

# Acquisition de canaux multitrajets pour la géolocalisation avec Galiléo

Fadoua BRAHIM<sup>1</sup>, Olivier RABASTE<sup>2</sup>, Thierry CHONAVEL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département Signal et Communications  
Technopole Brest-Iroise, CS 83818, 29285 Brest Cedex, France

<sup>2</sup>Laboratoire d'AstroParticule et Cosmologie  
10 rue Alice Domon et L'onie Duquet, 75205 Paris Cedex 13, France  
fadoua.brahim@enst-bretagne.fr, thierry.chonavel@enst-bretagne.fr  
rabaste@apc.univ-paris7.fr

**Résumé** – Les formes d'onde BOC (Binary Offset Carrier) utilisées pour la modulation des signaux Galiléo dans la bande L1, sont conçues notamment pour permettre une estimation précise du temps de propagation. Cependant, leurs fonctions d'autocorrélation présentent des pics secondaires de forte amplitude qui peuvent engendrer des erreurs d'acquisition, en particulier en présence de multitrajets proches. Dans cet article, nous comparons une approche par simulation de Monte Carlo par Chaîne de Markov (MCMC) à l'acquisition classique pour la synchronisation des signaux satellites dans un environnement à multitrajets du point de vue de la précision de localisation et de la charge de calcul.

**Abstract** – The Binary Offset Carrier (BOC) and Alternate BOC (ALTBOC) waveforms introduced for Galileo signaling are designed to enable high propagation time estimation accuracy. However, their autocorrelation functions have multiple narrow peaks, thus leading to potential acquisition ambiguities, in particular in presence of multipath. In order to detect the first path, high sampling rate is concerned. Unfortunately, this introduces noise correlation. In this paper, we compare a Monte Carlo Markov Chain (MCMC) technique with the standard acquisition approach for satellite signals synchronization in multipath environments, considering both accuracy and computational load issues.

## 1 Introduction

Le système GPS et prochainement le système Galiléo permettent d'estimer la position d'un utilisateur par une technique de triangulation qui nécessite la connaissance des distances entre le récepteur et les satellites visibles de la constellation. Cette distance est estimée par mesure des temps de propagation d'un signal de positionnement émis par les satellites. A la différence des signaux utilisés dans le système GPS, qui présentent une autocorrélation de forme triangulaire, les signaux Galiléo, qui appartiennent à la famille des signaux BOC (Binary Offset Carrier) et Alternate BOC, sont caractérisés par une autocorrélation pouvant présenter de nombreux pics secondaires (voir figure (1))[7]. Cela peut compliquer l'estimation des temps de propagation des signaux du fait du risque de confusion entre le pic principal et les pics secondaires. De plus, en présence de trajets multiples, tels qu'on peut en rencontrer dans certains environnements (indoor, urbain, marin) [8] [9] [10] [5], la détection du premier trajet, qui est généralement le plus représentatif de la distance au satellite, peut devenir difficile.

La méthode d'acquisition classique des signaux GPS [3, 11, 2] consiste en une recherche du maximum en sortie d'un banc de filtres Doppler. En présence de trajets multiples, le trajet d'intérêt pour la localisation est le premier qui dépasse un certain seuil. Selon ce critère, les trajets

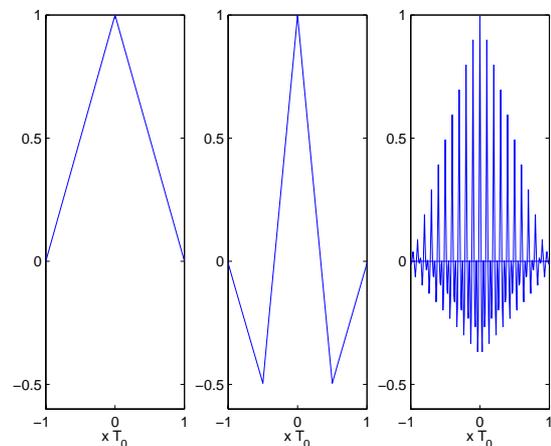


FIG. 1 – Fonctions d'autocorrélation des signaux GPS, BOC sinus (1, 1) and AltBOC (15, 10)

proches (distants de moins d'un temps chip) peuvent ne pas être distingués en sortie du filtrage adapté.

