HAL
open science

Conception et réalisation par impression 3D d'une antenne à ondes de fuite avec faibles lobes secondaires

A. Dorle, R. Gillard, E. Menargues, M. van Der Vorst, E. de Rijk, P. Martin-Iglesias, M. García-Vigueras

To cite this version:

A. Dorle, R. Gillard, E. Menargues, M. van Der Vorst, E. de Rijk, et al.. Conception et réalisation par impression 3D d'une antenne à ondes de fuite avec faibles lobes secondaires. XXIèmes Journées Nationales Microondes, May 2019, Caen, France. hal-02316954

HAL Id: hal-02316954

https://univ-rennes.hal.science/hal-02316954v1

Submitted on 15 Oct 2019

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.

Conception et réalisation par impression 3D d'une antenne à ondes de fuite avec faibles lobes secondaires

A. Dorlé[1], R. Gillard[1], E. Menargues[2], M. van der Vorst[3], E. de Rijk[2], P. Martín-Iglesias[3], M. García-Vigueras[1]

[1]*IETR, UMR CNRS 6164, INSA Rennes, 20 avenue des Buttes de Coësmes, CS 70839, 35708 Rennes Cedex 7*
[2]*SWISSto12, EPFL Innovation Park Building L, Chemin de la Dent d'Oche 1B, CH-1024 Ecublens, SUISSE*
[3]*ESA-ESTEC, Postbus 299, 2200 AG Noordwijk, PAYS-BAS*
aurelie.dorle@insa-rennes.fr, maria.garcia-vigueras@insa-rennes.fr

Résumé *– Cet article propose une antenne à ondes de fuite directive, fonctionnant en bande Ka et présentant un faible niveau de lobes secondaires. La structure se base sur un guide d'onde nervuré à fentes, excité par son mode fondamental* TE_{10}*. L'originalité de cette antenne repose sur la modulation simultanée de la longueur des fentes et de la hauteur de nervure, permettant un contrôle complet de l'illumination complexe. Le procédé d'impression 3D nommé stéréolithographie est ici utilisé pour imprimer un prototype avec faibles lobes secondaires. Les mesures sont également présentées et démontrent une bonne concordance avec les simulations, atteignant un niveau de lobes de - 15.3 dB à 30 GHz.*

1. Introduction

Etudiées depuis des décennies, les antennes à ondes de fuite (ou Leaky-Wave Antennas, LWAs) suscitent un intérêt grandissant en raison de leur forte directivité, bonne compacité et simplicité d'excitation [1], [2]. De plus, le diagramme de rayonnement d'une LWA peut être maîtrisé à la fois en forme et en dépointage, par le contrôle de l'illumination complexe de la surface rayonnante [1], [2]. Ainsi, en modulant de manière appropriée la géométrie de l'antenne, il est possible d'atteindre un faible niveau de lobes secondaires (SLL), comme nécessaire par exemple pour les applications spatiales.

La structure proposée est originale et se base sur un guide d'onde à fentes, chargé par une nervure verticale. La modulation de la longueur des fentes et de la hauteur de nervure permet de contrôler indépendamment l'amplitude et la phase de l'illumination. Les auteurs ont récemment proposé en bande K une structure dérivée, inspirée par [3], et réalisant une double polarisation linéaire [4]. Dans le présent article, le processus de synthèse est méticuleusement détaillé comparé à [4], expliquant plus précisément comment obtenir un faible SLL sans aberration de phase [5]. D'autre part, le design est ici conçu afin d'opérer à plus haute fréquence, en bande Ka.

La stéréolithographie (SLA) permet la fabrication monolithique de cette LWA modulée et donc complexe. L'intérêt du procédé SLA a déjà été prouvé, assurant l'optimisation de performances RF à hautes fréquences tout en conservant un coût moindre [3], [6]. Cet article examine l'utilisation de la SLA à travers un design exigeant en bande millimétrique.

L'article est organisé comme suit. La Section 2 introduit la structure de l'antenne et son principe de rayonnement. La Section 3 étudie trois designs conduisant progressivement à l'antenne avec faible SLL. Enfin, la Section 4 expose les résultats de mesure quand la Section 5 présente les conclusions finales.

