Réseau d'antennes à photo-mélange pour commutation photonique de faisceau en ondes millimétriques

Jérôme Taillieu, Alvarro Jose Pascual-Gracia, Muhsin Ali, Thomas Batté, Fabien Ferrero, Laurent Brochier, Olivier de Sagazan, Frédéric van Dijk, Luis Enrique Garcia Munoz, Guillermo Carpintero del Barrio, et al.

▶ **To cite this version:**

Jérôme Taillieu, Alvarro Jose Pascual-Gracia, Muhsin Ali, Thomas Batté, Fabien Ferrero, et al.. Réseau d'antennes à photo-mélange pour commutation photonique de faisceau en ondes millimétriques. 22èmes Journées Nationales Microondes (JNM 2022), Jun 2022, Limoges, France. pp.815-818. hal-03700274

HAL Id: hal-03700274
https://hal.science/hal-03700274

Submitted on 22 Jun 2022

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.

XXII[èmes] Journées Nationales Microondes
8-10 juin 2022 – Limoges

Réseau d'antennes à photo-mélange pour commutation photonique de faisceau en ondes millimétriques

J. Taillieu[1,2], A.J. Pascual[1], M. Ali[5], T. Batté[3], F. Ferrero[4], L. Brochier[4], O. de Sagazan[1], F. van Dijk[6], L. E. Garcia Munoz[5], G. Carpintero Del Barrio[5], R. Sauleau[1], M. Alouini[2] and D. Gonzalez-Ovejero[1]

[1] *Univ Rennes, CNRS, IETR (Institut d'Électronique et des Technologies du numéRique) – UMR 6164, Rennes, France*
[2] *Univ Rennes, CNRS, Institut FOTON – UMR 6082, F-35000 Rennes, France*
[3] *Institut Foton, INSA (Institut National des Sciences Appliquées) – UMR 6082, Rennes, France*
[4] *Université Côte d'Azur, CNRS, LEAT (Laboratory of Electronics Antennas and Telecommunications), Sophia Antipolis, France*
[5] *Universidad Carlos III de Madrid, 28911 Leganes, Spain*
[6] *III-V Lab, a joint lab between Nokia Bell Labs, Thales Research and Technology and CEA-LETI, Palaiseau, France*

Résumé *– Nous présentons un réseau d'antennes à excitation photonique et à commutation de faisceau pour des liaisons sans fil en bande E. Le réseau d'antennes se compose de deux sous-réseaux de patchs empilés servant de source primaire à une lentille en polytétrafluoroéthylène (PTFE) ; une photodiode alimente chaque sous-réseau. La lentille illuminée par l'un des sous-réseaux présente une directivité de 27 dBi, tout en permettant une commutation de faisceau entre ±2,7° avec un croisement de faisceau de -3 dB.*

1. Introduction

La demande croissante de trafic de données dans les systèmes sans fil nécessitera le déploiement de réseaux cellulaires à haute capacité. En particulier, la bande E (71-76 et 81- 86 GHz) a été identifiée comme une région spectrale appropriée pour des débits de plusieurs dizaines de Gbps [1].

La génération photonique d'ondes millimétrique et submillimétrique présente des avantages en termes de multiplexage par répartition en longueur d'onde pour les liaisons sans fil multicanaux, de déport par fibre optique des antennes et de compatibilité avec les réseaux d'accès optique déjà déployés et à venir. Cependant, les émetteurs photoniques fournissent une puissance inférieure à celle de leurs homologues électroniques, et souffrent d'une importante perte de conversion au niveau du convertisseur optique-électrique (généralement une photodiode ultra-rapide). Ce défaut, qui s'ajoute à une perte élevée en espace libre dans les ondes millimétriques, nécessite l'utilisation de liaisons en visibilité directe et d'antennes hautement directives.

Un défi supplémentaire consiste à fournir des émetteurs à ondes millimétriques compatibles avec la photonique et dotés de capacités de déflexion de faisceau. Cette caractéristique est également cruciale pour permettre un alignement précis des faisceaux directifs, la compensation des déformations des structures de montage, et des liaisons reconfigurables [2], [3]. Malgré les nombreuses démonstrations de liaisons sans fil s'appuyant sur la photonique, les réalisations expérimentales de transmissions photoniques dotés d'une fonction de déflexion du faisceau en bande E ou au-delà sont relativement rares [4]. En général, un petit nombre d'éléments actifs est utilisé, jusqu'à quatre, en raison de la difficulté d'intégrer un grand nombre de photodiodes aux antennes tout en assurant un couplage optique optimal. Ce problème a entravé le développement de liaisons sans fil avec des réseaux phasés présentant simultanément un gain élevé (>25 dBi) et une déflexion du faisceau.

