



**HAL**  
open science

## Approche de calibration de la composante croisée de la SER basée sur une cible résonante planaire

Zeshan Ali, Etienne Perret

► **To cite this version:**

Zeshan Ali, Etienne Perret. Approche de calibration de la composante croisée de la SER basée sur une cible résonante planaire. 22èmes Journées Nationales Micro-Ondes 2022, Jun 2022, Limoges, France. hal-03900126

**HAL Id: hal-03900126**

**<https://hal.science/hal-03900126v1>**

Submitted on 29 Dec 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.

# Approche de calibration de la composante croisée de la SER basée sur une cible résonante planaire

Zeshan Ali, et Etienne Perret

Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, LCIS, 26000 Valence, France  
 {zeshan.ali, etienne.perret}@lcis.grenoble-inp.fr

**Résumé** - Une approche simple et pratique pour l'étalonnage de la surface équivalente radar à polarisation croisée (SER) est présentée. Pour prouver le concept, une cible planaire comportant des résonateurs est utilisée comme objet de calibration de référence. La méthode est appliquée pour la calibration d'une étiquette RFID sans puce fonctionnant en polarisation croisée. Les performances expérimentales de la méthode proposée sont comparées à la SER simulée. Enfin, cet article propose un nouvel objet de référence de type diffuseur circulaire dépolarisant 3 en 1 pour la calibration des mesures polarimétriques. Les caractéristiques du diffuseur circulaire proposé sont testées comme objets d'étalonnage de référence pour les techniques d'étalonnage de radar polarimétrique à une seule antenne.

## 1. Introduction

Des progrès récents ont permis de considérer l'identification par radiofréquence (RFID) sans puce comme un pendant important du célèbre code-barres [1]. Les étiquettes RFID sans puce à polarisation croisée ont été introduites il y a quelques années [2] et sont devenues une référence. Cependant, une calibration précise de la SER (ou RCS en Anglais) à polarisation croisée est nécessaire pour caractériser et comparer les performances leurs performances. En mesure, cette calibration est souvent compliquée à mettre en œuvre, reposant sur l'utilisation d'objets de référence.

Dans cet article, nous présentons une approche simple de calibration de la SER d'objets dépolarisations. Pour prouver le concept, une étiquette RFID sans puce est utilisée comme cible de calibration de référence et une autre comme étiquette de test. Cet objet de référence est plan, peu coûteux et peut être réalisé avec les moyens procédés qu'une carte électronique (réalisation PCB) par rapport aux objets de référence 3D conventionnels (dièdre et trièdre par exemple). Il a la particularité de présenter différentes résonances qui bien que planaires vont présenter une composante rétrodiffusée perpendiculaire au champ incident. Les performances expérimentales de l'objet de calibration proposé sont comparées à la simulation de la SER du même objet.

## 2. Conceptions et simulations d'étiquettes

Les photographies des étiquettes RFID sans puce de référence et de test sont présentées Figure 1. L'étiquette de calibration de référence [Figure 1(a)] est basée sur des dipôles court-circuités à 45°, tandis que l'étiquette de test

[Figure 1(b)] est basée sur des résonateurs en double L [2]. Ces étiquettes ont été réalisées en utilisant la technologie PCB sur un substrat Rogers RO4003C avec une hauteur de substrat  $h = 0,81$  mm et une permittivité diélectrique  $\epsilon_r = 3,55$ . [2]. Les dimensions géométriques des étiquettes sont indiquées dans le tableau 1.

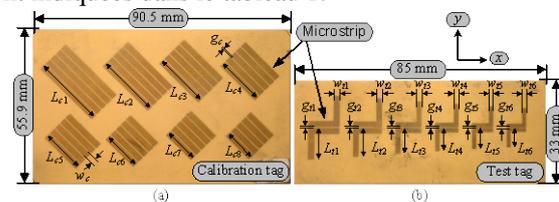


Figure 1. Photographies d'étiquettes RFID sans puce. (a) Étiquette de référence. (b) Étiquette de test.