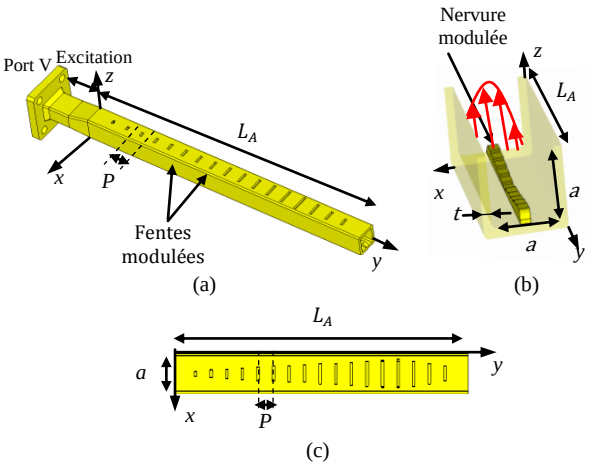

Figure 1. Structure de l'antenne (a) vue globale, (b) vue interne, (c) vue du dessus ($30GHz, a = 6mm, P = 4mm, L_A = 10.8\lambda, t = 1mm$).

2. Contrôle de l'illumination

2.a. Rayonnement du guide nervuré

La LWA proposée avec simple polarisation linéaire est visible en Figure 1. Cette antenne, entièrement métallique, est composée d'un guide d'onde vide autorisant l'énergie à s'échapper par des fentes de longueur variable, entaillées sur la face supérieure, voir Figure 1 (a) et (c). Mise en évidence sur la Figure 1 (b), la nouveauté majeure de cette LWA est amenée par l'insertion d'une nervure verticale, modulée en hauteur, placée sur la paroi inférieure du guide. L'antenne est excitée à son entrée par un simple port guide d'onde, comprenant une transition permettant de passer d'une section rectangulaire standard à une section carrée.

Le seul mode excité et se propageant dans la structure est le fondamental TE_{10}. Ce dernier interagit avec les

fentes de la surface supérieure et produit ainsi un diagramme de rayonnement en polarisation linéaire verticale [3]. La nervure et le réseau de fentes sont tous deux positionnés centrés pour préserver la symétrie de la structure et donc empêcher l'apparition de polarisation croisée dans le plan *ZY*.

Cette LWA est donc caractérisée par une unique onde de fuite, associée au nombre d'onde suivant [7] :

$$k_y^{10}(y) = \beta^V(y) - j\alpha^V(y) \quad (1)$$

La partie réelle $\beta^V(y)$ est la constante de phase. La partie imaginaire $\alpha^V(y)$ est appelée taux de fuite. Ce dernier exprime la quantité d'énergie s'échappant du guide à travers les fentes.

La constante de phase et le taux de fuite influencent tous deux le diagramme de rayonnement de l'antenne car ils agissent sur l'illumination $M^V(y)$ de la surface rayonnante [8]. La constante de phase détermine l'angle de dépointage du diagramme par $\theta_{RAD}^V = \text{asin}\,(\beta^V/k_0)$ [7]. Le taux de fuite affecte l'allure du diagramme conformément à la formule simplifiée suivante, dépendant de l'efficacité de rayonnement η_{RAD}^V [7]:

$$\alpha^V(y) = \frac{0.5 \times |M^V(y)|^2}{\frac{1}{\eta_{RAD}^V}\int_0^{L_A}|M^V(\tau)|^2 d\tau - \int_0^y |M^V(\tau)|^2 d\tau} \quad (2)$$

2.b. Contrôle de l'illumination complexe

D'après la partie précédente, l'objectif consiste donc à moduler stratégiquement β^V et α^V le long de l'axe *y,* afin de contrôler le diagramme de rayonnement en dépointage et en forme réciproquement. La solution est ici amenée par la mise en place de deux paramètres variables le long de cet axe : la longueur des fentes et la hauteur de nervure.

D'une part, le taux de fuite peut être ajusté en modifiant la longueur des fentes, comme prouvé en Figure 2 (a). Cependant, cette même figure montre que la longueur de fente impacte également la constante de phase. Cette conséquence inévitable conduit à une distribution $\beta^V(y)$ incontrôlée. De ce fait, un degré de liberté supplémentaire est requis pour garantir le contrôle de la constante de phase.