Une approche qui combine une antenne à faisceaux commutés avec des éléments quasi-optiques peut être une solution intéressante pour obtenir un faisceau directif mais également orientable. En particulier, nous proposons dans ce travail une commutation de faisceau par voie photonique avec un réseau d'antennes intégré à des photodiodes à transport unipolaire (UTC-PD) en bande E.

2. Faisceaux commutés par photonique

Dans cette section est décrit l'émetteur en onde millimétrique proposant une commutation de faisceau en bande E. La figure 1 décrit le schéma fonctionnel du transmetteur. Tout d'abord, le signal optique fibré est modulé puis dirigé vers l'un des *N* éléments par un commutateur optique. Ensuite, la lumière illumine une photodiode connectée à l'antenne rayonnant la porteuse millimétrique ainsi modulée.

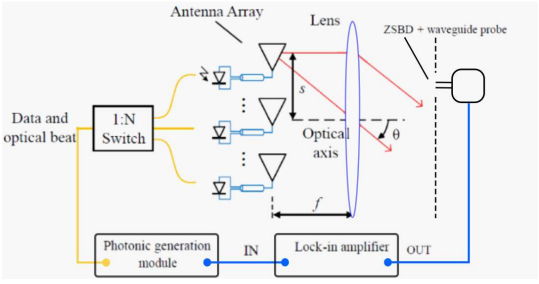

Figure 1. Architecture d'un réseau d'antenne à ondes millimétrique à excitation photonique pour commutation de faisceau

Enfin il est envisageable d'intégrer sur le circuit imprimé des amplificateurs HEMT après la photodiode afin de compenser la relative faible puissance émise par les photodiodes. Pour la commutation de faisceau, les antennes sont situées dans le plan focal d'une lentille de longueur focale *f*, comme le montre la figure 1. Pour une distance *s* par rapport à l'axe optique de la lentille, l'inclinaison du faisceau est donnée par $tan\ \theta = \pm s/f$. Dans ce cas, un seul élément est actif à la fois, et le faisceau peut être commuté entre *N* angles θ différents. Dans ce cas, seulement un seul élément est actif à la fois et le faisceau peut être commuté vers *N* différentes directions. En général, les systèmes à lentilles présentent des angles de déflections plus faibles que les réseaux d'antennes phasés mais l'architecture proposée remplie les besoins pour les liaisons point-à-point afin de compenser activement les pertes de désalignements [2], [5].

La commutation de faisceau appliqué à un transmetteur photonique à ondes millimétriques présentes d'intéressants compromis ce qui en fait une voie prometteuse à explorer. Tout d'abord, il est possible d'atteindre des valeurs de directivités très élevées (valeurs mesurées supérieures à 32dBi) [6], [7] grâce à la lentille, qui, elle, ne dépend pas du nombre d'éléments N. Etant donné le coût élevé des composants III-V il est souhaitable de pouvoir minimiser le nombre de photodiodes employées : cette technique permet un nombre d'éléments *N* ajustable en fonction des besoins de couverture angulaire et de la variation de gain entre deux angles adjacents de dépointages.

Même si la commutation de faisceau ne permet que des directions de balayage discrètes (64 directions de balayage [6]), la séparation des éléments peut être choisie pour obtenir un croisement de faisceaux à -3 dB pour une couverture quasi-continue. D'autres niveaux étant également possibles. Enfin, l'orientation du faisceau est simplement contrôlée par un commutateur optique avec un temps de commutation rapide, une faible perte d'insertion (30-300 ns et 2 dB, respectivement, pour le commutateur 1 × 4 Agiltron NanoSpeed) et une faible consommation d'énergie. Il convient de noter que le balayage mécanique [8] pourrait constituer une alternative au schéma de la figure 1. Dans ce cas, la lentille se déplacerait relativement à l'antenne pour décaler la position de l'émetteur par rapport à l'axe optique, conduisant ainsi à une orientation continue du faisceau. Cependant, la vitesse de déplacement (10 mm/s dans [8, section 2.1.1], équivalente à ≈ 10◦ /s) produit une orientation beaucoup plus lente que le schéma de commutation optique proposé, ce qui est en général insuffisant pour remplir les conditions en latences et fiabilités exigées dans les applications télécoms.