Tags	Para-mètres	Diffuseurs							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Référence	$L_{ci}$	24.8	21.8	19	16.8	15	13.4	12.2	11.2
Test	$L_{ti}$	10.9	10	9	8.1	7.3	6.75		
	$w_{ti}$	1.99	1.83	1.64	1.47	1.33	1.23		
	$g_{ti}$	0.5	0.45	0.41	0.37	0.33	0.31		

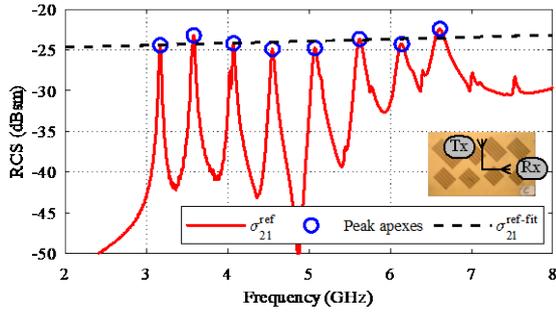
Étiquette de référence :  $L_{ci}$ , longueur des diffuseurs;  $w_c = 2$  mm, largeur de la piste microruban;  $g_c = 0,5$  mm, espace entre les dipôles couplés | Étiquette test :  $L_{ti}$ , longueur des résonateurs en forme de L;  $w_{ti}$ , largeur de la piste microruban des résonateurs;  $g_{ti}$ , espace entre les résonateurs couplés en double L.

Tableau 1. Dimensions géométriques (en mm) des étiquettes RFID sans puce.

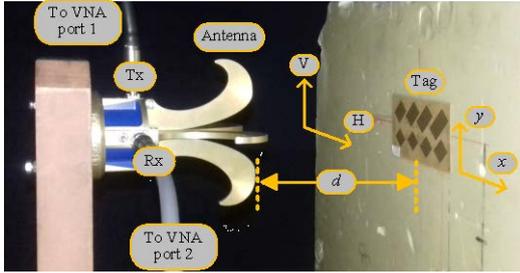
La SER des étiquettes RFID sans puce est simulée sur CST Microwave Studio. La Figure 2 montre la SER à polarisation croisée simulée pour l'objet de référence  $\sigma^{\text{ref}}$ . Les sommets des pics de  $\sigma^{\text{ref}}$  sont détectés et une courbe reliant ces sommets  $\sigma^{\text{ref-fit}}$  est obtenue par fit. Cette courbe sera utilisée dans la procédure d'étalonnage afin d'étendre la bande des fréquences discrètes (pics en lien avec les résonances) à une plage continue entre 2 et 8GHz.

## 3. Mesures et résultats

Les mesures expérimentales sont effectuées à l'aide d'une configuration radar monostatique en environnement anéchoïque, comme le montre la Figure 3. La distance entre l'étiquette et l'antenne est  $d = [10, 30]$  cm. La quantité mesurée est le coefficient de transmission  $S_{21}$ . Tous les signaux mesurés sont normalisés par rapport à une mesure initiale réalisée sans le tag (moyen simple pour supprimer une partie du bruit de fond).

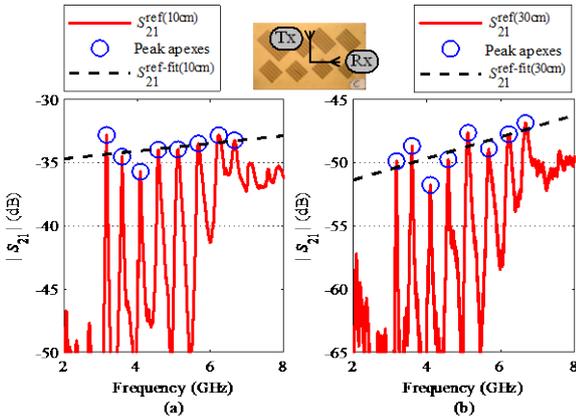


**Figure 2. SER en polarisation croisée simulée pour l'étiquette de référence  $\sigma_{21}^{\text{ref}}$  ainsi que son signal fittant les sommets avec une courbe linéaire  $\sigma_{21}^{\text{ref-fit}}$ .**



