

Un Mécanisme de Commutation pour Réduire les Problèmes de Direction Aveugle dans les Réseaux à Balayage

Aurélien Ayissi Manga¹, Raphaël Gillard¹, Renaud Loison¹, Isabelle Leroy-Naneix², Christian Renard²

¹Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes, INSA, 20 Avenue des Buttes de Coësmes, 35700 Rennes

²Thales Systèmes Aéroportés, 2 avenue Gay-Lussac, 78990 Elancourt
aurelien.ayissi-manga@insa-rennes.fr

Résumé – Ce papier présente une nouvelle solution permettant d'étendre la gamme de balayage angulaire d'une antenne réseau dont les performances sont limitées par une direction aveugle. Deux aspects principaux sont développés. La première partie est une description détaillée des mécanismes de couplage responsables de la direction aveugle observée dans le réseau étudié. La seconde partie introduit une modification de la topologie du réseau permettant d'étendre sa gamme de dépointage. La solution proposée repose sur la commutation entre deux modes de fonctionnement du réseau, couvrant chacun deux parties distinctes d'une gamme de balayage globalement plus importante.

1. Introduction

Le contexte de cette communication est celui des réseaux à balayage. La cellule unitaire du réseau étudié (Figure 1) est composée de deux patchs (patch *sup* et patch *inf*) se faisant face sur des substrats de permittivité ϵ_{r1} , ceinturés par une cavité et alimentés par des modules T/R (amplificateurs, déphaseurs) localisés sous le plan de masse. Ce réseau souffre d'une limitation de ses performances due à l'occurrence d'une direction aveugle. La direction aveugle est un phénomène par lequel la puissance communiquée à un réseau est recouplée vers ses sources pour certaines valeurs de l'angle de dépointage, interdisant ainsi tout rayonnement efficace de l'antenne [1]. Elle se produit lorsque la constante de propagation d'un mode de Floquet de la structure coïncide avec celle d'une "onde de couplage" se propageant au sein du réseau [2]. Aux fréquences et angles de dépointage impactés, l'augmentation du couplage mutuel provoque une importante désadaptation d'impédance : le module du coefficient de réflexion actif des sources tend vers l'unité.

Les problématiques liées aux directions aveugles ont fait l'objet d'une forte attention depuis la formalisation du phénomène dans [3]. Le plus souvent, l'onde de couplage mentionnée dans la littérature est une onde de surface qui se propage dans l'empilement diélectrique du réseau [4]. Dans ce cas, les techniques usuelles de limitation du couplage consistent soit en l'isolation des éléments rayonnants les uns des autres (blindage, structures à bande électromagnétique interdite [5]), ou dans la prévention de la propagation du mode d'onde de surface TM_0 (modification du substrat ou de l'élément rayonnant [6]). Toutefois, la direction aveugle peut aussi être due à

une onde d'espace se propageant au-dessus du réseau. Cette situation se produit pour des mailles de réseau relativement larges et correspond alors à l'entrée du lobe de réseau dans l'espace visible. Les méthodes conventionnelles de réduction du couplage par onde d'espace, comme la gravure d'anneaux résonants sur le plan de masse ou l'utilisation de superstrats et métaradômes détériorent fortement le gain et le rayonnement arrière [7][8]. De plus, les solutions basées sur le dimensionnement de réseaux irréguliers sont plus adaptées à la réduction des lobes secondaires qu'à celle des lobes de réseau [1]. Dans le cas présent, la cavité métallique (Figure 1) constitue déjà une protection contre les ondes de surface. En conséquence, c'est le couplage par onde d'espace qui est le plus susceptible de provoquer une direction aveugle.

Dans ce papier, une nouvelle solution permettant d'étendre la gamme de dépointage d'un réseau sujet à une direction aveugle est présentée. La solution proposée repose sur la commutation entre deux modes de fonctionnement du réseau. Ces deux modes permettent de couvrir deux parties distinctes d'une gamme de balayage globalement plus importante. La partie 2 est une description détaillée des mécanismes de couplage responsables de la direction aveugle observée dans le réseau étudié. La partie 3 explique le principe de fonctionnement de la solution basée sur la commutation. Un exemple de mise en œuvre et les performances associées sont également présentés.