Enfin, la technique commutation de faisceau ne permet pas de combiner la puissance des différentes photodiodes et donc dépend fortement d'amplificateurs pour améliorer la puissance émise et reçue et ainsi augmenter la distance de la liaison.

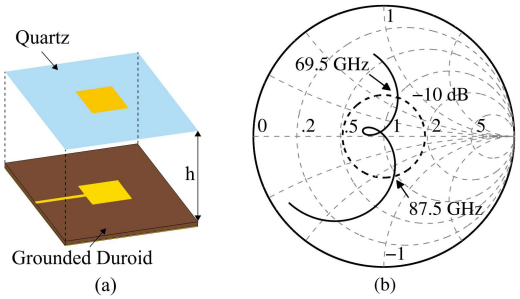

Figure 2. (a) Cellule élémentaire composée de deux patchs empilés. (b) Abaque de Smith correspondante.

3. Réseau d'antenne

L'élément intégré en réseau doit exhiber à la fois un gain élevé mais doit aussi pouvoir être adapté en impédance sur une large bande de fréquence afin de satisfaire la capacité de canal souhaitée. L'élément radiatif doit émettre dans la demie sphère supérieure et être suffisamment compact pour être intégré dans un réseau.

Une configuration de patch empilés est un candidat prometteur pour remplir les conditions précédemment mentionnées. Cette approche consiste à empiler un patch dit « pilote » et un patch parasitique placé au-dessus d'une distance *h* comme montré en figure 2a. Cette architecture permet de conserver un diagramme de rayonnement et un centre de phase symétriques sans augmenter la taille de la cellule, ce qui est souhaitable dans le cas de systèmes quasi optiques.

Le réseau a été fabriqué sur un circuit imprimé (PCB) Duroid 5880 de 127 µm d'épaisseur. Le patch pilote est imprimé sur le PCB tandis que le patch parasitique est gravé sur la face inférieure d'une couche de superstrat en quartz de 112 µm d'épaisseur. La distance *h* entre les patchs est contrôlée par une entretoise en silicium (voir figure. 3) et a été ajustée de manière à présenter deux résonnances permettant de couvrir entièrement la bande E : ainsi la largeur de bande relative en impédance simulée est de 23% pour un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB. Une fois la structure de patchs empilée conçue, elle est répliquée pour former deux sous-réseaux de 2 × 2 éléments, alimentés indépendamment par une UTC-PD.

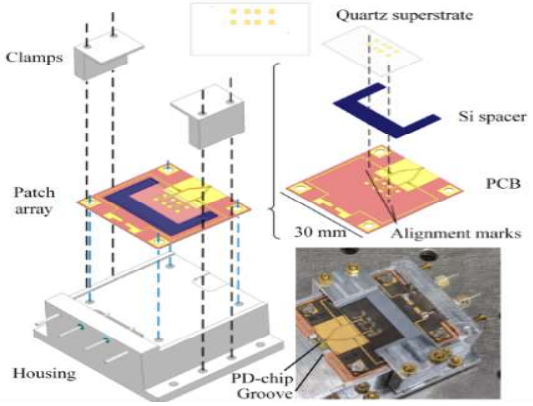

Figure 3. Vue éclatée du prototype, et en bas à droite : photographie du prototype.

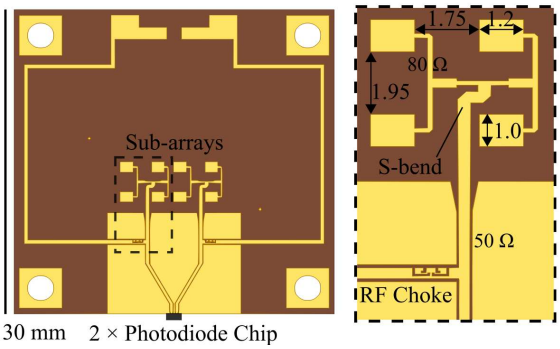

Figure 4. Gauche : PCB développé sur Duroid 5880. Droite : Vue détaillée d'un des sous-réseaux

