

Formes d'ondes bio-inspirées : de la chauve-souris au radar

Anthony TORRE¹ Abigael TAYLOR¹ Dominique POUILLIN¹ Thierry CHONAVEL²

¹ONERA, Université Paris-Saclay F-91123 Palaiseau, France

²IMT Atlantique, Lab-STICC UMR CNRS 6285, F-2938, Brest, France

Résumé – Comme toute technologie le radar évolue et fait face à de nombreuses problématiques (management de spectre, traitement du clutter, amélioration de la résolution, ...). Cela conduit à la création et l'optimisation de nouvelles formes d'ondes conjointement à leur traitement. Pour y parvenir, nous avons orienté notre étude sur des signaux bio-inspirés de ceux des chauves-souris et observé les avantages potentiels à utiliser de telles formes d'ondes. Cet article présente une comparaison entre des formes d'ondes dites classiques en radar et une autre bio-inspirée en analysant notamment leurs réponses à un traitement usuel. La modélisation de cette forme d'onde bio-inspirée permet de comparer plusieurs stratégies de modulation fréquentielle au sein d'une impulsion. Les bornes de Cramér-Rao sont calculées afin de quantifier les capacités d'estimation en retard et Doppler de chaque forme d'onde.

Abstract – Radar technology is continuously evolving and the ever-growing needs (spectrum management, clutter processing, better resolution, ...) induce the creation and optimization of new waveforms jointly with the appropriate signal processing. In order to do so, we propose to study waveforms bio-inspired from bats signals and observe the potentials assets of such innate waveforms. This article compares classic radar waveforms with a bio-inspired one and their responses to traditional radar processing. The modelling of this bio-inspired waveform enable the comparison between several frequency modulations strategies within one pulse. The Cramér-Rao lower bounds are calculated to quantify the efficiency of each waveform in estimating delay and Doppler.

1 Introduction

Comme toute technologie, le radar n'échappe pas au besoin constant d'évolution pour faire face à des problématiques variées. L'encombrement du spectre électromagnétique par des utilisateurs toujours plus nombreux ou la volonté d'améliorer la résolution et le traitement du clutter (fouillis qui vient perturber les mesures radar) ne sont qu'une partie des complications auxquelles font face les radars. Afin de répondre à ces problématiques, la création de nouvelles formes d'ondes accompagnées de leur optimisation et du traitement adéquat a été envisagée, en recherchant du côté de la Nature. Il existe en effet dans le monde animal certaines espèces capables de s'orienter et d'évoluer dans leur environnement grâce à un radar naturel appelé écholocation. C'est le cas des chauves-souris qui depuis des millions d'années se repèrent et chassent en émettant des ondes ultra-sonores. Chaque espèce douée d'écholocation a su développer les formes d'ondes adaptées à sa méthode de chasse (capture en vol, pêche ou glanage) et à son environnement (un milieu ouvert comme une plaine, peu encombré tel que la surface de l'eau ou bien très encombré à l'image des forêts) [1]. L'analogie notable entre radar et écholocation fait de ce mécanisme naturel un axe d'étude privilégié pour la recherche de nouvelles formes d'ondes appliquées au radar.

En prenant pour modèle des signaux naturels comme celui de la figure 1, on cherche donc à produire une forme d'onde bio-inspirée et à la comparer à des signaux radars classiques comme le chirp ou le chirp hyperbolique qui ont maintes fois été étudiés et comparés. Dans les travaux de Balleri [2], le chirp et le chirp hyperbolique sont confrontés afin d'étudier la tolérance au Doppler et la précision en retard offerte par le chirp hyperbolique en bande étroite et en large bande. L'objectif est donc de continuer cette démarche d'analyse de la réponse de ces formes d'ondes au traitement radar usuel, via notamment l'étude de la fonction d'ambiguïté, tout en observant les capacités offertes par une nouvelle forme d'onde bio-inspirée introduite par Parsons dans [3]. Cette dernière offre la

capacité de décrire, avec un formalisme commun, différents signaux à supports fréquentiel et temporel données. Nous nous intéressons dans cet article aux bornes de Cramér-Rao et à la simulation de Monte-Carlo pour quantifier les capacités de nos formes d'ondes en termes de variance d'estimation de la position et de la vitesse.

