



HAL
open science

Métasurfaces à faible densité pour antennes reconfigurables

Vladislav Popov, Badreddine Ratni, Shah Nawaz Burokur, Fabrice Boust

► **To cite this version:**

Vladislav Popov, Badreddine Ratni, Shah Nawaz Burokur, Fabrice Boust. Métasurfaces à faible densité pour antennes reconfigurables. 16èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Nov 2020, Toulouse, France. hal-04293697

HAL Id: hal-04293697

<https://hal.parisnanterre.fr/hal-04293697v1>

Submitted on 6 Feb 2025

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.

Métasurfaces à faible densité pour antennes reconfigurables

Vladislav Popov¹, Badreddine Ratni², Shah Nawaz Burokur² et Fabrice Boust³

¹SONDRA, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, F-91190, Gif-sur-Yvette, France

²LEME, UPL, Univ Paris Nanterre, F92410 Ville d'Avray, France

³DEMR, ONERA, Université Paris-Saclay, F-91123, Palaiseau, France
Fabrice.Boust@onera.fr

Résumé — Les métasurfaces reconfigurables souffrent souvent de pertes Joule et de lobes secondaires élevés. Nous présentons ici une méthodologie pour concevoir des métasurfaces à faible densité dont le comportement est fortement non local. Il devient ainsi possible de diminuer le nombre d'éléments accordables ainsi que le niveau des lobes parasites. Cette approche est illustrée sur une configuration type reflect-array fonctionnant à 10 GHz.

I. INTRODUCTION

Les métasurfaces ont été introduites comme une version 2D des métamatériaux. Naturellement, leurs propriétés ont été décrites via des impédances de surface qui sont des fonctions continues des coordonnées spatiales (cf. par exemple [1]). Dans ce contexte le nombre de motifs est nécessairement assez élevé (typiquement 64 par λ^2). Cette approche a permis un grand nombre de réalisations telles que la réflexion anormale, la manipulation de la polarisation, la conversion d'une onde plane en onde de surface... Un caractère reconfigurable peut être conféré à ces métasurfaces, notamment dans le domaine microondes en introduisant des éléments accordables comme des diodes PIN ou varactor. Toutefois, les performances des métasurfaces reconfigurables restent le plus souvent très modestes notamment au niveau de l'efficacité. Il y a deux raisons à cela :

- un grand nombre d'éléments reconfigurables est à l'origine de pertes Joule élevées ;
- la méthodologie de conception utilisée tend à conserver la composante normale du vecteur de Poynting ce qui conduit soit à des lobes parasites [2] soit à des pertes supplémentaires [3].

Nous avons donc cherché à pallier ces deux inconvénients en développant des métasurfaces à faible densité (typiquement 10 par λ^2) et une conception autorisant de fortes dispersions spatiales.

II. METHODOLOGIE

Les premières métasurfaces à faible densité développées sont les métaréseaux [4]. Ils se présentent comme des lignes de motifs, petits devant la longueur d'onde, deux lignes étant séparées par une distance de l'ordre de $\lambda/2$ ou $\lambda/4$. Il est ainsi possible de définir des impédances linéiques pour ces lignes mais il faut un calcul de réseaux sans approximation pour obtenir la réponse de de l'ensemble de ces lignes. Ces métaréseaux permettent d'obtenir des réflexions anormales quasi-parfaites, pour des grands angles de réflexion, inatteignables avec des

métasurfaces standards [5]. Les métaréseaux sont toutefois généralement limités à des surfaces planes éclairées par des ondes planes (le formalisme qui leur est attaché suppose l'existence d'une périodicité).

La démarche proposée permet de pallier ces limitations. Pour l'expliquer, nous considérons une géométrie 2D, le cas d'une polarisation TE et la configuration de la figure 1. Il s'agit d'un ensemble de N fils chargés (à une échelle très sub-longueur d'onde) placés sur un substrat métallisé sur la face arrière et éclairé par une onde incidente quelconque ($E_x^{(ref)}(\mathbf{r})$).

