



HAL
open science

Technique d'imagerie radar polarimétrique pour la lecture sans fil d'un thermomètre à base de Galinstan fabriqué en technologie additive

D Henry, A Ahmad, A Djilani, P Pons, H Aubert

► To cite this version:

D Henry, A Ahmad, A Djilani, P Pons, H Aubert. Technique d'imagerie radar polarimétrique pour la lecture sans fil d'un thermomètre à base de Galinstan fabriqué en technologie additive. XXXIIIème Journées Nationales des Microondes, Jun 2024, Antibes - Juan les Pins, France. hal-04648029

HAL Id: hal-04648029

<https://hal.science/hal-04648029>

Submitted on 15 Jul 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.

Technique d'imagerie radar polarimétrique pour la lecture sans fil d'un thermomètre à base de Galinstan fabriqué en technologie additive

D. Henry¹, A. Ahmad¹, A. Djilani^{1,2}, P. Pons¹, H. Aubert^{1,2}

¹LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse

²Toulouse INP - Institut National Polytechnique
dhenry@laas.fr

Résumé — Ces travaux reportent la conception, la fabrication, la localisation et l'interrogation d'un capteur passif et sans fil de température basé sur le déplacement de Galinstan dans un canal microfluidique. Le capteur est fabriqué en technologie additive par frittage laser et dépoliarise le champ électromagnétique. Il est ensuite interrogé par un radar FM-CW à 24GHz jusqu'à une portée de 15m, et le niveau de Galinstan est estimée à partir d'une technique d'imagerie radar polarimétrique. À une portée de 2.4m, la sensibilité du capteur est de 4.5dB par millimètre de Galinstan.

1. Introduction

L'interrogation à distance de capteurs sans fil peut être difficile en environnement contraint lorsque l'utilisation de batteries ou de circuits électroniques n'est pas possible. Dans de telles conditions, l'utilisation de capteurs passifs et sans puce (c'est-à-dire sans batteries ni circuits électroniques) est une solution intéressante. Parmi ces dispositifs, on compte les capteurs passifs RFID (Radio Frequency Identification) étudiés dans des applications variées exploitant l'approche multi-capteurs [1], la bio-compatibilité [2], la polarisation du champ électrique [3]. L'inconvénient de cette technologie est la portée de l'interrogation qui reste insuffisante pour certaines applications (environ 1m pour les capteurs passifs RFID en respectant les normes des puissances isotropiques rayonnées équivalentes [4]).

Une des solutions pour augmenter cette portée est d'utiliser un radar FM-CW (onde continue à fréquence modulée) avec des antennes directives en émission et réception. Il est ainsi possible à partir d'une imagerie radar 3D d'interroger des capteurs passifs aux ondes millimétriques et d'estimer des grandeurs physiques. De plus, les environnements industriels et contraints sont souvent très réfléchissants pour les ondes électromagnétiques. Des travaux ont donc été menés pour réduire le clutter électromagnétique et augmenter le rapport signal-à-bruit en interrogeant des capteurs passifs dépoliarisants de pression en environnement industriel [5]. Bien que ces capteurs soient détectables jusqu'à une dizaine de mètres, ils sont complexes à fabriquer, et possèdent des dynamiques de signal relativement faibles (entre 2dB et 3dB). De plus, des lignes à

retard sont nécessaires, ce qui ne facilite pas leur intégration en milieu industriel.

Afin d'obtenir des capteurs passifs facilement fabriquables avec de bonnes dynamiques de signal, ces travaux [6] présentent un capteur passif dépoliarisant entièrement fabriqué en technologie additive (par frittage laser). Ce capteur est composé de guides d'onde et d'un canal microfluidique pour une mesure de la température à distance à une fréquence de 24GHz. Comparé au dernier capteur de ce type fabriqué en technologie additive [7], les antennes sont intégrées au capteur et du Galinstan est utilisé dans le canal. Le fonctionnement du capteur ainsi que sa conception sont détaillés dans la première partie. Dans la seconde partie, le capteur est interrogé à différentes distances (jusqu'à 14.8m) par un radar FM-CW effectuant un balayage 3D de la scène pour différentes polarisations. Le déplacement du Galinstan dans le canal microfluidique est ensuite estimé à partir d'une technique d'imagerie utilisant des isolignes [8] d'échos radar.