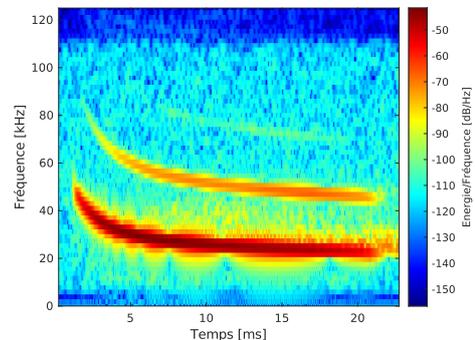


FIGURE 1 : Spectrogramme de pulse de Noctule Commune [4].

Dans un premier temps, on présente les formes d'ondes utilisées dans l'article avec une rapide comparaison entre le chirp hyperbolique et le signal bio-inspiré. On rappelle ensuite la définition de la fonction d'ambiguïté, son lien avec les bornes de Cramér-Rao pour le chirp et le chirp hyperbolique puis on compare ces expressions à celles obtenues pour la fonction paramétrique de Parsons.

2 Formes d'ondes considérées

Dans cet article, un pulse $s(t)$ définit un signal de durée T parcourant la plage de fréquence allant de f_0 à f_1 avec $f_0 > f_1$ soit une occupation spectrale $B = f_0 - f_1$. La fréquence instantanée d'un signal est décrite par $f(t)$ et la fonction $\text{Rect}\left\{\frac{t}{T}\right\}$ désigne la fonction porte.

2.1 Le chirp et le chirp hyperbolique

Signal classique en radar, le chirp est décrit par une évolution linéaire de la fréquence sur une durée T :

$$f(t) = \gamma t, \text{ où } \gamma = \frac{-B}{T} \text{ et } s(t) = \frac{\text{Rect}\left\{\frac{t}{T}\right\}}{\sqrt{T}} e^{i\pi\gamma t^2}, \quad (1)$$

La fonction décrivant un chirp hyperbolique (ou HFM pour Hyperbolic Frequency Modulation) est donnée par l'équation suivante d'après [2] :

$$f(t) = \frac{f_0}{1+kt} \text{ avec } k = \frac{f_0 - f_1}{f_1 T}, \quad (2)$$

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{Rect}\left\{\frac{t}{T}\right\} e^{2i\pi\alpha \ln(1+kt)} \text{ où } \alpha = \frac{f_0}{k}. \quad (3)$$

Cette fonction, par sa nature hyperbolique, a souvent été associée à la description des signaux de chauves-souris et étudiée pour ses propriétés d'invariance au Doppler dans des applications radar à large bande.

2.2 Une forme d'onde bio-inspirée

Afin de reproduire l'évolution fréquentielle des signaux biologiques de chauves-souris tel que celui représenté sur la figure 1, Parsons a introduit la fonction nommée exponentielle-2 dans [3]. Ce dernier a en effet étudié l'approximation des signaux de différentes espèces de chauves-souris via huit fonctions mathématiques dans une optique d'identification des espèces. L'exponentielle-2 est ainsi définie (la durée d'impulsion T a été rajoutée afin de respecter l'homogénéité de la formule) :

$$f(t) = \frac{f_0}{f_0 - a f_1} \left[(f_0 - f_1) \beta^{\frac{t}{T}} + (1-a) f_1 \right], \quad (4)$$

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{Rect}\left\{\frac{t}{T}\right\} e^{\frac{2i\pi f_0}{f_0 - a f_1} \left[\lambda \beta^{\frac{t}{T}} + (1-a) f_1 t \right]}, \quad (5)$$

$$\text{avec } \lambda = \frac{(f_0 - f_1) T}{\ln(\beta)}, \beta = \frac{a f_1}{f_0} \text{ et } a > 0 \text{ fixé.}$$

Les résultats de Parsons (Tableau 3 dans [3]) sur des signaux tels que celui présenté en figure 1 ont montré que cette fonction présentait de bonnes capacités pour imiter les signaux de certaines espèces de chauves-souris. La figure 2 montre une reproduction du signal de la figure 1 via la fonction de Parsons.

