

GRETSI 2022

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

Corentin Lubeigt^{1,2}, Jordi Vilà-Valls²,
Laurent Lestarquit³ et Éric Chaumette²

¹TéSA Laboratory, Toulouse, France

²ISAE-SUPAERO, Toulouse, France

³CNES, Toulouse, France

9 Septembre 2022



Plan de la Présentation

Contexte et Motivation

GNSS et Réflectométrie par GNSS
GNSS-R à Site Bas

Outils and Algorithmes

MPEE
Traitement à Une et Deux Sources

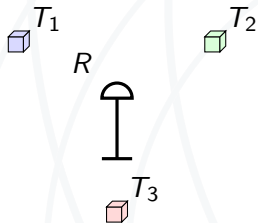
Étude de Cas

Géométrie
Résultats

Conclusion

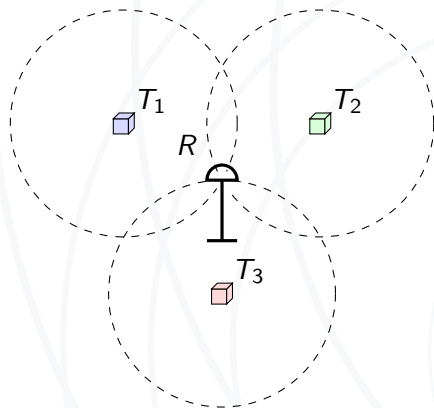


Global Navigation Satellite System (GNSS)



► constellations (GPS, GALILEO, etc),

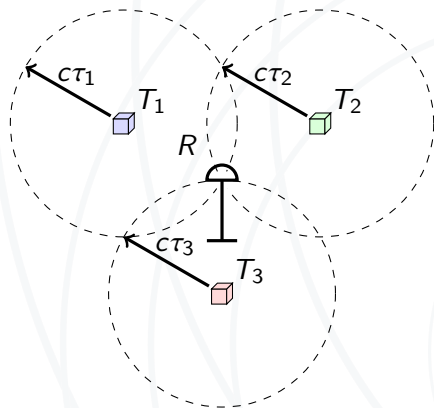
Global Navigation Satellite System (GNSS)



- ▶ constellations (GPS, GALILEO, etc),
- ▶ signaux connus (PRN),



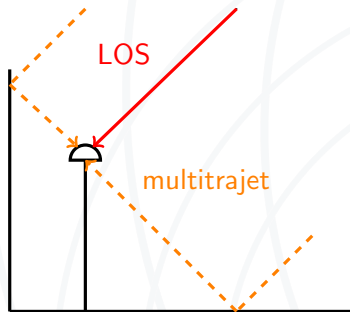
Global Navigation Satellite System (GNSS)



- ▶ constellations (GPS, GALILEO, etc),
- ▶ signaux connus (PRN),
- ▶ propagation du signal,
- ▶ calcul de position par triangulation.



Le Problème du Multitrajet

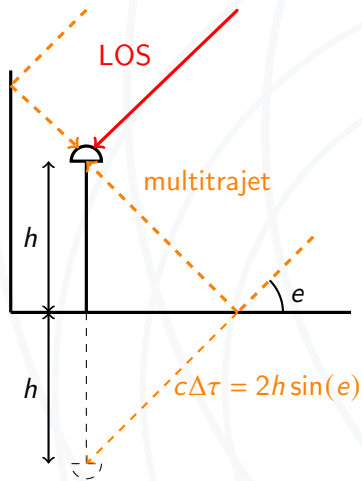


Définition*: *Le multitrajet consiste en la réception d'une ou plusieurs répliques réfléchies ou diffractées du signal désiré en plus du signal du trajet direct.*

- ▶ Biais sur l'estimation de la position,
- ▶ Application mobile : phénomène aléatoire et dynamique,

*[1] Kaplan and Hegarty, "Understanding GPS/GNSS: Principle and Applications," 2017.

Le Problème du Multitrajet?