2. Fonctionnement du capteur

Le capteur passif sans fil présenté dans ces travaux est une structure métallique en guide d'onde composée d'une cavité électromagnétique connectée à deux antennes en polarisations croisées, et conçue pour fonctionner dans une bande de fréquence entre 22.8GHz et 24.8GHz. Le schéma de la structure est affichée sur la Figure 1a. La cavité a une longueur de 9.2mm et est délimitée par deux iris inductifs. Les éléments des iris sont de formes triangulaires pour pouvoir être imprimés facilement en technologie additive. Les dimensions transverses de la cavité sont celles d'un guide d'onde rectangulaire WR28 (3.556mm×7.112mm). Une vue détaillée de la cavité est affichée sur la Figure 1b. L'un des ports de la cavité est connecté à une antenne cornet polarisée verticalement (V). L'autre port est connecté à une antenne cornet polarisée horizontalement (H) via un guide d'onde courbé (H) suivi d'un guide d'onde torsadé de 90°. Les dimensions totales du capteur sont de 74.9mm×69.8mm×31.8mm. Le gain simulé des deux antennes cornets à 23.8GHz est de 15.5dB pour un angle d'ouverture de 25° dans le plan *E* et 31° dans le plan *H*. La cavité est traversée par un canal microfluidique en PTFE (polytetrafluoroéthylène) de diamètres interne 500μm et externe 800μm à travers deux ouvertures

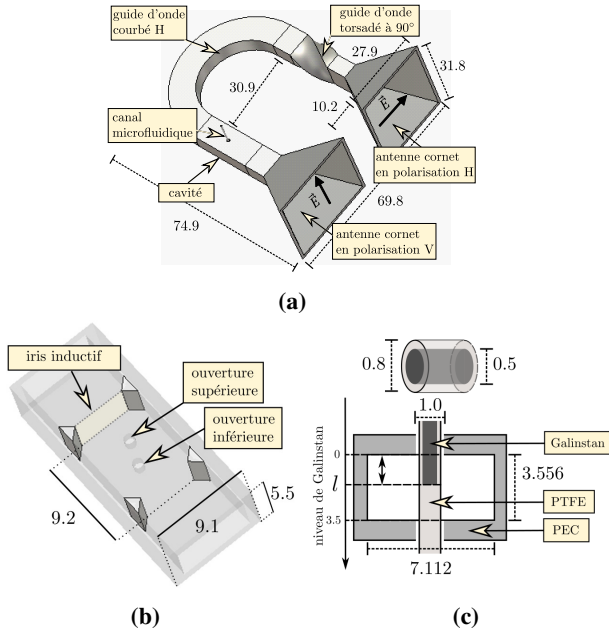


FIGURE 1. (a) Schéma de la structure métallique du capteur passif microfluidique. (b) Vue détaillée de la cavité. (c) Vue transverse du canal microfluidique à travers la cavité. Les unités sont en mm.

passant au centre de la cavité. À cet endroit, le champ électrique du mode de résonance fondamental atteint sa plus haute amplitude. Une vue transverse du canal microfluidique est visible sur la Figure 1c. À l'intérieur de ce canal se trouve du Galinstan (alliage Gallium-Indium-Étain) dont la position du ménisque, notée l , désigne le *niveau de Galinstan* dans le canal. Quand ce niveau est $l=0$ mm, le canal est vide. Quand ce niveau atteint $l=3.556$ mm, le canal est rempli. Au dessus de ce niveau, le ménisque du Galinstan est situé à l'extérieur du guide d'onde.

L'amplitude du coefficient de transmission S_{21} de la cavité est simulée avec le logiciel HFSS à la fréquence de 23.8GHz et est affichée en fonction du niveau de Galinstan sur la Figure 2 (courbe bleue). Dans cette simulation le Galinstan est modélisé comme un conducteur électrique parfait (PEC). Comme attendu, on observe une diminution de $|S_{21}|$ lorsque le niveau de Galinstan augmente dans le canal. La dynamique maximale obtenue est $\Delta|S_{21}|=53$ dB.