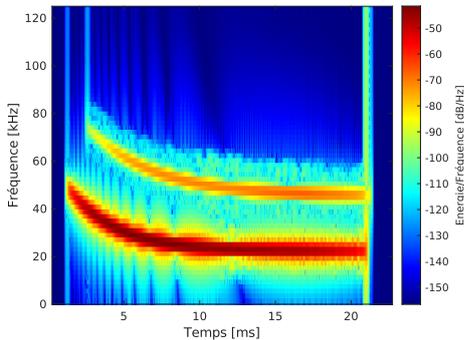


FIGURE 2 : Spectrogramme d'une reconstitution synthétique d'un pulse de Noctule Commune. ($T_1 = 19.6ms$, $B_1 = 26.7kHz$, $a_1 = 0.004$, $T_2 = 18.6ms$, $B_2 = 28.4kHz$, $a_2 = 0.021$)

Ce qui fait la particularité de cette fonction par rapport au chirp hyperbolique réside dans le paramètre a qui permet de

régler la courbure de notre fonction, c'est-à-dire la pente qui décrit l'évolution fréquentielle de notre signal. On a ainsi la possibilité de profiter des caractéristiques de la fonction hyperbolique avec une flexibilité plus grande. La figure 3 montre des fréquences instantanées pour une largeur de bande de $B = 25MHz$ sur une durée $T = 25\mu s$ (paramètres radars et non biologiques) pour les différentes formes d'ondes considérées. On voit ainsi que, selon la valeur de a , il est possible de passer d'une courbure hyperbolique prononcée à un signal qui peut approcher un chirp en passant par le chirp hyperbolique à paramètres fréquentiels et temporels fixés. Le paramètre a respecte en effet les conditions suivantes :

- Si $a = 0$ fréquence constante,
- Si $a \in]0, \frac{f_0}{f_1}[$ courbe de fréquence convexe qui se rapproche d'un chirp si a se rapproche du rapport $\frac{f_0}{f_1}$,
- Si $a > \frac{f_0}{f_1}$ courbe concave, non étudié dans notre cas.

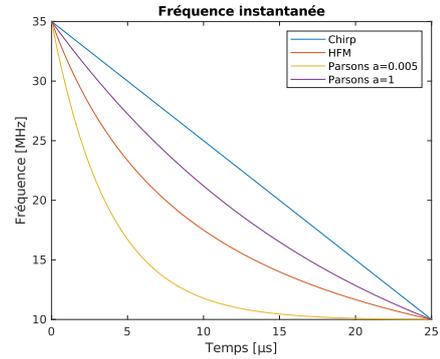


FIGURE 3 : Fréquence instantanée des différentes fonctions.

Dans la suite de l'étude, on appellera fonction de Parsons, la fonction exponentielle-2. On s'intéressera aux capacités radar de ces trois signaux notamment la précision de l'estimation en retard et Doppler. Parsons, dans ses articles, s'était intéressé seulement à la conception des signaux de chauves-souris (identification [3] et performances [5]) et nous tentons ainsi d'évaluer la pertinence de sa fonction pour une application orientée radar.

3 Performances du traitement radar

3.1 La fonction d'ambiguïté

La fonction d'ambiguïté rend compte de la réponse temporelle du filtre adapté pour un signal reçu avec un retard τ et un Doppler ν et est définie en bande étroite d'après [6] par :

$$\chi(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) s^*(t + \tau) e^{2i\pi\nu t} dt \quad (6)$$

Elle permet d'analyser l'effet de la vitesse d'une cible sur la sortie du filtre adapté et ainsi évaluer la pertinence d'une forme d'onde pour l'application radar souhaitée. Comme décrit dans la suite, elle peut servir de base pour le calcul des bornes de Cramér-Rao.

3.2 Les bornes de Cramér-Rao

Les bornes de Cramér-Rao (BCR) définissent une limite inférieure sur la variance d'un estimateur non biaisé permettant dans notre cas de borner la variance de nos estimateurs en retard et Doppler.

$$J_{AF,Parsons} = \left(\begin{array}{cc} \frac{8\pi^2 f_0^2}{T^2(f_0 - af_1)^2} \lambda^2 (\beta - 1) \left[\beta - 1 - \frac{\ln(\beta)}{2} (\beta + 1) \right] + \frac{2}{T^2} \frac{4\pi^2 f_0}{(f_0 - af_1)} \left[2\lambda\beta - \left(\frac{2}{\ln(\beta)} + 1 \right) (\beta - 1)\lambda \right] & \\ \frac{4\pi^2 f_0}{(f_0 - af_1)} \left[2\lambda\beta - \left(\frac{2}{\ln(\beta)} + 1 \right) (\beta - 1)\lambda \right] & -\frac{2}{3} \pi^2 T^2 \end{array} \right) \Bigg|_{\tau, \nu=0} \quad (12)$$