**Figure 3. Photographie de la configuration de mesure.**

La Figure 4 présente les signaux mesurés  $S_{21}$  du tag de référence pour  $d = 10$  cm  $S_{21}^{\text{ref}(10\text{ cm})}$  ainsi que son signal fitté  $S_{21}^{\text{ref-fit}(10\text{ cm})}$  [Figure 4(a)] et pour  $d = 30$  cm  $S_{21}^{\text{ref}(30\text{ cm})}$  ainsi que son signal fitté  $S_{21}^{\text{ref-fit}(30\text{ cm})}$  [voir Figure 4(b)]. Les signaux  $S_{21}^{\text{ref-fit}(10\text{ cm})}$  et  $S_{21}^{\text{ref-fit}(30\text{ cm})}$  seront utilisés dans le processus de calibration.



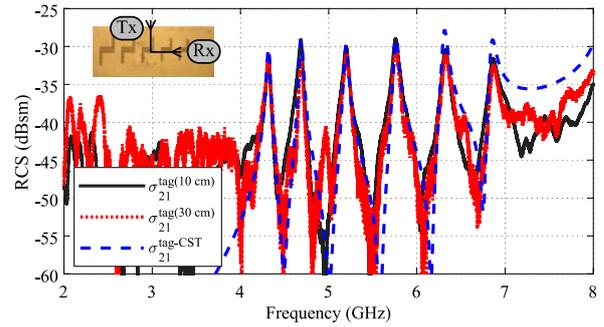
**Figure 4. Mesures  $S_{21}$  du tag de référence ainsi que leur signal fitté. (a)  $d=10$  cm. (b)  $d=30$  cm.**

La SER calibrée du tag de test  $\sigma_{21}^{\text{tag}}$  est calculée à l'aide d'une classique [3] :

$$\sigma_{21}^{\text{tag}} = \left[ \frac{S_{21}^{\text{tag}}}{S_{21}^{\text{ref-fit}}} \right]^2 \cdot \sigma_{21}^{\text{ref-fit}} \quad (1)$$

Pour l'étalonnage des signaux mesurés à  $d = 10$  cm,  $S_{21}^{\text{tag}} = S_{21}^{\text{tag}(10\text{ cm})}$  et  $S_{21}^{\text{ref-fit}} = S_{21}^{\text{ref-fit}(10\text{ cm})}$  dans (1). Alors que, pour l'étalonnage des signaux mesurés à  $d = 30$  cm,  $S_{21}^{\text{tag}} = S_{21}^{\text{tag}(30\text{ cm})}$  et  $S_{21}^{\text{ref-fit}} = S_{21}^{\text{ref-fit}(30\text{ cm})}$  dans (1). La Figure 5 montre la polarisation croisée de la SER