Pour mettre en évidence le fonctionnement sans fil du capteur dépolarisant, une simulation des surfaces équivalentes radar (SER) monostatiques de la structure complète est effectuée avec le logiciel HFSS en fonction de l'azimut. Les résultats sont affichés sur la Figure 3 pour (a) la SER en co-polarisation, notée σ_{VV} et (b) la SER en polarisation croisée, notée σ_{VH} . Les couleurs noires et rouges représentent la SER lorsque le canal est respectivement vide ($l=0$ mm) et rempli ($l=3.6$ mm). Comme la structure convertit l'onde incidente en polarisation V en une onde réémise en polarisation H par l'intermédiaire du guide torsadé de 90°, on observe une plus grande dynamique pour σ_{VH} (32dB) que pour σ_{VV} (5dB).

Le prototype est ensuite imprimé en technologie ad-

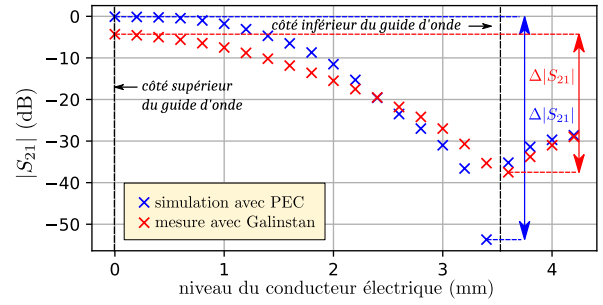


FIGURE 2. Amplitude du coefficient de transmission de la cavité simulé (courbe bleue) et mesuré (courbe rouge) à 23.8GHz en fonction du niveau de métal liquide dans le canal.

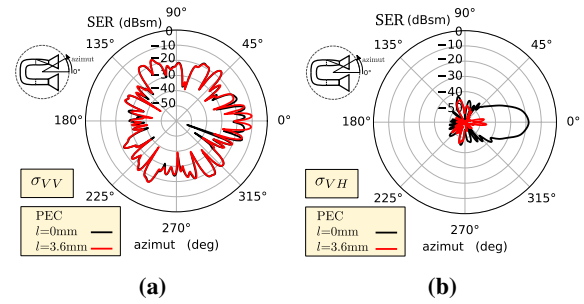


FIGURE 3. SER monostatique simulée en fonction de l'azimut (a) en co-polarisation σ_{VV} et (b) en polarisation croisée σ_{VH} .

ditive par frittage laser au laboratoire CIRIMAT (Toulouse, France). Une poudre d'acier inoxydable est utilisée (316L de conductivité électrique 3.10^6 S/m et de rugosité moyenne de $7\mu\text{m}$). Pour des raisons pratiques, la structure métallique a été imprimée en cinq parties distinctes : (i) la cavité, (ii) la première antenne cornet, (iii)-(iv) le guide courbé en deux parties et (v) le guide torsadé avec la deuxième antenne cornet. Les différentes parties sont ensuite assemblées à l'aide de flanges, comme le montre la photographie de la structure imprimée sur la Figure 4. Le coefficient de transmission de la cavité est aussi mesuré à l'aide d'un analyseur de réseau en fonction du niveau de Galinstan à l'intérieur du canal. Pour déplacer le Galinstan avec précision, une table de micro-positionnement est utilisée pour translater la cavité alors qu'un canal rempli de Galinstan reste fixe. Avec cette méthode, il est possible de connaître le niveau de Galinstan l avec une précision de $\pm 30\mu\text{m}$. L'amplitude du coefficient de transmission $|S_{21}|$ mesuré est affichée sur la courbe rouge de la Figure 2. La différence d'amplitude entre la simulation (sans pertes) et les mesures n'excède pas 5dB. La dynamique maximale obtenue est $\Delta|S_{21}|=33$ dB pour une sensibilité $\Delta|S_{21}|/\Delta l=9.1$ dB/mm entre 0mm et 3.6mm. La sensibilité est légèrement plus élevée entre 0.8mm et 3.0mm (9.3dB/mm).

