

Conception et optimisation de tags non-linéaires RF passifs pour le suivi de frelons asiatiques

F. Druppel¹, D. Lederer²

¹ECAM Brussels Engineering School, Belgique

²UCLouvain, Belgique

18053@ecam.be

Résumé — La prolifération du frelon asiatique représente une menace majeure pour les colonies d'abeilles en Europe. Parmi les solutions de localisation des nids, les radars harmoniques passifs offrent un bon compromis entre coût et efficacité, mais leur portée reste limitée par le faible rendement de conversion des tags à diode Schottky. Cet article présente et compare trois topologies de tags passifs non linéaires : un tag simple, un tag à boucle inductive et, pour la première fois, un tag à inductances couplées. Les impédances présentées à la diode sont optimisées à 2.9GHz et 5.8GHz à l'aide de simulations combinant ADS et CST. Les mesures en chambre anéchoïque confirment une amélioration de près de +13dB de la puissance rayonnée avec la topologie à inductances couplées par rapport au tag simple. Ces résultats ouvrent la voie à des tags passifs plus performants et légers, mieux adaptés au suivi d'insectes et à la détection de nids de frelons.

1. Introduction

Suite à la prolifération des frelons asiatiques (Vespa velutina) qui attaquent nos ruches d'abeilles au point de considérablement faire diminuer leur population en Europe, de plus en plus d'actions sont menées en vue de localiser et éradiquer leurs nids [1].

Il existe déjà plusieurs méthodes de localisation des nids de frelons, telles que la triangulation [2], la détection optique (imagerie thermique [3], imagerie rétro-réfléctrice [4]), ou encore le suivi d'un frelon via de la radio-télémétrie active [5] ou passive basée sur un radar harmonique [6].

Nous nous intéressons ici aux méthodes de suivi de frelon par radio-télémétrie, moins sensibles aux obstacles occultants que les systèmes optiques, et de surcroit passive, en raison de leur très faible coût (5-10€ par tag) par rapport aux systèmes actifs (200-300€ par tag).

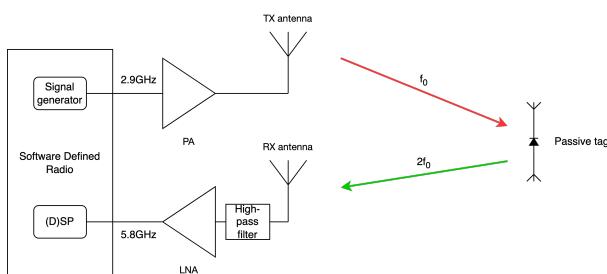


FIGURE 1. Diagramme de principe - Radar Harmonique

Comme illustré à la Figure 1, le radar harmonique repose sur l'émission d'une onde à une fréquence fondamentale f_0 vers un tag non linéaire, qui génère des harmoniques du signal incident, typiquement à $2f_0$ ou $3f_0$. Le récepteur du radar est accordé à ces harmoniques, ce qui permet en outre d'isoler la réponse du tag des réflexions parasites de l'environnement à f_0 .

Les tags non-linéaires étudiés dans la littérature sont essentiellement réalisés à l'aide d'une diode Schottky et d'un fil métallique permettant de réaliser une antenne. Bien que fonctionnels, une des limitations de ce type de système réside dans le faible rendement de conversion de la diode, ce qui réduit la distance maximale de détection. La génération d'harmoniques au sein de la diode demeure limitée par la non-linéarité modérée de sa caractéristique I-V, les effets capacitatifs de la jonction et les pertes par mésadaptation au sein du tag.

Afin d'améliorer les performances des tags non-linéaires passifs, une inductance sous la forme de boucle peut être ajoutée en parallèle à la diode ([7]). Une autre méthode consiste à ajouter un circuit d'adaptation complexe pour améliorer le transfert de puissance entre l'antenne et la diode [8]. Néanmoins, les méthodologies de conception de ces différentes solutions ne sont peu ou pas détaillées dans la littérature ([7], [8]), et/ou présentent des géométries difficilement compatibles avec les contraintes de poids et/ou d'encombrement pour l'application visée ([8]). Dans cet article, nous explorons une nouvelle topologie de tag non-linéaire passif pour le traçage des frelons asiatiques présentant une performance accrue et démontrée expérimentalement.