L'étape suivante de la conception est le circuit d'alimentation entre le réseau d'antennes et la source. Dans ce cas, le réseau d'antennes est excité par une puce UTC-PD 2 × 1 sur InP [9, Fig. 6]. Chaque UTC-PD alimente indépendamment l'un des sous-réseaux. En ce qui concerne le réseau d'alimentation connectant les photodiodes avec l'antenne, une transition effilée est d'abord utilisée pour adapter la sortie du guide d'ondes coplanaire (CPW) sur substrat InP provenant des photodiodes au GCPW sur Duroid 5880. Ensuite, les deux lignes de transmissions se séparent pour atteindre la distance de séparation requise pour alimenter les sous-réseaux 2 × 2. Perpendiculairement aux lignes de signaux, on peut également observer sur la figure 4 les selfs RF constituées de résonateurs à anneau divisés (SRR) et les interconnexions CC utilisées pour polariser les photodiodes. Ces selfs présentent une isolation supérieure à 20 dB sur l'ensemble de la bande E. Enfin, des transitions de GCPW à ligne microstrip sont utilisées pour exciter le réseau d'alimentation de chaque sous-réseau.

Concernant l'assemblage la structure, un boîtier en aluminium avec deux pinces a été inclus, comme le montre la figure 3. Ce boitier permet le maintien de l'antenne PCB mais surtout facilite grandement la connexion des photodiodes UTC sans altérer les propriétés de l'antenne. Plus de détails sur l'assemblage de l'antenne sont donnés dans [10].

4. Simulations et mesures

Pour réaliser la commutation de faisceau par voie optique, le réseau d'antennes est placé dans le plan focal d'une lentille en PTFE (Thorlabs LAT075) avec une longueur focale de 53 mm et un diamètre de 5 cm. Les deux sous-réseaux sont situés symétriquement (s = 2,5 mm) de part et d'autre de l'axe optique (Cf. figure 1). Ainsi, l'excitation d'une des deux photodiodes produit un faisceau incliné pointant dans les directions θ= ±2:7°.

La figure 5(a) montre le banc de caractérisation monté sur une table optique. Il permet de mesurer le diagramme de rayonnement le long d'une coupe verticale. En arrière-plan de la figure 5(a) est visible le module photonique de génération d'onde millimétriques. Celui-ci contient deux laser fibrés non-asservis (Toptica Photonics DFB pro BFY), un coupleur optique, un modulateur Mach Zhender (iXBlue MX-LN-20) et son driver ainsi qu'un contrôleur de polarisation afin d'assurer un couplage optimal dans les guides d'ondes optique des photodiodes. Le module de génération photonique héberge les blocs utilisés pour la génération d'ondes mm par photo-mélange [10]. Il délivre deux raies optiques à 1,55 µm modulées en amplitude séparées d'une fréquence égale à celle de l'onde millimétrique souhaitée. L'entrée du module est un signal sinusoïdal à 100 kHz provenant d'un amplificateur à verrouillage (SRS SR830). Ensuite, la sortie du module fibré est divisée (représentée en jaune sur la figure 1) pour éclairer l'une des deux UTC-PD. Le côté récepteur consiste en une sonde WR-10 connectée à une diode à barrière Schottky à polarisation nulle (ZSBD). A son tour, la ZSBD est montée sur une translation linéaire motorisée. Enfin la sortie RF du ZSBD est connectée à l'entrée de l'amplificateur Lock-in, et l'amplitude relative détectée est mesurée.

Les mesures et les résultats de la simulation de l'antenne et de la lentille à l'aide des conditions limites FE-BI (Finite Element-Boundary Integral) de ANSYS HFSS sont présentés en figure 6 à 85 GHz. Les largeurs de faisceau à mi-puissance sont de 4,8° avec un croisement de faisceau à -3 dB. La directivité simulée est de 27,9 dBi (le système actuel de mesure ne permet pas la mesure de la directivité de l'émetteur mais l'intervalle mesuré est en excellent accord avec les simulations).