Une approche plus précise consiste à exploiter la parcimonie du canal dans un cadre bayésien en modélisant sa réponse impulsionnelle au moyen d'un *a priori* Bernoulli-Gaussien. La maximisation de la probabilité *a posteriori* correspondante étant difficile, le problème d'estimation

peut alors être résolu aux moyens de méthodes de simulation de type Monte-Carlo par Chaîne de Markov [6]. L'approche permet en particulier de séparer des trajets proches et ainsi de diminuer le biais d'estimation sur le premier trajet. Elle permet également de prendre en compte la corrélation du bruit.

Pour les signaux Galiléo, la longueur minimale du code est de 4092 chips, l'application de la méthode MCMC pour la recherche des trajets dans toute la durée du code est trop coûteuse en terme de temps de calcul. Pour le réduire, on commencera par utiliser la méthode classique de détection qui permet de déterminer une zone réduite où l'énergie dépasse un certain seuil de détection puis d'appliquer l'algorithme MCMC sur cet intervalle.

Le papier est organisé comme suit. D'abord, nous rappelons l'approche classique d'acquisition. Ensuite, nous décrivons l'approche bayésienne et la recherche de l'estimateur par échantillonnage de Gibbs. En conclusion, des caractéristiques de performance de ces algorithmes dans un environnement à multitrajets sont discutées et comparées.

## 2 La Méthode classique d'acquisition en GPS et Galiléo

L'acquisition classique du signal est un procédé de recherche à deux dimensions (temps, fréquence) où une réplique du code est alignée avec le signal reçu [3]. Ceci est assuré par des corrélations du signal réplique et du signal reçu pour chaque fréquence Doppler et chaque retard. Quand le code et la fréquence Doppler du signal réplique coïncident avec le signal incident, la sortie des corrélateurs est maximale et supérieure à un certain seuil. Ce seuil peut être choisi en employant le formalisme de Neyman Pearson [3] :

$$V_t = \sigma_n \sqrt{-2 \log P_{fa}} \quad (1)$$

où  $P_{fa}$  est la probabilité de fausse alarme fixée et  $\sigma_n^2$  la variance du bruit. Le schéma d'acquisition classique est présenté sur la figure 2.

### 2.1 La fenêtre de recherche

Les erreurs de multitrajets sont dues aux réflexions et diffractions du signal satellite sur des surfaces lors de sa propagation jusqu'au récepteur. Les signaux réfléchis et diffractés décalent le pic de corrélation et corrompent la forme de la corrélation du récepteur (théoriquement symétrique). Ces deux types de dégradation de la corrélation conduisent à des mesures incorrectes de pseudo-distance si on utilise la méthode classique d'acquisition.

En particulier, la superposition de trajets décalées entraînera généralement un biais d'estimation de la position. C'est pourquoi, nous proposons d'appliquer la méthode MCMC sur une fenêtre déterminée par la méthode classique.

En présence d'un trajet direct, C'est le premier trajet reçu

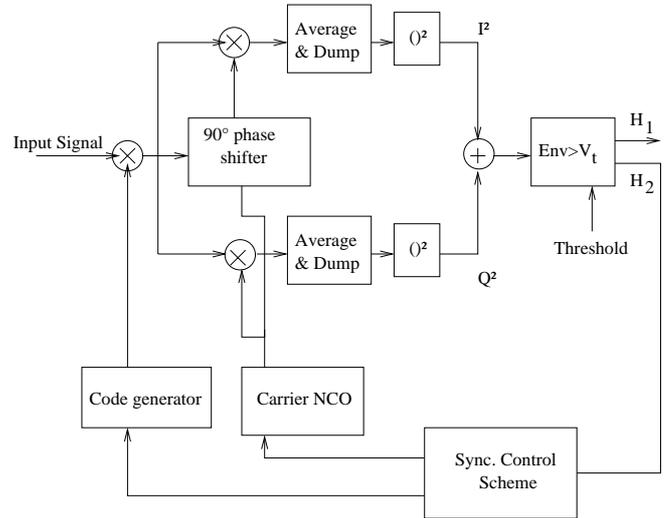


FIG. 2 – Schéma d'acquisition

qu'il faudra prendre en compte pour la localisation. A défaut, ce premier trajet sera celui qui fournit le biais le plus faible. Donc, nous ne prendrons en compte que la première zone d'énergie détectée en terme de retard de code.

