

Imagerie radar multistatique utilisant des émetteurs d'opportunité GPS

Frédéric MAUSSANG, Franck DAOUT, Guillaume GINOLHAC, Françoise SCHMITT

Groupe d'Electromagnétisme Appliqué (GEA) – Université Paris X
PST Ville d'Avray, 1 chemin Desvallières, 92410 Ville d'Avray, France

{frederic.maussang, franck.daout, guillaume.ginolhac, francoise.schmitt}@u-paris10.fr

Résumé – Cet article présente l'utilisation des satellites du système GPS comme émetteurs radar d'opportunité pour détecter et imager des objets en mouvement sur le sol terrestre. Avec l'approche multistatique, il est possible d'avoir des images de la cible avec une résolution correcte, y compris avec des signaux bande étroite. La nature multistatique du système (plusieurs émetteurs pour un récepteur) oblige à faire évoluer les techniques Radar à Synthèse d'Ouverture Inverse (RSOI, inverse car la cible est en mouvement) jusqu'à maintenant monostatiques. Nous étudierons ici la faisabilité de ce concept.

Abstract – This article presents the use of GPS satellites as radar transmitters of opportunity in order to detect and image moving targets on the ground. The multistatic approach gives then images with an interesting resolution, even with a narrow band. The multistatic property of the radar system (several transmitters for one receiver) obliges us to modify the Inverse Synthetic Aperture Radar technics (ISAR, inverse because of the moving target) which are monostatic today. This paper presents how this concept is possible.

1 Introduction

L'utilisation de signaux radar pour l'imagerie terrestre est largement répandue grâce à la facilité de propagation des ondes électromagnétiques, par rapport à des systèmes optiques par exemple. L'utilisation de RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) monostatique est une des approches utilisées afin d'imager une portion de territoire. C'est alors que l'utilisation d'émetteurs d'opportunité est particulièrement intéressante pour leur discrétion (exemple dans [1]).

S'ouvrent alors à nous plusieurs sources possibles :

- Les signaux FM radio et télé, de puissance assez élevée, mais de bande fréquentielle étroite [2],
- les signaux de radiocommunication, de bande plus large, mais dont la propagation est mal maîtrisée,
- les signaux GPS, connus, synchronisés portant de l'information sur le satellite, mais de puissance faible (environ -160dBW).

Malgré la faible puissance des signaux, l'utilisation du système servant au positionnement GPS (*Global Positioning System*) [3] paraît intéressante par la connaissance du message émis, en particulier de sa forme.

L'objectif est alors d'avoir la meilleure résolution possible pour imager la cible, ce qui facilitera par la suite la détection, la localisation et l'identification de celle-ci. Nous pouvons alors utiliser le principe du multistatisme, plusieurs satellites, au moins 4, étant visibles en permanence du récepteur posé au sol. Pour cela, il sera nécessaire d'adapter les algorithmes d'imagerie RSO monostatiques existants à ce problème.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons au GPS et ses propriétés. Dans un second temps, les signaux obtenus pour une configuration à trois émetteurs est présentée.

Les algorithmes d'imagerie multistatique sont ensuite utilisés avec les signaux GPS. Une première application sur une cible ponctuelle en mouvement est présentée.

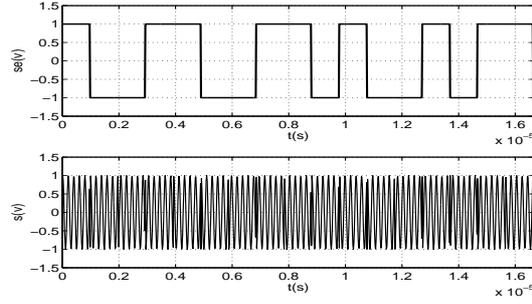
2 Utilisation d'émetteurs d'opportunité : les satellites du système GPS

Le système GPS est constitué de 24 satellites. Ces satellites sont répartis d'une façon équidistante sur 6 plans orbitaux, 4 satellites par plan, à une altitude de 20184 km, inclinés de 55° par rapport à l'équateur, avec une période de révolution de 11h 58min.