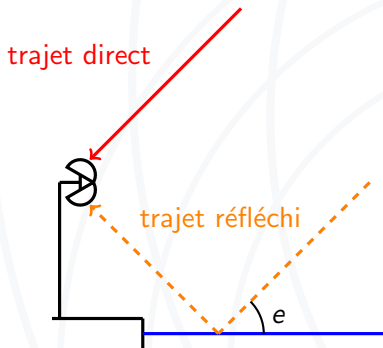
Définition*: *Le multitrajet consiste en la réception d'une ou plusieurs répliques réfléchies ou diffractées du signal désiré en plus du signal du trajet direct.*

- ▶ Biais sur l'estimation de la position,
- ▶ Application mobile : phénomène aléatoire et dynamique,
- ▶ la réflexion contient de l'information !

*[1] Kaplan and Hegarty, "Understanding GPS/GNSS: Principle and Applications," 2017.

- ▶ Signaux GNSS : émis partout et tout le temps : signaux d'opportunité,
- ▶ Propriétés des surfaces réfléchissantes : télédétection (altimétrie, étude de la biomasse, vitesse de vent, taux d'humidité des sols, etc.),
- ▶ GNSS-R : Étude de la réflexion des signaux GNSS sur la surface de la Terre.





- ▶ Application : épaisseur de neige, humidité des sols et contrôle des marées et crues,
- ▶ Retard relatif très faible : interférence entre les trajets,
- ▶ 1 antenne : étude basée sur l'interférence au niveau de la puissance de signal reçue*.
- ▶ 2 antennes : technique délaissée à cause de l'interférence et du parasitage entre les antennes.

*[2] Ribot et al, "Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry," 2014.

GNSS-R à Site Bas = Proche du Sol

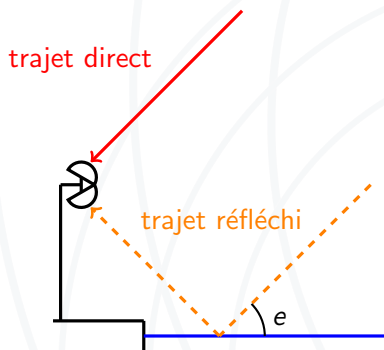


Figure: Étang d'Ayrolle, près de Gruissan le 27 Juillet 2021.

1 Antenne : Technique Interférométrique

- ▶ Site bas : deux signaux très proches.
- ▶ Quand l'élévation du satellite e évolue, la différence de phase $\Delta\phi$ évolue également, telle que :

$$\Delta\phi(t) = 2\pi \frac{2f_c h}{c} \sin(e(t)) \quad (1)$$

où f_c est la fréquence porteuse et h la hauteur de récepteur.

- ▶ Cette différence de phase apparait dans l'approximation de la puissance totale de signal reçue à la sortie du filtre adapté :

$$RSB(t) \propto \sqrt{\rho_0^2 + \rho_1^2 + 2\rho_0\rho_1 \cos(\Delta\phi(t))} \quad (2)$$

avec ρ_i les amplitudes du signal direct ($i = 0$) et réfléchi ($i = 1$).

GNSS-IR : Un Exemple

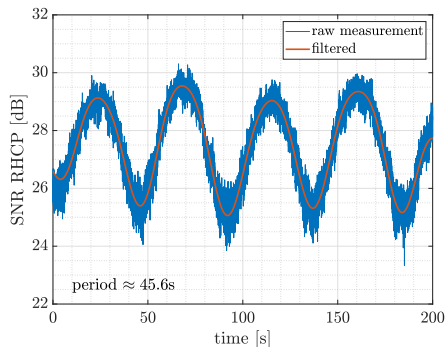


Figure: Données issues de la campagne CNES à l'étang d'Ayrolle.

- ▶ Signal GPS L1 C/A,
- ▶ évolution de l'élévation (degrés) :

$$e(t) \approx 24.94 + 0.0058 \cdot t$$

- ▶ hauteur estimée*:

$$h \approx 22.8\text{m}$$

*[2] Ribot et al, "Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry," 2014.

