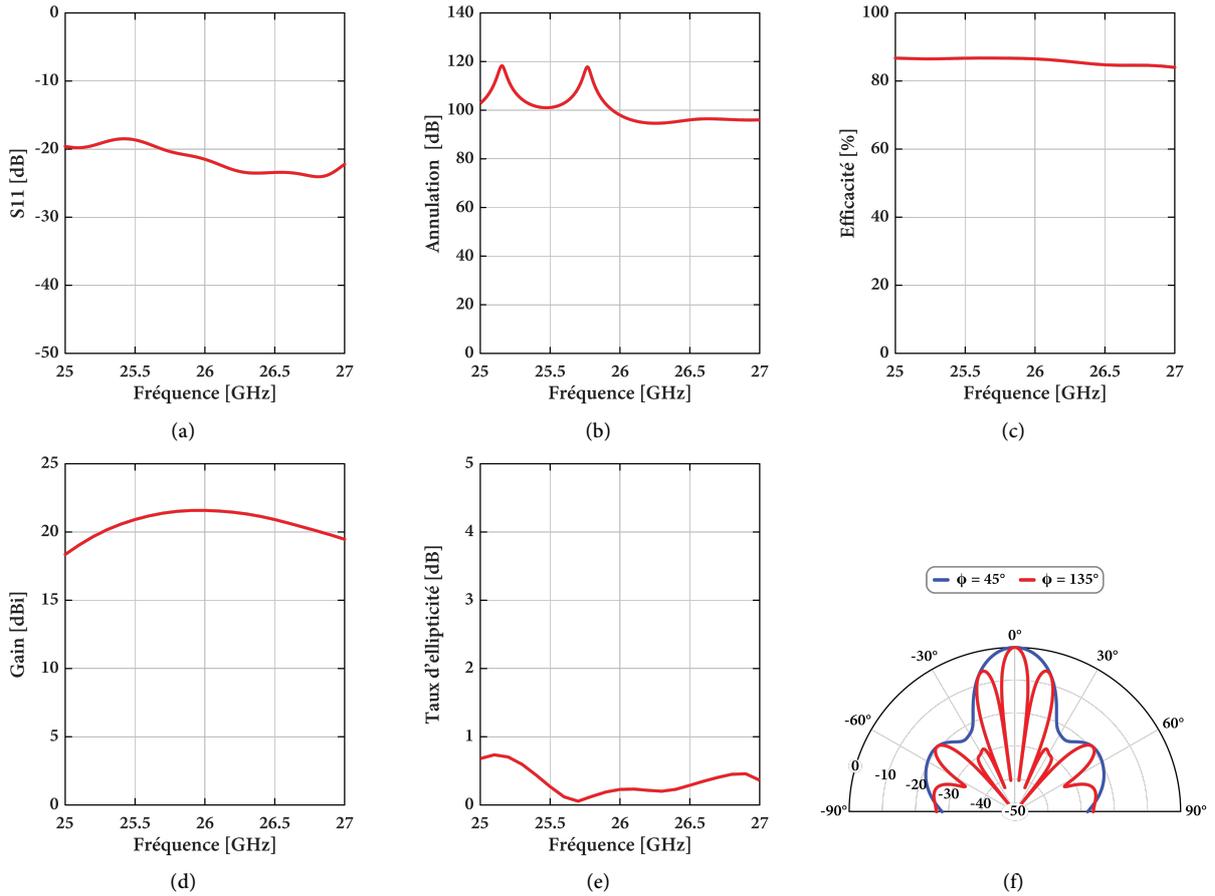


Figure 2 : (a) adaptation, (b) annulation de l'auto-interférence, (c) efficacité, (d) gain, (e) taux d'ellipticité, et (f) diagramme de rayonnement à 26 GHz du réseau.

améliorant le taux d'ellipticité, cette même approche a été appliquée à l'ensemble du réseau.

Le réseau est divisé en quatre sous-réseaux de 16 éléments, chacun contenant quatre sous-réseaux de 4 éléments. Ceux-ci sont également placés autour du centre du sous-réseau à 16 éléments et tournés de 90° l'un par rapport à l'autre. Ils sont ensuite connectés à un autre diviseur de puissance séquentiel, placé sur la couche inférieure métallique, qui assure un déphasage progressif de 90° dans le sens horaire entre les sous-réseaux à 4 éléments pour améliorer encore la qualité de la polarisation.