Ainsi, d'autre part, la nervure est ajoutée pour sa capacité à modifier la constante de phase, comme montré sur la Figure 2 (b). Par conséquent, le contrôle de la distribution $\beta^V(y)$ est garanti par ce nouveau degré de liberté.

Pour obtenir le diagramme de rayonnement voulu, la première étape consiste à définir $M^V(y)$. Par exemple, un faible SLL peut être obtenu avec une illumination cosinus [7], [8]. A partir de l'illumination choisie et l'efficacité de rayonnement, $\alpha^V(y)$ est déterminé selon (2). Parallèlement, les variations résultantes de $\beta^V(y)$ sont compensées (pour atteindre $\beta^V(y) = \beta^V$) afin de permettre à toutes les fentes de rayonner dans la même direction et éviter l'aberration de phase [5]. La valeur de β^V est choisie pour avoir le dépointage désiré. Les conditions sur $\alpha^V(y)$ et $\beta^V(y)$ doivent être satisfaites simultanément grâce à la modulation des fentes et de la nervure.

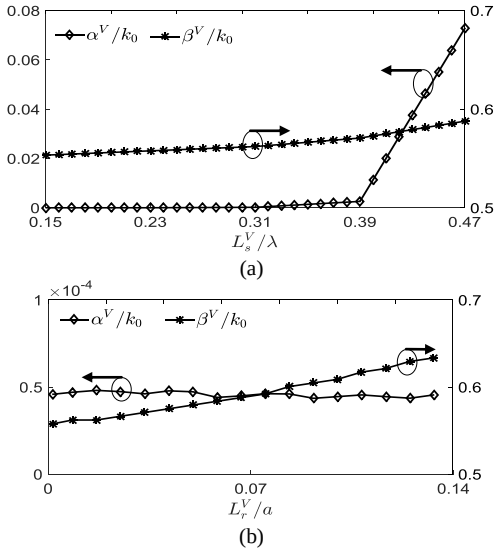

Figure 2. Taux de fuite (Np/rad) et constante de phase normalisés en fonction de (a) la longueur de fente (L_r^V = 0 mm), (b) la hauteur de nervure (L_S^V = 2.65 mm). Les résultats sont obtenus à 30 GHz avec HFSS, suivi d'une interpolation.

3. Réduction des lobes secondaires

Trois LWAs en bande Ka sont considérées dans cette section, illustrant un processus pas à pas jusqu'à l'antenne optimale à faible SLL. Le point de départ est une antenne classique non modulée ayant de forts lobes secondaires. Pour le second design, les fentes sont modulées pour réaliser une illumination cosinus grâce au contrôle du taux de fuite. Enfin, la nervure modulée est ajoutée pour le dernier design, visant à améliorer le SLL.

La fréquence centrale est choisie à 30 GHz, car souvent utilisée pour les communications satellites. Les grandeurs principales sont données en légende de la Figure 1. La constante de phase visée $\beta^V = 0.6k_0$ définit le dépointage à 36.9°. L'efficacité de rayonnement théorique est sélectionnée à 95 % pour conserver une antenne compacte et un fort gain. La longueur des fentes est choisie afin de rester sous la résonance.

3.a. Antenne uniforme sans nervure

Ce premier design considère une antenne uniforme non modulée. Toutes les fentes sont alors identiques, ce qui se traduit par $\alpha^V(y) = \alpha^V$. L'illumination est donc exponentielle et $\eta_{RAD}^V = 1 - \exp\,(-2\alpha^V L_A)$ [7]. Par conséquent, le taux de fuite peut être calculé pour avoir une efficacité de 95 %, et correspond à une longueur de fente de 4.45 mm.

De par l'uniformité de la structure, la constante de phase du guide est également intrinsèquement constante selon y (soit $\beta^V(y) = \beta^V$). Cette valeur β^V n'est pas identique à celle d'un guide fermé à cause de la présence des fentes. Ainsi, β^V est déterminée en simulant le guide incluant les fentes de 4.45 mm. Le résultat donne un angle de dépointage associé de 36.8°. L'antenne uniforme proposée ici n'inclut pas de nervure. En effet, la nervure n'est pas nécessaire pour avoir $\beta^V(y) = \beta^V$ puisque cette relation est naturellement vérifiée pour ce design.

