



**HAL**  
open science

## Plate-forme nano-robotique radar à 60 GHz

Kamel Haddadi, Denis Pomorski, Mohamed Sebbache, Nawal Alsaleh,  
Clément Lenoir

► **To cite this version:**

Kamel Haddadi, Denis Pomorski, Mohamed Sebbache, Nawal Alsaleh, Clément Lenoir. Plate-forme nano-robotique radar à 60 GHz. CNRIUT 2023 Saint Pierre - La Réunion, IUT de Saint Pierre, Jun 2023, Saint Pierre (La Réunion), La Réunion. hal-04326698

**HAL Id: hal-04326698**

**<https://hal.science/hal-04326698v1>**

Submitted on 6 Dec 2023

**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.

---

## Plate-forme nano-robotique radar à 60 GHz

---

Nawal Alsaleh<sup>1,2</sup>

[nawal.alsaleh.etu@univ-lille.fr](mailto:nawal.alsaleh.etu@univ-lille.fr)

Denis Pomorski<sup>2</sup>

[denis.pomorski@univ-lille.fr](mailto:denis.pomorski@univ-lille.fr)

Mohamed Sebbache<sup>1</sup>

[mohamed.sebbache@univ-lille.fr](mailto:mohamed.sebbache@univ-lille.fr)

Clément Lenoir<sup>1</sup>

[clement.lenoir.etu@univ-lille.fr](mailto:clement.lenoir.etu@univ-lille.fr)

Kamel Haddadi<sup>1</sup>

[kamel.haddadi@univ-lille.fr](mailto:kamel.haddadi@univ-lille.fr)

<sup>1</sup> IUT de Lille, Université de Lille

CRISAL – Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille, UMR CNRS 9189

<sup>2</sup> IUT de Lille, Université de Lille

IEMN – Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, UMR CNRS 8520

**Thèmes** – Robotique –Électronique

**Résumé** – *Ce travail, à l'interface entre les domaines de la robotique et de l'électronique haute fréquence, adresse le développement d'outils de caractérisation hyperfréquence pour le contrôle non destructif (CND) à haute précision. Les outils de caractérisation électromagnétique basés sur des rayonnements non ionisants et faible puissance permettent des mesures sans contact et à très haute sensibilité électrique. Ce type de caractérisation engendre néanmoins des imprécisions de mesure liées à la difficulté de contrôler précisément la distance entre le capteur hyperfréquence et le matériau sous test. Une approche originale basée sur l'association d'un système de nano-positionnement piézo-électrique automatisé dans l'environnement LabVIEW® et de capteurs hyperfréquences est proposée afin d'offrir des solutions de CND hyperfréquences à haute traçabilité.*

**Mots-Clés** – Contrôle non destructif (CND), Nano-robotique, Hyperfréquences, Caractérisation électromagnétique.

## 1 Introduction

Les techniques de caractérisation hyperfréquence ont été largement décrites dans la littérature [1]-[2]. En particulier, les solutions radar en régime millimétrique (30 GHz – 300 GHz) offrent des mesures sans contact pour la mesure des propriétés diélectriques du matériau sous test. Néanmoins, ces méthodes engendrent des imprécisions de mesure liées notamment à la difficulté de contrôler précisément les positions respectives de l'antenne et du matériau sous test.

La solution proposée dans ce travail repose sur le développement d'une plate-forme de nano-positionnement nano-robotisée et automatisée sous LabVIEW® permettant de déplacer le matériau sous test dans l'espace XYZ sur des courses centimétriques avec une résolution de déplacement nanométrique. Le radar hyperfréquence opérant autour de 60 GHz est conçue et réalisée en technologie guide d'onde métallique WR15 insensible aux variations de l'environnement couramment rencontrées en technologie planaire.

## 2 Plate-forme radar

La plateforme de test se compose de deux éléments principaux, une platine de balayage de l'échantillon sous test et une instrumentation micro-onde dédiée. La platine de balayage de l'échantillon est composée de trois actionneurs linéaires piézoélectriques commercialisées par Smaract® GmbH avec des plages de balayage de 16 mm dans les directions X et Y et de 21 mm dans la direction Z. Les positions XYZ sont contrôlées en boucle fermée avec une résolution nanométrique et une répétabilité de  $\pm 30\text{nm}$ .