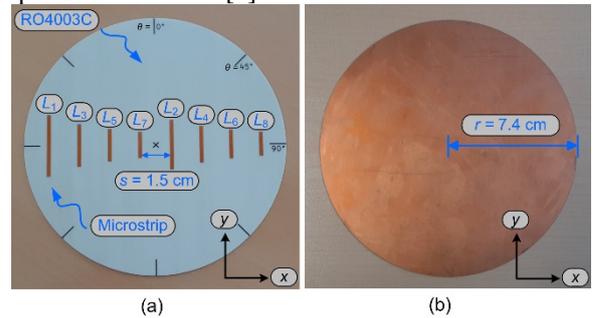
calibrée du tag test  $\sigma_{21}^{\text{tag}}$  mesuré à  $d = 10$  cm  $\sigma_{21}^{\text{tag}(10\text{ cm})}$  et à  $d = 30$  cm  $\sigma_{21}^{\text{tag}(30\text{ cm})}$  en comparaison avec la SER simulée sur CST  $\sigma_{21}^{\text{tag-CST}}$ . On peut observer que les signaux  $\sigma_{21}^{\text{tag}(10\text{ cm})}$  et  $\sigma_{21}^{\text{tag}(30\text{ cm})}$  présentent une bonne correspondance avec le signal simulé  $\sigma_{21}^{\text{tag-CST}}$ . Dans la bande de fréquences de 4 à 6 GHz, l'erreur de calibration crête à crête à  $d = 10$  cm  $\Delta\sigma_{21}^{\text{tag}(10\text{ cm})}$  est inférieure à 1,59dB et pour  $d = 30$  cm  $\Delta\sigma_{21}^{\text{tag}(30\text{ cm})}$  elle est inférieure à 2,51 dB. En revanche, pour la gamme de fréquences de 4 à 7 GHz, les erreurs sont plus importantes :  $\Delta\sigma_{21}^{\text{tag}(10\text{ cm})} < 2,65$  dB et  $\Delta\sigma_{21}^{\text{tag}(30\text{ cm})} < 3,11$  dB.



**Figure 5. SER à polarisation croisée calibrée du tag test  $\sigma_{21}^{\text{tag}}$  mesuré à  $d = 10$  cm  $\sigma_{21}^{\text{tag}(10\text{ cm})}$  et à  $d = 30$  cm  $\sigma_{21}^{\text{tag}(30\text{ cm})}$  en comparaison avec la SER simulée sur CST  $\sigma_{21}^{\text{tag-CST}}$ .**

#### 4. Étalonnage des radars polarimétriques

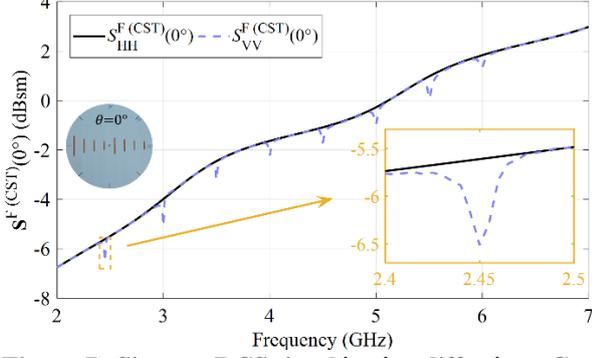
Les vues avant et arrière du diffuseur d'étalonnage proposé sont présentées respectivement sur les figures 6(a) et (b). Le diffuseur proposé est réalisé en utilisant un substrat Rogers RO4003C avec une permittivité diélectrique  $\epsilon_r = 3,55$ , et une hauteur de substrat  $h = 0,81$  mm. Le rayon du diffuseur circulaire est  $r = 7,4$  cm. La conception du diffuseur proposé est basée sur des dipôles microbandes [4].



**Figure 6. Photographies du diffuseur circulaire proposé. (a) Vue face avant. (b) Vue face arrière.  $L_1 = 35,45$  mm,  $L_2 = 28,79$  mm,  $L_3 = 24,48$  mm,  $L_4 = 21,27$  mm,  $L_5 = 18,82$  mm,  $L_6 = 16,82$  mm,  $L_7 = 15,27$  mm,  $L_8 = 13,88$  mm,  $w=2$ , et  $s = 1,5$  cm.**