2. Méthodologie

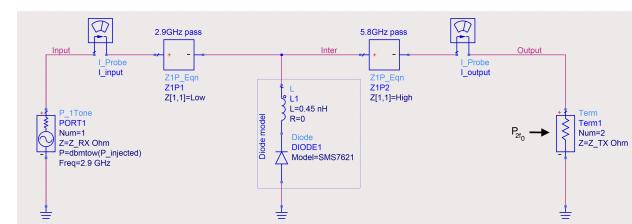


FIGURE 2. Schéma de simulation - caractérisation des impédances de la diode

Comme dans [9] nous choisissons $f_0 = 2.9GHz$ et $2f_0 = 5.8GHz$, car cette paire de fréquences se situe dans des bandes radar (maritimes) autorisées, et offre un com-

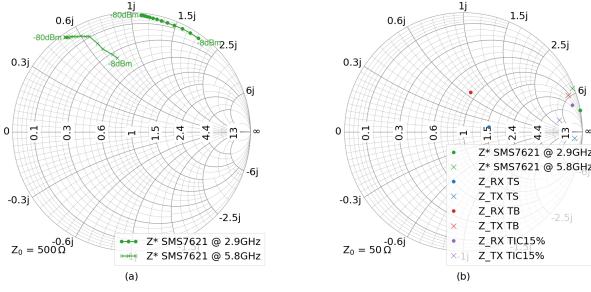


FIGURE 3. Abaques de Smith - impédances conjuguées de la diode (a) et impédances des tags (b)

promis optimal entre taille d'antenne, portée et efficacité énergétique pour le suivi d'insectes à courte distance [9].

Le tag étudié est également basé sur la diode SMS7621-040LF [10] (où "L1" (Fig. 2) représente l'inductance parasite du package). Ses impédances à f_0 et $2f_0$ sont déterminées à l'aide d'ADS sur base du schéma 2 en optimisant les transferts de puissance entre "Z_RX" (impédance présentée à la diode à f_0) et la diode à f_0 et entre la diode et "Z_TX" (impédance présentée à la diode à $2f_0$) à $2f_0$. P_{2f_0} représente la puissance absorbée par "Z_TX".

La Fig. 3 (a) montre l'évolution des impédances (complexes conjuguées) de la diode à 2.9GHz et 5.8GHz en fonction de la puissance disponible, pour une impédance de référence de 500Ω . On observe que les impédances se stabilisent entre $-50dBm$ et $-80dBm$.

Afin d'optimiser les performances du tag on considère comme cibles les impédances conjuguées de la diode à $-50dBm$, soit :

$$\begin{aligned} Z_{-50dBm_{2.9GHz}}^* &= (9.75 + j544.55)\Omega \\ Z_{-50dBm_{5.8GHz}}^* &= (9.5 + j260)\Omega \end{aligned}$$

Celles-ci sont indiquées en vert à la Fig. 3b.

Trois topologies de tag sont étudiées ici : le tag simple (TS), le tag à boucle (TB), et le tag à inductances couplées (TIC).

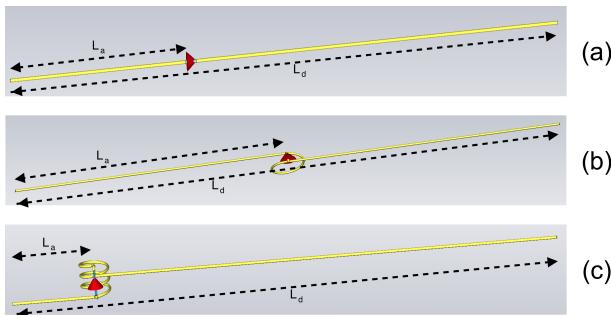


FIGURE 4. Modèles 3D des tags

2.a. Tag simple

Le tag simple consiste en une diode Schottky connectée aux deux bras d'un dipôle (Fig. 4a) de longueur $L_d = \lambda/2 = 49.2mm$ à f_0 . Sa longueur étant fixée, le point d'alimentation du dipôle peut être déplacé de manière à modifier "Z_RX" et "Z_TX" et maximiser P_{2f_0} .

La position du port d'alimentation du dipôle est donc balayée de 25% à 50% de la longueur du dipôle par rapport au bord de l'antenne. Les impédances "Z_RX" et "Z_TX"

correspondantes (en bleu à la Fig. 3b) sont calculées par simulation électromagnétique dans CST, et réinjectées dans le circuit de la Fig. 2 en vue de calculer P_{2f_0} .

