



Université Lille Nord de France
Pôle de Recherche
et d'Enseignement Supérieur

Ecole doctorale régionale Sciences Pour l'Ingénieur Lille Nord-de-France - 072



Titre : Traitement des signaux circulaires appliqué à la réflectométrie GNSS aéroportée par drone

Financement prévu : Conseil Régional Hauts de France 50%

Cofinancement éventuel : ULCO 50%

(Co)-Directeur de thèse : Serge Reboul

E-mail : serge.reboul@univ-littoral.fr

Encadrants : Georges Stienne

E-mail : georges.stienne@univ-littoral.fr

Laboratoire : LISIC (Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale, EA 4491)

Equipe : Specifi

Descriptif :

En France, ce sont les inondations qui font le plus de dommages et de ravages parmi les biens et la population. La surveillance des zones inondables passe par le suivi et l'évaluation temps réel des niveaux d'eau, courants de rivières et taux d'humidité des sols. Un instrument aéroporté utilisant la réflectométrie GNSS permet de réaliser simultanément l'ensemble de ces mesures et permet d'accéder rapidement aux zones à surveiller en temps de crise. Le coût de développement d'un tel instrument est réduit en comparaison avec les systèmes opérationnels actuels, qui s'appuient sur de l'imagerie satellitaire.

La réflectométrie GNSS consiste en l'utilisation, comme signaux d'opportunité [4], des signaux de radionavigation (GPS, Galileo...) perçus en provenance directe de l'ensemble des satellites GNSS en vue d'une part et après réflexion par l'environnement du récepteur d'autre part. C'est en comparant le signal direct avec le signal réfléchi que l'on mesure des paramètres tels que l'altimétrie et le taux d'humidité des surfaces de réflexion de la zone à surveiller. On dispose alors d'un ensemble de points de mesures datés et géo-localisés précisément par satellites, ce qui permet une comparaison spatio-temporelle entre les mesures.

Un des axes d'application de la recherche développée par l'équipe SPECIFI du LISIC dans le cadre de la Structure Fédérative de Recherche Campus de la Mer est l'observation de la Terre par réflectométrie GNSS. Les applications visées concernent l'altimétrie sur l'eau et la détermination des courants de surface d'une part, et l'étude du taux d'humidité des sols d'autre part. Une thèse s'est terminée au LISIC en décembre 2016 avec l'obtention de résultats d'ordre centimétrique pour l'application altimétrique, pour un système de réception statique, proche du sol. Pour cela, plusieurs techniques originales de traitement des signaux GNSS ont été développées et publiées [5-10]. L'objectif est désormais de faire évoluer ces techniques pour le cas d'un système de réception aéroporté à une centaine de mètres, en mouvement. En effet, l'équipe SPECIFI dispose dans le cadre du CPER Marco d'un drone prévu pour cette application. L'équipe SPECIFI a également travaillé sur des données de réflectométrie GNSS aéroportées à plus hautes altitude (~3km) qui lui ont été fournies dans le cadre d'une collaboration informelle avec l'Agence Spatiale Européenne (ESA).



L'objectif de la thèse est de développer des techniques de traitement des signaux GNSS pour la réflectométrie aéroportée par drone et de les expérimenter en conditions réelles. Le LISIC disposera pour ce projet d'un drone octocoptère financé par le CPER Marco. Les données capteurs seront acquises par un système d'observation financé par un Bonus Qualité Recherche de l'ULCO puis traitées en différé. L'objectif final est d'évaluer la précision de mesures d'altimétrie et de courants de surface par réflectométrie GNSS depuis un drone en condition réelle et de démontrer l'intérêt d'une telle approche.

D'un point de vue théorique, la thèse portera sur l'application de la fusion d'informations au traitement des signaux multidimensionnels dans les systèmes de navigation par satellites. Dans l'approche utilisée, l'observable consistera en la différence de phase entre le signal GNSS arrivant directement au système de réception et le signal GNSS arrivant après réflexion sur la surface étudiée [7, 9, 10]. Cette observable est un angle et évolue périodiquement en fonction des paramètres de hauteur d'eau et d'état de mer à estimer. Les méthodes de traitement de signal à développer et appliquer se baseront donc sur la statistique de von Mises [1-3] et seront des techniques de régression angulaire-angulaire. De telles techniques se basent sur l'analyse du signal de mesure de phase en série de Fourier. Il sera en particulier nécessaire d'estimer l'ordre du développement en série de Fourier à utiliser et d'estimer les paramètres de la série pour déterminer conjointement les paramètres recherchés de hauteur d'eau et d'état de mer (amplitude et vitesse de vagues). De plus, la réflectométrie GNSS permet d'observer plusieurs empreintes satellitaires différentes depuis un même système de réception. Le recoupement des informations obtenues sur les différentes empreintes permettra de résoudre l'ambiguïté de phase GNSS-R. Il sera également possible de fusionner les mesures ainsi obtenues, statistiquement indépendantes, pour augmenter la précision et la robustesse des estimations. Les techniques de fusion d'information à utiliser pour l'application, dans le cadre de la régression angulaire-angulaire, seront développées durant la thèse.