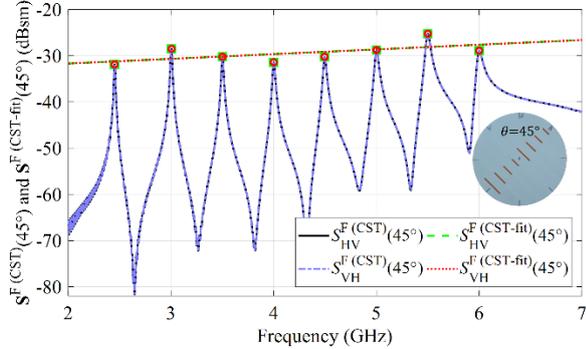
La figure 7 montre les signaux RCS simulés rétrodiffusés en co-polarisation  $S_{\text{HH}}^{\text{F}(CST)}(0^\circ)$  et  $S_{\text{VV}}^{\text{F}(CST)}(0^\circ)$  de la face avant du diffuseur proposé pour  $\theta = 0^\circ$ . En effet à  $\theta = 0^\circ$ , les dipôles du diffuseur proposé

sont alignés verticalement. Pour cette raison, l'image  $S_{VV}^{F(CST)}(0^\circ)$  présente les creux de résonance. D'autre part,  $S_{HH}^{F(CST)}(0^\circ)$  présente des signaux non résonnants. Ces signaux non résonnants proviennent des réflexions spéculaires de la forme circulaire. Les signaux de polarisation croisée  $S_{HV}^{F(CST)}(0^\circ)$  et  $S_{VH}^{F(CST)}(0^\circ)$  sont proches de zéro à cause de la forme symétrique du diffuseur.



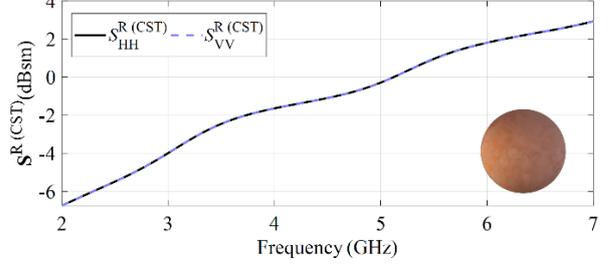
**Figure 7. Signaux RCS simulés rétrodiffusés en Co-polarisation  $S_{HH}^{F(CST)}(0^\circ)$  et  $S_{VV}^{F(CST)}(0^\circ)$  de la face avant du diffuseur proposé aligné à  $\theta = 0^\circ$ . Encadrés : zoom avant sur le premier creux de résonance.**

À  $\theta = 45^\circ$ , coté face avant orienté vers le radar polarimétrique, le diffuseur proposé devient dépolarisant et rétrodiffuse les quatre composantes de la matrice de diffusion  $S^F(CST)(45^\circ)$ . Les signaux simulés du RCS en co-polarisation  $S_{HH}^{F(CST)}(45^\circ)$ ,  $S_{VV}^{F(CST)}(45^\circ)$  sont les versions réduites en amplitude des signaux  $S_{VV}^{F(CST)}(0^\circ)$ . Cette réduction d'amplitude est due à l'angle  $\theta = 45^\circ$  des dipôles par rapport à la polarisation du signal incident. La figure 8 montre les signaux RCS simulés rétrodiffusés en polarisation croisée  $S_{HV}^{F(CST)}(45^\circ)$  et  $S_{VH}^{F(CST)}(45^\circ)$  ainsi que leurs signaux d'ajustement  $S_{HV}^{F(CST-fit)}(45^\circ)$  et  $S_{VH}^{F(CST-fit)}(45^\circ)$  de la face avant du diffuseur proposé aligné à  $\theta = 45^\circ$ . Le fit des signaux est effectué en utilisant un polynôme du premier degré sur les sommets des pics associés aux dipôles.