Par exemple dans la figure 3, nous ne considérons de trajets que dans les régions délimitées par  $[t_0, t_1] \times [f_0, f_1]$  et  $[t_0, t_1] \times [f_2, f_3]$ . Ces régions seront nos fenêtres de recherche où nous appliquons notre algorithme de détection de type MCMC.

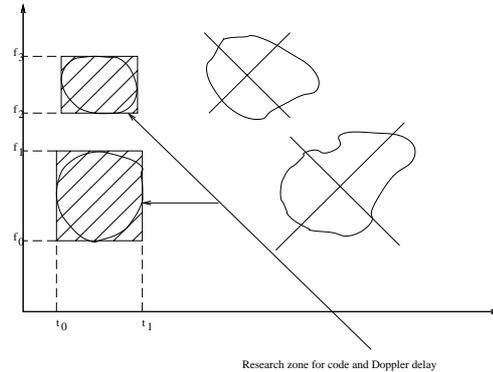


FIG. 3 – Zone de recherche pour le retard du code et le décalage Doppler

## 3 La méthode MCMC

### 3.1 Le modèle Bernoulli-Gaussien pour le canal

Ce modèle est inspiré des travaux d'estimation des canaux multitrajets complexes présentés dans [6]. Afin de représenter la parcimonie du canal, on définit une variable à deux états;  $q_k = 0$  en l'absence de trajet et  $q_k = 1$  en présence d'un trajet. Soit  $\mu = P(q_k = 1)$  la probabilité qu'un trajet soit présent à l'instant  $k$ .  $\mu$  dépend de l'environnement de propagation. Ainsi, les zones rurales sont

caractérisées par de très faibles valeurs de  $\mu$ , alors que les zones urbaines nécessitent de plus grandes valeurs de  $\mu$ .

Comme dans [6], on définit une séquence Bernoulli - Gaussienne (BG)  $z = (q, h)$  où  $h$  est un vecteur des amplitudes de trajets correspondants à  $q$ . On modélise les entrées  $h_k$  de  $h$  par un mélange de deux gaussiennes, tels que la densité de probabilité de  $h_k$  conditionnellement à  $q_k$  est

$$p(h_k/q_k = i) \sim N(0, \sigma_i^2) + jN(0, \sigma_i^2) \quad i = 0, 1 \quad (2)$$

où  $\sigma_0$  est choisi près de zéro et beaucoup plus petit que  $\sigma_1$ .

L'estimation de  $z$  est réalisée à travers la maximisation de la probabilité *a posteriori*  $p(z/x)$ . De la formule de Bayes,

$$p(\mathbf{z}/\mathbf{x}) \propto p(\mathbf{x}/\mathbf{z})p(\mathbf{z}) = p(\mathbf{x}/\mathbf{z})p(\mathbf{h}/\mathbf{q})p(\mathbf{q}) \quad (3)$$

Considérant que

1. le bruit est Gaussien circulaire complexe avec une matrice d'autocorrélation  $\Gamma_n = A_n^{-1}$
2. les échantillons  $q_k$  sont indépendants
3. les échantillons  $h_k$  sont indépendants conditionnellement à  $q_k$ .

Il vient alors que la log-vraisemblance *a posteriori* de  $\mathbf{z}$  sachant  $\mathbf{x}$  est donnée par

$$L(\mathbf{z}/\mathbf{x}) = -(\mathbf{x} - \mathbf{S}_\lambda \mathbf{h})^H \mathbf{A}_n (\mathbf{x} - \mathbf{S}_\lambda \mathbf{h}) - \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{D}_q \mathbf{h}}{2\sigma_1^2} - \frac{\mathbf{h}^H (1 - \mathbf{D}_q) \mathbf{h}}{2\sigma_0^2} + \mathbf{q}^H \mathbf{q} \ln\left(\frac{\mu}{1-\mu} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2}\right) + C \quad (4)$$

avec  $C$  est une contante indépendante de  $\mathbf{z}$ .