Le radar hyperfréquence repose sur le développement d'un démodulateur IQ en technologie six-port opérant autour de 60 GHz (Figure 1) [3]. Ce système permet de mesurer le rapport complexe entre deux ondes sinusoïdales A (référence) et B (test). Le signal hyperfréquence de référence A alimente le réseau six ports par le port 1 (signal A). Le signal B (à déterminer) est appliqué au port 2 (signal B) [Fig. 1(a)]. Les quatre voies restantes sont connectées à des détecteurs de puissance [Fig. 1(b)]. Le circuit six-port (SP) comprend un diviseur de puissance, trois coupleurs hybrides 3dB/90° et quatre détecteurs de puissance dont la sensibilité vidéo typique est de  $\gamma = 500 \text{ mV/mW}$ . Ces blocs de circuits fonctionnant dans la bande de fréquences 55-75 GHz peuvent être facilement connectés les uns aux autres. Supposons que les deux signaux d'entrée d'amplitude respectives A et B présentent un déphasage  $\Delta\phi$ , les relations suivantes décrivent les tensions détectées sur les ports de sortie [3] :

$$V_1 = \frac{\gamma}{4} [A^2 + B^2 - 2AB \cos(\Delta\phi)] \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{\gamma}{4} [A^2 + B^2 + 2AB \cos(\Delta\phi)] \quad (2)$$

$$V_3 = \frac{\gamma}{4} [A^2 + B^2 - 2AB \sin(\Delta\phi)] \quad (3)$$

$$V_4 = \frac{\gamma}{4} [A^2 + B^2 + 2AB \sin(\Delta\phi)] \quad (4)$$

Ainsi, la mesure des tensions détectées permet de retrouver le déphasage entre les signaux d'entrée par la relation suivante :

$$\Delta\phi = \text{atan} \left( \frac{V_4 - V_3}{V_2 - V_1} \right) \quad (5)$$

Signalons également que la mesure des quatre tensions  $V_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) permet également de déterminer le module du rapport complexe entre les deux signaux [1].

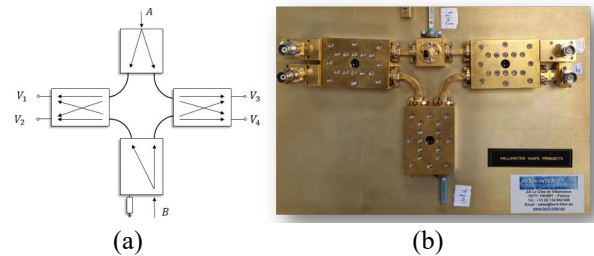


Figure 1 – Démodulateur IQ six-port en technologie guide d'onde WR15.

Le radar hyperfréquence est conçue à l'aide du démodulateur IQ associé à une source hyperfréquence monochromatique, un coupleur hybride, un circulateur et une antenne cornet (Figure 2).

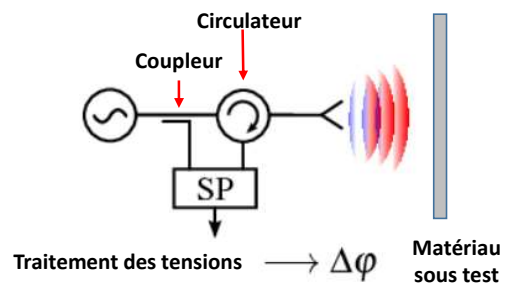


Figure 2 – Principe du radar à ondes continue basée sur un démodulateur six-port (SP).

Dans cette configuration de mesure, une partie du signal hyperfréquence est prélevée par le coupleur pour alimenter la voie de référence du démodulateur IQ. L'autre partie du signal est transmis à l'antenne au travers d'un circulateur. Le signal réfléchi par la cible alimente la deuxième voie du démodulateur IQ au travers du

circulateur. Ainsi, le circulateur est un dispositif de séparation des signaux émis et réfléchi. La plate-forme est illustrée en Figure 3.

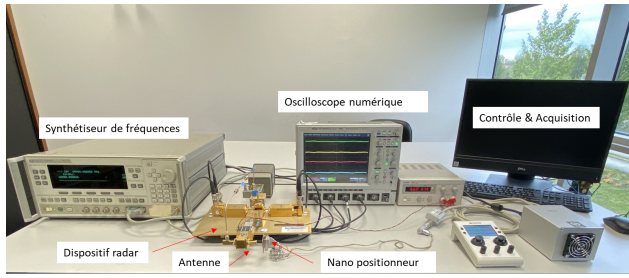


Figure 3 – Plate-forme nano-robotique pour la caractérisation électromagnétique en espace libre à 60 GHz.

