



HAL
open science

RFID sans puce basée sur l'effet micro-Doppler pour application longue portée

A Azarfar, N Barbot, E Perret

► **To cite this version:**

A Azarfar, N Barbot, E Perret. RFID sans puce basée sur l'effet micro-Doppler pour application longue portée. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2023, Limoges, France. hal-04047234

HAL Id: hal-04047234

<https://hal.science/hal-04047234>

Submitted on 27 Mar 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.

RFID sans puce basée sur l'effet micro-Doppler pour application longue portée

A. Azarfar¹, N. Barbot¹, E. Perret¹

¹Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, LCIS, F-26000 Valence, France
ashkan.azarfar@lcis.grenoble-inp.fr

Résumé — L'article décrit comment les tags RFID sans puce en mouvement peuvent être lus à des distances plus élevées que ce qui se fait actuellement sans tenir compte du déplacement. Le mouvement se traduit par l'apparition d'un champ rétrodiffusé par le tag contenant des fréquences différentes de celles émises par le lecteur selon l'effet Doppler. L'utilisation de ces fréquences non générées par le lecteur augmente considérablement la distance de lecture du tag, notamment en environnement réel. Cet article se focalise sur un mouvement de rotation du tag. La preuve de concept est réalisée sur des dipôles court-circuités qui sont lus jusqu'à 10 m.

1. Introduction

La technologie RFID sans puce a été présentée comme une solution efficace pour réduire les coûts sur le marché de la traçabilité par rapport à la RFID classique. Dans cette technologie, la puce de silicium ainsi que tout composant électronique sont exclus de la structure du tag. Les données d'identification (ID) sont donc incluses dans les propriétés géométriques des tags qui se traduisent par une signature RF spécifique que le lecteur peut décoder. Beaucoup d'efforts ont été investis dans la technologie sans puce [1] cependant, la distance de lecture associée à cette technologie reste très inférieure à celle de la RFID Ultra Haute Fréquence (UHF) car contrairement aux tags RFID UHF classiques qui modifient leur SER, les tags sans puce ne peuvent pas moduler leur signal rétrodiffusé car l'interaction EM avec le tag sans puce (et presque tous les matériaux de l'environnement) peut être modélisée par des systèmes linéaires invariants dans le temps (LTI). Ainsi, les signaux rétrodiffusés par le tag et par l'environnement partagent les mêmes fréquences que le signal transmis, ce qui réduit considérablement la portée de lecture [2]. Ainsi, la solution pertinente pour augmenter la portée de lecture consiste à rompre la linéarité ou l'invariance temporelle des tags sans puce.

En radar, l'effet Doppler a été étudié et utilisé pour de nombreuses applications depuis des décennies [3]. L'onde rétrodiffusée par un objet en mouvement peut réfléchir des fréquences différentes de celles émises par l'émetteur. L'étude des mouvements périodiques d'un objet (rotation ou vibration dans une ou plusieurs directions) avec de faibles déplacements par rapport à la distance [4] est

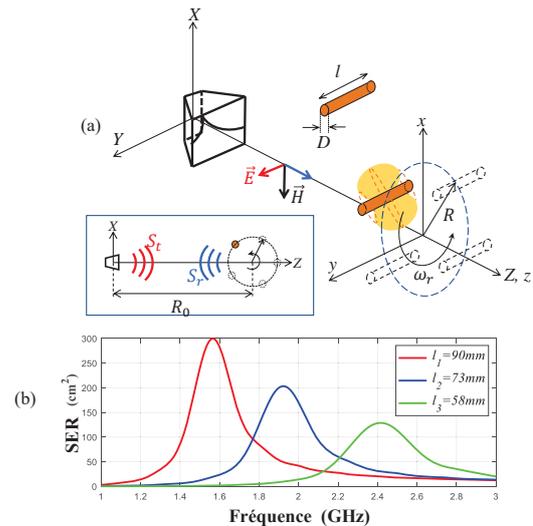


Figure 1. (a) Principe du capteur Chipless basé sur l'effet micro Doppler. (b) SER simulée du dipôle pour différentes longueurs l .

connue sous le nom d'effet micro-Doppler [5]. En considérant les surfaces extérieures de l'objet comme des surfaces parfaitement conductrices et de grande taille par rapport à la longueur d'onde, il est possible d'établir des formules analytiques décrivant comment la puissance rétrodiffusée est distribuée parmi les harmoniques autour de la fréquence du champ incident [4, 5]. Récemment, le principe de l'effet micro-Doppler a été utilisé pour réaliser des balises rotatives détectables par les radars automobiles FMCW [6].

