

Les Signaux à Bande Large au Service de la Réflectométrie par GNSS à Site Bas

Corentin LUBEIGT^{1,2}, Jordi VILÀ-VALLS², Laurent LESTARQUIT³, Eric CHAUMETTE²

¹Laboratoire TéSA

7 boulevard de la Gare, 31500, Toulouse, France

²ISAE-SUPAERO, DEOS, équipe NAVIRES

10 avenue Edouard Belin, 31055, Toulouse, France

³CNES, DSO/RF/STR

18 avenue Edouard Belin, 31401, Toulouse, France

corentin.lubeigt@tesa.prd.fr

Résumé – Pendant plus de trente ans, les signaux *Global Navigation Satellite System* (GNSS) ont été utilisés comme signaux d’opportunité comme en *GNSS Reflectometry* (GNSS-R). L’étude de la réflexion de ces signaux sur le sol peut en effet conduire à l’estimation de paramètres sur la surface de réflexion ou sur la hauteur du récepteur. Lorsque cette hauteur est faible, le récepteur est à site bas et la proximité du sol entraîne de fortes interférences entre les signaux direct et réfléchi ce qui rend difficile une estimation non biaisée des différentes observables. Cette difficulté peut néanmoins être levée grâce à des signaux GNSS occupant des bandes de plus en plus larges.

Abstract – For more than three decades, Global Navigation Satellite System (GNSS) signals have been seen as signals of opportunity as in GNSS Reflectometry (GNSS-R). The study of the reflections from the ground of such signals can indeed lead to many features regarding the reflecting surface and the receiver’s height. When this height is small, the receiver is said ground-based and the vicinity to the ground induces important interferences between the direct and the reflected path which make it difficult to process to obtain an unbiased altimetry product. However, this difficulty can be leveraged thanks to recent wideband GNSS signals.

1 Introduction

Les signaux de *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) sont principalement utilisés afin de se positionner sur Terre. Rapidement après la mise en service des premières constellations, la communauté s’est intéressée à ces signaux comme des signaux d’opportunité [1]. En particulier, l’étude de la réflexion de ces signaux sur des surfaces plus ou moins réfléchissantes ouvre la porte à des applications telles que l’altimétrie, l’estimation de l’état de la mer, des vitesses de vent de surface ou encore l’estimation de l’hygrométrie des sols. L’étude des signaux GNSS réfléchis sur la surface du sol est connue sous le nom de *GNSS Reflectometry* (GNSS-R).

Le phénomène de réflexion ayant l’effet d’inverser la polarité des signaux GNSS, d’une polarisation circulaire à droite (*Right Hand Circular Polarization* ou RHCP) à une polarisation circulaire à gauche (*Left-Hand Circular Polarization* ou LHCP), les signaux GNSS sont généralement reçus à l’aide de deux antennes, l’une, RHCP pointant vers le haut, reçoit le signal direct et la seconde, LHCP pointant vers le bas, reçoit le signal réfléchi.

Néanmoins, le *GNSS Interferometric Reflectometry* (GNSS-IR) [2], utilise une seule antenne, à site bas, et exploite l’interférence entre le signal direct et le signal réfléchi. Ce

phénomène est observé au niveau de la puissance globale reçue, sous la forme d’oscillations du *Carrier-to-Noise density ratio* (C/N0). Ces oscillations peuvent être reliées à la géométrie (hauteur et élévation du satellite) et leur fréquence permet d’estimer la hauteur du récepteur.

Pour des scénarios proches du sol, un traitement à deux antennes expose à d’importants phénomènes d’interférence : le signal direct a tendance à polluer le canal LHCP et vice-versa. Pourtant, travailler sur ces signaux permettrait d’obtenir des mesures toutes les quelques millisecondes. Le problème est alors de gérer l’interférence entre les différents contributeurs. Pour des signaux à faible bande tels que GPS L1 C/A, il est vrai que si les signaux sont trop proches dans le temps, l’interférence entre eux sera trop importante, néanmoins pour les signaux GNSS les plus récents GPS L5 ou GALILEO E5, présentant des bandes bien plus larges, le découplage des signaux direct et réfléchi devient envisageable à site bas.

Dans cet article, la faisabilité d’estimer la hauteur de manière non biaisée à l’aide d’un récepteur muni d’une antenne à double polarisation est étudiée. Ces travaux se basent sur un scénario présenté dans la partie 2 duquel découle le modèle de signal utilisé. La section 3 analyse un premier traitement supposant une seule source. Enfin la section 4 propose un traitement à deux sources. La section 5 vient conclure cette étude.