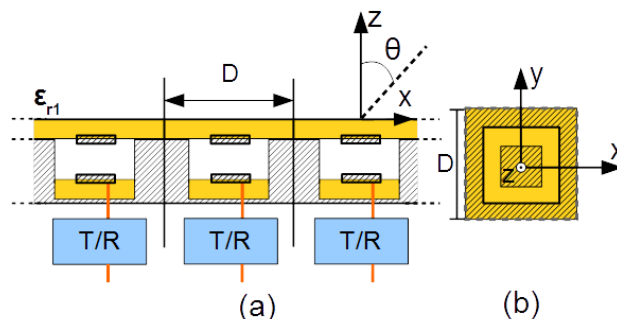


Figure 1. Réseau d'étude (a) vue côté (b) vue du haut

2. La direction aveugle et le mécanisme de couplage

Dans le contexte de l'étude, des contraintes de conception sur les modules T/R imposent d'utiliser une maille de réseau D relativement grande ($D = 0,63\lambda$ à la

fréquence de fonctionnement $f = 10\text{GHz}$). En conséquence, le réseau ne respecte pas la condition de non-apparition du lobe de réseau dans l'espace visible. La Figure 2 représente le coefficient de réflexion actif d'une source du réseau en fonction de l'angle de dépointage θ (plan E), sous l'hypothèse d'un réseau infini. La simulation est réalisée sur HFSS. Le coefficient de réflexion subit une augmentation importante à l'approche de $\theta_{DA} = 35,2^\circ$. Cet angle critique correspond à l'entrée du lobe de réseau dans l'espace visible, illustrée sur le diagramme de la Figure 3. Lorsque $\theta = \theta_{DA}$, les couplages par onde d'espace se recombinaient en phase dans l'axe du lobe de réseau ($-x$), provoquant ainsi l'augmentation du couplage mutuel et la direction aveugle.

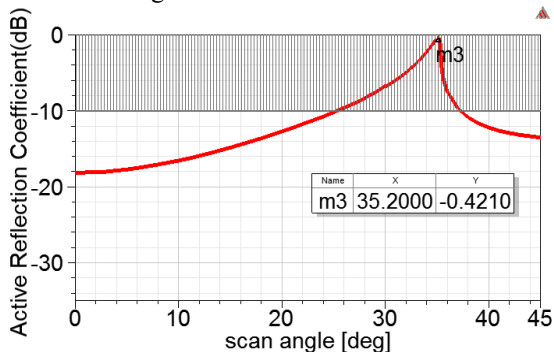


Figure 2 Coefficient de réflexion actif : topologie initiale, réseau infini

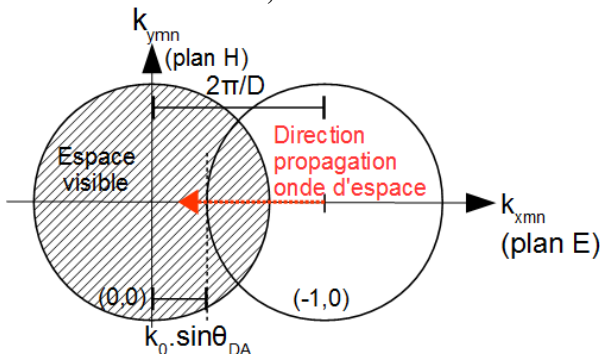


Figure 3 Diagramme de lobe de réseau

Dans le cas d'un réseau fini, la puissance recouplée sur une source dépend fortement de sa position au sein du réseau. Cette corrélation entre couplage et position est illustrée sur la Figure 4, qui représente la variation du coefficient de réflexion actif en fonction de θ pour différentes sources d'un réseau de 20 éléments selon x par 5 éléments selon y . Les sources considérées sont localisées dans le plan E (rangée centrale du réseau, éléments numérotés de 1 à 20). On constate que les sources d'indices plus faibles subissent un couplage relativement élevé, là où les sources d'indices supérieurs ne subissent que peu ou pas de couplage et maintiennent une bonne adaptation d'impédance dans toute la gamme de dépointage. P18 et P20 par exemple ne sont pas sujettes à la direction aveugle. Une conséquence de la nature "directive" du mécanisme de couplage à l'origine de la direction aveugle est donc le caractère "cumulatif" de la puissance couplée. L'onde d'espace se propageant principalement dans la direction du lobe de réseau ($-x$), la puissance couplée à une source donnée est due à la