L'idée de cet article est d'utiliser l'effet Doppler, en tant que modulation de phase variable dans le temps, sur des tags sans puce pour permettre la détection sur une distance de lecture plus élevée que lorsque le tag est immobile. Le mouvement de rotation est considéré ici et la détection est basée sur les fréquences micro-Doppler induites par la rotation.

2. Modèle analytique

2.a. Rétrodiffusion d'un dipôle rotatif comme tag sans puce

La Figure 1(a) montre un dipôle d'une longueur l qui est aligné sur l'axe y et qui tourne sur un cercle de rayon

R . La fréquence angulaire de rotation du dipôle autour de son axe de rotation (axe y) est $\omega_r = 2\pi f_r$. Le champ lointain rayonné d'une antenne polarisée suivant y avec un gain G_A est incident sur le dipôle et le champ rétro-diffusé en co-polarisation est reçu par la même antenne. En outre, le courant induit sur le dipôle peut être parfaitement modélisé par une source de courant avec un diagramme de rayonnement omnidirectionnel, comme le montre la Figure 1(a). Ainsi, l'amplitude du champ rétro-diffusé ne change pas pendant la rotation du dipôle. Les champs rétrodiffusés dont la phase varie du fait de la rotation du dipôle peuvent être modélisés avec précision en utilisant l'effet micro-Doppler classique induit par la rotation [5]. Dans la représentation 2D du problème, illustrée dans l'encart de la Figure 1(a), le dipôle peut être remplacé par un diffuseur ponctuel en rotation dans le plan xz . Pour une onde harmonique transmise en fonction du temps $s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \phi_0)$ avec une puissance $P_t = A^2/2$ l'enveloppe complexe du signal périodique reçu peut être obtenue comme suit [5] :

$$s_r^{ce}(t) = A e^{j\phi_0} \rho(f_0) e^{-2jk(R_0 + R \sin \omega_r t)} \quad (1)$$

où $k = 2\pi f_0/c = 2\pi/\lambda$, c est la vitesse de la lumière, et $\rho(f_0)$ est la réflectivité dépendant de la fréquence du résonateur dipôle qui est utilisé ici comme tag chipless. La Figure 1(b) montre que la SER simulée du dipôle dépend de sa longueur et donc, cette dépendance en fréquence a été considérée dans (1). Le signal périodique $s_r^{ce}(t)$ peut être exprimé par une série de Fourier dans le domaine temporel :

$$s_r^{ce}(t) = A_c \rho(f_0) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) e^{-jn\omega_r t} \quad (2)$$

où $\beta = 4\pi R/\lambda$, $A_c = A e^{j\phi_0} e^{-j2kR_0}$, et $J_n(\beta)$ est la fonction de Bessel de première espèce d'ordre n .

La transformée de Fourier de l'équation (2) donne (3), qui décrit clairement les composantes de fréquence nouvellement générées à $n f_r$ dues à l'effet micro-Doppler, partie du signal qui est à l'origine de l'augmentation de la portée de lecture du tag en rotation sans puce proposée.

$$S_r^{ce}(f) = A_c \rho(f_0) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \delta(f - n f_r) \quad (3)$$

2.b. SER différentielle pour un dipole en rotation

La SER différentielle (ou delta RCS en anglais) a été introduite dans [7] pour déterminer la puissance du signal modulé par le tag. Définie à l'origine pour les tags UHF, cette définition a cependant été étendue à tout tag modulant [8] et peut être appliquée aux tags présentées dans ce document. La SER différentielle peut être calculée directement à partir de (3) tout en remarquant que la puissance associée au signal réel est la moitié de celle associée à l'enveloppe complexe :

$$\sigma_d(f_0) = \frac{(4\pi)^3 R_0^4}{2P_t G_A^2 \lambda^2} \left[\int_{-\epsilon}^{-\epsilon} |S_r^{ce}(f)|^2 df + \int_{+\epsilon}^{+\epsilon} |S_r^{ce}(f)|^2 df \right] \quad (4)$$