### 3.2 L'algorithme MCMC

Pour déduire un estimateur de  $\mathbf{z}$  de la loi *a posteriori*  $p(\mathbf{z}/\mathbf{x})$ , on procède de la façon suivante. On génère des réalisations selon la densité de probabilité *a posteriori* associée à l'équation 4, puis on utilise ces réalisations pour calculer un estimateur empirique des paramètres. Ceci est effectué à l'aide d'un échantillonneur de Gibbs qui simule des réalisations des échantillons  $z_k$  selon les marginales *a posteriori*  $p(z_k/x, z_{-k})$  où  $z_k = (z_0, \dots, z_{k-1}, z_{k+1}, \dots, z_L)$ . Après un certain nombre d'itérations (ici  $I_0 = 100$ ), l'échantillonneur atteint un équilibre thermique qui signifie que les échantillons générés sont distribués selon la probabilité *a posteriori*  $p(\mathbf{z}/\mathbf{x})$ .

Ces échantillons sont alors utilisés pour calculer les estimateurs suivants  $\hat{\mathbf{q}}$  et  $\hat{\mathbf{h}}$  de  $\mathbf{q}$  and  $\mathbf{h}$  :

$$\hat{q}_k = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{\sum_{i=I_0+1}^I q_k^{(i)}}{I-I_0} > s \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad (5)$$

$$\hat{h}_k = \begin{cases} \frac{\sum_{i=I_0+1}^I q_k^{(i)} h_k^{(i)}}{\sum_{i=I_0+1}^I q_k^{(i)}} & \text{si } q_k = 1 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (6)$$

où  $I$  est le nombre d'itérations total et le seuil  $s$  est donné par

$$s = \left[ 1 + \frac{1-\mu}{\mu} \exp\left(\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} - 1\right) \left[Q^{-1}\left(\frac{\sigma_0 P_{FA}}{\sqrt{2\pi}}\right)\right]^2\right) \right]^{-1} \quad (7)$$

où

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (8)$$

selon le formalisme de Neyman-Pearson [6] où la  $P_{FA}$  est la probabilité de fausse alarme fixée.

## 4 Simulations et résultats

Nous avons effectué des tests pour la modulation  $BOC_s(1, 1)$ .

### 4.1 Canal simulé

De nombreux exemples de canaux multitrajets pour les environnements GPS-Galiléo ont été décrits dans la littérature pour les environnements indoor [5] ou outdoor (canal urbain, aéronautique) [10]. Selon ces travaux, le retard maximum par rapport au trajet direct, l'atténuation minimale et la loi des retards des trajets secondaires dépendent de l'angle de l'élévation du satellite et de son azimuth [1].

Les trajets fortement retardés ( $> 0.5$ chip) sont peu probables et de faible puissance. Les retards les plus probables ( $< 0.5$ chip) sont dans les limites de l'erreur tolérée sur le retard de code (0.5 chip) et ne perturbent pas l'acquisition classique. Par contre, en l'absence d'un trajet direct, les boucles de poursuite lancées avec de tels retards conduisent en des erreurs de positionnement ; c'est pourquoi il est toujours préférable d'éliminer de telles erreurs dans l'étape d'acquisition.

Pour évaluer la précision de notre méthode, nous avons choisi des canaux du type précédent (étalement des trajets inférieur à 1 temps chip). Pour cela, nous avons généré un certain nombre de trajets suivant une loi Poissonnienne de paramètre 2. L'amplitude du premier trajet est distribuée selon une loi de Rice, alors que les autres trajets sont uniformément distribués sur le temps chip et leurs amplitudes sont distribuées selon une loi de Rayleigh [4].

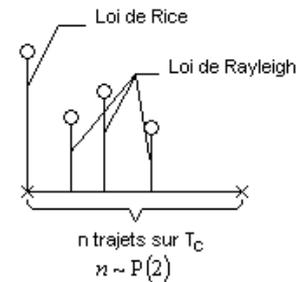


FIG. 4 – Canal simulé

### 4.2 Paramètres des simulations

La taille de la fenêtre dans laquelle nous cherchons le temps de retard est de taille  $4T_c$ , ie,  $2 \times$  la taille du pic

d'autocorrélation dans le cas du GPS et  $6\times$  la taille du pic principal d'autocorrélation dans le cas du  $BOC_s(1, 1)$ .

### 4.3 Résultats et Conclusions

Commençons par étudier les performances d'estimation de la pseudo-distance pour un satellite. Nous avons effectué 10000 simulations pour l'acquisition des signaux  $BOC_s(1, 1)$ . Le taux de détection, le biais moyen et la variance moyenne sont donnés dans les tableaux 1 et 2 pour des pas d'échantillonnage égaux à  $1/12$  et  $1/120$  temps chip. Le deuxième tableau correspond à un fonctionnement plus réaliste du récepteur du fait d'un coût de calcul nettement réduit pour l'estimation du temps de propagation.