Un autre aspect théorique de cette thèse concerne la trajectographie du drone. La détermination de la trajectoire optimale à suivre pour les mesures sera contrainte par l'instant de mesure, les limites de déplacements du drone (en particulier sa vitesse et son accélération) et la constellation satellitaire visible aux instants considérés. Les éphémérides satellitaires GNSS précises, dont l'accès est ouvert, indiqueront par association avec un Système d'Informations Géographiques le nombre et la position des empreintes disponibles sur la zone d'intérêt. L'objectif de cette étude sera de déterminer préalablement aux mesures la trajectoire à suivre pour minimiser les contraintes et maximiser la qualité d'observation.

Concernant l'aspect expérimental de la thèse, l'équipe SPECIFI dispose, en plus du drone, du matériel scientifique nécessaire à la réception et à la numérisation des signaux de réflectométrie GNSS mais aussi à la détermination de la position du drone (antennes spécifiques, récepteurs scientifiques, carte d'acquisition multivoies, centrale inertielle...). L'utilisation d'un tel matériel nécessite une expertise qui a été développée au sein de l'équipe.

Références :

[1] G. Stienne, S. Reboul, M. Azmani, J.B. Choquel, and M. Benjelloun. GNSS dataless signal tracking with a delay semi-open loop and a phase open loop. *Signal Processing*, 93(5) : p. 1192–1209, 2013.



- [2] G. Stienne, S. Reboul, J.B. Choquel, and M. Benjelloun. Cycle slip detection and repair with a circular on-line change-point detector. *Signal Processing*, 100 : p. 51–63, 2014.
- [3] G. Stienne, S. Reboul, M. Azmani, J.B. Choquel, and M. Benjelloun. A multi-temporal multi-sensor circular fusion filter. *Information Fusion*, 18 : p. 86–100, 2014.
- [4] G. Stienne, Y.C. Lin, J. Garrison, J. Pipmeier, J. Knuble, and K. Hersey, Retrieval of P-band soil reflectivity from signals of opportunity observations using an Extended Kalman Filter. *GNSS+R 2015 Workshop, Potsdam (Germany)*, May 2015.
- [5] 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*, 14 : p. 10234–10257, 2014.
- [6] J. C. Kucwaj, G. Stienne, S. Reboul, J. B. Choquel, and M. Benjelloun. Accurate Pseudorange Estimation by Means of Code and Phase Delay Integration : Application to GNSS-R Altimetry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(10) : p. 4854–4864, Oct 2016.
- [7] J. C. Kucwaj, S. Reboul, G. Stienne, J. B. Choquel, and M. Benjelloun. Circular Regression Applied to GNSS-R Phase Altimetry. *Remote Sensing*, 9(7) : p. 1-19, June 2017.
- [8] J. C. Kucwaj, M. A. Ribot, G. Stienne, C. Botteron, S. Reboul, J. B. Choquel, P. A. Farine, and M. Benjelloun. Calibration of the GNSS signal amplitudes in the Interference Pattern Technique for altimetry. *International Radar Conference, Lille (France)*, p. 1–6, Oct 2014.
- [9] J. C. Kucwaj, G. Stienne, S. Reboul, J. B. Choquel, and M. Benjelloun. High rate interference pattern technique applied to real time altimetry. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing (China)*, p. 5631–5634, July 2016.
- [10] J. C. Kucwaj, G. Stienne, S. Reboul, J. B. Choquel, and M. Benjelloun. A model-based angle unwrapper: Application to the GNSS-R Interference Pattern Technique. *19th International Conference on Information Fusion (FUSION), Heidelberg (Germany)*, p. 2095–2100, July 2016.

Mots clés : Traitement du signal circulaire, Réflectométrie GNSS, Télédétection, Altimétrie, Drone, Trajectographie, Surveillance des zones inondables