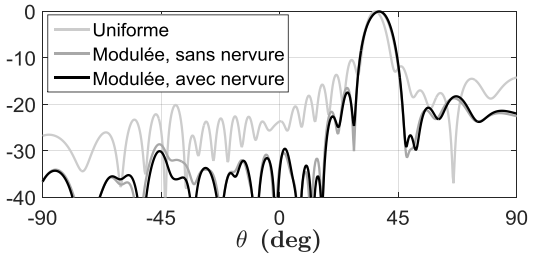

Figure 3. Diagramme de rayonnement normalisé (dB), polarisation theta, plan *ZY*.

Une fois la dimension de fente déterminée, un design imprimable par SLA est implémenté : le port d'excitation est ajouté, l'extrémité de l'antenne est laissée ouverte et les angles droits sont arrondis (détails en Section 4.). Le diagramme de rayonnement simulé est donné en Figure 3. L'efficacité de rayonnement obtenue est de 94.8 %, proche de celle attendue. La différence est explicable à l'aide de la base de données interpolant le taux de fuite, mais aussi par les modifications réalisées pour avoir un design réalisable. La directivité finale est de 16.83 dB alors que le fort niveau de lobes secondaires est mis en évidence à - 10.42 dB. Il n'y a pas de polarisation croisée dans le plan *ZY* grâce à la symétrie de la structure.

3.b. Antenne modulée sans nervure

Dans le but d'améliorer l'antenne précédente, une illumination en cosinus est ici exigée pour atteindre un faible SLL. Cette dernière est réalisée en modulant correctement la longueur des fentes selon *y*, en accord avec le taux de fuite nécessaire calculé avec (2). L'illumination et le $\alpha^V(y)$ associé sont donnés en Figure 4 (a), avec le design des fentes correspondant en (b).

Du fait de la modulation des fentes, la constante de phase $\beta^V(y)$ n'est plus constante selon *y*, référencée comme « distordue » en Figure 4 (a). Ainsi, une aberration de phase incontrôlée est ici présente.

Le diagramme simulé de l'antenne modulée sans nervure est montré en Figure 3. L'efficacité de rayonnement reste similaire à celle du design précédent, à 94 %, prouvant la possibilité d'obtenir la même propriété avec modulation. Selon la Figure 3, la largueur du faisceau principal est augmentée, comme attendu par comparaison de l'actuelle illumination cosinus avec la précédente exponentielle [8]. Pour la même raison, on retrouve une plus faible directivité à 16.59 dB. Enfin, l'intérêt principal de cette antenne réside dans la réduction de 6 dB du SLL, descendant à - 16.43 dB.

La modulation des fentes selon l'axe *y* permet d'atteindre l'objectif d'une LWA avec faibles lobes secondaires. Néanmoins, une amélioration supplémentaire est attendue si l'aberration de phase mise en évidence ici peut être corrigée et supprimée.

3.c. Antenne modulée avec nervure

La dernière antenne vise à corriger l'aberration de phase causée par la modulation des fentes, à l'aide de l'insertion d'une nervure. En choisissant précisément la hauteur de la nervure pour chaque position *y*, il est possible de corriger la distorsion de chaque fente (voir Section 2.b.) et donc de retrouver $\beta^V(y) = \beta^V = 0.6k_0$.

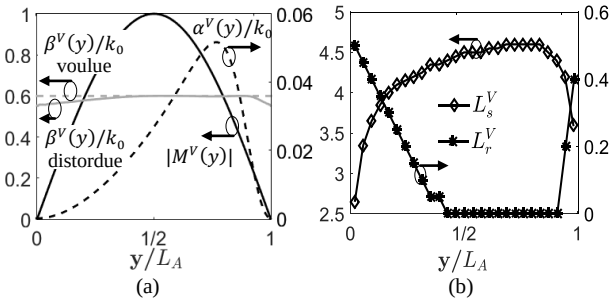

Figure 4. (a) Illumination (lin), taux de fuite (Np/rad) et constantes de phase, (b) Longueur des fentes et hauteur de nervure (mm) pour l'antenne modulée.