Afin de calculer les BCR de la fonction de Parsons, nous avons appliqué une démarche similaire à celle de Balleri. Dans [2], il calcule les BCR du chirp hyperbolique et donne celle du chirp défini par Van Trees [7]. Les BCR sont définies comme les éléments de la matrice de Fisher inverse [7] :

$$BCR(\tau) = -\frac{J_{AF}(2, 2)}{2 SNR |J_{AF}|}, \quad (7)$$

$$BCR(\nu) = -\frac{J_{AF}(1, 1)}{2 SNR |J_{AF}|}. \quad (8)$$

La matrice de Fisher est la matrice hessienne du carré de l'amplitude de la fonction d'ambiguïté :

$$J_{AF} = \left(\begin{array}{cc} \frac{\partial^2 |\chi(\tau, \nu)|^2}{\partial \tau^2} & \frac{\partial^2 |\chi(\tau, \nu)|^2}{\partial \tau \partial \nu} \\ \frac{\partial^2 |\chi(\tau, \nu)|^2}{\partial \nu \partial \tau} & \frac{\partial^2 |\chi(\tau, \nu)|^2}{\partial \nu^2} \end{array} \right) \Bigg|_{\tau, \nu=0} \quad (9)$$

En utilisant cette définition, on étudie la précision sur l'estimation conjointe du retard et du Doppler. Du fait du couplage entre retard et Doppler, de telles bornes ne sont pas définies pour le chirp linéaire dans le cas d'une impulsion rectangulaire unique [2]. Il a donc été décidé de regarder dans un premier temps la précision sur l'estimation indépendante du retard au sein d'une unique impulsion. Le calcul de cette borne devient alors [7] :

$$BCR(\tau) = -\frac{1}{2 SNR J_{AF}(1, 1)}. \quad (10)$$

On pourra également voir les résultats sur la version couplée pour un train d'impulsion (avec une PRI pour Période de Répétitions des Impulsions et N impulsions) où la matrice de Fisher devient selon [2] :

$$J_{AF,N} = \left(\begin{array}{cc} \frac{\partial^2 |\chi(\tau, \nu)|^2}{\partial \tau^2} & \frac{\partial^2 |\chi(\tau, \nu)|^2}{\partial \tau \partial \nu} \\ \frac{\partial^2 |\chi(\tau, \nu)|^2}{\partial \nu \partial \tau} & \frac{\partial^2 |\chi(\tau, \nu)|^2}{\partial \nu^2} - \frac{2}{3} \pi^2 PRI^2 (N^2 - 1) \end{array} \right) \Bigg|_{\tau, \nu=0} \quad (11)$$

On considère le SNR post-compression pour un bruit blanc gaussien et les tracés qui suivent portent sur les BCR représentées en distance pour une meilleure visibilité.

3.3 Cramér-Rao et chauves-souris

Pour ce qui est de la matrice de Fisher de la fonction de Parsons représentant nos signaux de chauves-souris, les calculs conduisent à la matrice (12) pour une impulsion. Cette dernière nous permet alors d'obtenir les bornes de Cramér-Rao de notre signal bio-inspiré et de les comparer avec celles définies par Van Trees [7] pour le chirp et par Balleri [2] pour le chirp hyperbolique.

4 Résultats et Discussions

Via une simulation de Monte-Carlo (100 000 points), on trace conjointement aux bornes théoriques les écarts-type (notées RMSE) sur l'estimation du retard au sein d'une impulsion sur la figure 4. On considère ici des impulsions d'une durée

$T = 25 \mu s$ parcourant une bande de $B = 10 MHz$. On trace les bornes pour le chirp (rouge), le chirp hyperbolique (bleu), la fonction de Parsons ($a = 0.005$ en noir) et également pour ce qu'on appellera HFM-Parsons (cyan), c'est-à-dire le chirp hyperbolique approché avec notre fonction de Parsons ($a = 0.5936$). On applique dans ce cas là l'équation (10) où le retard seul est estimé.

