



**HAL**  
open science

## Réduction des réflexions parasites produites par des panneaux à modulation périodique d'impédance de surface

H. Haddad, Renaud Loison, R. Gillard, A. Harmouch, A. Jrad

► **To cite this version:**

H. Haddad, Renaud Loison, R. Gillard, A. Harmouch, A. Jrad. Réduction des réflexions parasites produites par des panneaux à modulation périodique d'impédance de surface. Journées Nationales Micro-ondes, May 2019, Caen, France. hal-02430063

**HAL Id: hal-02430063**

**<https://hal.science/hal-02430063v1>**

Submitted on 7 Jan 2020

**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.

## Réduction des réflexions parasites produites par des panneaux à modulation périodique d'impédance de surface

H. Haddad<sup>1</sup>, R. Loison<sup>1</sup>, R. Gillard<sup>1</sup>, A. Harmouch<sup>2</sup>, A. Jrad<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IETR, UMR CNRS 6164, INSA Rennes, 20 avenue des Buttes de Coësmes, CS 70839, 35708 Rennes Cedex 7

<sup>2</sup>CRSI, Faculty of engineering, Lebanese University, EDST, 1300, Tripoli, Lebanon

<sup>3</sup>LEPA, Faculty of Sciences, Lebanese University, EDST, 1301, Tripoli, Lebanon  
Renaud.loison@insa-rennes.fr

**Résumé** – Cette communication propose une nouvelle méthodologie pour mieux contrôler le rayonnement de panneaux plans réfléchissants à modulation périodique d'impédance de surface. Il s'agit en particulier de limiter les réflexions parasites associées aux harmoniques de Floquet d'ordre supérieur. L'approche s'appuie sur la définition de paramètres permettant d'évaluer a priori le potentiel des motifs périodiques candidats et est validée par des simulations électromagnétiques.

### 1. Introduction

La modulation d'impédance de surface (ou SIM en anglais) est fréquemment utilisée en électromagnétisme, dans les métasurfaces [1], les réseaux réflecteurs [2] ou les antennes à onde de fuite [3], pour contrôler une onde à rayonner. Dans le cas particulier des panneaux plans réfléchissants à SIM (aussi appelés métamiroirs), une modulation périodique est ainsi utilisée pour rediriger une onde incidente dans une direction autre que la direction spéculaire, défiant ainsi les lois classiques de la réflexion [4]. Malheureusement, la contrainte de périodicité conduit à l'excitation d'harmoniques de Floquet, qui se manifestent par des réflexions parasites dans des directions non désirées [5]. Dans cette communication, une méthodologie est proposée pour aboutir à une mise en œuvre limitant cet inconvénient. Dans la partie 2 de cette communication, la problématique générale est posée et les équations fondamentales définissant l'apparition des harmoniques de Floquet sont rappelées. Dans la partie 3, il est montré que le niveau de ces harmoniques est fortement dépendant de la mise en œuvre pratique utilisée. Finalement, la partie 4 s'appuie sur les observations réalisées pour proposer des règles pratiques de mise en œuvre limitant l'excitation des harmoniques de Floquet. Deux paramètres sont en particulier identifiés dont le rôle s'avère essentiel dans cette opération.

### 2. Problème étudié

La Figure 1 présente la géométrie générale du problème 2D étudié. Une onde plane TM (champ magnétique selon  $x$ ) arrive avec une incidence  $\theta_i$  sur un panneau réfléchissant horizontal présentant une modulation d'impédance selon l'axe  $(O,y)$ . Ici,

l'impédance considérée est purement réactive et la modulation peut donc être ramenée à une simple variation avec  $y$  de la phase du coefficient de réflexion  $\Gamma$  (coefficient de réflexion défini localement). Pour rediriger l'onde réfléchie dans la direction  $\theta_r$ , cette variation de phase doit satisfaire :

$$d\phi_r/dy = k_0(\sin\theta_r - \sin\theta_i) \quad (1)$$

où  $k_0$  est le nombre d'onde dans le vide et  $\phi_r$  la phase de  $\Gamma$ . La modulation obtenue est périodique de période :

$$T_y = \lambda_0(\sin\theta_r - \sin\theta_i) \quad (2)$$

avec  $\lambda_0 = 2\pi/k_0$ .