recombinaison cohérente des contributions de ses homologues d'indices supérieurs. De la même façon, sa propre contribution s'ajoute à la puissance couplée sur les sources d'indices inférieurs.

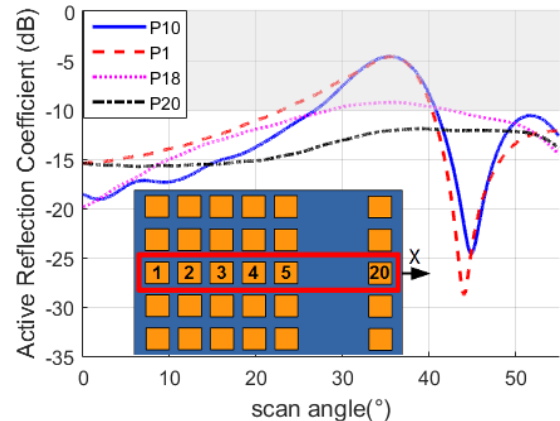


Figure 4 Coefficient de réflexion actif pour quelques sources du réseau 5x20

3. La solution proposée

3.a. Principe

Les sources du réseau sont toutes convenablement adaptées ($|\Gamma| < -10\text{ dB}$) sur la gamme angulaire $[0^\circ-25^\circ]$. Par conséquent, l'objectif principal de l'étude est d'étendre cette gamme de dépointage jusqu'à $\theta_{DA}=35,2^\circ$. La solution proposée ici consiste en l'activation d'un mode de fonctionnement alternatif du réseau lorsque l'angle de dépointage dépasse une certaine valeur critique. Ce mode de fonctionnement supplémentaire est optimisé spécifiquement pour restaurer l'adaptation sur la zone aveugle $[30-35^\circ]$: il est donc sensible à l'angle de dépointage et détériore l'adaptation dans la gamme angulaire initiale $[0-25^\circ]$. Pour cette raison, la solution proposée est basée sur une commutation: la source est inchangée pour des dépointages inclus dans $[0^\circ-30^\circ]$ (configuration *low-scan*), tandis que le second mode de fonctionnement de la source (configuration *high-scan*) est activé dès que $\theta > 30^\circ$.

La configuration *high-scan* est activée par une modification de l'élément rayonnant, dont le but est de permettre la compensation de la puissance couplée par l'onde d'espace grâce à la réflexion intrinsèque au niveau du port d'entrée de la source. En pratique, cela consiste à ajuster la longueur du patch *sup* afin d'atteindre l'opposition de phase entre ondes réfléchies et couplées.

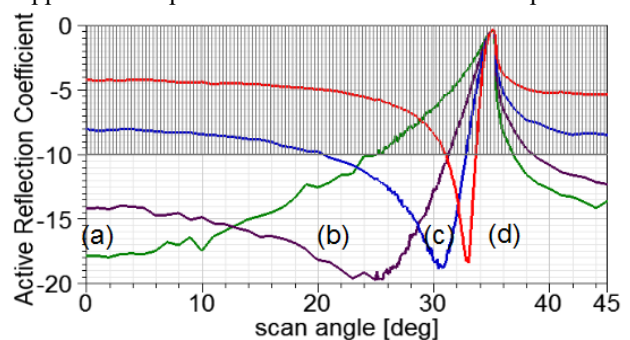


Figure 5 Influence de la longueur de patch *sup*: (a) $L=7.5\text{mm}$, (b) $L=7\text{mm}$, (c) $L=6.5\text{mm}$, (d) $L=5.5\text{mm}$

Dans le cas présent, on est amené à réduire la longueur du patch sup en passant de $L = 7,5\text{mm}$ à $L_{hc} = 5,5\text{mm}$ (Figure 5). Par souci de simplicité, les résultats de la Figure 5 ont été obtenus dans le cas d'un réseau infini. C'est la raison de la remontée brutale du coefficient de réflexion à l'angle θ_{DA} .