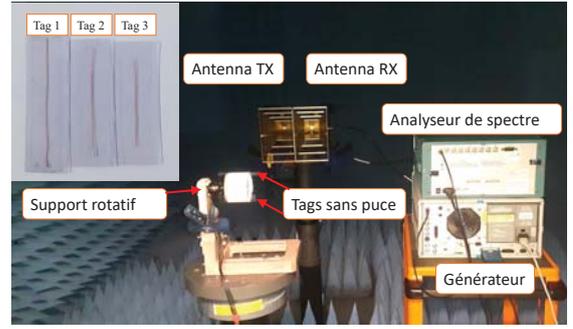


Figure 2. Banc de mesure utilisé pour identifier les tags en rotation

$$\sigma_d(f_0) = \sigma(f_0)[1 - J_0^2(\beta)] \quad (5)$$

où 2ϵ est la largeur de bande minimale qui permet de supprimer la puissance à $f=0$ et $\sigma(f_0) = (|\rho(f_0)|^2 (4\pi)^3 R_0^4) / (G_A^2 \lambda^2)$ est la SER du dipôle court-circuité à la fréquence f_0 . Notons que (5) a été obtenue en utilisant l'égalité bien connue $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n^2(\beta) = 1$. Cette relation permet de relier la SER classique et à la SER différentielle (delta RCS).

3. Résultat et Discussion

3.a. Configuration de la mesure

Le banc de mesure est présenté sur la Figure 2 et se compose d'un VNA (HP 8720D) et d'un analyseur de spectre (Tektronix RSA3408A). Les deux instruments sont respectivement connectés aux antennes d'émission et de réception (A.H. Systems, INC. SAS-571). Notez que le VNA fonctionne en mode CW et agit uniquement comme une source RF. La fréquence f_0 peut être réglée entre 1 et 2.6 GHz et la puissance de sortie a été fixée à 0 dBm. L'analyseur de spectre acquiert le signal rétrodiffusé sur une plage de 1 kHz autour de la CW générée par le VNA. Les tags sont placés sur un support rotatif de rayon $R = 3.7$ cm (avec $\epsilon_r \approx 1$) et tournent à une vitesse de $f_r = 70$ tr/s. Le support rotatif est placé à une distance de $R_0 = 1$ m des antennes pour remplir les conditions de champ lointain. Les tags considérés dans cet article sont également présentés sur la Figure 2 et correspondent à de simples dipôles court-circuités. Trois tags ont été conçus à l'aide d'un fil de cuivre de $100 \mu\text{m}$ avec des longueurs de 90, 73 et 58 mm.

3.b. Densité spectrale de puissance (DSP) reçue

La DSP rétrodiffusée par le tag en rotation est présentée Figure 3. Comme l'environnement est un système LTI, la DSP reçue lorsque le tag ne tourne pas est seulement située à f_0 (ou $f = 0$ Hz après la démodulation). Lorsque le tag est en rotation, les pics situés à $n f_r$ associés aux harmoniques micro-Doppler apparaissent dans le signal. De plus, chaque tag peut être différenciée en utilisant l'amplitude des lobes latéraux rétrodiffusés (on exclut le lobe à fréquence nulle). Par exemple, dans la Figure 3 avec $f_0 = 1.75$ GHz, le tag 2 a une amplitude supérieure à celle des tags 1 et 3. La même tendance que celle observée sur la SER [voir Figure 1 (b)] est observée à cette fréquence.

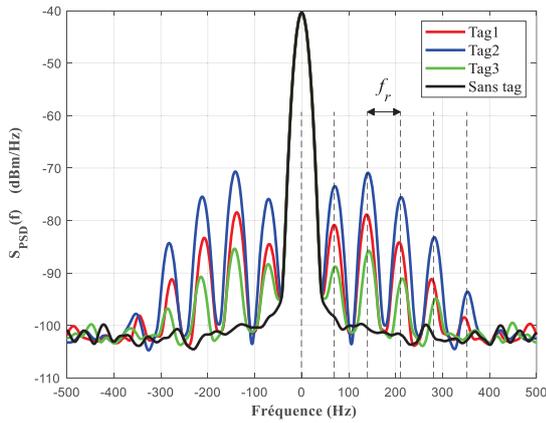


Figure 3. Mesure de la densité spectrale de puissance rétrodiffusée pour les 3 tags tournant à $f_r = 70$ Hz pour une fréquence porteuse f_0 de 1,75 GHz. La mesure « Sans tag » correspond à la DSP de la chambre lorsqu'aucun objet ne tourne.