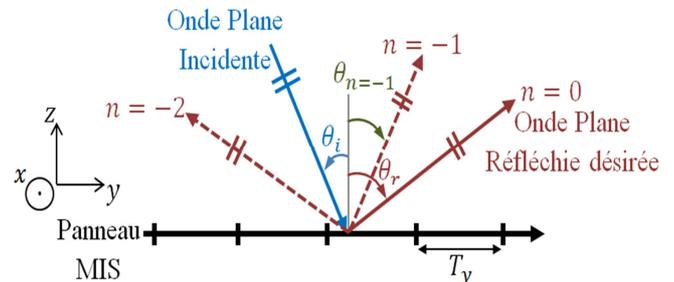


Figure 1. Problème étudié

Par suite, compte tenu de la périodicité, le champ réfléchi se décompose sur une série d'harmoniques de Floquet. Le mode d'ordre  $n$  est caractérisé par une direction de réflexion:

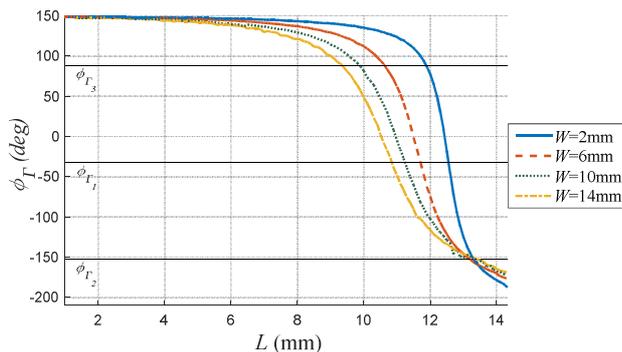
$$\theta_n = \arcsin(\sin\theta_r + n\lambda_0/T_y) \quad (3)$$

Le cas  $n=0$  correspond à la direction de réflexion visée, les autres s'apparentant à des réflexions parasites non désirées.

### 3. Impact de la mise en œuvre pratique sur le niveau des réflexions parasites

La façon de réaliser en pratique la modulation s'avère essentielle dans le contrôle du niveau de ces réflexions parasites. Pour le montrer, on choisit un cas test avec  $\theta_i=0$  et  $\theta_r=60^\circ$ , ce qui, d'après (2), conduit à  $T_y = 1,154\lambda_0$ . La fréquence d'opération est fixée à  $f_0=8$  GHz. On s'intéresse à une mise en œuvre discrète, dans

laquelle la modulation est produite grâce à des dipôles microruban (longueur  $L$  selon  $y$  et largeur  $W$ ) imprimés sur un substrat diélectrique ( $h=1,6$  mm;  $\epsilon_r=2,17$ ) au-dessus d'un plan de masse. L'espacement entre les éléments (ou maille du réseau) est fixé à  $d=0,385\lambda_0$ , ce qui donne 3 motifs par période  $T_y$ . Dans la suite, on désignera  $T_y$  par l'appellation macro-période pour bien faire la distinction avec la maille du réseau  $d$ . La figure 2 présente la phase du coefficient de réflexion associé au dipôle en fonction de sa longueur  $L$  et pour 4 valeurs possibles de sa largeur  $W$ . Pour la simulation, le dipôle est placé en environnement infini périodique (période égale à la maille  $d$ ) et est illuminé sous incidence normale.



**Figure 2. Coefficient de réflexion sur le dipôle en fonction de sa longueur  $L$  et pour 4 valeurs possibles de sa largeur  $W$ .**

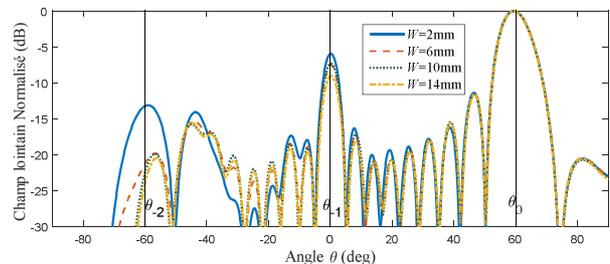
On remarque que la gamme de phase synthétisable est supérieure à  $317^\circ$ , quelle que soit la largeur  $W$ . De façon classique, une largeur faible conduit à une gamme de phase plus élevée, au prix toutefois d'une sensibilité également plus forte (pente de la courbe plus importante).

L'utilisation de 3 motifs par macro-période  $T_y$  impose un incrément de phase de  $120^\circ$  entre 2 motifs consécutifs. Les lignes horizontales noires sur la figure 2 indiquent les 3 phases à synthétiser en choisissant arbitrairement une phase  $\phi_{r1}=-32^\circ$  pour le premier motif.

Dans la suite, on compare 4 panneaux réfléchissants différents, chacun étant synthétisé avec des dipôles utilisant l'une des 4 valeurs données de  $W$ . Pour chacun des panneaux, la longueur des 3 dipôles est choisie en sélectionnant sur la figure 2 les points d'intersection entre les lignes horizontales noires et la courbe correspondant à la largeur  $W$  utilisée.