Le dispositif est complété par un oscilloscope numérique également automatisé dans l'environnement LabVIEW® afin de recueillir les tensions détectées en fonction de la position XYZ de l'échantillon sous test.

### 3 Mesures expérimentales

Une campagne exhaustive considérant une multitude de scénarios de mesure a été mise en œuvre. A titre d'illustration, nous nous focalisons sur un scénario. La cible est une plaque métallique (réflexion totale) positionnée initialement à une distance de 5 mm de l'ouverture de l'antenne. La plaque métallique est montée sur le nano-positionneur pour être déplacée de la position absolue -5 mm à -6 mm avec un pas de déplacement fixée à 500 nm. L'environnement de travail s'affranchit volontairement de système anti-vibration afin de se placer dans des conditions réelles d'opération. Afin de limiter les incertitudes de mesure, une série de tensions sont acquises pour chaque position afin d'évaluer les valeurs minimale, maximale et moyenne. La Figure 4 représente les données mesurées ainsi que la phase extraite des tensions mesurées.

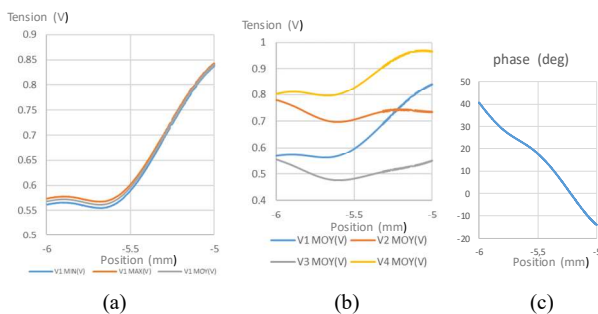


Figure 4 – (a) tension  $V_1$  détectée en fonction de la distance entre l'ouverture de l'antenne et une cible métallique planaire. (b) Tensions  $V_1$  à  $V_4$ . (c) Phase du signal reconstituée à partir des tensions. La distance est exprimée en mm et la fréquence de travail est fixée à 60 GHz.

Ces mesures démontrent la pertinence de la solution

proposée avec une phase extraite qui est fonction de la distance à la cible. Signalons que la phase n'évolue pas de manière quasi-linéaire en raison des réflexions multiples en espace libre (entre l'antenne et la cible). Une modélisation en espace libre (non discutée ici) permet de s'affranchir de ces effets.

Finalement, nous donnons en Figure 5 un 'zoom' de la phase détectée sur une plage de distance de 10 microns.

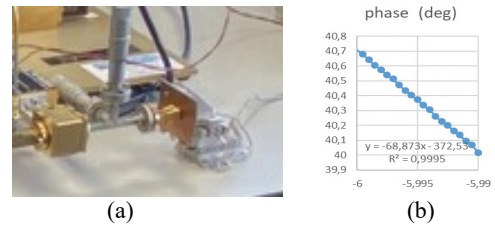


Figure 5 – (a) Interaction antenne cornet – plaque métallique. (b) Phase en fonction de la distance sur une plage de 10 microns.

Une évolution quasi-linéaire est observée, les réflexions multiples étant atténuées en s'éloignant de l'antenne. L'interpolation au premier ordre démontre une sensibilité de mesure de 68,87 deg/mm avec une excellente résolution de phase. En effet, les déplacements de 500 nm sont facilement détectables.

### 4 Conclusions

La combinaison des techniques de mesure à hyperfréquence a permis de lever les limitations des techniques radar hyperfréquence champ-proche en régime millimétrique. La technique proposée s'avère une solution viable pour adresser des problématiques de caractérisation aux petites échelles en milieu industriel et sévère pour lesquelles les systèmes conventionnels (optique) sont exclus.

### Remerciements

Le projet LINKED (Linking Sensing & Driving - n° 214754, AAP DSR 2018-2020) est financé par la Délégation à la Sécurité routière (DSR).

### Références

- [1] A. Koelpin, et al., "Six-Port technology for precise geometrical measurement applications - An overview," 2013 European Radar Conference, 275-278, 2013.
- [2] K. Haddadi, et al. "Status of six-port technology for wireless sensing applications," 2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). IEEE, 2018. p. 269-271.
- [3] K. Haddadi, et al. "Formulation for complete and accurate calibration of six-port reflectometer." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 60.3 (2012): 574-581.