Les quatre sous-réseaux de 16 éléments sont également tournés l'un par rapport à l'autre autour du centre du réseau. Enfin, chacun des deux sous-réseaux diagonalement opposés est connecté à un anneau hybride, comme illustré à la figure 1(c). Une paire de sous-réseaux diagonalement opposés alimentés par un anneau hybride sera utilisée pour transmettre tandis que l'autre paire de sous-réseaux associé à son hybride sera utilisée pour recevoir.

La géométrie rotative du réseau, combinée aux signaux différentiels fournis par les anneaux hybrides, génère un niveau élevé d'annulation d'auto-interférence entre l'émetteur et le récepteur. Cette technique, appelée annulation en champ proche [3]-[4], annule les champs

électriques transmis dans la zone dite de champ proche tandis que les champs électriques se combinent de manière constructive en champ lointain. Dans des conditions idéales, les antennes de réception, qui se trouvent dans la zone de champ proche, seront totalement isolées des antennes d'émission.

La puissance couplée de l'hybride Tx (Port 1) à l'hybride Rx (Port 2) peut être exprimée comme suit :

$$P_{Rx} = 0.5 |S_{AB}e^{j\pi} + S_{AD} + S_{CB} + S_{CD}e^{j\pi}|^2 P_{Tx}$$

$$= 0.5 |-S_{AB} + S_{AD} + S_{CB} - S_{CD}|^2 P_{Tx} \quad (1)$$

ceci indique que si le réseau est symétrique et que le couplage entre les sous-réseaux est identique, et si les signaux fournis par les anneaux hybrides sont exactement d'amplitudes égales et déphasés de 180°, alors la puissance couplée de l'émetteur au récepteur sera nulle.

En pratique, il y aura toujours des déséquilibres d'amplitude et de phase dans les anneaux hybrides, et les antennes fabriquées peuvent ne pas avoir des dimensions identiques ou ne pas être exactement symétriques autour du centre du réseau. Par conséquent, le couplage de puissance entre l'émetteur et le récepteur ne sera pas parfaitement nul.

Il convient de noter que les anneaux hybrides utilisés en réception ne font qu'annuler les interférences de

l'émetteur local et n'affecte pas réellement les signaux utiles provenant d'autres satellites. De plus, dans cette configuration, seule la moitié des éléments du réseau peut être utilisée pour transmettre et l'autre moitié pour recevoir, mais tous les éléments ne peuvent être utilisés en même temps pour transmettre et recevoir.

### III. PERFORMANCES DU SYSTÈME

Le réseau proposé avec les anneaux hybrides a été modélisé et simulé sous CST Microwave Studio sur un substrat Rogers RT5880 ( $\epsilon_r = 2.2$ ,  $h = 0.254 \text{ mm}$ ,  $\tan\delta = 9 \times 10^{-4}$ ). Le réseau de patches et les anneaux hybrides ont été entièrement conçus et simulés en tenant compte des pertes mais de manière séparée, puis ces résultats ont été combinés. Les résultats de ces simulations sont illustrés à la Figure 2.

La Figure 2(a) montre que le réseau présente une adaptation relativement large bande de 25 GHz à 27 GHz, qui est une bande de fréquence standard pour les liaisons satellitaires (norme SFCG 15-2R4). En outre, la Figure 2(b) illustre le niveau d'annulation d'auto-interférence obtenu, qui reste supérieur à 90 dB dans la bande d'adaptation.

Le réseau atteint une efficacité de rayonnement supérieure à 84 % et un gain supérieur à 20 dBi à 26 GHz ( $\approx 21,6 \text{ dBi}$ ) pour le réseau sans prendre en compte les anneaux hybrides. Ce gain ne correspond qu'à une seule liaison (montante ou descendante) qui n'utilise que la moitié du nombre de patches. Le taux d'ellipticité obtenu est très bon ( $\approx 0,23 \text{ dB}$ ) à 26 GHz, et ce taux est l'une des principales caractéristiques à mettre en avant pour ce réseau à rotation séquentielle multi-niveaux.