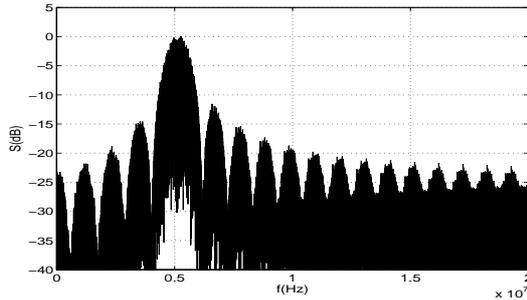
Les ondes émises sont délivrées par des horloges atomiques, qui, après multiplication de la fréquence fondamentale, fournissent deux bandes de fréquences :

- L1 de fréquence centrale 1575,42 MHz, modulée par deux codes : un code civil C/A (*Coarse Acquisition*) et un militaire P(Y) en quadrature de phase,
- L2 de fréquence centrale 1227,60 MHz, modulée par des codes P(Y).

Etant accessible à tous, seul le code C/A est étudié. De plus, l'étalement de spectre du signal émis s'effectue par la modulation en BPSK. Ce signal est constitué d'un code pseudo-aléatoire (PRN) constitué de 1024 bits, chaque bit étant émis à la fréquence $f_{\text{bit}} = 1,023$ MHz (voir la figure 1). La bande de fréquence du signal peut alors être estimée à 1MHz environ, ce qui donne une résolution de $\frac{c}{B} = 300m$ environ, avant synthèse d'ouverture. La durée de la séquence est de 1ms. Un signal de navigation est superposé à cette séquence. Chaque satellite est identifié grâce à sa séquence aléatoire PRN qui lui est propre.



(a) se : 17 premiers bits du code PRN, s : code PRN modulé à $5 \times 1,023MHz$



(b) Spectre du signal émis

FIG. 1 – Signal émis par le satellite GPS (identifiant 1. La fréquence centrale a été ici diminuée pour une meilleure vision).

La puissance minimale du signal reçu, correspondant à une élévation de 5° du satellite, dans l'hypothèse d'une antenne de réception de gain unité, est faible et est de l'ordre de $-160dBW$ [3]. On suppose que le gain sera amélioré par un pré-traitement. De plus, les algorithmes d'imagerie devraient eux aussi augmenter ce gain.

3 Contexte de la simulation et modélisation du signal reçu

Nous supposons que la cible est mobile. Nous nous plaçons alors dans un repère lié au récepteur (R) (figure 2). Nous considérons, pour le moment, un seul satellite visible noté n servant d'émetteur (E), de coordonnées $(x_{ne}(u_k), y_{ne}(u_k), z_{ne}(u_k))$ et une cible mobile de coordonnées $(x_c(u_k), y_c(u_k), z_c(u_k))$ à un instant u_k . Le retard entre le signal direct $\delta_{n,1}$ et celui réfléchi par un point (x', y') dans le repère de la cible $\delta_2 + \delta_{n,3}$ se calcule par :

$$\delta_n(u_k, x', y') = \delta_2(u_k, x', y') + \delta_{n,3}(u_k, x', y') - \delta_{n,1}(u_k) \quad (1)$$

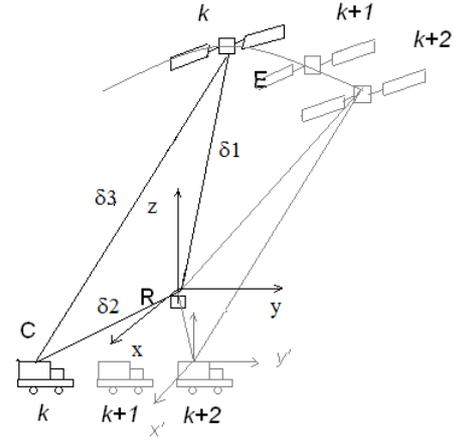


FIG. 2 – Schéma simplifié de la géométrie du système imageur (E : émetteur (satellite GPS), R : récepteur, C : cible (en mouvement)).