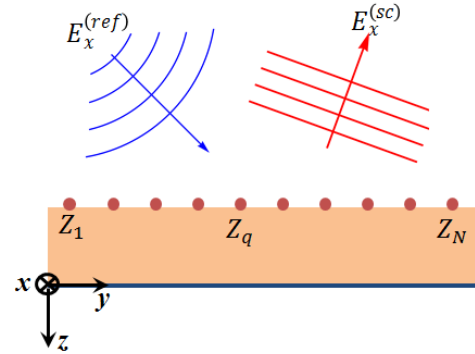


Fig. 1. Schéma de la configuration.

Le champ diffracté par l'échantillon peut s'écrire :

$$E_x^{(sc)}(\mathbf{r}) = E_x^{(ref)}(\mathbf{r}) + \sum_{q=1}^N G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_q) I_q \quad (1)$$

I_q est le courant induit par l'onde incidente dans le fil q et $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_q)$ la fonction de Green associée à ce fil. Le courant I_q est relié à l'onde incidente via la loi d'Ohm qui s'écrit dans ce cas :

$$Z_q I_q = E_x^{(exc)}(\mathbf{r}_q) - Z_q^{(in)} I_q - \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq q}}^N Z_{qp}^{(m)} I_p \quad (2)$$

$E_x^{(exc)}$ est la somme du champ incident et du champ réfléchi par le substrat métallisé sur la face arrière. Les impédances $Z_{qp}^{(m)} = -G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_q)$ traduisent les couplages entre fils et ne sont fonction que des caractéristiques géométriques de la configuration. En revanche, Z_q est fonction des impédances qui sont réparties le long du fil ($Z_q^{(in)}$ est simple l'impédance d'entrée du fil qui ne dépend que de son rayon). Un choix judicieux de ces impédances permet *via* l'équation (2) de contrôler les courants I_q et *in fine* le champ diffracté. En pratique, les fonctions de Green sont calculées numériquement par éléments finis et les impédances réparties sur les fils qui contribuent à Z_q sont choisies pour satisfaire une contrainte sur $E_x^{(sc)}$ à l'aide d'une méthode d'optimisation. Cette procédure permet de déterminer le jeu d'impédances nécessaire pour, par exemple, réfléchir l'énergie incidente dans une direction

donnée. On peut également créer plusieurs faisceaux ou chercher à focaliser l'énergie réfléchie.

III. ILLUSTRATION

Pour illustrer la méthode, nous avons choisi une métasurface composée de 21 lignes espacées de 15 mm, placées sur un substrat d'épaisseur totale 2.5 mm et de permittivité 2.2 dont la face arrière est métallisée. Les lignes sont chargées par des diodes varactors selon le motif présenté fig. 2. Compte tenu des capacités relativement élevées des diodes varactors disponibles, nous avons été amenés à ajouter un ruban métallique sur un niveau inférieur pour conférer à l'ensemble l'impédance requise.

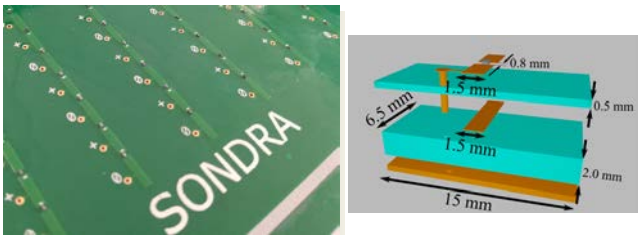


Fig. 2. Photographie de la métasurface et schéma du motif élémentaire.

Pour mettre en œuvre la procédure présentée plus haut, il est nécessaire de connaître précisément la relation entre l'impédance linéique et la tension appliquée aux diodes. Pour cela, une tension identique est appliquée à toutes les colonnes et on mesure le coefficient de réflexion spéculaire. La comparaison avec une simulation 3D de la cellule élémentaire assortie de conditions de périodicité permet d'établir la relation entre la capacité du varactor et la tension appliquée. Ensuite, l'utilisation des expressions présentées dans [6] permet de calculer l'impédance linéique. La configuration de test retenue est de type « reflect-array » (Fig. 3).

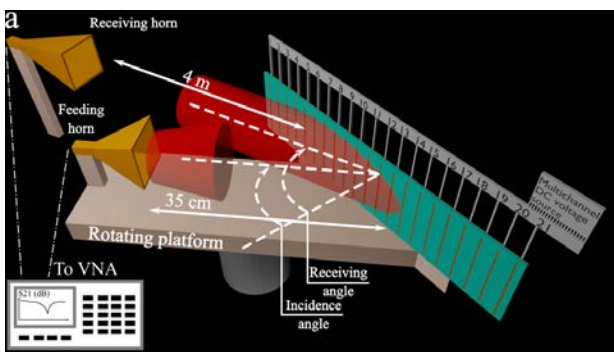


Fig. 3. Schéma de la configuration expérimentale.

