



HAL
open science

Synthèse d'ouverture en spectroscopie THz dans le domaine temporel pour l'imagerie 3D

Manal Ait Assou, Cyril Decroze, Georges Humbert, Aurelian Crunteanu

► **To cite this version:**

Manal Ait Assou, Cyril Decroze, Georges Humbert, Aurelian Crunteanu. Synthèse d'ouverture en spectroscopie THz dans le domaine temporel pour l'imagerie 3D. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Limoges 8-10 juin 2022, Jun 2022, Limoges, France. hal-03768651

HAL Id: hal-03768651

<https://hal.science/hal-03768651>

Submitted on 4 Sep 2022

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.

Synthèse d'ouverture en spectroscopie THz dans le domaine temporel pour l'imagerie 3D

M. Ait Assou, C. Decroze, G. Humbert, A. Crunteanu
XLIM, UMR 7252 CNRS/ Université de Limoges, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges
Manal.ait-assou@xlim.fr

Résumé – Les ondes TéraHertz (THz) offrent de nouvelles perspectives dans le domaine de l'imagerie pour des applications de caractérisations sans contact et non destructives. Pour ces applications, la technique de spectroscopie térahertz dans le domaine temporel permet une analyse sur une bande passante instantanée très large (0.1-6 THz), mais nécessite généralement de déplacer mécaniquement l'échantillon à imager dans le plan focal du faisceau THz. Ce travail porte sur l'adaptation d'un banc de spectroscopie temporelle THz pour l'imagerie d'échantillons fixes, en se basant sur le principe d'un radar à synthèse d'ouverture (SAR). Ce papier montre les premières études de faisabilité de cette approche à 1 THz.

1. Introduction

Les ondes THz (situées dans l'intervalle spectral 300GHz-10THz) possèdent plusieurs propriétés remarquables comme leur nature non-ionisante, une faible absorption des matériaux diélectriques, une forte absorption par l'eau et une forte réflexion sur les surfaces conductrices [1]. Elles offrent de nombreux intérêts dans plusieurs champs d'applications comme le contrôle non-destructif des matériaux, la caractérisation de couches minces, le contrôle de procédés de fabrication, la sécurité ou encore l'imagerie biomédicale [2]. La méthode de spectroscopie dans le domaine temporel (TDS- Time Domain Spectroscopy) est actuellement une référence pour ces applications, car elle offre un large spectre THz (typiquement de 0,1 à 5 THz) et une dynamique de mesure élevée (> 80 dB). Les systèmes THz-TDS sont basés sur deux antennes photoconductrices (PCA) [3] éclairées par un laser pulsé à la femtoseconde pour générer et détecter des impulsions THz [2]. Pour l'imagerie 3D et la spectroscopie, la configuration classique consiste à déplacer mécaniquement l'échantillon à tester dans le plan de focalisation du faisceau THz (figure 1).

Dans cette étude, nous proposons une méthode alternative, en déplaçant l'antenne d'émission plutôt que l'échantillon à caractériser. La finalité est de réaliser un réseau d'antennes synthétique sur le principe d'un radar SAR (Synthetic Aperture Radar) en transmission. Le SAR est largement utilisé dans le spectre des micro-ondes et millimétrique pour une grande variété d'applications civiles et militaires [3,4,5]. Il a également été appliqué récemment sur un banc TDS-THz [6], en réflexion, et sur des échantillons en rotation, sans

exploiter les possibilités de spectroscopie offertes par le THz-TDS.

Le système mis en place ici est implémenté sur une plateforme THz-TDS en transmission, à 1 THz. L'objet analysé est une mire métallique fixe positionner entre deux antennes photoconductrices (l'une fixe, en réception, et celle d'émission mobile pour synthétiser un réseau de grande dimensions). L'imagerie cohérente SAR sera alors effectuée classiquement par rétropropagation des signaux mesurés pour chaque position de l'antenne d'émission. Ce principe revient à réaliser une lentille numérique pour atteindre des résolutions inférieures au millimètre, et permet de s'affranchir des optiques de focalisation THz du banc TDS initial.

2. Système THz-TDS à synthèse d'ouverture

La configuration en transmission du banc de spectroscopie THz classique, basée sur l'utilisation des antennes à photo commutateurs ultra-rapides (PCA), est présentée sur la figure 1. Le système est constitué d'un laser femtoseconde dont le faisceau est divisé en deux. Le premier faisceau illumine une antenne PCA mise sous tension pour la génération d'une onde THz, tandis que le deuxième faisceau est orienté vers l'antenne de réception qui génère un photocourant suite à la réception synchrone des ondes THz. En variant le délai entre les deux faisceaux optiques, le photocourant détecté permet de reconstruire la forme temporelle de l'onde THz transmise, sur le principe de l'échantillonnage en temps équivalent.

Le système THz-TDS offre la possibilité d'obtenir une image 3D en déplaçant mécaniquement l'objet à tester dans le plan focal d'un système de lentilles de focalisation. La résolution latérale de l'image est donnée par le diamètre du spot THz focalisé, alors que la résolution en profondeur est inversement proportionnelle à la bande passante.

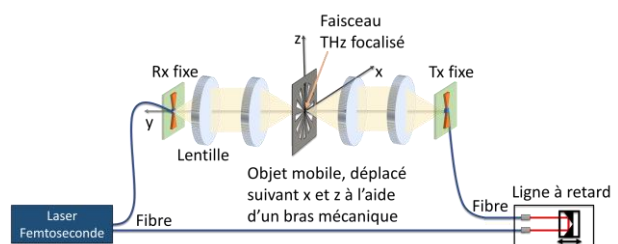


Figure 1. Système classique d'imagerie THz-TDS

La technique de synthèse d'ouverture que nous avons implémentée (schéma de principe sur la figure 2) permet de retirer les lentilles du système de focalisation THz, et de garder fixe l'échantillon à caractériser.