3. Interrogation du capteur

L'interrogation du capteur est effectuée par un radar FM-CW de fréquence porteuse $f_c=24.3$ GHz et de bande

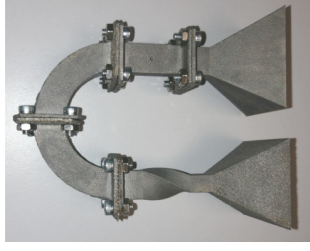


FIGURE 4. Photographie du capteur imprimé par frittage laser

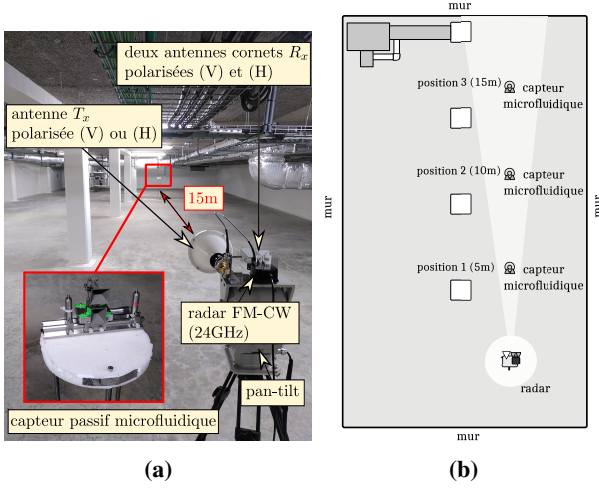


FIGURE 5. (a) Photographie du capteur microfluidique à 15m de l'interrogateur radar (b) illustration du schéma de mesure

de modulation $B=2\text{GHz}$. On obtient donc une résolution théorique en profondeur $d=\frac{c}{2B}=7.5\text{cm}$ avec $c=3.10^8\text{m/s}$ la vitesse de la lumière dans le vide. Le front-end du radar (modèle DK-sR-1030e IMST GmbH [9]) est composé d'un canal de transmission (T_x) et de deux canaux de réceptions (R_x). La puissance émise de 20dBm est rayonnée par une antenne cornet circulaire munie d'une lentille polarisée V ou H . Son gain est de 28dB et son angle d'ouverture de 6° . Les antennes de réception sont des cornets de gain 20dB et polarisées V et H . Un balayage mécanique en 3D de la scène est effectuée à l'aide d'un pan-tilt qui modifie la direction du faisceau des antennes en azimut (φ) et en élévation (θ). Une photographie du dispositif est affichée sur la Figure 5a. Le balayage en azimut s'effectue selon un angle de $\pm 10^\circ$ avec une vitesse angulaire $v_\varphi=4^\circ/\text{s}$. Le temps de répétition du radar étant de $T_{rep}=53\text{ms}$, le pas angulaire en azimut est $d_\varphi=v_\varphi \times T_{rep}=0.2^\circ$. Le balayage en élévation s'effectue selon un angle de $\pm 10^\circ$ avec un pas angulaire de 1° .

Le capteur est interrogé dans une salle du laboratoire à 2.4m du radar, puis dans un sous-sol à des distances de 5.2m, 9.9m et 14.8m du radar pour différents niveaux de Galinstan, comme illustré sur le schéma de la Figure 5b. L'écho radar du mode de détection du capteur est représenté dans le plan (θ, φ) sur la Figure 6 pour (a) $l=0\text{mm}$ et (b) $l=3.0\text{mm}$ lorsque ce dernier est à 2.4m du radar. On note p la configuration de polarisations des antennes T_x

TABLEAU 1. Caractéristique de l'estimation à différentes distances d'interrogation

p	Δe_{max}		$\alpha_{e_{max}}$		$\overline{e_{max}}$	
	VH	HV	VH	HV	VH	HV
2.4m	8.2	9.9	3.7	4.5	-8.5	-8.7
5.2m	5.4	3.3	2.4	1.5	-6.7	-5.3
9.9m	3.8	4.9	1.7	2.2	-11.2	-11.7
14.8m	2.0	na	0.9	na	-8.7	na

pour $l_{min}=0.8\text{mm}$ et $l_{max}=3.0\text{mm}$

unités : Δe_{max} en dB ; $\alpha_{e_{max}}$ en dB/mm ; $\overline{e_{max}}$ en dB