3.b. Mise en œuvre

Afin de mettre en œuvre la solution proposée en utilisant un mécanisme de commutation simple, les étapes suivantes ont été effectuées (Figure 6): (1) la longueur du patch *sup* initial est réduite à L_{hc} , (2) une fente rectangulaire ($7,6\text{mm} \times 0,3\text{mm}$) est gravée au centre du patch *sup* afin que sa longueur électrique soit semblable à celle du patch *sup* en configuration *low-scan* ($7,5\text{mm}$), (3) un élément de commutation ON/OFF (une diode pin par exemple) est placé au centre de la fente. Il permet de court-circuiter ou non cette dernière et donc d'ajuster dynamiquement la longueur électrique du patch, en fonction de l'angle de dépointage souhaité (configuration *low-scan* pour l'état OFF, configuration *high-scan* pour l'état ON).

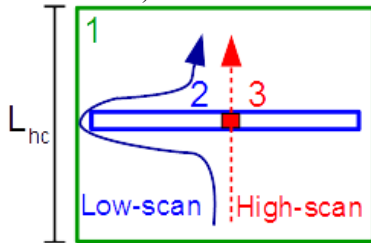


Figure 6 Variations de longueur électrique patch *sup*

3.c. Résultats et discussion

i) Réseau infini

En accord avec les caractéristiques classiques d'une diode PIN, l'interrupteur placé au centre de la fente est modélisé par la résistance $R_{on} = 3 \Omega$ et la capacité $C_{off} = 25\text{fF}$. La variation du coefficient de réflexion actif en fonction du dépointage θ est représentée sur la Figure 7, dans le cas d'un réseau infini.

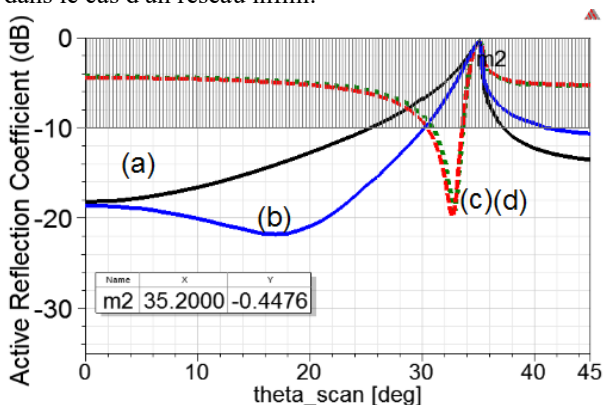


Figure 7 Topologie révisée (réseau infini): (a)réseau initial, (b)low-scan, (c)high-scan, (d) $L = 5.5\text{mm}$

Lorsque l'interrupteur est OFF, la source avec patch *sup* à fente se comporte comme la source d'origine (configuration *low-scan*, courbes bleue et noire). Inversement, lorsque la fente est court-circuitée (interrupteur ON), le comportement angulaire de la

source est identique à celui de la source avec patch *sup* réduit : la source est adaptée dans la zone aveugle (configuration *high-scan*, courbe rouge pointillée).

ii) Réseau fini et commutation uniforme

Afin de prendre en compte la nature cumulative du mécanisme de couplage (soulignée dans la partie 2), l'étape suivante de l'étude est une caractérisation du réseau 5×20 . Dans un premier temps, la solution est mise en œuvre de façon uniforme sur tout le réseau. Les simulations menées dans le cas du réseau fini confirment les tendances observées précédemment. En configuration *low-scan* (switch OFF, Figure 8), le réseau retrouve son fonctionnement initial. Les sources d'indices faibles sont lourdement impactées par le couplage et les sources d'indices supérieurs conservent une bonne adaptation d'impédance sur toute la gamme angulaire.