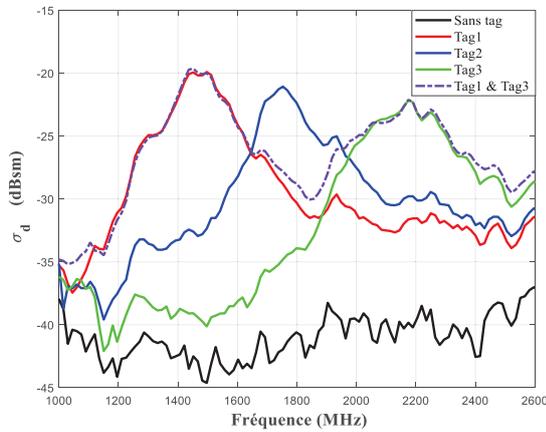


Figure 4. RCS différentiel en fonction de la fréquence porteuse pour les trois tags en rotation.

3.c. Identification basée sur la SER différentielle

Dans la Figure 3, la DSP est clairement différente d'un tag à l'autre. Cependant, cette façon d'identifier chaque tag implique que toutes les tags doivent être placées à la même distance des antennes. Si la distance est modifiée, l'amplitude du signal rétrodiffusé est également modifiée, ce qui rend l'identification des tags impossible. La variation du delta RCS σ_d en fonction de la fréquence, donnée par (5), peut être utilisée comme une métrique indépendante de la distance de mesure. La Figure 4 présente le delta RCS σ_d en fonction de la fréquence porteuse ; elle présente un maximum à la fréquence de résonance du dipôle comme cela a été prédit avec l'équation (5). De plus, les 3 fréquences de résonance peuvent être clairement séparées, ce qui montre que les 3 tags peuvent être identifiés uniquement en utilisant la position des pics.

Notez que le delta RCS des tags a été obtenu sans utiliser de mesure à vide. Enfin, la ligne pointillée présente le delta RCS lorsque les tags 1 et 3 sont placés en même

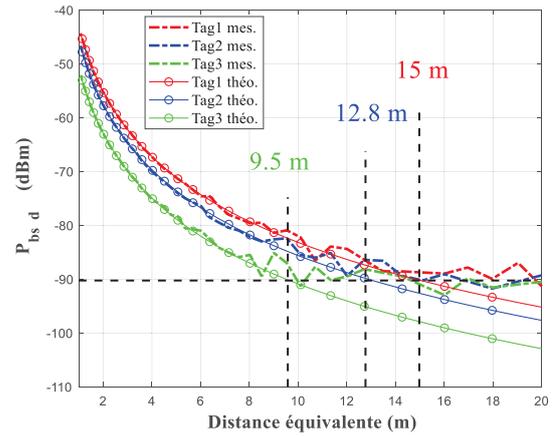


Figure 5. Portée de lecture des 3 différentes tags en fonction de la distance équivalente.

temps sur le support rotatif. Dans ce cas, nous pouvons voir que les deux résonateurs peuvent être identifiés simultanément. Ainsi, la conception d'une tag rotative sans puce composée de plusieurs résonateurs peut être réalisée[1]. La capacité de codage de cette tag multi-résonateurs, en supposant que l'identification est codée avec la présence ou l'absence d'un résonateur donné, peut être estimée en divisant la bande passante totale (1,6 GHz) par la bande passante d'un seul résonateur (400 MHz). Ainsi, le tag multi-résonateur proposée a une capacité de 4 bits dans la bande passante de 1 à 2,6 GHz.

3.d. Distance de lecture

La distance de lecture dans des environnements réels (*i.e.*, les canaux non isolés) des tags chipless classiques et des tags LTV est radicalement différente. Étant donné que les tags sans puce sont des systèmes LTI, leur distance de lecture, en supposant une méthode de lecture qui compense l'environnement en utilisant une mesure vide, est principalement limité par le niveau de l'environnement résiduel $|\epsilon(f)|^2$ [2] :

$$R_0^{LTI} \leq \sqrt[4]{\frac{G_A^2 \lambda^2 \sigma(f)}{(4\pi)^3 |\epsilon(f)|^2}} \quad (6)$$

où $\sigma(f)$ est le RCS du tag sans puce. Notez que cette formule ne dépend pas de la puissance transmise ni de la sensibilité du lecteur. Enfin, la plage de lecture est généralement inférieure à 50 cm dans des environnements réels.