2 Description du Scénario et Modèle

2.1 Scénario considéré

Le scénario envisagé s'inspire d'une campagne de mesure organisée par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) le 27 Juillet 2021 sur l'étang d'Ayrolle près de Gruissan. Lors de cette campagne un récepteur monté sur un mat collectait les signaux GNSS à l'aide d'une antenne bipolaire inclinée à 90° , orientée vers l'ouest. Le récepteur numérisait séparément la voie RHCP et la voie LHCP une bande $B = 20$ MHz sur la fréquence L5. la figure 1 schématise la géométrie considérée. La hauteur h entre le récepteur et la surface de réflexion est

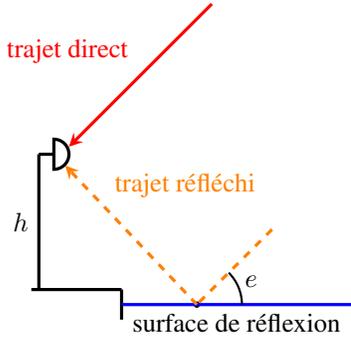


Figure 1 – Géométrie considérée.

d'environ 25 mètres. Proche du sol, la hauteur h et l'élévation du satellite e peuvent être reliées par la formule 1 :

$$c\Delta\tau = 2h \sin(e) \quad (1)$$

où c est la vitesse de la lumière et $\Delta\tau$ est le retard relatif du trajet réfléchi sur le trajet direct. En exploitant cette formule pour toutes les élévations de satellite, il est donc possible d'évaluer tous les retards relatifs que va voir le récepteur comme l'illustre la figure 2 ci-dessous. Pour la suite, et à titre d'exemple pour

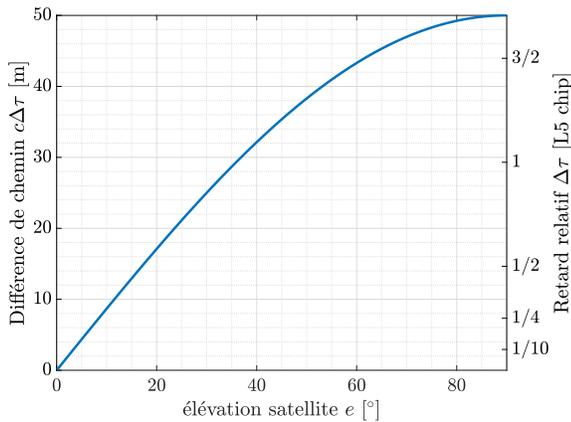


Figure 2 – Retard du trajet réfléchi sur le trajet direct en fonction de l'élévation du satellite pour une hauteur de récepteur $h = 25$ m.

les applications numériques, l'élévation du satellite sera fixée

à 30° ce qui entraîne une différence de chemin de 25 m, ou un retard relatif de 0.85 L5 chip, où 1 L5 chip correspond à la durée d'un symbole pour le GPS code transmis la bande L5, cette durée est égale à environ $0.1\mu\text{s}$.

2.2 Modèle du Signal

2.2.1 Modèle de signal conditionnel à deux sources

Dans cette étude, un récepteur muni d'une seule antenne capable de recevoir le signal direct (numéroté 0) et le signal réfléchi (numéroté 1) est donc considéré. La récepteur étant supposé proche du sol, la réflexion, due à une surface lisse comme celle d'un lac est supposée spéculaire.

Le satellite GNSS est donc en train d'émettre un signal à bande limitée $s(t)$ de bande B modulé à la fréquence porteuse f_p .

Le signal reçu au niveau de l'antenne peut donc être vu comme la somme de deux copies, retardées, atténuées et déformées par effet Doppler du même signal, son enveloppe complexe s'écrit alors :

$$x(t) \triangleq d(t; \tau_0, b_0, \rho_0, \phi_0) + d(t; \tau_1, b_1, \rho_1, \phi_1) + n(t), \quad (2)$$

$$d(t; \tau, \rho, \phi) = \rho e^{j\phi} s(t - \tau) e^{-j2\pi f_p b t}, \quad (3)$$

où $n(t)$ est un bruit blanc gaussien, τ_0 et τ_1 sont les retards des signaux direct et réfléchi et pour $i \in \{0, 1\}$, b_i est le facteur de contraction dû à l'effet Doppler, ρ_i et ϕ_i , l'amplitude (strictement positive) et la phase du coefficient complexe qui résulte des phénomènes de propagation et des gains d'antenne à l'émission et à la réception.