**Figure 8. Signaux RCS simulés rétrodiffusés en polarisation croisée  $S_{HV}^{F(CST)}(45^\circ)$  et  $S_{VH}^{F(CST)}(45^\circ)$  ainsi que leurs signaux d'ajustement  $S_{HV}^{F(CST-fit)}(45^\circ)$  et  $S_{VH}^{F(CST-fit)}(45^\circ)$  de la face avant du diffuseur proposé aligné à  $\theta = 45^\circ$ . Les symboles  $\circ$  et  $\square$  présentent les sommets des pics des signaux.**

La face arrière du diffuseur proposé [voir la figure 6(b)] se comporte comme un disque métallique. L'épaisseur de cuivre est  $t=35 \mu\text{m}$ . La figure 9 montre les signaux RCS simulés rétrodiffusés en co-polarisation  $S_{HH}^{R(CST)}$  et  $S_{VV}^{R(CST)}$  de la face arrière du diffuseur proposé. Ici aussi, les signaux de polarisation croisée  $S_{HV}^{R(CST)}$  et  $S_{VH}^{R(CST)}$  sont proches de zéro en raison de la forme symétrique du diffuseur.



**Figure 9. Signaux RCS simulés rétrodiffusés par la Co-polarisation  $S_{HH}^{R(CST)}$  et  $S_{VV}^{R(CST)}$  de la face arrière du diffuseur proposé.**

L'étalonnage complet du radar polarimétrique est effectué à l'aide d'une technique d'étalonnage basée sur une seule antenne, reprise de la littérature [5]. Cette technique est valable pour les systèmes radar polarimétriques avec une bonne isolation de la polarisation croisée entre les ports d'antenne (c'est-à-dire 30 dB dans notre cas). Par conséquent, cette technique convient bien au système radar de mesure basé sur l'antenne QH800 (voir [6]). Cette technique de calibration (pour plus de détails voir [5]) nécessite deux objets de calibration. La première cible d'étalonnage présente un comportement dominant en co-polarisation, tandis que la seconde cible d'étalonnage présente un fort comportement de diffusion en polarisation croisée. Avec ces deux cibles, la matrice de diffusion étalonnée d'un objet test inconnu  $C^u$  est calculée. L'exposant fait référence à l'objet de test inconnu. Dans cet article, nous avons rendu cette approche compatible avec l'utilisation d'un diffuseur résonnant, ce qui n'est pas le cas dans [5].

Pour l'étalonnage de la co-polarisation, la rétrodiffusion exacte de la co-polarisation de la première cible d'étalonnage (c'est-à-dire avec un comportement dominant en co-polarisation)  $S_0$  (résultat de la simulation) doit être connue. Ensuite, la matrice de rétrodiffusion de la première cible d'étalonnage  $M^0$  doit être mesurée en plaçant la cible à une distance  $d_0$ . Puis, pour une cible de test inconnue dont on note  $M^u$  la matrice mesurée à une distance  $d_u$ , les composantes de co-polarisation étalonnées  $C_{VV}^u$  et  $C_{HH}^u$  de la matrice de diffusion calibrée  $C^u$  sont estimées comme dans [5], à partir des relations suivantes :

$$C_{VV}^u = \left( \frac{M_{VV}^u}{M_{VV}^0} \right) \left( \frac{d_u}{d_0} \right)^2 e^{-i2k(d_0-d_u)} S_0 \quad (2)$$

$$C_{HH}^u = \left( \frac{M_{HH}^u}{M_{HH}^0} \right) \left( \frac{d_u}{d_0} \right)^2 e^{-i2k(d_0-d_u)} S_0 \quad (3)$$

où  $k$  est le nombre d'onde.