et R_x du radar, tels que $p=VH$ indique une polarisation V pour l'antenne T_x et H pour l'antenne R_x (et inversement lorsque $p=HV$). Comme attendu, les niveaux d'écho sont plus faibles lorsque $l=3\text{mm}$ pour $p=VH$ et $p=HV$ que lorsque $l=0\text{mm}$. Sur ces images, les échos radars sont segmentés par des isolignes de niveau d'écho [8] où des caractéristiques peuvent être extraites, en particulier e_{max} le maximum d'écho radar à l'intérieur de l'isoligne. e_{max} peut être utilisé comme estimateur du niveau de Galinstan à l'intérieur du canal microfluidique. L'estimateur e_{max} est affiché sur la Figure 7 en fonction du niveau de Galinstan pour différentes distances d'interrogation. On observe sur ces courbes que la dynamique maximale, ainsi que le niveau d'écho moyen, varient en fonction de la distance d'interrogation. Les trois caractéristiques les plus pertinentes de l'estimateur, à savoir la dynamique maximale d'écho Δe_{max} , la sensibilité $\alpha_{e_{max}}$ et la valeur moyenne de e_{max} , notée $\overline{e_{max}}$, sont reportées dans le Tableau 1 pour des niveaux de Galinstan allant de $l_{min}=0.8\text{mm}$ à $l_{max}=3.0\text{mm}$. On observe que la dynamique maximale, et par conséquent la sensibilité, diminuent lorsque la distance entre le capteur et le radar augmente. Cette diminution n'est pas générée par l'atténuation de la densité de puissance électromagnétique (qui est déjà compensée), mais par la dégradation de la résolution spatiale. De plus, pour des distances d'interrogation importantes, la rétro-diffusion électromagnétique d'objets à proximité peut interférer avec celle du capteur. Ce phénomène est visible pour $p=HV$ à la distance de 14.8m, où le niveau d'écho du clutter (généralisé probablement par le support horizontal du capteur) empêche l'interrogation. À l'inverse, la lecture est possible pour $p=VH$ à 14.8m où une sensibilité de 0.9dB/mm est mesurée. Les meilleurs résultats sont néanmoins obtenus à 2.4m avec une sensibilité de 4.5dB/mm pour $p=HV$. Enfin, on observe que la valeur de $\overline{e_{max}}$ ne diminue pas toujours avec la distance d'interrogation, et semble être affectée par différents canaux de propagation.

La résolution de la mesure représentant le déplacement de Galinstan minimum mesurable, notée δe_{max} , peut être déduite à partir d'une étude de répétabilité. Cette étude de répétabilité est appliquée à l'estimateur e_{max} . Sachant que e_{max} n'a pas un comportement linéaire en fonction de l , la résolution de la mesure dépend de la variation $l[m+1] - l[m]$ entre deux mesures effectuées, notées m et $m+1$:

$$\delta e_{max} = \sigma_{e_{max}} \times \left| \frac{l[m+1] - l[m]}{e_{max}[m+1] - e_{max}[m]} \right| \quad (1)$$

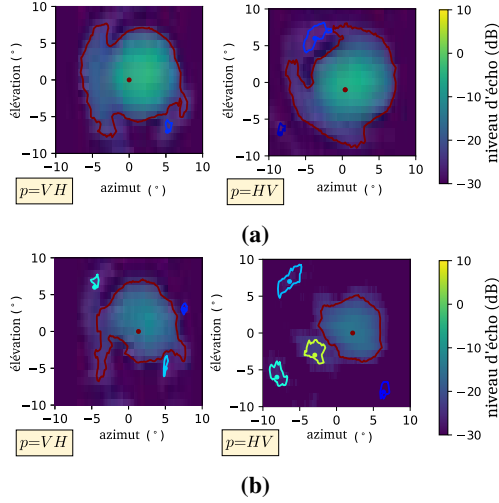


FIGURE 6. Images radar dans le plan (θ, φ) à la distance radar-capteur de 2.4m en polarisations croisées VH et HV pour un niveau de Galinstan de (a) $l=0\text{mm}$ et (b) $l=3.0\text{mm}$

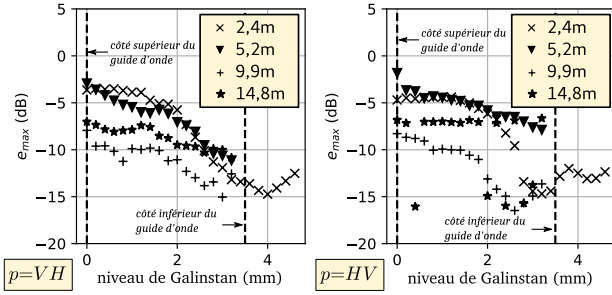


FIGURE 7. Estimateur e_{max} en fonction du niveau de Galinstan pour $p=VH$ et $p=HV$ pour différentes distances d'interrogation.