avec :

$$\begin{aligned} \delta_{n,1} &= \frac{1}{c} \sqrt{x_{ne}(u_k)^2 + y_{ne}(u_k)^2 + z_{ne}(u_k)^2} \\ \delta_2 &= \frac{1}{c} \sqrt{(x_c(u_k) + x')^2 + (y_c(u_k) + y')^2} \\ \delta_{n,3} &= \frac{1}{c} \sqrt{(x_{ne}(u_k) - x_c(u_k) - x')^2 + \dots} \\ &\dots + (y_{ne} - y_c(u_k) - y')^2 + z_{ne}(u_k)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

et c la vitesse de propagation de l'onde dans le vide ($c \approx 3,0 \times 10^8 m/s$). Après démodulation, le signal reçu pour une fréquence f_i , dans le cas d'un seul émetteur et pour un seul diffuseur, a pour expression :

$$s_n(u_k, f_i, x', y') = \sigma_n \frac{\sin(\pi f_i T_{bit})}{\pi f_i T_{bit}} \exp(-j2\pi\delta_n(u_k, x', y')(f_i - f_0)) \quad (3)$$

avec f_i les fréquences réparties entre $f_0 - \frac{B}{2}$ et $f_0 + \frac{B}{2}$, $T_{bit} = \frac{1}{f_{bit}}$, σ_n le facteur de diffusion du diffuseur et $j^2 = -1$.

La Transformée de Fourier inverse par rapport à f_i permet d'obtenir le signal temporel reçu :

$$z(u_k, t_i) = \left(\sum_{n=1}^{N_e} \text{IFFT}_l(S_n(u_k, f_i)) \right) + b(u_k, t_i) \quad (4)$$

avec N_e le nombre de satellites émetteurs. b est un bruit considéré comme gaussien.

Si nous appliquons ceci au cas d'une cible se déplaçant à une vitesse constante de 30 km/h, avec une trajectoire rectiligne située à 20km du récepteur, nous obtenons le résultat de la figure 3 présentant la combinaison des résultats obtenus à partir de 3 satellites visibles (nous avons choisi les 3 satellites les plus à la verticale du récepteur). Nous pouvons ainsi observer la trace du passage de la cible, le retard variant en fonction du temps long (u_k), et l'aspect multistatique du système.

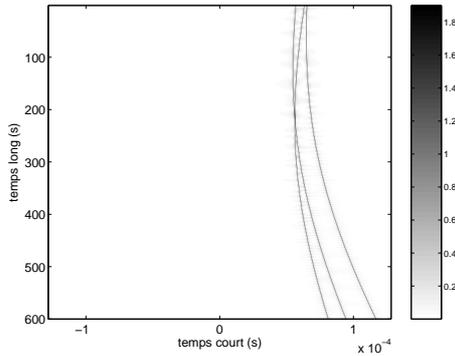


FIG. 3 – Signal reçu à partir de 3 satellites (temps d'observation de 10min, avec un pas de 0,1s en temps long et 0,5 μ s en temps court).

4 Problème de détection et imagerie RSOI

4.1 Problème de détection

A partir de la simulation décrite sur la figure 2, nous considérons N_e satellites visibles sur la période d'observation. Ils émettent un signal continu e_n de fréquence centrale f_0 identique pour tous les émetteurs (voir le paragraphe 2).

Le problème de détection au point (x', y') peut alors se poser de cette façon, pour un échantillon l et à un instant u_k , le signal reçu étant composé d'un bruit b (qui dépend de l'émetteur n et de l'échantillon k) supposé gaussien dans l'hypothèse H_0 , du bruit et du signal réfléchi dans l'hypothèse H_1 :

$$\begin{cases} H_0 & : z(u_k, t_i) = \sum_{n=1}^{N_e} b_n(u_k, t_i) \\ H_1 & : z(u_k, t_i) = \sum_{n=1}^{N_e} \sigma_n s_n(u_k, t_i, x', y') + \dots \\ & \dots + b_n(u_k, t_i) \end{cases} \quad (5)$$

avec z le signal reçu, $t_i \in [0, N_s - 1]$ et $k \in [1, N_p]$. s_n est le signal réfléchi par la cible provenant de l'émetteur n . Il correspond au signal émis retardé de $\delta_n(u_k, x', y')$ (le signal direct entre l'émetteur et le récepteur sert de référence de temps).