Pour aller plus loin, deux observations sont extraites de la Figure 2 (b). D'abord, la hauteur de la nervure influence peu le taux de fuite. Grâce à cette caractéristique, la modulation de la nervure et celle des fentes peuvent être conçues indépendamment. La première étape consiste à trouver la dimension des fentes comme en Section 3.b., alors que la seconde est consacrée au design de la nervure.

Ensuite, la Figure 2 (b) permet de dégager une règle de conception. Effectivement, la relation entre la constante de phase et la hauteur de nervure semble être linéaire, vérifiant la loi suivante :

$$\beta^V/k_0 = 0.5136 * L_r^V/a + \beta_{nr}^V \qquad (3)$$

Dans la formule (3), β_{nr}^V représente la constante de phase dans le guide en présence des fentes mais sans nervure. Cette valeur dépend de la taille de fente et correspond exactement à celle référencée comme « distordue » en Figure 4 (a). En utilisant (3) avec $\beta^V = 0.6\,k_0$, la hauteur de la nervure selon *y* peut être calculée. La modulation résultante est présentée en Figure 4 (b).

Le diagramme simulé de l'antenne modulée avec nervure est donné en Figure 3. A nouveau, l'efficacité de rayonnement est de 93.9%, approchant la valeur idéale et prouvant que la nervure n'impacte pas le taux de fuite. La directivité, de 16.55 dB, et la largeur du faisceau, restent constantes en comparaison avec l'antenne qui précède. Finalement, le SLL a diminué de 0.96 dB, pour atteindre un niveau de – 17.39 dB. Les dernières propriétés sont conformes à ce qui était attendu. Effectivement, en corrigeant l'aberration de phase, une illumination cosinus optimisée est obtenue : le rayonnement dans les lobes secondaires diminue et le faisceau principal devient plus large comparé à l'antenne uniforme de la Section 3.a. [8].

En conclusion, la correction de l'aberration de phase a été permise par l'insertion d'une nervure modulée, assurant la diminution des lobes secondaires.

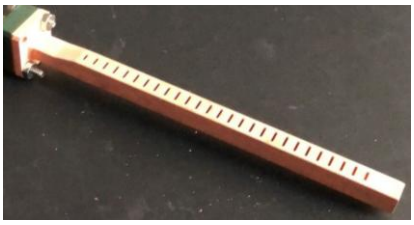

Figure 6. Prototype de l'antenne modulée avec nervure, réalisé par SLA.

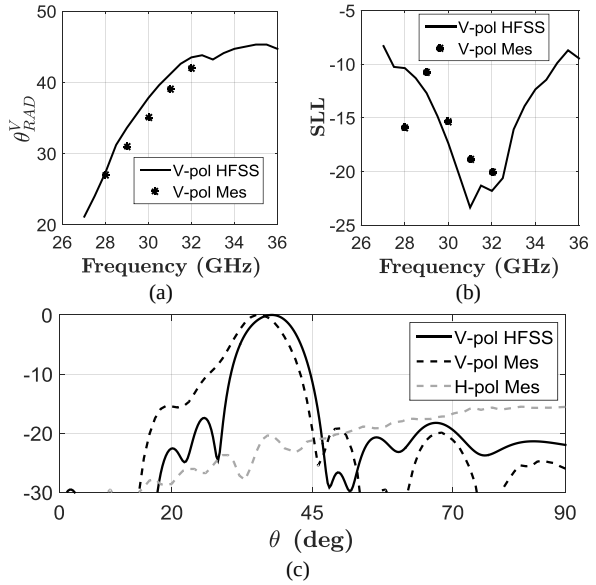

Figure 7. Résultats de mesure de l'antenne modulée avec nervure (a) angle de dépointage (°), (b) SLL (dB), (c) diagramme normalisé (dB), polarisation theta, plan *ZY*.