Si le signal ainsi reçu est numérisé sur K échantillons à la fréquence critique $F_s = B = 1/T_s$, le signal en bande de base en sortie du filtre de Hilbert (supposant une compensation parfaite de la fréquence Doppler comme discuté plus loin) peut être exprimé sous la forme discrète suivante :

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}(\tau_0, \tau_1) \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n}, \quad \mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_K), \quad (4)$$

avec, pour $k \in [K_1, K_2]$,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^T &= (\dots, x(kT_s), \dots), \quad \mathbf{A}(\tau_0, \tau_1) = [\mathbf{s}(\tau_0), \mathbf{s}(\tau_1)] , \\ \mathbf{s}(\tau)^T &= (\dots, s(kT_s - \tau) \dots), \quad \boldsymbol{\alpha}^T = (\rho_0 e^{j\phi_0}, \rho_1 e^{j\phi_1}) , \\ \mathbf{n}^T &= (\dots, n(kT_s), \dots) . \end{aligned}$$

Le modèle présenté dans la formule 4 peut être identifié à un Modèle de Signal Conditionnel (MSC) à deux sources comme étudié dans [3].

2.2.2 Discussion sur la fréquence Doppler

Dans le modèle de signal envisagé, les fréquences Doppler sont supposées égales et parfaitement compensées à la réception. Dans le cas d'un scénario statique à site bas, il peut être montré que la différence de fréquence Doppler entre le signal direct et le signal réfléchi est uniquement due à la hauteur du récepteur, à l'élévation du satellite et à la vitesse à laquelle cette élévation

varie. En effet la différence de phase entre les deux signaux peut être formulée par l'expression 5 [4] :

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_0 = \frac{2\omega_c h}{c} \sin(e). \quad (5)$$

Ainsi lorsque l'élévation du satellite e varie, la phase relative varie également et la dérivée première correspond en fait à la différence de fréquence Doppler :

$$\Delta F_d = (b_1 - b_0)f_p = \frac{2f_p h}{c} \cos(e) \frac{de}{dt}. \quad (6)$$

La formule 6 est souvent exploitée pour effectuer de l'altimétrie à partir d'observations du C/N0 en GNSS-IR. Pour application numérique, le cas suivant est proposé : pour un satellite GPS L5 avec une vitesse d'élévation $de/dt = 0.008 \text{ }^\circ/s$, $e = 0^\circ$, $f_p = 1176.45 \text{ MHz}$ et un récepteur à une hauteur $h = 25 \text{ m}$: $\Delta F_d \approx 1.6 \text{ Hz}$. Une si faible différence ne sera pas observable pour les temps d'observation considérés par la suite (de l'ordre de la dizaine de millisecondes).

2.3 Fuite de signal dans les canaux

Au cours de cette étude, le traitement du signal reçu est fait sur les deux canaux RHCP et LHCP séparés, il est à prévoir que sur les canaux séparés, les amplitudes des signaux seront fortement impactées par le filtrage de l'antenne. Malheureusement, une antenne RHCP ne filtre pas entièrement la part LHCP des signaux reçus, et vice-versa, c'est ce qui permet à la technique de GNSS-IR de fonctionner mais qui gêne un traitement trop simple des canaux LHCP et RHCP. Pour la suite, sur une même voie, les rapports d'amplitudes entre les deux signaux sont supposés constants et arbitrairement fixés :

$$\rho_1^{\text{RHCP}} / \rho_0^{\text{RHCP}} = \rho_1^{\text{LHCP}} / \rho_0^{\text{LHCP}} = 0.1. \quad (7)$$

3 Traitement à Une Source

Dans cette section, un premier traitement, simple, est proposé. Cette première approche se base sur une hypothèse simplificatrice forte : l'idée est de supposer que le canal RHCP, dédié à la réception du signal direct, ne contient que le signal direct et n'est pas pollué par une fuite du signal réfléchi. De même le canal LHCP est supposé ne contenir que le signal réfléchi. Ces hypothèses sont bien sûr discutables mais il est intéressant de l'étudier afin de déterminer le prix d'un traitement mal spécifié (dans ce cas un traitement une source est appliqué à un signal contenant en réalité deux source). Ainsi la méthode présentée ici consiste en l'estimation séparée des retards sur la voie LHCP : $\hat{\tau}^{\text{LHCP}}$ et sur la voie RHCP : $\hat{\tau}^{\text{RHCP}}$. La différence de ces deux retards : $\widehat{\Delta\tau} = \hat{\tau}^{\text{LHCP}} - \hat{\tau}^{\text{RHCP}}$ permet ainsi d'obtenir une estimation de la hauteur du récepteur grâce à l'équation 1.