Nous faisons cette hypothèse :

$$\sum_{l=0}^{N_s-1} s_n(u_k, t_i) s_m^*(u_k, t_i) = \begin{cases} 0 & \text{pour } n \neq m \\ 1 & \text{pour } n = m \end{cases} \quad (6)$$

Cette hypothèse est tout à fait réaliste, les codes PRN servant à l'émission des signaux des satellites étant orthogonaux et le terme de normalisation pouvant être inclus dans le terme $\sigma_{i,n}$.

On peut alors écrire le problème de détection sous forme vectorielle en concaténant les échantillons $z(u_k, t_i)$ et former un vecteur $\mathbf{z} \in \mathcal{C}^{N_s \times N_p}$ (N_p étant le nombre d'échantillons du signal en fréquence). De même, si l'on note \mathbf{s}_n le vecteur des $s_n(u_k, t_i)$, nous pouvons définir $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{N_e}]$. On peut également définir $b_{n,k} = \sum_{n=1}^{N_e} \mathbf{b}_n$ supposé gaussien centré, avec \mathbf{b}_n la concaténation des échantillons de $b_n(u_k, t_i)$, et définir σ comme la concaténation des σ_n :

$$\begin{cases} H_0 & : \mathbf{z} = \mathbf{b}' \\ H_1 & : \mathbf{z} = \sigma \mathbf{S}(x', y') + \mathbf{b}' \end{cases} \quad (7)$$

Le facteur de diffusion σ et la position (x', y') sont inconnus.

4.2 Algorithme d'imagerie

La théorie de la détection nous donne comme formule pour l'image de la cible en (x', y') [4] :

$$I(x', y') = \sum_{n=1}^{N_e} I_n(x', y') \quad (8)$$

avec :

$$I_n(x', y') = \|\mathbf{s}_n^*(x', y') \mathbf{z}\|^2 \quad (9)$$

Ceci consiste donc en une somme incohérente d'images bistatiques formées par les couples émetteur – récepteur.

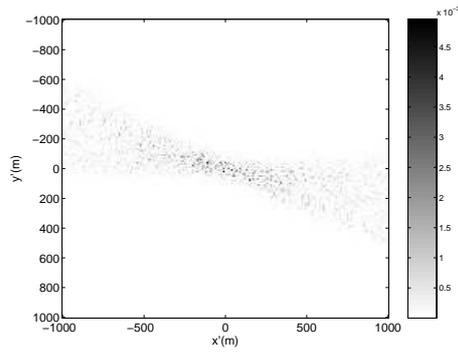
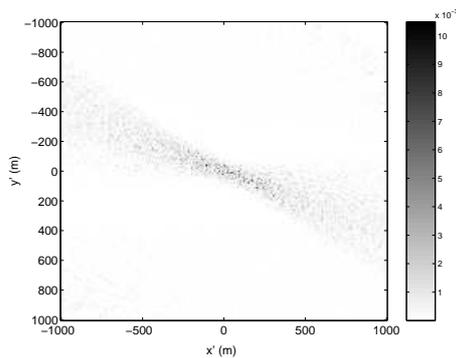
Une version rapide de cet algorithme est proposée dans [5]. Nous allons utiliser cet algorithme pour notre application.

4.3 Résultat de la simulation

Afin de montrer la faisabilité de notre concept, nous appliquons l'algorithme d'imagerie radar sur les signaux simulés dans le paragraphe 3 avec une cible ponctuelle, et ce à partir de trois satellites visibles sur la durée d'observation (référéncés A1, B3 et F1). La figure 4(a) représente une des trois images radar bistatiques obtenues en considérant chaque émetteur séparément. La figure 4(b) représente elle l'image obtenue à partir du système multistatique composé des trois émetteurs (c'est donc, d'après l'équation 8, la somme incohérente des trois images précédentes).