4. Résultats expérimentaux

Pour confirmer les performances de la dernière antenne proposée, un prototype en SLA a été imprimé par la société SWISSto12 [3], [4], [6]. La pièce résultante est montrée en Figure 6. A de telles fréquences, la fabrication de tout système RF devient complexe. En effet, puisque les dimensions diminuent, le procédé de fabrication se doit de procurer de faibles tolérances et une forte précision. Par ailleurs, la surface nécessite d'être aussi lisse que possible. De ce fait, une méthode classique par soustraction de matière conduirait à une antenne coûteuse, impliquant des assemblages volumineux, dus à la complexité de la structure avec nervure modulée [6]. A l'opposé, la SLA permet une fabrication précise et monolithique de l'antenne proposée, tout en conservant un faible coût et une pièce légère. D'abord, une version non métallique du prototype est imprimée couche par couche, par solidification d'un polymère par un laser UV. La surface de la pièce obtenue est ensuite traitée. Finalement l'antenne est immergée dans un bain chimique pour être complètement cuivrée. Afin d'assurer la meilleure métallisation possible lors du processus de fabrication, les angles droits ont été arrondis (comme cela avait été anticipé dans les simulations).

Les résultats de mesure sont présentés en Figure 7. L'adaptation de l'antenne est sous les – 10 dB sur la bande [28 - 40] GHz. L'angle de dépointage mesuré en Figure 7 (a) suit la tendance croissante annoncée par la simulation, conformément à la nature leaky-wave de l'antenne [7]. Les valeurs semblent décalées en fréquence, ce qui s'explique par la réduction de la section du guide, causée par un rétrécissement pendant la fabrication SLA. La directivité mesurée est de 16.2 dB à 30 GHz, soit seulement 0.36 dB sous la simulation. Comme montré en Figure 7 (b), un faible niveau de lobes secondaires est en effet atteint par notre antenne, promouvant l'intérêt de l'insertion de la nervure modulée dans la structure. Dans le plan *ZY*, exposé en Figure 7 (c), le diagramme de rayonnement confirme les observations précédentes, avec un dépointage et un SLL plus élevé qu'en simulation. Néanmoins, la polarisation croisée est très faible, sous les – 20 dB dans le faisceau principal, et ce sur toute la bande de mesure entre 28 GHz et 32 GHz. Cela souligne la forte précision obtenue grâce à la fabrication 3D par SLA, réussissant à produire la symétrie nécessaire à notre antenne dans le plan *ZY*.

5. Conclusion

Dans cet article, le contrôle flexible de l'illumination complexe d'une antenne à ondes de fuite est mis en évidence. Le concept de modulation est développé à 30 GHz et est démontré par la fabrication 3D d'un prototype avec faibles lobes secondaires.

6. Remerciements

Les auteurs remercient Mr. E. Van Der Houwen et Mr. L. Rolo, de l'ESA-ESTEC, pour leur contribution aux mesures en chambre anéchoïque. Ces travaux sont soutenus par une bourse ESA NPI et par Rennes Métropole avec la bourse AIS 17C0481.

Références

[1] N. Javanbakht, M. S. Majedi et A. R. Attari, « Thinned array inspired quasi-uniform leaky-wave antenna with low side-lobe level », IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 2992-2995, 2017.

[2] F. L. Whetten et C. A. Balanis, « Meandering long slot leaky-wave waveguide-antennas », IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 39, no. 11, pp. 1553-1560, Novembre 1991.

[3] M. García-Vigueras, E. Menargues, T. Debogovic, E. de Rijk et J. R. Mosig, « Cost-effective dual-polarised leaky-wave antennas enabled by three-dimensional printing », IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 11, no. 14, pp. 1985-1991, Novembre 2017.

[4] A. Dorlé, et al., « Additive Manufacturing of Modulated Triple-Ridge Leaky-Wave Antenna », IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 11, pp. 2123-2127, Novembre 2018.

[5] A. R. Mallahzadeh et M. H. Amini, « Design of a leaky-wave long slot antenna using ridge waveguide », IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 8, no. 10, pp. 714-718, Juillet 2014.

[6] J. S. Silva, M. García-Vigueras, T. Debogović, J. R. Costa, C. A. Fernandes et J. R. Mosig, « Stereolithography-Based antennas for satellite communications in Ka-band », Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 4, pp. 655-667, Avril 2017.

[7] A. A. Oliner et D. R. Jackson, « Leaky-wave antennas », Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2007.

[8] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, Second ed., John Wiley & Sons, Inc, 1997.