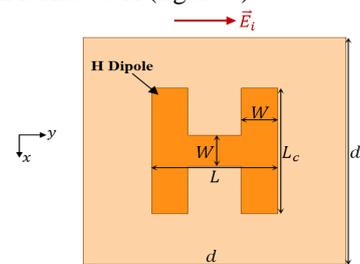
La figure 3 présente le champ rayonné (simulé avec Ansys HFSS) par les différents panneaux. Pour toutes les configurations, le maximum de rayonnement est bien obtenu dans la direction visée, à savoir  $\theta=\theta_1=60^\circ$ . D'importants lobes apparaissent également dans les directions parasites associées aux premiers harmoniques, c'est-à-dire  $\theta_1=0^\circ$  et  $\theta_2=-60^\circ$  (lignes verticales noires). On notera que le niveau de ces lobes parasites est très dépendant du panneau considéré et donc ici de la largeur du dipôle. Plus précisément, le niveau de l'harmonique -2 est fortement réduit ( $-20$ dB environ) dès que  $W\geq 6$ mm. Quant au niveau de l'harmonique -1, il décroît de façon

monotone lorsque  $W$  augmente de 2 à 14 mm. Dans tous les cas, l'augmentation de la largeur  $W$  s'avère donc bénéfique. Un examen plus détaillé de la figure 2 montre que cette augmentation est associée à deux phénomènes distincts : d'une part, une dérive vers la gauche de la fréquence de résonance du dipôle (point d'inflexion des courbes colorées) et, d'autre part, une sensibilité moins forte de la phase vis-à-vis de la longueur  $L$ .



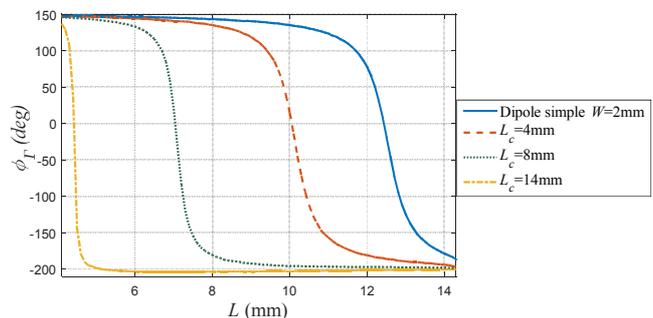
**Figure 3. Champ rayonné par le réflecteur pour différentes configurations de dipôles (de largeur  $W$ )**

Afin d'investiguer davantage ces phénomènes et de mieux distinguer leur effet respectif, un autre type de dipôle est maintenant testé. Il s'agit d'un dipôle miniaturisé en forme de H (figure 4).



**Figure 4. Dipôle en H**

La largeur  $W$  est fixée à 2 mm. La figure 5 montre l'évolution de la phase du coefficient de réflexion sur le dipôle en fonction de sa longueur  $L$  pour 4 valeurs possibles de l'extension orthogonale  $L_c$ . La courbe bleue correspond à  $L_c=0$  et redonne donc le dipôle simple de largeur  $W=2$  mm déjà présenté sur la figure 2.

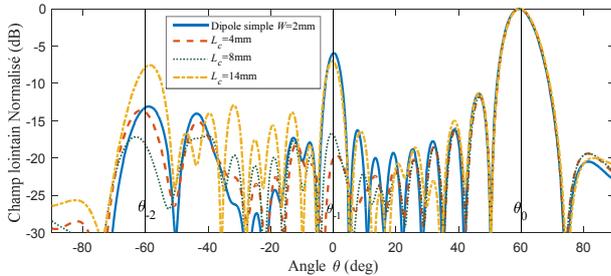


**Figure 5. Coefficient de réflexion sur le dipôle en H en fonction de sa longueur  $L$  et pour 4 valeurs possibles de  $L_c$  ( $W=2$ mm).**

Comme attendu, la résonance se décale vers la gauche du fait de la miniaturisation opérée. Dans le même temps, la sensibilité de la phase s'accroît (pente des courbes de plus en plus abrupte). On notera également que la gamme de phase couverte est légèrement supérieure à celle obtenue avec les dipôles simples, ce qui s'explique principalement par le fait que

la fréquence de résonance est dorénavant largement dépassée pour les plus fortes valeurs de  $L_c$ .

Comme précédemment, 4 panneaux réfléchissants sont synthétisés. Ils correspondent cette fois aux 4 valeurs possibles de l'extension  $L_c$ . Pour chacun de ces panneaux, les longueurs  $L$  requises pour les 3 dipôles mis en œuvre sont déduites des courbes de la figure 5. La figure 6 montre le champ rayonné pour ces différents panneaux.