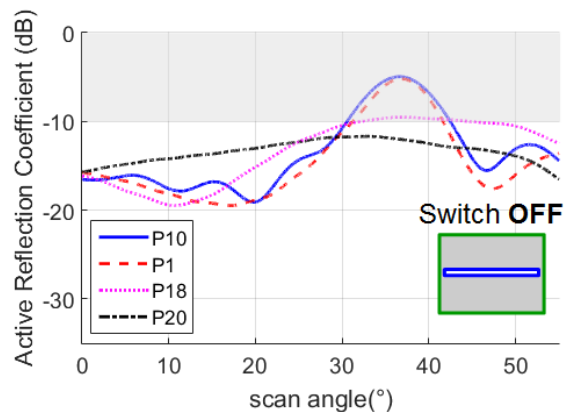


Figure 8 Réseau fini : configuration *low-scan*

En configuration *high-scan* (switch ON, Figure 9), l'augmentation brutale du coefficient de réflexion pour $\theta = \theta_{DA}$ observée dans le cas du réseau infini n'est plus présente. Cette amélioration était en réalité suggérée par l'observation du comportement du réseau fini en zone aveugle sur la Figure 4. Les sources d'indices faibles restent ainsi adaptées jusqu'à l'angle de la direction aveugle, contrairement aux sources d'indices supérieurs dont les performances sont fortement détériorées par rapport au réseau initial.

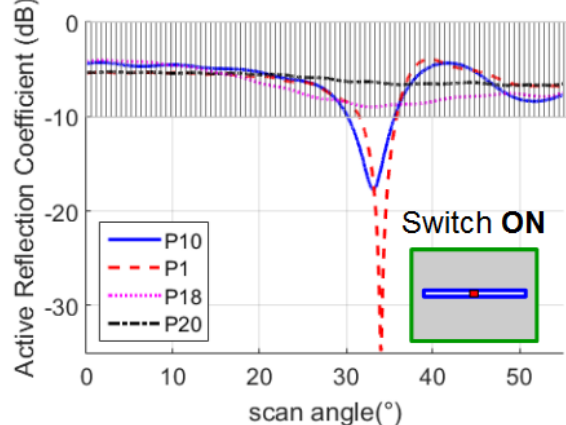


Figure 9 Réseau fini : configuration *high-scan*

iii) Réseau fini et commutation sélective

Comme suggéré dans la partie 2, il est pertinent de faire une distinction entre sources lourdement et

faiblement impactées par la direction aveugle lors de la mise en œuvre de la solution de commutation. Le Tableau 1 renseigne sur l'état souhaitable de l'interrupteur de chaque source, en fonction de l'angle de dépointage voulu. La configuration high-scan n'est pas activée pour les sources d'indices supérieurs (P17-P20). La gamme de dépointage finale est représentée sur la Figure 10, pour un ensemble de sources réparties dans le plan E. Il est utile de noter que la source P16 demeure désadaptée dans la zone aveugle, indépendamment du mode de fonctionnement.

Configuration	Sources		
	1-15	16	17-20
Low-scan [0°-30°]	OFF	OFF	OFF
High-scan [30°-35°]	ON	X	OFF