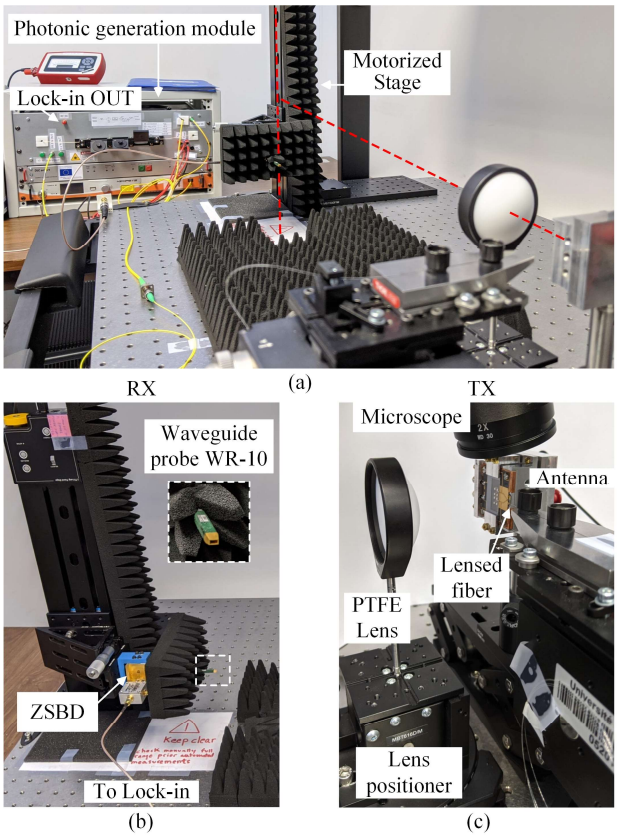

Figure 5. Banc de caractérisation du commutateur de faisceau photonique

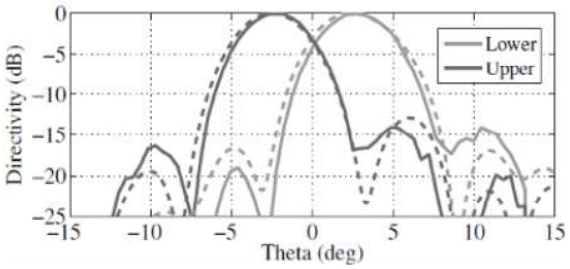

Figure 6. Diagrammes de rayonnement normalisés mesurés (ligne continue) et simulés (ligne pointillée) en fonction de l'angle d'élévation pour la caractérisation expérimentale de la commutation de faisceau photonique pour 85 GHz. La partie inférieure et la partie supérieure font référence à la position du sous-réseau par rapport à l'axe optique.

5. Conclusions

Nous présentons un transmetteur photonique en bande E pour la commutation de faisceau dans des liaisons sans fil. Lorsque le réseau d'antennes est placé au niveau du plan focal d'une lentille PTFE, l'excitation d'un des deux sous-réseaux permet une commutation de faisceau 1-D entre ±2.7° avec une directivité simulée > 27 dBi.

Lors de la conférence, nous présenterons les performances de l'émetteur dans une liaison sans fil. Une transmission à 5 Gbps a notamment été réalisée (BER $<10^{-11}$). Le travail présenté établit la base pour développer des conceptions plus avancées de transmetteurs photoniques à large bande avec un faisceau fortement directif et commutable

Références

[1] J. G. Andrews et al., "What will 5G be?" IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.

[2] A. Hirata et al., "120-GHz-band wireless link technologies for outdoor 10-Gbit/s data transmission," IEEE Trans. Microw. Theory Techn.,vol. 60, no. 3, pp. 881–895, 2012.

[3] S. Hur, T. Kim, D. J. Love, J. V. Krogmeier, T. A. Thomas, and A. Ghosh, "Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks," IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 10, pp. 4391–4403, 2013.

[4] T. P. McKenna, J. A. Nanzer, and T. R. Clark, "Photonic beamsteering of a millimeter-wave array with 10-Gb/s data transmission," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 26, no. 14, pp. 1407–1410, 2014.

[5] A. Hirata, "Transmission trial of television broadcast materials using 120-GHz-band wireless link," NTT Microsystem Integration Laborato ries, Tech. Rep., 2009.

[6] J. Ala-Laurinaho et al., "2-D beam-steerable integrated lens antenna system for 5G E-band access and backhaul," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 64, no. 7, pp. 2244–2255, 2016.

[7] A. Artemenko, A. Mozharovskiy, A. Sevastyanov, V. Ssorin, and R. Maslennikov, "Electronically beam steerable lens antenna for 71–76/81–86 GHz backhaul applications," in 2015 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp., 2015, pp. 1–4.

[8] X. Fu, F. Yang, C. Liu, X. Wu, and T. J. Cui, "Terahertz beam steering technologies: From phased arrays to field-programmable metasurfaces," Adv. Opt. Mater., vol. 8, no. 3, p. 1900628, 2020.

[9] A. J. Pascual et al., "A photonically-excited leaky-wave antenna array at E-Band for 1-D beam steering," Appl. Sci., vol. 10, no. 10, 2020.

[10] A. J. Pascual et al., "Photonic-enabled beam switching mm-wave antenna array," J. Lightw. Technol. In early access, 2021.