$\sigma_{e_{max}}$ représente l'écart-type de l'estimateur e_{max} qui dépend uniquement du bruit de mesure radar. À partir d'une centaine de mesures successives effectuées avec le radar, la résolution de la mesure, lorsque le capteur est interrogé à 2.4m de distance, est estimée à $\delta_{e_{max}}=17\mu\text{m}$ pour $p=VH$ et $\delta_{e_{max}}=10\mu\text{m}$ pour $p=HV$. Suivant le type d'estimateur utilisé, la résolution peut être inférieure à $10\mu\text{m}$ [6].

Enfin, on peut estimer l'écart minimal théorique en température mesurable par :

$$\delta_{T_{e_{max}}} = \delta_{e_{max}} \times \frac{\delta_T}{\delta_l} \quad (2)$$

avec $\frac{\delta_l}{\delta_T}$ la sensibilité en température définie par :

$$\frac{\delta_l}{\delta_T} = \frac{\alpha_T \times V_{tank}}{S_c} \quad (3)$$

δ_l représente un petit déplacement du Galinstan dans le canal microfluidique résultant d'une petite variation δ_T de température. $\alpha_T=11.5 \times 10^5 \text{K}^{-1}$ est le coefficient d'expansion thermique du Galinstan, $S_c=\pi r^2$ est la surface de la section du canal microfluidique de rayon

$r=0.25\text{mm}$, et V_{tank} représente le volume du réservoir de Galinstan relié au canal. À titre d'exemple, pour un volume $V_{tank}=10\text{mm}^3$, la sensibilité en température est $\frac{\delta_l}{\delta_T}=5.9\mu\text{m}/^\circ\text{C}$, et l'écart minimal mesurable en température est $\delta_{T_{e_{max}}}=2.9^\circ\text{C}$. Cet écart peut diminuer jusqu'à 0.7°C pour d'autres estimateurs différents de e_{max} [6].

4. Conclusion

Ce premier prototype de capteur passif microfluidique fabriqué en technologie additive propose des performances encourageantes en terme de sensibilité. Des travaux sont en cours de développement afin de pouvoir identifier l'écho radar de ce capteur parmi le clutter [6], et de pouvoir compenser les fluctuations d'écho qui dépendent de la distance d'interrogation. Des impressions de ce capteur en *un seul bloc* sont aussi en cours afin de s'affranchir des flanges et d'augmenter la sensibilité du capteur, et des mesures réelles de la température sont envisagées.

Références

- [1] F. Requena *et al.*, "Combined temperature and humidity chipless rfid sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 16, pp. 16 098–16 110, 2022.
- [2] P. Fathi *et al.*, "Dual-polarized keratin-based uwb chipless rfid relative humidity sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 1924–1932, 2022.
- [3] N. Barbot and E. Perret, "Impact of the polarization over the read range in chipless rfid," in *2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 2021, pp. 139–141.
- [4] N. Barbot *et al.*, "Classical RFID Versus Chipless RFID Read Range : Is Linearity a Friend or a Foe?" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 9, pp. 4199–4208, 2021.
- [5] D. Henry *et al.*, "Classification of Radar Echoes for Identification and Remote Reading of Chipless Millimeter-Wave Sensors," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 1, pp. 926–937, 2021.
- [6] —, "Wireless reading and localization of additively manufactured galinstan-based sensor using a polarimetric millimeter-wave radar imaging technique," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, pp. 1–14, 2023.
- [7] T. Marchal *et al.*, "Wireless measurement of the pressure from the ka-band radar echo of a 3d-printed microfluidic depolarizing sensor," in *2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2021, pp. 173–175.
- [8] D. Henry and H. Aubert, "Isolines in 3D Radar Images for Remote Sensing Applications," in *2019 16th European Radar Conference (EuRAD)*, 2019, pp. 69–72.
- [9] "IMST Radar small and flexible radar modules by IMST," <http://www.radar-sensor.com/>, accessed : 2022-09-26.