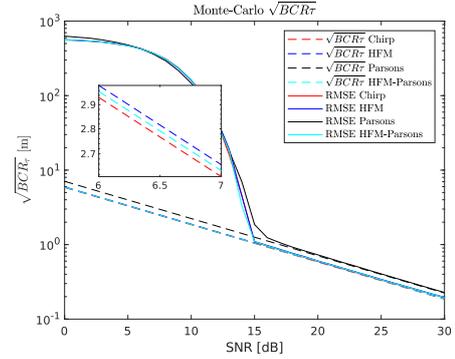


FIGURE 4 : BCR sur la distance en fonction du SNR pour une impulsion avec zoom sur les BCR théoriques éq. (10).

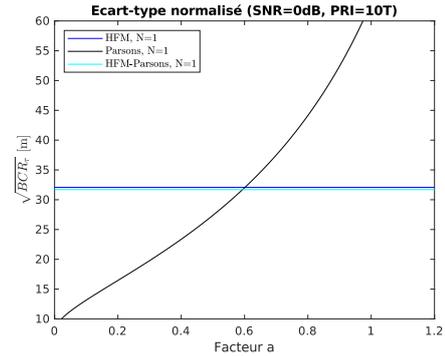


FIGURE 5 : Borne sur l'écart-type normalisé de la distance ($SNR = 0dB$, $N = 1$ impulsion) éq. (7) et (9). Impact du coefficient a en comparaison avec le HFM.

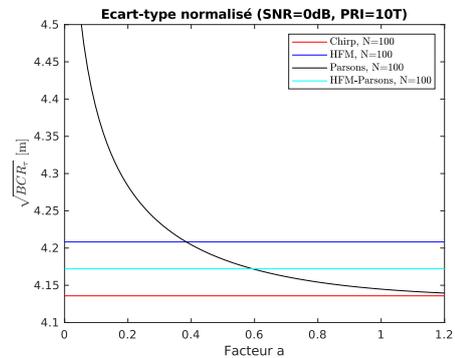


FIGURE 6 : Borne sur l'écart-type normalisé de la distance ($SNR = 0dB$, $N = 100$ impulsions) éq. (7) et (11). Impact du coefficient a en comparaison avec le chirp et le HFM.

Les figures 5 et 6 fournissent les BCR sur la distance pour

des trains d'impulsions de $PRI = 10T$ avec $N = 1$ et $N = 100$ impulsions en fonction des valeurs du facteur a pour un SNR nul. Ces résultats sont obtenus via l'équation (7) et la matrice (11).

4.1 Analyse des BCR

Sur la figure 4 on vérifie dans un premier temps la plasticité de notre fonction bio-inspirée car les courbes HFM et HFM-Parsons sont pratiquement égales. Il est possible d'obtenir les mêmes résultats que le chirp hyperbolique en choisissant le facteur a qui convient. La fonction de Parsons permet donc d'ajuster à paramètres temporels et fréquentiels fixés la courbure mais aussi la précision en distance de notre signal et est plus flexible que le chirp hyperbolique. C'est encore plus visible sur les figures 5 et 6 où l'on voit l'évolution des bornes pour la fonction de Parsons en fonction du facteur a . Il est possible d'obtenir une précision en distance proche de celle du chirp et même meilleure que celle du chirp hyperbolique avec le facteur a qui convient.

En ce qui concerne les BCR pour un train d'impulsions (matrice (11)), les résultats, sans être présentés ici, sont similaires à ceux associés à l'estimation de la distance seule (figure 4). L'utilisation d'un train d'impulsions change peu la précision en distance de nos formes d'ondes et seul le facteur a influe pour notre fonction de Parsons.

Dans un second temps si on s'aperçoit qu'en termes de précision sur le retard nos trois fonctions partagent des capacités similaires, la figure 5 permet d'observer l'avantage de la modélisation de Parsons. Sur une impulsion, plus le facteur a est bas, meilleure est la précision car la courbure de notre fonction permet le découplage du retard et du Doppler. Cet avantage est visible sur la sortie du filtre adapté de la figure 7 et discuté dans la section suivante.