**Figure 6. Champ rayonné par le réflecteur pour différentes configurations de dipôles en H ( $W=2\text{mm}$ ,  $L_c$  variable)**

Tous les diagrammes se traduisent par un lobe principal à  $\theta=\theta_r=60^\circ$ , ce qui confirme à nouveau le bien-fondé de la synthèse opérée. On notera également que ce lobe est particulièrement stable, quelle que soit la valeur de  $L_c$  utilisée.

Inversement, les variations du niveau des lobes parasites ( $\theta_1$  et  $\theta_2$ ) avec la configuration sont très nettes. L'effet de  $L_c$  semble opérer en 2 temps. Dans un premier temps, on constate une diminution générale des lobes parasites lorsque  $L_c$  augmente à partir de 0. Le niveau minimal de l'harmonique -2 est ainsi obtenu pour  $L_c=8\text{mm}$  alors que celui de l'harmonique -1 est plutôt atteint entre 4 et 8 mm. La configuration  $L_c=4$  mm est à cet égard particulièrement intéressante avec un niveau de -20dB et -13,6dB, respectivement à  $\theta_1$  et  $\theta_2$ . Dans un deuxième temps, le niveau de ces harmoniques ré-augmente très fortement pour la plus forte valeur de  $L_c$ , à savoir 14 mm. Ces tendances peuvent être reliées aux propriétés identifiées sur la figure 5. Ainsi, il semble que deux éléments favorisent l'excitation des harmoniques supérieurs. Le premier correspond à une forte sensibilité de la phase vis-à-vis du paramètre de contrôle (ici la longueur  $L$ ) comme c'est le cas pour la configuration  $L_c=14\text{mm}$ . Dans ce cas, on peut supposer que la phase simulée avec l'hypothèse de périodicité infinie n'est pas très précise et que, par suite, de petits écarts de phase existent dans le réseau réel par rapport à la loi idéale (1). La reproduction de ces défauts sur le réseau avec une macro-périodicité  $T_y$  exacerberait alors l'effet périodique, ce qui expliquerait la remontée des harmoniques supérieurs. Le deuxième élément semblant favoriser l'excitation de ces harmoniques est l'obtention de la résonance du motif pour des valeurs de  $L$  proches de la taille de la maille du réseau  $d$ . Sur les figures 5 et 2, cela correspond aux courbes colorées les plus à droite. Dans ce cas, l'interprétation serait plutôt liée aux phénomènes de couplage : les motifs utilisés, plus grands au voisinage de la résonance, se coupleraient plus facilement avec leurs voisins des cellules adjacentes. Là

encore, cela aurait pour effet d'éloigner la phase réellement produite de celle prédite avec une simulation infinie périodique et donc de générer de petites erreurs de phase sur le réseau réel. Comme précédemment, celles-ci se trouveraient exacerbées du fait de leur reproduction avec la macro-périodicité  $T_y$ .

On notera que ces interprétations sont cohérentes avec ce qui avait été observé pour le dipôle simple. Dans ce cas, l'augmentation de  $W$ , favorable à la diminution du niveau des harmoniques supérieurs, correspondait à la fois à une moindre sensibilité et à une longueur résonante plus à gauche.

#### 4. Méthodologie de conception proposée

Afin de minimiser les réflexions parasites, il faut disposer de critères *a priori* pour choisir la géométrie de motif la plus adaptée. A partir des observations réalisées dans le paragraphe précédent, deux paramètres essentiels peuvent être proposés:

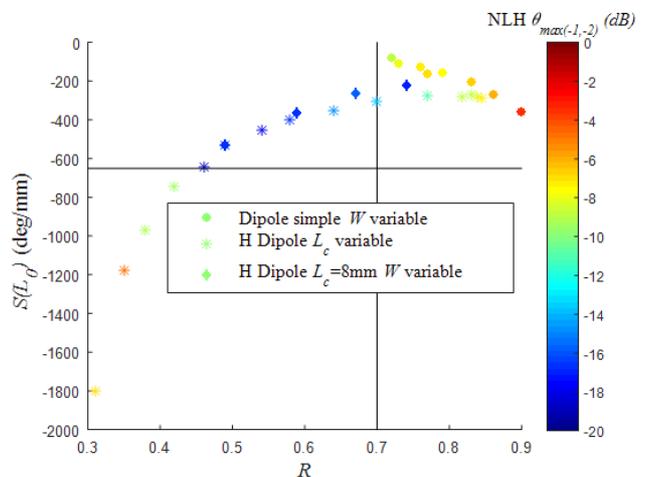
- la sensibilité de la phase à la résonance du motif:

$$S(L_0) = (d\phi_r / dL)_{L=L_0} \quad (4)$$

où  $L_0$  est la longueur résonante

- le ratio entre cette longueur résonante et la taille de la maille :

$$R = L_0 / d \quad (5)$$

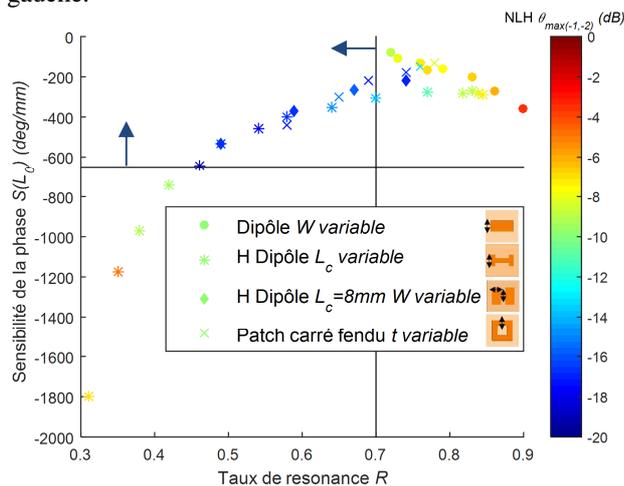


**Figure 7. Niveau des lobes harmoniques (NLH) en fonction des deux paramètres  $S(L_0)$  et  $R$ .**

La figure 7 présente ainsi le niveau des lobes parasites pour différentes valeurs de ces deux paramètres. Le niveau présenté correspond à chaque fois au maximum de l'harmonique -1 et de l'harmonique -2. On remarque que les niveaux les plus faibles (en bleu) sont tous concentrés dans la zone supérieure gauche du graphe et ceci quelle que soit la géométrie du motif considéré. Cette zone correspond bien aux plus faibles valeurs de  $R$  et de  $|S|$ , donc à la combinaison d'une longueur résonante petite devant la taille de la maille et à une faible sensibilité de la phase. La figure montre qu'en appliquant des seuils appropriés (lignes horizontale et

verticale), il est possible de maintenir les lobes en dessous d'un niveau spécifié (ici 13,5dB par exemple).

Finalement, afin de confirmer que cette règle s'applique plus largement, la figure 7 a été complétée en y ajoutant les performances obtenues avec un motif différent, à savoir un anneau métallique de taille variable. Les résultats, présentés sur la figure 8, montrent que les niveaux d'harmoniques obtenus pour des valeurs de  $R$  et  $S$  équivalentes sont similaires et que les meilleures configurations sont bien situées en haut à gauche.



**Figure 8. Niveau des lobes harmoniques (NLH) en fonction des deux paramètres  $S(L_0)$  et  $R$  en ajoutant le motif anneau métallique.**

## 5. Conclusion

Dans cette communication, il est montré que, parmi toutes les configurations de motifs utilisables pour synthétiser un méta-miroir, certaines sont plus performantes en termes de prévention des réflexions parasites. Une règle est proposée pour sélectionner *a priori* les motifs les plus adaptés en tenant compte de la sensibilité de leur réponse au voisinage de la résonance et de la taille relative du motif résonant par rapport à la maille. Des tests réalisés en simulation sur différentes familles de motif montrent que les meilleures performances sont obtenues pour des motifs à faible sensibilité et dont la longueur résonante est réduite par rapport à la taille de la maille.

## Références

- [1] S. Maci, G. Minatti, M. Casaletti, and M. Bosiljevac, "Metasurfing: Addressing waves on impenetrable metasurfaces," *IEEE Ant. and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1499-1502, 2011.(4)
- [2] J. Huang, J. A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, USA, NJ, Wiley—IEEE Press, 2007.
- [3] A. M. Patel and A. Grbic, "A printed leaky wave antenna with a sinusoidally modulated surface reactance," *IEEE A. P. S.*, Charleston, SC, Jun. 1–5, 2009.
- [4] N. Mohammadi Estakhri and A. Alù, "Wave-front Transformation with Gradient Metasurfaces", *Phys. Rev. X* 6, 041008, 2016.

- [5] V. S. Asadchy, M. Albooyeh, S. N. Tsvetkova, A. Díaz-Rubio, Y. Ra'idi, and S. A. Tretyakov, "Perfect Control of Reflection and Refraction Using Spatially Dispersive Metasurfaces", *Phys. Rev. B* 94, 075142, 2016.