La Fig 6 montre que P_{2f_0} (et donc la puissance rayonnée par l'antenne) pour le TS vaut en moyenne $-125dBm$, avec une légère amélioration lorsque le point d'alimentation se trouve à entre 25% et 40% de L_d .

2.b. Tag bouclé

Dans le tag bouclé (TB) une boucle inductive est ajoutée en parallèle avec la diode et le dipôle (Fig 4 (b)). Ici également, le point d'alimentation du dipôle est étudié de 25% à 50% de la longueur du dipôle. On observe une amélioration maximale des performances sur le tracé rouge de la Fig 6 avec le port à 45 – 50% et lorsqu'une inductance de $L = 5.4nH$ est ajoutée, ce qui correspond à une boucle de diamètre $3.14mm$ selon la formule : $L = \frac{\mu_0 \mu D}{2} \left(\ln\left(\frac{8D}{d}\right) - 2 \right) [H]$ où D est le diamètre de la boucle et d celui du fil. Ceci représente une augmentation d'environ 10 dB de puissance rayonnée par rapport au TS.

2.c. Tag à inductances couplées

En s'inspirant de circuits bal-un utilisés pour transformer une ligne de transmission asymétrique en ligne symétrique, nous constatons que deux inductances couplées avec un noeud central commun peuvent améliorer l'adaptation entre la diode et le dipôle.

Cette topologie est simulée dans ADS (voir Fig. 5), où les nombre et dimensions des inductances couplées peuvent être variés afin de maximiser P_{2f_0} . A nouveau les impédances "Z_RX" et "Z_TX" correspondantes (en mauve à la Fig. 3b) sont calculées dans CST (Fig 4c, et réinjectées dans le circuit de la Fig. 2 pour calculer P_{2f_0} . La Fig. 3b montre clairement qu'une meilleure adaptation conjuguée est obtenue simultanément à f_0 et $2f_0$ grâce à cette nouvelle topologie.

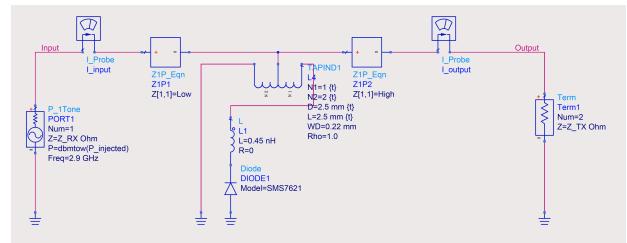


FIGURE 5. Schéma de simulation - topologie à inductances couplées

En variant la position de la diode de 10% à 50% de L_d , on observe à la Fig 6 une nette amélioration des performances, avec une valeur de P_{2f_0} de 24dB supérieure au cas du TS, et 15dB supérieure au TB, lorsque la diode se trouve à 15% de L_d . On note toutefois que l'adaptation conjuguée n'est pas parfaite, ce qui se traduit par une dégradation de 30 dB par rapport au cas idéal.

3. Résultats expérimentaux

Pour effectuer des mesures réelles, deux antennes sont placées à distance égale des tags dans une chambre anéchoïque (Fig 7). L'antenne TX est connectée à un générateur de signaux, et l'antenne RX à un analyseur de spectre.

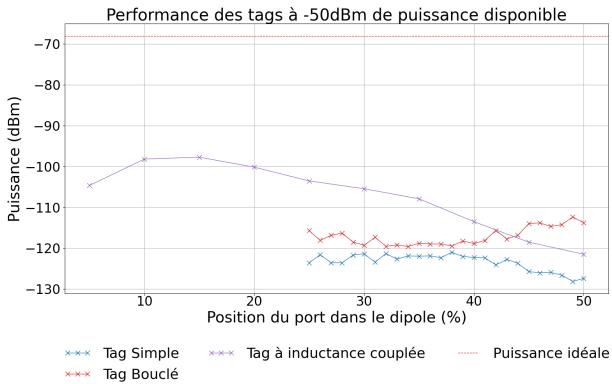


FIGURE 6. Valeur simulée de P_{2f0} en fonction du port dans le dipôle.