Vers Une Configuration à 2 Antennes

- ▶ Pourquoi 2 antennes ? Meilleur RSB pour le trajet réfléchi et estimation ponctuelle toutes les quelques millisecondes.
- ▶ Interférence difficile à gérer pour les premiers signaux GNSS (GPS L1 C/A, résolution spatiale de 300m) mais pour les signaux plus récents, qui s'étalent sur une bande plus large (GPS L5, GALILEO E5, résolution spatiale de 30m), il devient possible de séparer deux sources très proches !
- ▶ Appliquer des techniques de gestion de multitrajet sur ces signaux GNSS plus récents permettrait donc d'améliorer les performances obtenues par simple interférométrie.

Multipath Error Envelope (MPEE)

MPEE : valeur minimum et maximum du biais induit par un multitrajet sur l'estimation de $\hat{\tau}_0$. Pour un estimateur donné, la MPEE est définie par :

$$\left\{ \max_{\Delta\phi} (\text{biais}(\text{RMD}, \Delta\tau, \Delta\phi)), \min_{\Delta\phi} (\text{biais}(\text{RMD}, \Delta\tau, \Delta\phi)) \right\} \quad (3)$$

avec

$\text{RMD} = \rho_1/\rho_0$, le rapport d'amplitude multipath sur direct,
 $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_0$, le retard relatif du multitrajet par rapport au trajet direct,
 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_0$, la différence de phase.



- ▶ Sur des signaux GPS L5.
- ▶ Méthodologie : estimation du retard du signal le plus puissant τ_i sur chacune des antennes. La différence entre ces retard est proportionnelle au produit d'altimétrie.
- ▶ Deux algorithmes considérés :
 - ▶ Traitement à une source : traitement GNSS standard, équivalent à l'estimateur du maximum de vraisemblance à une source, ignore la présence de multitrajet.
 - ▶ Traitement à deux sources : CLEAN-RELAX*, une version itérative de l'estimateur du maximum de vraisemblance à deux sources.

*[3] Van Nee, "The Multipath Estimating Delay Lock Loop," 1992.



Figure: Étang d'Ayrolle, près de Gruissan le 27 Juillet 2021.

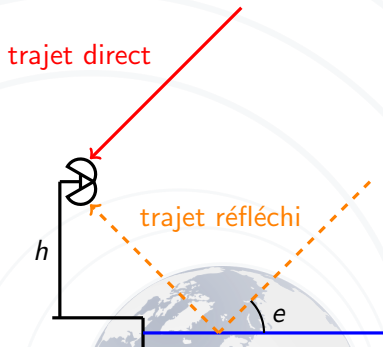


Figure: Schéma de l'expérience, $h = 25\text{m}$, $e = 30^\circ$.

Différence de trajet prédite :
 $c\Delta\tau = 2h \sin(e) = 25\text{m}$

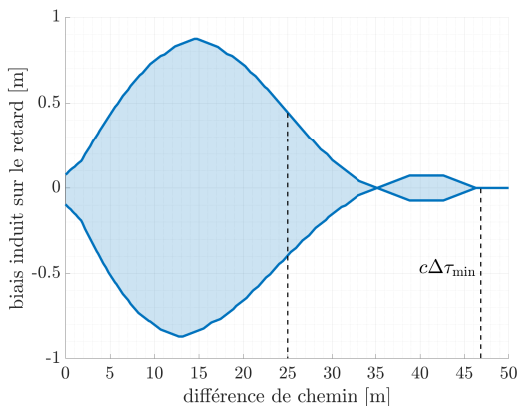


Figure: MPEE pour l'estimateur du maximum de vraisemblance à une source.

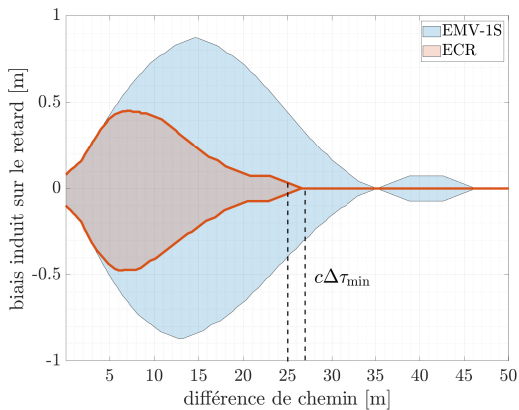


Figure: MPEE pour l'estimateur CLEAN-RELAX.