SNR(dB)		-10	-15	-20	-25
(1)	Détection(%)	94.6	96.8	95	87.8
	$\sqrt{EQM}(m)$	3.60	4.46	7.05	11.94
(2)	Détection(%)	98	97.2	96.2	94.4
	$\sqrt{EQM}(m)$	13.41	14.37	15.09	16.24

TAB. 1 – Résultats pour l'échantillonnage fin  $f_s = 120 * f_0$  ((1) : méthode MCMC, (2) : méthode classique).

SNR(dB)		-10	-15	-20	-25
(1)	Détection(%)	98.84	97.21	90.71	72
	$\sqrt{EQM}(m)$	13.11	14.52	18.02	20.571
(2)	Détection(%)	96.9	96.38	95.57	93.8
	$\sqrt{EQM}(m)$	23.46	23.95	24.70	25.27

TAB. 2 – Résultats pour l'échantillonnage grossier  $f_s = 12 * f_0$  ((1) : méthode MCMC, (2) : méthode classique).

Envisageons maintenant les conséquences de ces résultats dans un scénario de positionnement. Ici, les performances de positionnement simulées sont donnés dans le tableau 3. L'utilisateur est à Brest avec les coordonnées  $[48.24N \ 4.31W \ 0]$  à 9h45 le 07/06/2007, les satellites qui ont la plus haute élévation et qui ont un meilleur GDOP sont les numéros : 2, 13, 20 et 23. On suppose que les signaux sont reçus avec les SNR respectifs :  $-15dB$ ,  $-20dB$ ,  $-25dB$  et  $-10dB$ . Une méthode de moindres carrés est utilisée pour la triangulation à partir des retards estimés avec des performances qui correspondent à celles obtenues dans le tableau 2.

$\sqrt{EQM}(m)$	x	y	z	std
MCMC	212.42	42.26	373.46	249.25
standard	257.89	51.95	454.05	302.97

TAB. 3 – Erreurs de positionnement.

## Références

- [1] H. Al Bitar. *Advanced GPS signal processing techniques for LBS services*. PhD thesis, l'école doctorale Informatique et Télécommunications en Réseaux et Télécommunications, Juillet 2007.
- [2] A.J. Van Dierendonck. *GPS Receivers, Global Positioning system : Theory and Applications*, volume 1, pages 329–407. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 1995.
- [3] K. Krumvedia, P. Madhani, C. Cloman, E. Olson, J. Thomas, P. Axelrad, and W. Kober. A Complete IF Software GPS Receiver : A Tutorial about the Details.
- [4] J.G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill, 3 edition, 1995.
- [5] F. Pérez-Fontán, B. Sanmartin, A. Steingass, A. Lehner, J. Selva, E. Kubista, Joanneum Research. Graz, Austria, and B. Arbesser-Rastburg. Measurements and Modeling of the Satellite to Indoor Channel for Galileo. In *ENC-GNSS, 8th European Navigation Conference GNSS*, Rotterdam, The Netherlands, May 2004.
- [6] O. Rabaste and T. Chonavel. Estimation of multipath channels with long impulse response at low SNR, via an MCMC method. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(4), April 2007.
- [7] E. Rebeyrol, C. Macabiau, L. Lestarquit, L. Ries, J.L Issler, M.L. Boucheret, and M.Bousquet. BOC Power Spectrum Densities. In *ION NTM 2005*, pages 769–778, San Diego CA, 24-26 Janvier 2005.
- [8] J. Soubielle, I Fijalkow, P. Duvaut, and A. Bibaut. GPS Positioning in a Multipath Environment. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50, January 2002.
- [9] A. Steingass and A. Lehner. Measuring the navigation multipath channel : A Statistical Analysis. In *ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division*, Long Beach, California, September.
- [10] A. Steingass and A. Lehner. A Channel Model for Land Mobile Satellite Navigation. In *GNSS 2005 Conference*, Munich, Germany, July 2005.
- [11] P. Ward. *GPS Satellite Signal Characteristics, Understanding GPS signal characteristics*, chapter 4, pages 83–116. Artech House, Inc.