Nous pouvons alors observer sur chacune des images un nuage de points ayant une orientation horizontale privilégiée. Ceci s'explique par le fait que la cible se déplace selon l'axe des x et que les satellites ont un déplacement lent par rapport à la cible (un tour de la Terre en 24h environ). Ceci explique par ailleurs notre hypothèse d'une cible terrestre en mouvement.

Nous pouvons cependant constater que la résolution obtenue est inférieure aux 300m prévues par la théorie à un peu moins de 100m (selon l'axe des y'). Cette résolution est sensiblement améliorée par le multistatisme (voir les images zoomées sur la figure 5).

(a) Image bistatique (I_1)

(b) Image multistatique

FIG. 4 – Images bistatique et multistatique.

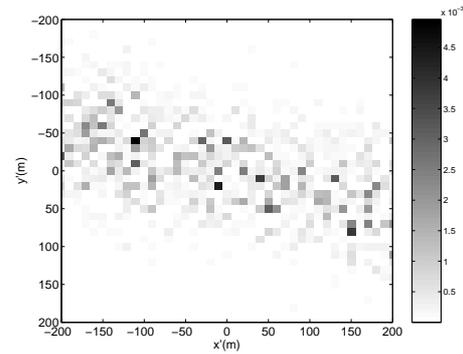
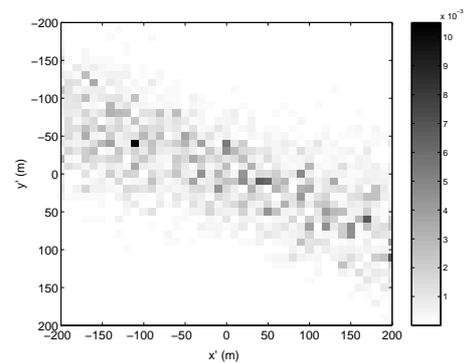
5 Conclusion et perspectives

Nous avons montré dans cet article la faisabilité de l'imagerie RSOI à partir des émetteurs des satellites GPS dans un objectif de détection de cibles terrestres en mouvement. Grâce au multistatisme nous arrivons à améliorer la résolution des images obtenues, ce qui aidera, par la suite, à l'identification de la cible.

Ce travail représente une première étape qui sera complétée par l'étude de cibles plus complexes [6], ce qui passe par l'étude de cibles et de contextes réalistes. Une comparaison de différents algorithmes d'imagerie spatio-temporels ou fréquentiels (PFA [7]) doit également être effectuée, en terme de résolution par exemple.

Références

- [1] L. Cazzani, C. Colesanti, D. Leva, G. Nesti, C. Pratti, F. Rocca, D. Tarchi, A Ground-Based Parasitic SAR Experiment, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 5, septembre 2000.
- [2] Y. Wu, D.C. Munson. Multistatic Synthetic Aperture Imaging of Aircraft using Reflected Television Signals, in *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imaging VIII, Proc. SPIE 4382*, Ed. E.G. Zelnio, Orlando, Florida, USA, avril 2001.

(a) Image bistatique (I_1)

(b) Image multistatique

FIG. 5 – Images bistatique et multistatique zoomées.

- [3] E. D. Kaplan, *Understanding GPS Principle and Applications*, Artech House, Inc., Boston, Massachusetts, USA, 1996, ISBN 0-89006-793-7.
- [4] H. L. Van Trees, *Estimation and Modulation Theory*, volume 1, John Wiley and Sons, Inc., 1968.
- [5] G. Ginolhac, F. Daout, F. Schmitt, Imagerie d'objets mobiles à l'aide d'un radar bande étroite multistatique, *Actes de la conférence GRETSI 2005*, Louvain-la-Neuve, Belgique, septembre 2005, pp. 1173 – 1176.
- [6] G. Ginolhac, F. Daout, F. Schmitt, Computation of Bistatic SAR with NEC2 in a Context of Passive ISAR System, *Proc of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'05)*, Séoul, Corée du Sud, juillet 2005.
- [7] B. D. Rigling, R. L. Moses, Polar Format Algorithm for Bistatic SAR, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, no. 4, octobre 2004, pp. 1147 – 1159.