4.2 Comportement face au Doppler

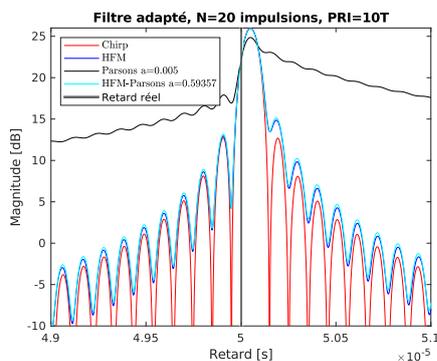


FIGURE 7 : Réponse au filtre adapté pour une hypothèse Doppler nul et un Doppler réel de $\nu = 20kHz$.

Outre la précision en retard étudiée dans cet article, l'aspect intéressant de ces fonctions hyperboliques reste leur comportement face au Doppler. Pour un train d'impulsions à doppler nul (paramètres $B = 10MHz$, $T = 25\mu s$, $PRI = 10T$, $N = 20$ impulsions), la réponse du filtre adapté en retard est symétriques et le retard réel est bien estimé. Néanmoins dès que le Doppler devient important, la réponse des fonctions hyperboliques devient, en l'absence de compensation Doppler intra-impulsion, asymétrique comme le montre la figure 7 et cela pourrait avoir des avantages notamment pour la détection

de cibles à grandes vitesses dans des cas larges bandes, là où la réponse du chirp est de même gain et reste symétrique. Couplé à une banque de filtres, l'exploitation de cette asymétrie permettrait d'estimer le Doppler et ainsi la distance réelle de la cible. On s'affranchirait de la mise en place de stratégies pour lever l'ambiguïté retard/vitesse du chirp. L'avantage de la fonction de Parsons ne réside donc pas dans la mesure directe, mais plutôt dans le traitement qu'on peut lui associer et la flexibilité qu'elle offre pour décrire une bande de fréquence à paramètres temporels et fréquentiels fixés.

5 Conclusion et perspectives

En vue d'applications radar, on a considéré ici une fonction bio-inspirée des signaux de chauves-souris introduite par Parsons [3] présentant une plus grande flexibilité que le chirp hyperbolique tout en conservant des performances similaires en termes de BCR. Pour une émission unique, elle permet d'estimer le retard, à la différence du chirp et pour une émission multiple elle assure des performances en retard proches de celles du chirp classique.

Un autre aspect intéressant et non étudié dans cet article serait de voir l'impact des harmoniques (voir figure 1). Pour les chauves-souris, l'émission de ces harmoniques présente de nets avantages. Outre l'augmentation de la bande et potentiellement des performances distances, cela leur permettrait notamment de faire la distinction entre les échos cibles et les échos dus au clutter [8], un atout déjà mis à l'épreuve dans le cas de sonde spatiale [9]. Le traitement des échos ambigus serait également facilité grâce à ces harmoniques [10]. Cette particularité des signaux de chauves-souris, avec la modulation d'amplitude, pourrait offrir de nouvelles perspectives pour le radar et mériterait donc d'être approfondie.

Références

- [1] A. Denzinger et H.-U. Schnitzler. Bat guilds, a concept to classify the highly diverse foraging and echolocation behaviors of microchiropteran bats. *Front. Physiol.*, 2013.
- [2] A. Balleri et A. Farina. Ambiguity function and accuracy of the hyperbolic chirp : comparison with the linear chirp. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017.
- [3] S. Parsons et G. Jones. Acoustic identification of twelve species of echolocating bat by discriminant function analysis and artificial neural networks. *Journal of Experimental Biology*, 2000.
- [4] R. Specht. *Nyctalus Noctula original feeding sound*. Avisoft Biocoustics, batcalls.com.
- [5] A. M. Boonman et al. The influence of flight speed on the ranging performance of bats using frequency modulated echolocation pulses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003.
- [6] N. Levanon et E. Mozeson. *Radar signals*. Wiley, 2004.
- [7] H. L. Van Trees. *Detection, estimation, and modulation theory*. 3. Wiley, 2001.
- [8] M. E. Bates et al. Bats use echo harmonic structure to distinguish their targets from background clutter. *Science*, 333, 2011.
- [9] L. Carrer, L. et Bruzzone. Solving for ambiguities in radar geophysical exploration of planetary bodies by mimicking bats echolocation. *Nature Communications*, 8(1) :2248, 2017.
- [10] C. Ming et al. How frequency hopping suppresses pulse-echo ambiguity in bat biosonar. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(29) :17288–17295, 2020.