Les résultats présentés dans la Fig. 4 illustrent la capacité de diriger le faisceau réfléchi dans différentes directions ou de réfléchir deux faisceaux, l'un étant maintenu dans une direction fixe et l'autre balayant différents angles. Dans les deux cas la fréquence est fixée à 10 GHz ; pour la Fig. 4a l'angle d'incidence est de 45° tandis que pour la Fig. 4b, l'onde éclaire l'échantillon sous incidence normale.

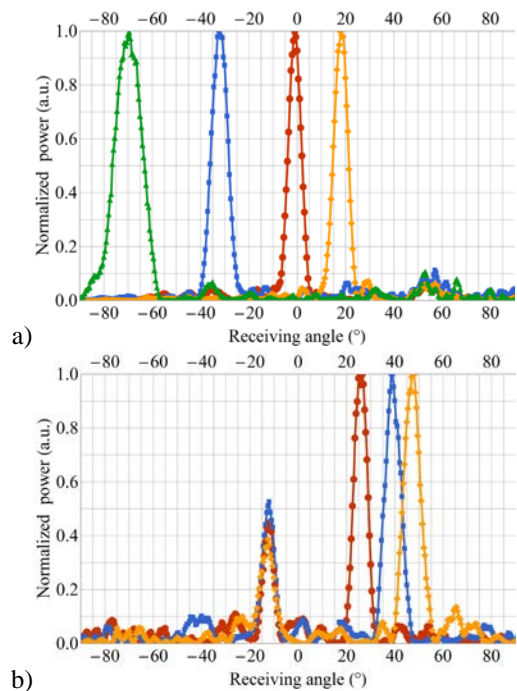


Fig. 4. Illustration de la capacité à réfléchir le faisceau incident dans différentes directions (a) ou de réfléchir deux faisceaux, l'un étant maintenu dans une direction fixe (b).

IV. CONCLUSION

Les métasurfaces denses associées à un formalisme qui conserve la composante normale du vecteur de Poynting limitent les performances accessibles. La démarche proposée permet de concevoir des métasurfaces à faible densité avec au besoin un comportement fortement non local. Cette possibilité permet, par exemple, de diminuer le niveau des lobes secondaires dans des configurations type reflect-array. En outre, une diminution du nombre d'éléments permet, dans le cas de systèmes reconfigurables, de réduire les pertes associées aux éléments accordables. La démarche proposée est très générale et peut s'appliquer à des antennes conformes ou à la focalisation en champ proche.

REFERENCES

- [1] S. A. Tretyakov, "Metasurfaces for general transformations of electromagnetic fields," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 373, 2015.
- [2] V. S. Asadchy, M. Albooyeh, S. N. Tsvetkova, A. Díaz-Rubio, Y. Ra'di, and S. A. Tretyakov, "Perfect control of reflection and refraction using spatially dispersive metasurfaces," *Physical Review B*, vol. 94, p. 075142, 08/19/ 2016.
- [3] N. M. Estakhri and A. Alù, "Wave-front Transformation with Gradient Metasurfaces," *Physical Review X*, vol. 6, p. 041008, 10/14/ 2016.
- [4] Y. Ra'di, D. L. Sounas, and A. Alù, "Metagratings: Beyond the Limits of Graded Metasurfaces for Wave Front Control," *Physical Review Letters*, vol. 119, p. 067404, 08/10/ 2017.
- [5] V. Popov, F. Boust, and S. N. Burokur, "Constructing the Near field and Far field with Reactive Metagratings: Study on the Degrees of Freedom," *Physical Review Applied*, vol. 11, p. 024074, 02/28/ 2019.
- [6] V. Popov, M. Yakovleva, F. Boust, J.-L. Pelouard, F. Pardo, and S. N. Burokur, "Designing Metagratings via Local Periodic Approximation: From Microwaves to Infrared," *Physical Review Applied*, vol. 11, p. 044054, 04/17/ 2019.