- ▶ L'altimétrie par GNSS-R à site bas est donc faisable à l'aide de 2 antennes malgré la présence de parasitage entre les antennes.
- ▶ Un traitement à une source peut s'envisager au prix d'un biais difficile à éliminer.
- ▶ Un traitement à deux source permet de réduire voire d'éliminer complètement ce biais.
- ▶ Cette étude s'intéresse exclusivement à l'effet du parasitage sur le biais et vient en complément d'une étude de l'effet du parasitage sur variance*.

*[4] Lubeigt et al, "On the Impact and Mitigation of Signal Crosstalk in Ground-Based and Low Altitude Airborne GNSS-R," 2021.

Merci pour votre attention !



References I

- [1] E. Kaplan and C. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: Principle and Applications*, 3rd ed. Artech House, 2017.
- [2] M. A. Ribot, J.-C. Kucwaj, C. Botteron, S. Reboul, G. Stienne, J. Leclère, J.-B. Choquel, P.-A. Farine, and M. Benjelloun, “Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry,” *Sensors*, vol. 14, no. 6, pp. 10 234–10 257, 2014. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/6/10234>
- [3] R. D. Van Nee, “The Multipath Estimating Delay Lock Loop,” in *IEEE Second International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, 1992, pp. 39–42.
- [4] C. Lubeigt, L. Ortega, J. Vilà-Valls, L. Lestarquit, and E. Chaumette, “On the Impact and Mitigation of Signal Crosstalk in Ground-Based and Low Altitude Airborne GNSS-R,” *Remote Sensing*, vol. 13, no. 6, p. 1085, 2021.

back-up: Dual Source Maximum Likelihood

$\mathbf{x} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}, \sigma_n^2 \mathbf{I}_N)$, therefore, the likelihood function is:

$$p(\mathbf{x}, \boldsymbol{\epsilon}) = \frac{1}{(\pi\sigma_n^2)^N} e^{-\frac{1}{\sigma_n^2} \|\mathbf{x} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}\|^2}. \quad (4)$$

Maximizing (4) is equivalent to minimizing $\|\mathbf{x} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}\|^2$. And with the projector $\mathbf{P}_\mathbf{A} = \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H$,

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}\|^2 &= \|\mathbf{P}_\mathbf{A} (\mathbf{x} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha})\|^2 + \|\mathbf{P}_\mathbf{A}^\perp (\mathbf{x} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha})\|^2 \\ &= \underbrace{\left\| \mathbf{A} \left((\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha} \right) \right\|^2}_{\text{null for } \boldsymbol{\alpha} \text{ well chosen}} + \|\mathbf{P}_\mathbf{A}^\perp \mathbf{x}\|^2. \end{aligned}$$

back-up: Dual Source Maximum Likelihood Estimator (cont'd)

So the 2S-MLE $\widehat{\epsilon}$ is reduced to the search of the parameters (η_0, η_1) that maximize the projection of the data upon the data subspace:

$$\begin{aligned}\widehat{\epsilon} &= \arg \max_{\epsilon} p(\mathbf{x}, \epsilon) \\ \Leftrightarrow \widehat{\epsilon} &= \arg \min_{\epsilon} \|\mathbf{x} - \mathbf{A}\alpha\|^2 \\ \Leftrightarrow \begin{cases} (\widehat{\eta}_0, \widehat{\eta}_1) &= \arg \max_{\eta_0, \eta_1} \|\mathbf{P}_{\mathbf{A}}\mathbf{x}\|^2, \\ \widehat{\alpha} &= (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{x}, \\ \widehat{\sigma}_n^2 &= \frac{1}{N} \|\mathbf{P}_{\mathbf{A}}^\perp \mathbf{x}\|^2. \end{cases}\end{aligned}$$

back-up: CLEAN-RELAX Estimator

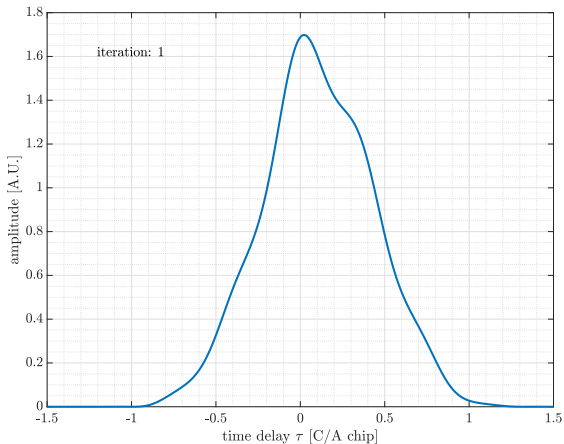


Figure: First estimation.