Pour l'étalonnage de la polarisation croisée, la matrice  $\mathbf{M}^C$  de la deuxième cible d'étalonnage (c'est-à-dire présentant un fort comportement de diffusion en polarisation croisée) doit être mesurée en plaçant la cible à une distance  $d_c$ . Ensuite, les composantes étalonnées de polarisation croisée  $C'_{HV}^u$  et  $C'_{VH}^u$  de  $\mathbf{C}'^u$  de l'objet de test inconnu sont estimées comme dans [5], avec :

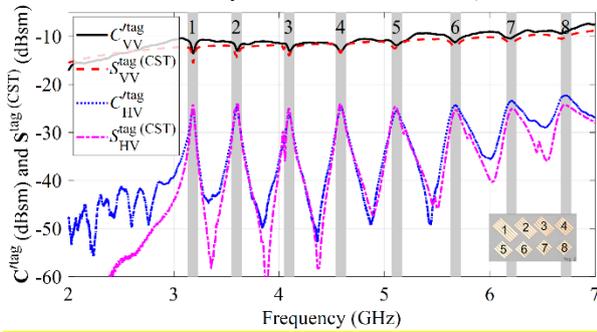
$$C'_{HV}^u = \frac{M_{HV}^u}{\sqrt{K_1 K_2}} \left(\frac{d_u}{d_0}\right)^2 e^{-izk(d_0-d_u)} S_0 \quad (4)$$

$$C'_{VH}^u = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} M_{VH}^u \left(\frac{d_u}{d_0}\right)^2 e^{-izk(d_0-d_u)} S_0 \quad (5)$$

où  $K_1 = M_{HV}^C/M_{VH}^C$  et  $K_2 = M_{VV}^0/M_{HH}^0$ . L'étalonnage du radar polarimétrique est réalisé à l'aide de (2), (3), (4) et (5).

En pratique, pour l'étalonnage du radar à l'aide du diffuseur proposé, nous avons utilisé la face arrière (qui fournit des signaux co-polarisés dominants) (voir figure 9) et la face avant inclinée à  $45^\circ$  (qui fournit de forts signaux en polarisation croisée) (voir figure 8). Dans un tel cas, les signaux utilisés dans (2), (3), (4) et (5) sont : 1)  $S_0 = S_{VV}^{R(CST)}$ ; 2)  $M_{HH}^0 = M_{HH}^R$  et  $M_{VV}^0 = M_{VV}^R$  avec  $d_0 = 28$  cm; 3)  $M_{HV}^C = M_{HV}^{F(\text{fit})}(45^\circ)$  et  $M_{VH}^C = M_{VH}^{F(\text{fit})}(45^\circ)$  avec  $d_c = 28$  cm. Dans ce cas, l'objet de test (à savoir un tag chipless RFID mesuré à  $d_u = 28$  cm est utilisé.

Pour cette étiquette RFID, la figure 10 montre les signaux RCS calibrés  $C'_{VV}^{\text{tag}}$  et  $C'_{HV}^{\text{tag}}$  en comparaison avec les signaux RCS simulés avec CST  $S_{VV}^{\text{tag}(CST)}$  et  $S_{HV}^{\text{tag}(CST)}$ . On peut observer que chaque composante de  $\mathbf{C}'^{\text{tag}}$  présente un bon accord avec  $\mathbf{S}^{\text{tag}(CST)}$ . Pour faciliter l'observation, seules deux composantes des matrices de diffusion  $\mathbf{C}'^{\text{tag}}$  et  $\mathbf{S}^{\text{tag}(CST)}$  sont représentées sur la figure 10. Les erreurs sur la matrice d'étalonnage [c'est-à-dire,  $\Delta \mathbf{S}'^{\text{tag}} = \mathbf{C}'^{\text{tag}} - \mathbf{S}^{\text{tag}(CST)}$ ] sont calculées pour la gamme de fréquences de 2 à 7 GHz. Pour toutes les composantes de la matrice de diffusion  $\mathbf{C}'^{\text{tag}}$  l'erreur maximale de RCS  $\Delta S_2^{\text{max}}$  est inférieure à 3 dB. Ici, les performances du diffuseur proposé sont comparables à celles des objets d'étalonnage standard (disque métallique et dièdre incliné à  $22,5^\circ$  - résultats non présentés dans l'article).