Table 1 Etat des interrupteurs en fonction θ

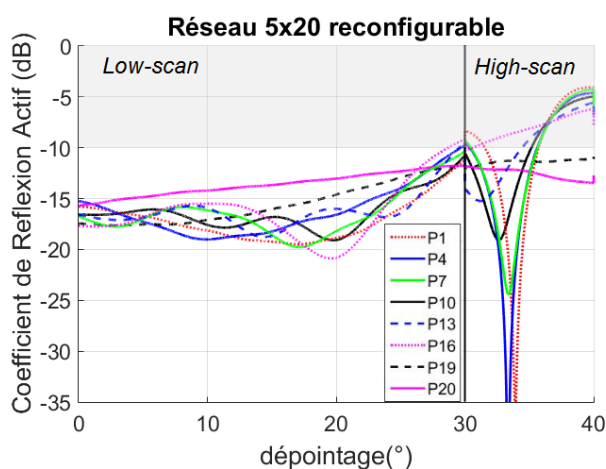


Figure 10 Gammes de fonctionnement combinées

En termes de gain (Figure 11), la topologie révisée permet d'atteindre les performances maximales atteignables (courbes de gain réalisé et de gain intrinsèque confondues) jusqu'à l'angle de la direction aveugle : la chute de gain provoquée par l'entrée du lobe de réseau dans l'espace visible est intrinsèque aux dimensions du réseau et n'est donc pas compensable (la puissance rayonnée est divisée entre lobes principal et de réseau). Cela représente une amélioration de 4° pour la gamme angulaire respectant $G > G_{\max} - 1\text{dB}$.

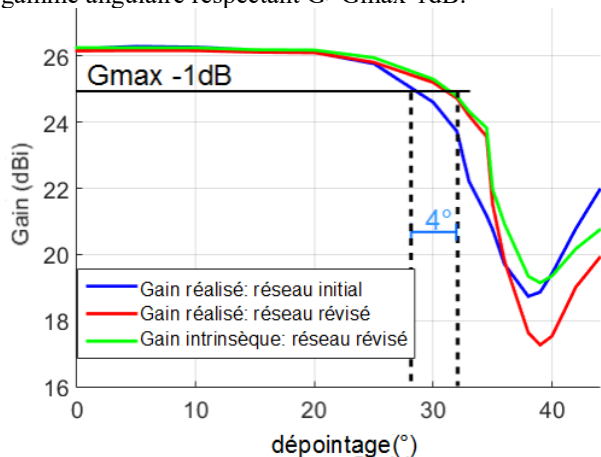


Figure 11 Gain des réseaux d'origine et révisé

Conclusion

Une nouvelle solution permettant d'améliorer les performances d'un réseau sujet à une direction aveugle a été présentée. Cette solution, basée sur une commutation entre deux modes opérationnels de l'élément rayonnant est mise en œuvre dans le cas d'un réseau 5x20 pour valider son principe de fonctionnement. Elle permet d'étendre la gamme de dépointage jusqu'à l'angle théorique de la direction aveugle.

Références

- [1] R.B.Waterhouse, "The use of shorting posts to improve the scanning range of probe-fed microstrip patch phased arrays," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 44, no. 3, pp. 302-309, Mar 1996.
- [2] T.A.Milligan, Modern Antenna Design, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc, 2005, pp.125-128.
- [3] D.Pozar and D.Schaubert, "Scan blindness in infinite phased arrays of printed dipoles," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 32, no. 6, pp. 602-610, Jun 1984.
- [4] A. K. Bhattacharyya, Phased Array Antennas, John Wiley and Sons, Inc, 2006, pp.79-82.
- [5] L.Peng, C.I.Ruan and J.Xiong, "Compact EBG for multi-band applications", in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 60, no. 9, pp. 4440-4444, Sept 2012.
- [6] G.P.Gauthier, A.Courtay and G.M.Rebeiz, "Microstrip antennas on synthesized low dielectric-constant substrates," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 45, no. 8, pp. 1310-1314, Aug 1997.
- [7] A.Wahid, M.Sreenivasan and P.H.Rao, "A CSRR loaded microstrip array antenna with low sidelobe level," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol 14, pp. 1169-1171, 2015.
- [8] E.Rajo-Iglesias, O.Quevedo-Teruel and L.Inclan-Sanchez, "Mutual coupling reduction in patch antenna arrays by using a planar EBG structure and a multilayer dielectric substrate," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 56, no. 6, pp. 1648-1655, Jun 2008.
- [9] Y.Jianfeng, P.Weizheng, W.Yufeng, L.Daxin and C.Yan, "Side lobe reduction in thinned array synthesis using immune algorithm", Microwave and Millimeter Wave Technology, CMMT, 2008, pp.1131-1133.