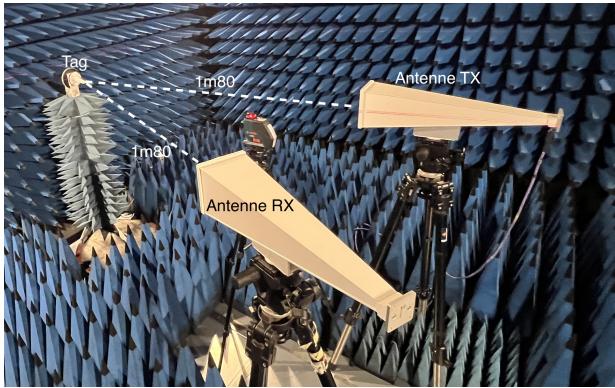


FIGURE 7. Dispositif de mesure en chambre anéchoïque

Les trois topologies de tag sont fabriquées et testées expérimentalement en comparant les puissances reçues par l'analyseur de spectre. Les résultats de mesure (Fig 8) sont en accord avec les simulations et montrent une amélioration de la topologie TB par rapport à la topologie TS (environ 5dB pour $L_a = 50\%L_d$). Ils montrent aussi une amélioration très nette de 8.5 dB de la topologie TIC (pour $L_a = 35\%L_d$) par rapport à la topologie TB, ce qui représente une amélioration de la distance de détection d'environ 63%. D'autres tests seront réalisés prochainement pour de plus petites valeurs de L_a .

4. Conclusion

Cet article présente une méthodologie de conception de tags passifs non-linéaires basés sur une diode Schottky et une antenne dipôle pour le traçage des frelons asiatiques. Il présente également des voies d'optimisation du tag en faisant varier la position de la diode et d'éléments d'adaptation au sein du dipôle. Enfin, il propose une nouvelle topologie d'adaptation conjuguée basée sur des inductances couplées et facile à mettre en œuvre, qui permet d'améliorer significativement ($\sim 8.5dB$) la puissance réémise par le tag par rapport à la topologie classique du "tag bouclé". Ceci est démontré expérimentalement. Ces résultats ouvrent la voie à des tags passifs plus performants et légers, mieux adaptés au suivi d'insectes et à la détection de nids de frelons.

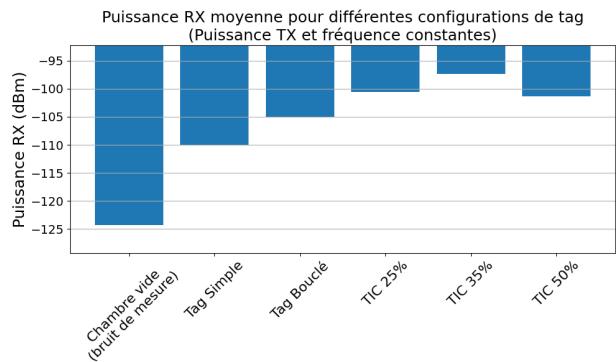


FIGURE 8. Résultats de mesures - TS à 50%, TB à 50%

Références

- [1] A. Quaresma *et al.*, "Invasion genetics of the asian hornet vespa velutina nigrithorax in southern europe," *Biological Invasions*, vol. 24, no. 5, pp. 1479–1494, May 2022.
- [2] T. V. (groupe des Vespawatchers), "Méthode de localisation des nids de frelons asiatiques." 2023.
- [3] T. Shams and P. Desbarats, "Detection of asian hornet's nest on drone acquired flir and color images using deep learning methods," in *2020 Tenth International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA)*, 2020, pp. 1–6.
- [4] M. T. Smith *et al.*, "A method for low-cost, low-impact insect tracking using retroreflective tags," *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 12, no. 11, pp. 2184–2195, 2021.
- [5] P. J. Kennedy *et al.*, "Searching for nests of the invasive asian hornet (vespa velutina) using radio-telemetry," *Communications Biology*, vol. 1, no. 1, p. 88, Jul 2018.
- [6] H. Aumann *et al.*, "A low-cost harmonic radar for tracking very small tagged amphibians," in *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2013, pp. 234–237.
- [7] A. Lavrenko *et al.*, "Design and evaluation of a compact harmonic transponder for insect tracking," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 445–448, 2020.
- [8] C. Hilton *et al.*, "Wire-based passive dipole harmonic tags for harmonic doppler radar applications," in *2020 IEEE USNC-CNC-URSI North American Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, 2020, pp. 25–26.
- [9] G. Storz and A. Lavrenko, "Compact low-cost fmcw harmonic radar for short range insect tracking," in *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*, 2020, pp. 642–647.
- [10] S. Inc., <https://www.skyworksinc.com/products/diodes/sms7621-series>.