3.1 Estimateur du maximum de vraisemblance à une source

Dans le cas d'un traitement à une source, il est naturel de faire appel à un estimateur simple tel que l'estimateur du maximum

de vraisemblance à une source (EMV-1S). Cette estimateur a la forme bien connue rappelée dans la formule 8 [5] :

$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau} |R_{s,x}(\tau)|^2 \quad (8)$$

où $R(\tau)$ est la fonction d'inter-corrélation entre le signal reçu x et une réplique locale du signal attendu s .

3.2 Biais sur l'estimation du retard et de la hauteur

La *Multipath Error Envelope* (MPEE) est un outil plébiscité par la communauté GNSS pour évaluer la performance sans bruit d'un estimateur [5]. En d'autres termes, la MPEE fournit une enveloppe des biais induits sur un estimateur par la présence d'un trajet secondaire. Cette enveloppe se présente en fonction du retard qui sépare les deux trajets et ses bornes sont obtenues lorsque les signaux sont soit en phase, soit en opposition de phase. La figure 3 est un exemple d'une telle enveloppe pour le scénario décrit dans la section 2. Sur cette figure,

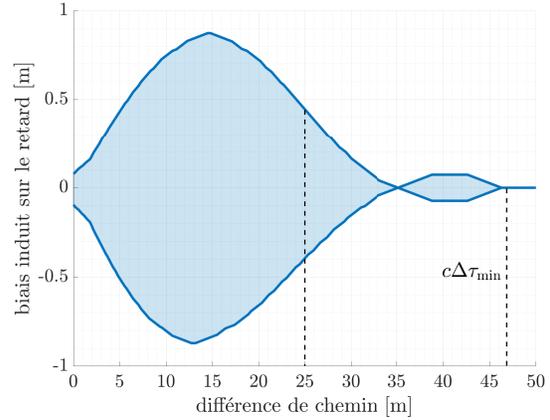


Figure 3 – MPEE pour l'EMV à une source sur un signal GPS L5Q numérisé à 20 MHz.

il est possible de lire que pour des différences de chemin au delà de $c\Delta\tau_{\min} \approx 47 \text{ m}$, l'estimation du trajet principal n'est plus affectée par le trajet secondaire. Les signaux sont alors dits découplés et il devient envisageable de traiter les canaux LHCP et RHCP séparément pour estimer, sans biais, la différence de chemin et donc la hauteur du récepteur. Pour le scénario considéré, d'après la figure 2, ce chemin minimum est atteint lorsque l'élévation du satellite est supérieure à 70° . Par ailleurs, si l'élévation du satellite est de 30° , la différence de chemin est de 25 m et, d'après la figure 3, le biais induit sur le retard estimé pour un canal (RHCP ou LHCP, par symétrie) oscille entre -40 et +40 cm. Ainsi la différence de chemin $c\widehat{\Delta\tau}$, permettant le calcul de la hauteur présentera un biais qui oscillera entre -80 cm et +80 cm, selon la différence de phase entre les signaux, qui évolue avec l'élévation du satellite comme vue dans l'équation 5. Appliquant la formule 1, ce biais sur la différence de chemin provoque un biais sur la hauteur estimée entre -80 cm et +80 cm.

4 Traitement à Deux Sources

Pour ce traitement, la présence d'un signal secondaire dans les canaux RHCP et LHCP est prise en compte et un traitement à deux sources est appliqué. Ainsi lors de l'estimation du trajet principal, une estimation des caractéristiques du trajet secondaire est également effectuée. Étant donnée la faible énergie que ces trajets secondaires ont, les estimées ne seront vraisemblablement pas exploitables pour calculer la différence de chemin à l'aide d'un seul canal mais ce traitement, mieux spécifier devrait permettre d'obtenir des mesures non biaisées des trajets principaux pour chaque canal.

4.1 EMV-2S et Estimateur CLEAN-RELAX

Dans cette approche aussi, l'estimateur du maximum de vraisemblance, adapté au cas deux sources (EMV-2S) est un candidat envisageable. Son expression, pour l'estimation des deux retards τ_0 et τ_1 est rappelée dans la formule 9 ci-dessous [6] :

$$(\hat{\tau}_0, \hat{\tau}_1) = \arg \max_{\tau_0, \tau_1} \left\| \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{x} \right\|^2. \quad (9)$$

L'EMV-2S est cependant rarement utilisé car, bien qu'il présente des propriétés intéressantes, sa charge calculatoire peut rapidement le rendre inadéquat à un grand nombre d'applications. Pour cette raison, une version sous-optimale de l'EMV-2S est considérée par la suite, il s'agit de l'estimateur CLEAN-RELAX (ECR) [7].