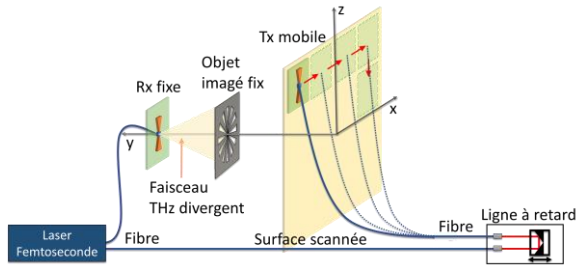


Figure 2. Système THz-TDS-SAR

Dans cette configuration SAR, l'antenne émettrice est translatée de manière automatisée, horizontalement et verticalement, grâce à un positionneur 2 axes ce qui revient à synthétiser un réseau virtuel d'antennes, d'ouverture équivalente D et de pas de réseau d (figure 3).

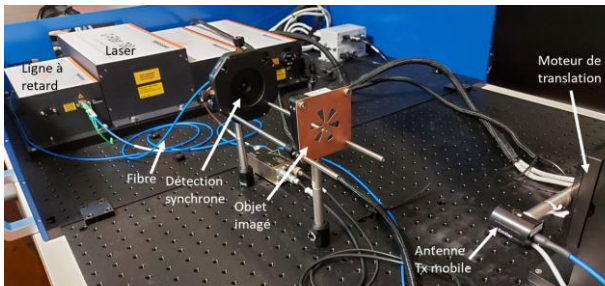


Figure 3. Banc expérimental THz-TDS-SAR

L'antenne de réception (fixée) détecte pour chaque position de l'émetteur un signal THz transmis à travers l'échantillon à caractériser. Sans optique de focalisation, le signal mesuré montre un fort niveau de bruit, une bande passante inférieure à 2 THz. Une moyenne de plusieurs dizaines d'acquisitions est donc nécessaire pour optimiser le rapport signal sur bruit dans cette configuration. Le spectre de l'impulsion moyennée atteint ainsi une largeur de bande de 2,5 THz et une dynamique autour de 30 dB à 1 THz.

Finalement, les signaux mesurés par le réseau virtuel sont rétro-propagés numériquement pour reconstituer l'image de l'objet sous test (figure 4). Les résultats présentés reposent sur un réseau synthétique de 80×80 antennes, formant un réseau synthétique de dimension $D=12$ cm, avec un pas entre antennes $d=1,5$ mm, permettant d'obtenir une zone de visibilité de 4×4 cm². La résolution transverse de l'image (Res) est fixée par la dimension D de l'ouverture synthétique, alors que le pas de translation d impose la zone de visibilité à imager (FOV), selon les relations suivantes :

$$Res = \frac{\lambda * R}{D}, \quad FOV = \frac{\lambda * R}{d},$$

Où $\lambda = 300 \mu\text{m}$ correspond à la longueur d'onde centrale de la bande passante et $R=20$ cm est la distance objet-plan du réseau synthétique.

L'image 3D obtenue est reconstituée dans la bande 900 GHz - 1,1 THz, avec une résolution latérale théorique de $500 \mu\text{m}$ et une résolution en profondeur de $1,5$ mm (à une distance $R=20$ cm).

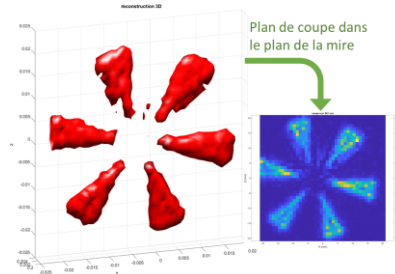


Figure 4. Images 3D/ 2D reconstruite (0.9- 1,1 THz)

3. Conclusion

Nous proposons une première démonstration d'imagerie 3D par synthèse d'ouverture en utilisant un système de spectroscopie THz dans le domaine temporel. Ces travaux préliminaires montrent qu'il est possible de remplacer les « optiques » de focalisation du faisceau THz et le système d'imagerie à déplacement mécanique par un traitement numérique SAR, avec une résolution de l'image reconstitués qui dépend du réseau d'antennes synthétisé. L'approche implémentée permettra de minimiser le temps d'acquisition d'un imageur THz-TDS classique, grâce à la synthèse de réseaux d'antennes lacunaires.

Les études en cours utilisant la méthode SAR THz visent également la caractérisation spectroscopique et l'imagerie des échantillons plus complexes, intégrant des couches à propriétés diélectriques dissimilaires.

Références

- [1] Jean-Louis Coutaz et al., « Optoélectronique térahertz », EDP Sciences (2008).
- [2] Dexheimer, S.L. (Ed.). (2008). "Terahertz Spectroscopy: Principles and Applications" (1st ed.). CRC Press.
- [3] Nathan M. Burford, Magda O. El-Shenawee, "Review of terahertz photoconductive antenna technology," Opt. Eng. 56(1) 010901 (24 January 2017).
- [3] Mehrdad Soumekh, "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms," A WileyInterscience Publication, 1999.
- [4] A. Batra et al., "Short-Range SAR Imaging From GHz to THz Waves," in IEEE Journal of Microwaves, vol. 1, no. 2, pp. 574-585, April 2021.
- [5] Batra, Aman & Wiemeler, Michael & Gohringer, Diana & Kaiser, Thomas. (2021). Sub-mm Resolution 3D SAR Imaging at 1.5 THz.
- [6] D. Damyanov et al., "High Resolution Lensless Terahertz Imaging and Ranging," in IEEE Access, vol. 7, pp. 147704-147712, 2019