La figure 2(f) représente les coupes du diagramme de rayonnement du réseau dans deux plans :  $\phi = 45^\circ$  et  $\phi = 135^\circ$ . Il convient de noter qu'en raison de l'alignement diagonal des sous-réseaux opposés, le diagramme de rayonnement est incliné de  $45^\circ$  par rapport à l'axe des  $x$ . Le diagramme de rayonnement dans le plan  $\phi = 45^\circ$  est directif avec des lobes latéraux extrêmement faibles, tandis que dans le plan  $\phi = 135^\circ$ , le faisceau principal est encore plus directif, mais avec deux lobes de réseau importants sur les côtés. En effet, la principale origine de ces lobes provient de la configuration des deux sous-réseaux de 16 patches placés de manière opposée qui imposent des contraintes géométriques ne permettant pas de réduire la distance de séparation entre ces deux sous-réseaux à une longueur d'onde

### IV. CONCLUSION

Le réseau de  $8 \times 8$  patches circulaires présenté dans cet article présente un fort niveau d'isolation entre TX et RX, un gain élevé, tout en étant compact, et possède de nombreux avantages comme étage antennaire pour une liaison In-Band Full-Duplex pour CubeSats en bande Ka. Le réseau proposé utilise la technique d'annulation en champ proche pour atteindre un niveau d'annulation d'auto-interférence supérieur à 50 dB, et exploite une

approche de rotation séquentielle à multi-niveaux pour atteindre une très bonne qualité de polarisation circulaire avec un taux d'ellipticité de 0,23 dB à 26 GHz.

Le réseau se caractérise également par une large bande d'adaptation de 25 à 27 GHz avec un gain supérieur à 20 dBi et une efficacité de rayonnement supérieure à 84 % à 26 GHz. En outre, la surface totale du réseau est de  $6,4 \times 6,4 \text{ cm}^2$ , ce qui permet de l'intégrer à la surface d'un CubeSat de 1U.

Seule la moitié des éléments du réseau est utilisée pour l'émission ou la réception, ce qui réduit le gain de chaque liaison de 3 dB. Mais un élargissement de la bande de gain pour l'adapter aux largeurs de bande de l'adaptation et du taux d'ellipticité est possible.

Néanmoins, certains travaux [5] ont proposé un moyen de permettre que chaque patch puisse être utilisé pour transmettre et recevoir simultanément, sans dégrader l'efficacité de la technique d'annulation en champ proche. Cela signifie que tous les éléments du réseau pourraient être utilisés simultanément par les deux liaisons et, par conséquent, augmenter leur gain de 3 dB.

En outre, cette approche pourra contribuer à la réduction des lobes de réseau en réduisant la distance entre les sous-réseaux, qui elle-même limitée par la forme géométrique et la taille du diviseur de puissance séquentiel qui alimente les patches.

### Références

- [1] A. Riihonen & H. Suraweera, *Full-Duplex Communications for Future Wireless Networks*. Springer, 2020.
- [2] D. Inserra, W. Hu, and G. Wen, "Design of a Microstrip Series Power Divider for Sequentially Rotated Nonuniform Antenna Array." *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017.
- [3] R. Wu, J., M. Li, N. Behdad, "A Wideband, Unidirectional Circularly Polarized Antenna for Full-duplex Applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66, (3), pp. 1559–1563.
- [4] Hijazi, Hadi, Allan Pen, Marc Le Roy, Raafat Lababidi, Denis Le Jeune, André Pérennec, Jean-Luc Issler, Kevin Elis, and Jean-Herve Corre. "Circularly Polarized In-Band Full-Duplex Antenna Array for Ka-Band Inter-CubeSat Links." In 2022 20th IEEE Interregional NEWCAS Conference (NEWCAS), pp. 80-83. IEEE, 2022.
- [5] I. Tekin, and H. Nawaz. "Double-Differential Fed, Dual Polarized Patch Antenna System with Advanced Interport RF Isolation for IBFD Transceivers." U.S. Patent 10,756,436, issued August 25, 2020.