back-up: CLEAN-RELAX Estimator

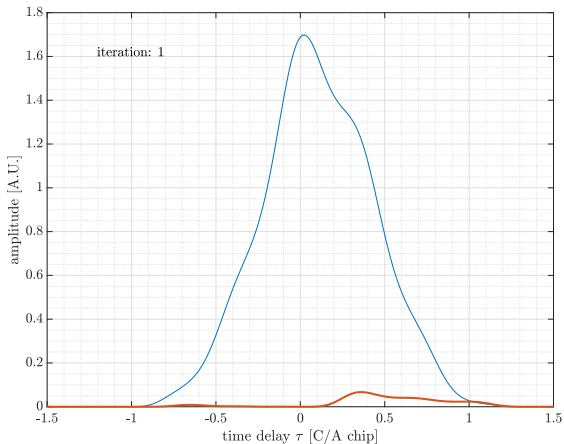


Figure: Second estimation upon the residue.

back-up: CLEAN-RELAX Estimator

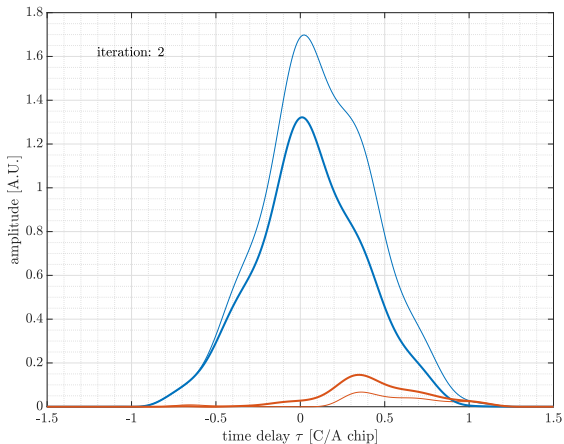


Figure: Iterate...

back-up: CLEAN-RELAX Estimator

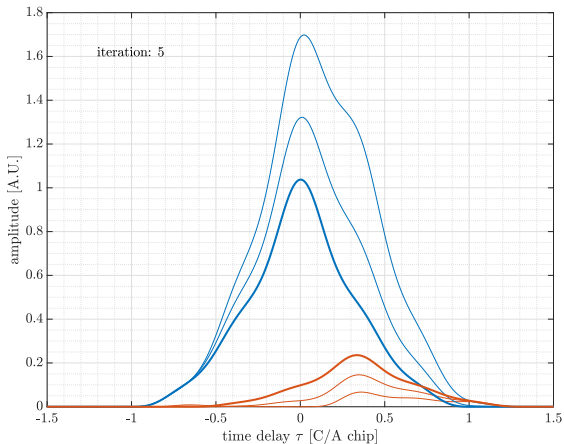


Figure: ... until convergence.

back-up: CLEAN-RELAX Estimator

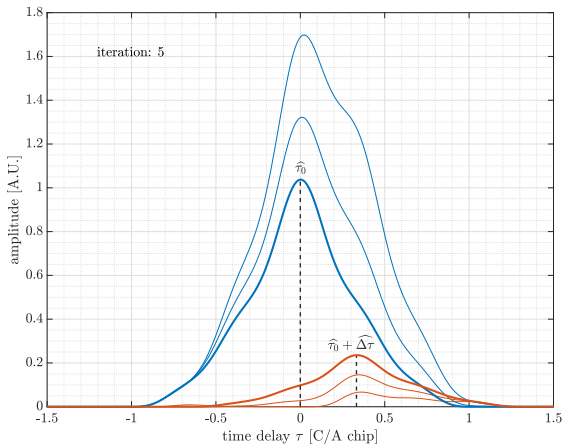


Figure: Read the estimates.