Lorsque le tag est en rotation, il ne peut plus être considéré comme un système LTI. Dans ce cas, la distance de lecture dans des environnements réels (*i.e.*, les canaux non isolés) peut être dérivée d'une forme modifiée de l'équation radar [2] et est proportionnelle à la puissance rétrodiffusée qui n'est pas situé à $f = f_0$. Notez que cette puissance est directement liée au delta RCS σ_d du tag :

$$R_0^{LTV} \leq \sqrt[4]{\frac{P_t G_A^2 \lambda^2 \sigma_d}{(4\pi)^3 P_{rmin}}} \quad (7)$$

où P_{rmin} est la sensibilité du lecteur en réception (*i.e.*, la puissance modulée minimum détectable par le lecteur).

Enfin, on voit avec (7) que la portée de lecture peut être augmentée avec la puissance émise et peut atteindre des dizaines de mètres dans les bandes ISM.

La puissance rétrodiffusée modulée P_{bsd} peut être calculée sur la base de la DSP mesurée comme suit :

$$P_{bsd} = \int_{-\infty}^{-\epsilon} S_{DSP}(f) df + \int_{+\epsilon}^{+\infty} S_{DSP}(f) df \quad (8)$$

tandis que la puissance transmise P_t varie dans l'intervalle $[-50 : +5]$ dBm à une distance fixe de $R_0=1$ m dans une chambre anéchoïque. Pour chaque valeur de P_t , la distance équivalente a été déterminée, en supposant une valeur fixe de $P_t = +5$ dBm. Les résultats sont présentés Figure 5 où l'on voit que la puissance modulée est une fonction décroissante de la distance équivalente. En considérant un seuil de détection à -90 dBm, la portée maximale de lecture pour les tags 1, 2 et 3 est de 15, 12.8 et 9.5 m respectivement. Ces portées de lecture sont supérieures d'un facteur 30 à celles associées à la détection classique des tags sans puce.

4. Conclusion

Le concept de lecture de tag RFID sans puce utilisant le principe de l'effet Doppler est introduit pour la première fois. Un modèle prenant en compte le comportement fréquentiel de le tag a été développé. Le delta RCS du tag a été obtenu analytiquement et mesuré. Les résultats sont en accord avec la théorie et montrent que des distances de lecture de l'ordre de 10 m peuvent être atteintes avec cette approche. Un mouvement de rotation de le tag a été étudié pour faciliter la mise en œuvre. Cependant, l'approche n'est pas limitée à ce type de mouvement. Avec un équipement de mesure compatible avec la détection de signal démodulé de fréquences inférieures à quelques Hz, ce principe peut être utilisé sur des tags se déplaçant à une vitesse plus faible, dans le cas de translations par exemple lorsque les objets tagués sont positionnés sur un tapis roulant ou déplacés à la main.

Références

- [1] E. Perret, *Radio frequency identification and sensors : from RFID to chipless RFID*. John Wiley & Sons, 2014.
- [2] N. Barbot *et al.*, "Classical RFID versus chipless rfid read range : Is linearity a friend or a foe ?" *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 69, no. 9, pp. 4199–4208, Sep. 2021.
- [3] V. C. Chen, *The micro-Doppler effect in radar*. Artech House, 2019.
- [4] R. Kleinman and R. Mack, "Scattering by linearly vibrating objects," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 27, no. 3, pp. 344–352, May 1979.
- [5] V. C. Chen *et al.*, "Micro-Doppler effect in radar : phenomenon, model, and simulation study," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 2–21, Jan. 2006.

- [6] A. Lazaro *et al.*, "New radar micro-doppler tag for road safety based on the signature of rotating backscatters," *IEEE Sensors J.*, vol. 21, no. 6, pp. 8604–8612, Mar. 2021.
- [7] P. V. Nikitin *et al.*, "Differential RCS of RFID tag," *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 8, pp. 431–432, Apr. 2007.
- [8] N. Barbot *et al.*, "Differential RCS of modulated tag," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 9, pp. 6128–6133, Sep. 2021.