Cet estimateur maximise de manière itérative le critère de vraisemblance présenté dans l'équation 9 : pour chaque itération, l'algorithme cherche à estimer une seule source avec un critère à une source (se basant ainsi sur la méthode EMV-1S), cette source estimée est alors soustraite au signal reçu et l'algorithme cherche à estimer une seconde source dans le signal résiduel. En itérant jusqu'à un critère de convergence sur la valeur de la vraisemblance finale, l'ECR réalise ainsi une estimation des deux sources.

4.2 Biais sur l'estimation des retards et de la hauteur

Dans cette partie, la MPEE est à nouveau utilisée afin d'observer le comportement de l'ECR en l'absence de bruit. La figure 4 présente cette MPEE dans des conditions similaires à celles utilisées précédemment. Pour comparaison, la MPEE de l'EMV-1S est rappelée sur la même figure. Sur cette figure, il est clair que même si l'ECR fournit des estimées biaisées pour de faibles différences de chemin, il est capable de correctement estimer le trajet principal pour des différences de chemin supérieures à $c\Delta\tau^{\min} = 27$ m, ce qui, d'après la figure 2, est atteint pour des élévations de satellite supérieures à 32° . Par ailleurs, dans le cas d'un satellite à une élévation de 30° , le biais induit sur le retard estimé pour un canal (RHCP ou LHCP) oscille entre -4 et +4 cm, ce qui conduira, par symétrie et par la formule 1, à un biais sur la hauteur estimée entre -8 et +8 cm.

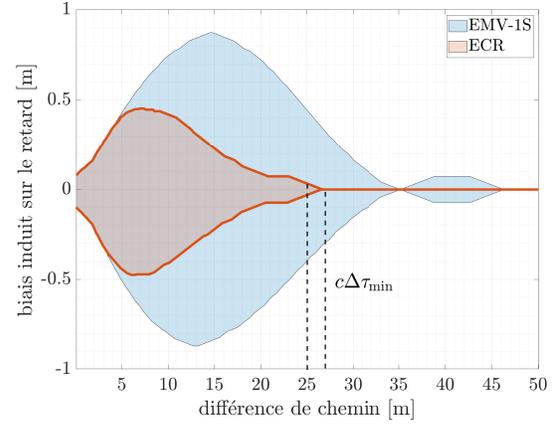


Figure 4 – MPEE- $\Delta\tau$ pour l'estimateur CLEAN-RELAX sur un signal GPS L5Q numérisé à 20 MHz.

5 Conclusion

Cette étude propose la comparaison de deux traitements pour le GNSS-R à site bas avec des signaux à large bande. La proximité du sol conduisant à de fortes interférences au sein de l'antenne, il est montré qu'un traitement mal spécifié, à une source pour les canaux LHCP et RHCP peut conduire à d'importants biais sur l'estimation de la hauteur. En tenant compte de la présence d'un signal interférant sur chaque canal, il est possible d'appliquer un traitement à deux sources et ainsi, de rendre possible le calcul de la hauteur pour une plage plus importante d'élévations de satellites. Dans le cas où l'élévation satellite serait tout même trop faible, et donc la différence de chemin trop faible pour le traitement à deux sources, le biais perçu serait tout de même le plus souvent nettement réduit.

References

- [1] M. Martín-Neira, "A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry," *ESA Journal*, vol. 17, 1993.
- [2] M. A. Ribot *et al.*, "Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry," *Sensors*, vol. 14, no. 6, 2014.
- [3] C. Lubeigt *et al.*, "Joint Delay-Doppler Estimation Performance in a Dual Source Context," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 23, 2020.
- [4] Y. Georgiadou and A. Kleusberg, "On Carrier Signal Multipath Effects in Relative GPS Positioning," *Manuscripta Geodaetica*, vol. 13, no. 3, 1988.
- [5] E. Kaplan and C. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: Principle and Applications*, 3rd ed. Artech House, 2017.
- [6] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. Prentice-Hall, 1993.
- [7] J. Li and P. Stoica, "Efficient Mixed-Spectrum Estimation with Applications to Target Feature Extraction," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 44, no. 2, 1996.