



**HAL**  
open science

# Métasurface Modulée Temporellement pour Conversion de Fréquence

Tanguy Lopez, Thomas Lepetit, Badreddine Ratni, Shah Nawaz Burokur

► **To cite this version:**

Tanguy Lopez, Thomas Lepetit, Badreddine Ratni, Shah Nawaz Burokur. Métasurface Modulée Temporellement pour Conversion de Fréquence. Dixième Conférence Plénière du GDR ONDES, Dec 2023, Marseille, France. hal-04354648

**HAL Id: hal-04354648**

**<https://hal.parisnanterre.fr/hal-04354648>**

Submitted on 24 Jun 2024

**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.

## Métasurface Modulée Temporellement pour Conversion de Fréquence

T. Lopez<sup>1,2</sup>, T. Lepetit<sup>1</sup>, B. Ratni<sup>2</sup>, S. N. Burokur<sup>2</sup>

<sup>1</sup> : ONERA, DEMR, Université de Paris-Saclay, F91123 Palaiseau, France,

<sup>2</sup> : LEME, UPL, Univ Paris Nanterre, F92410 Ville d'Avray, France  
tanguy.lopez@onera.fr / tlopez@parisnanterre.fr

### Résumé

La modulation temporelle des métasurfaces apporte une nouvelle dimension particulièrement intéressante pour de nombreuses applications. En effet, la modulation temporelle rend possible la manipulation du spectre spatio-temporel des champs interagissant avec la métasurface. Notamment, dans le domaine de la furtivité radar, l'exploitation de cette propriété permet de nouvelles stratégies de dissimulation dont la cape Doppler, qui repose sur la compensation du décalage Doppler de la cible afin de masquer celle-ci dans le fouillis radar. Ce travail présente donc une métasurface modulée temporellement servant à la conversion en fréquence d'un signal harmonique.

### 1. Introduction

Les métasurfaces constituent, depuis le début du millénaire, une solution particulièrement intéressante pour la furtivité radar [1]. Grâce à l'intégration de composants électroniques actifs, leurs fonctionnalités se sont rapidement multipliées, permettant entre autres la reconfigurabilité [2]. Depuis quelques années, l'apport de la modulation temporelle de ces éléments électroniques est au cœur de nombreux développements, offrant au passage de nouvelles stratégies de camouflage radar, dont la cape Doppler [3], [4]. Par compensation du décalage Doppler induit par le déplacement de la cible, celle-ci peut alors être confondue avec les éléments statiques de la scène (fouillis radar). Ce travail se concentre donc sur l'étude d'une métasurface modulée temporellement pour la conversion de fréquence de signaux en tant qu'élément d'une cape Doppler complète.

### 2. Conversion de fréquence par métasurface modulée temporellement

La modulation temporelle d'une métasurface sous illumination doit se faire à une période  $T_m$  bien plus large que le temps de relaxation du système afin de garantir l'existence de l'écriture de la relation entre les champs électriques incident, réfléchi et le coefficient de réflexion [5] :

$$E_r(t) = \Gamma(t)E_i(t) \quad (1)$$

Par transformée de Fourier, il est alors possible d'écrire les spectres, dénotés  $\sim$ , de ces trois éléments :

$$\tilde{E}_r(\omega) = \tilde{\Gamma}(\omega) * \tilde{E}_i(\omega) \quad (2)$$

Grâce à un coefficient de réflexion à rampe de phase, il est alors possible de convertir la fréquence du signal incident pour générer le signal réfléchi, notamment dans le cas d'une pente négative puisque :

$$x(t)e^{-j\omega_m t} \Leftrightarrow X(\omega + \omega_m) \quad (3)$$

Dans le cas étudié, la métasurface d'intérêt est une version purement capacitive de [2] et forme un circuit LC parallèle avec le conducteur à dissimuler. La phase du coefficient de réflexion de ce circuit est pilotée par la capacité variable montée sur la métasurface. Cette capacité variable est une diode varactor dans les réalisations pratiques [4], mais en dehors d'une certaine perte de puissance à la conversion, son introduction ne compromet pas la conversion de fréquence. Dans le cas simplifié d'une capacité idéale, la phase du coefficient de réflexion de la métasurface obtenue par modulation linéaire de la capacité est présentée sur la Figure 1(a). Par application du schéma de modulation présentée dans l'insert de la Figure 1(a), la phase du coefficient de réflexion est alors transformée en rampe sur la même plage de valeurs de capacité. En associant ces valeurs de capacité à des temps étalés sur une période de modulation, la phase du coefficient de réflexion varie alors linéairement dans le temps.