**Figure 10.** Les signaux RCS calibrés  $C'_{VV}^{\text{tag}}$  et  $C'_{HV}^{\text{tag}}$  en comparaison avec les signaux simulés par CST  $S_{VV}^{\text{tag}(CST)}$  et  $S_{HV}^{\text{tag}(CST)}$  pour l'étiquette RFID sans puce utilisée comme cible de test.

## 5. Conclusion

Cet article présente la possibilité d'utiliser une simple structure planaire de type PCB pour effectuer la calibration de la polarisation croisée de la SER d'un objet à caractériser. Le principe repose sur l'utilisation de résonateurs dimensionnés de manière à rétrodiffuser une composante du champ perpendiculaire au champ incident. Ainsi la calibration de la polarisation croisée ne fait pas appel à l'utilisation d'objets métalliques le plus souvent 3D, encombrants et coûteux du fait de la précision requise. L'approche proposée est générale et ne se limite pas à la caractérisation des étiquettes sans puce. De plus, des modèles ou des approches plus précises que (1) (disponibles dans la littérature) peuvent être utilisés pour améliorer la précision de l'utilisation d'une étiquette sans puce comme cible dépolarisante. Les performances de la méthode proposée sont comparées à la SER simulée sur logiciel commercial. L'erreur de calibration maximale de 4 à 7 GHz est inférieure à 3,11 dB.

Un diffuseur circulaire plan, compact et peu coûteux a été utilisé comme cible d'étalonnage radar. Cette cible d'étalonnage proposée est un diffuseur 3 en 1 : 1) coté face arrière, il se comporte comme un disque métallique. 2) Coté face avant, avec des dipôles alignés verticalement, il se comporte comme un diffuseur non polarisé avec des signaux rétrodiffusés dominants en co-polarisation. 3) Coté face avant, avec des dipôles inclinés à  $45^\circ$ , il se comporte comme un diffuseur dépolarisé avec des signaux rétrodiffusés importants en polarisation croisée. Le diffuseur proposé a été testé en tant qu'objet d'étalonnage de référence pour une technique classique d'étalonnage de radar polarimétrique à antenne unique. Un objet de test (c'est-à-dire une étiquette RFID sans puce dépolarisée) a été utilisé. L'erreur d'étalonnage maximale pour le diffuseur proposé sur une gamme de fréquences allant de 2 à 7 GHz est de  $\pm 3$  dB.

## 6. Remerciements

Ce travail est financé par l'Union Européenne à travers l'ERC ScattererID N°772539.

## Références

- [1] E. Perret, Radio Frequency Identification and Sensors: From RFID to Chipless RFID. Hoboken, NJ, USA : Wiley : Wiley, 2014.
- [2] A. Vena, E. Perret, and S. Tedjni, "A Depolarizing Chipless RFID Tag for Robust Detection and Its FCC Compliant UWB Reading System," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 61, no 8, p. 2982-2994, août 2013.
- [3] A. Vena, E. Perret, et S. Tedjini, "Chipless RFID Tag Using Hybrid Coding Technique," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* vol. 59, no. 12, pp. 3356-3364, déc. 2011.
- [4] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed. New York, USA: Wiley, 1998.

- [5] K. Sarabandi, F. T. Ulaby, and M. A. Tassoudji, "Calibration of polarimetric radar systems with good polarization isolation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 28, no. 1, pp. 70–75, 1990.
- [6] (2019). Datasheet - Open Boundary Quad-Ridge Horns. MVG. Accessed: Feb. 23, 2022. [Online]. Available:[https://www.mvg-world.com/sites/default/files/2020-05/Datasheet\\_Antennas\\_Open%20Boundary%20Quad-Ridge%20Horns\\_08\\_19\\_BD7\\_2.pdf](https://www.mvg-world.com/sites/default/files/2020-05/Datasheet_Antennas_Open%20Boundary%20Quad-Ridge%20Horns_08_19_BD7_2.pdf).