Pour une onde incidente harmonique, les spectres attendus sont affectés d'un sinus cardinal, à cause de la simulation à durée finie. Sur la Figure 1(b), pour une onde incidente de porteuse  $f_0 = 300$  MHz, les

spectres du champ incident (bleu) et réfléchi (rouge) sont comparés après réflexion sur la métasurface modulée à  $f_0 \gg f_m = 1$  MHz. Ces résultats sont issus d'une simulation temporelle sur COMSOL® (logiciel de simulation par éléments-finis). On observe une conversion effective du lobe principal du sinus cardinal de  $f_0$  vers  $f_0 - f_m$  dans le cas de la modulation vers les basses fréquences amenées par la rampe de pente négative de la Figure 1(a).

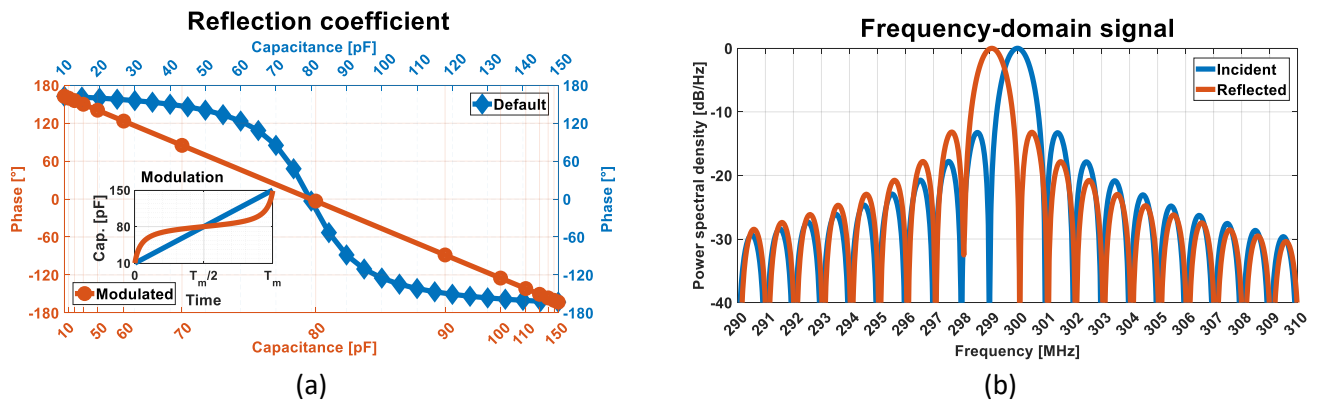


Figure 1. (a) Phase du coefficient de réflexion de la métasurface à  $f_0 = 300$  MHz pour une modulation linéaire de la capacité (courbe bleue) et phase linéaire désirée (courbe rouge) offerte par le schéma de modulation spécifique de l'insert. (b) Densités spectrales de puissance du champ harmonique incident (courbe bleue) à  $f_0 = 300$  MHz et du champ réfléchi (courbe rouge) converti en fréquence vers  $f_0 - f_m$  pour une modulation à  $f_m = 1$  MHz.

### 3. Conclusion

Dans l'optique de multiplier les solutions et stratégies de furtivité radar, ce travail s'intéresse à la viabilité de la modulation temporelle de la métasurface de travail en tant que convertisseur de fréquence. Après établissement des conditions de modulation, puis mise en place du schéma spécifique à rampe de phase, les résultats obtenus par simulation éléments-finis confirment en effet la bonne conversion d'un signal incident d'une fréquence  $f_0$  vers une fréquence  $f_0 - f_m$ . La validation expérimentale de ce comportement est envisagée, afin de mesurer à la fois le bon décalage en fréquence, ainsi que les pertes de conversion amenées par les diodes varactor, comme évoqué précédemment.

### 4. Bibliographie

- [1] N. Engheta, «Thin absorbing screens using metamaterial surfaces», *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (IEEE Cat. No.02CH37313)*, San Antonio, USA, vol. 2, pp. 392-395, 2002.
- [2] T. Lopez, T. Lepetit, B. Ratni et S. N. Burokur, «Experimental validation of a reconfigurable coaxial metasurface radar absorber using varactor diode tuning», *2023 Seventeenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, Chania, Greece, pp. X-211-X-213, 2023.
- [3] V. Kozlov, D. Vovchuk et P. Ginzburg, «Broadband radar invisibility with time-dependent metasurfaces», *Sci. Rep.*, vol. 11, p. 14187, 2021.
- [4] D. Ramaccia, D. L. Sounas, A. Alù, A. Toscano et F. Bilotti, «Phase-induced frequency conversion and Doppler effect with time-modulated metasurfaces», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1607-1617, 2020.
- [5] X. Wang et C. Caloz, «Spread-spectrum selective camouflaging based on time-modulated metasurface», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 1, pp. 286-295, 2021.