



**HAL**  
open science

## Récepteur prototype pour l'acquisition à distance de signaux HF

Ankit Jain, Emilio Joussue Mejias Pena, Melvin Prost, Pascal Pagani,  
Rolland Fleury, Michel Ney, Patrice Pajusco

► **To cite this version:**

Ankit Jain, Emilio Joussue Mejias Pena, Melvin Prost, Pascal Pagani, Rolland Fleury, et al.. Récepteur prototype pour l'acquisition à distance de signaux HF. JNM2017: 20èmes Journées Nationales Microondes, May 2017, Saint-Malo, France. hal-01807317

**HAL Id: hal-01807317**

**<https://hal.science/hal-01807317v1>**

Submitted on 17 Jul 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Récepteur prototype pour l'acquisition à distance de signaux HF

Ankit Jain<sup>1,2</sup>, Emilio Mejias<sup>1</sup>, Melvin Prost<sup>1</sup>, Pascal Pagani<sup>1,2</sup>, Rolland Fleury<sup>1,2</sup>, Michel Ney<sup>1,2</sup>, Patrice Pajusco<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Telecom Bretagne, Brest, France. <sup>2</sup>LAB-STICC UMR CNRS 6285, Brest, France.  
ankit.jain@telecom-bretagne.eu

**Résumé** – Cet article présente un prototype de récepteur capable d'enregistrer, à distance, des signaux haute fréquence (HF). Le composant de base de ce récepteur est un équipement de radio logicielle, ou Software Defined Radio (SDR), qui peut être configuré pour enregistrer des données selon la nécessité de l'utilisateur. Les échantillons radio enregistrés à partir d'un réseau d'au moins quatre récepteurs non co-localisés permettent la localisation de l'émetteur en utilisant la méthode "Time Difference of Arrival" (TDoA). Tous les récepteurs sont synchronisés avec une même référence temporelle pour obtenir la meilleure précision de géolocalisation. Les signaux radio enregistrés peuvent également être utilisés pour l'analyse et la modélisation du canal de propagation HF, ainsi que la caractérisation du milieu ionosphérique.

## 1. Introduction

Les signaux radio de la bande HF facilitent la communication longue distance car les ondes radioélectriques transmises dans cette bande sont réfléchies par l'ionosphère. Ainsi, les transmissions radio HF peuvent couvrir de vastes zones géographiques. Pour cette raison, les signaux HF sont appropriés pour les communications radio pendant les opérations militaires et civiles. Dans de tels contextes, il est intéressant de pouvoir localiser la position de l'émetteur en enregistrant puis en analysant les signaux radio. La géolocalisation de l'émetteur HF est possible en utilisant des méthodes du domaine temporel telles que les techniques "Time of Arrival" (ToA) et TDoA [1]. Dans ce cas, il est possible de localiser un émetteur HF sans connaître l'altitude de réflexion sur l'ionosphère [2]. La méthode ToA nécessite un minimum de trois récepteurs pour la géolocalisation ainsi que la connaissance de l'instant de transmission du signal [3]. Lorsque le temps de transmission du signal est inconnu, la géolocalisation de l'émetteur HF est possible en utilisant la méthode TDoA, qui nécessite quatre récepteurs non co-localisés et synchronisés l'un par rapport à l'autre [4]. La précision de la localisation d'émetteurs HF sera meilleure en augmentant le nombre de récepteurs [5].

La transmission radio HF longue distance utilise des ondes de ciel et le signal se déplace dans le guide d'ondes ionosphère-terre. Dans le cas de signaux qui ne sont réfléchis qu'une seule fois sur les couches ionosphériques, on parle de mode à un bond et lorsqu'ils

sont réfléchis plusieurs fois, il s'agit de modes à bonds multiples. Les ondes radio se déplaçant en mode à un bond peuvent atteindre des distances allant de 500 km à 3500 km.

L'ionosphère est un milieu hautement dynamique, qui varie de façon diurne, saisonnière, géographique et en fonction de l'activité solaire [1][6]. Différentes couches de l'ionosphère évoluent à différents moments de la journée de manière non corrélée. Les signaux radio enregistrés peuvent être analysés pour obtenir des informations sur l'état et la variation de cette couche atmosphérique, ce qui permet sa caractérisation. Les données enregistrées peuvent également être utilisées pour la modélisation et l'analyse du canal de propagation HF [7].

Cet article décrit un prototype de récepteur capable d'enregistrer des signaux HF en un point distant et de rapatrier l'information via le réseau pour un traitement centralisé. Le but principal du récepteur intégré est de capturer des données à différents endroits de manière simultanée, et de calculer la différence de temps d'arrivée entre le récepteur de référence et les trois autres récepteurs. Les retards peuvent être obtenus en calculant la corrélation croisée entre les échantillons de données au récepteur de référence et les autres récepteurs [8]. Les propriétés d'autocorrélation du signal transmis sont de première importance, car elles impactent directement la capacité de mesurer des différences de temps de propagation.

Dans la suite de l'article, la section 2 explique en détail l'architecture du récepteur. Dans la section 3, un échantillon de données capturées à Brest à partir d'un émetteur distant est présenté. Les propriétés de corrélation des données capturées sont également discutées. Enfin, les conclusions sont tirées dans la section 4.

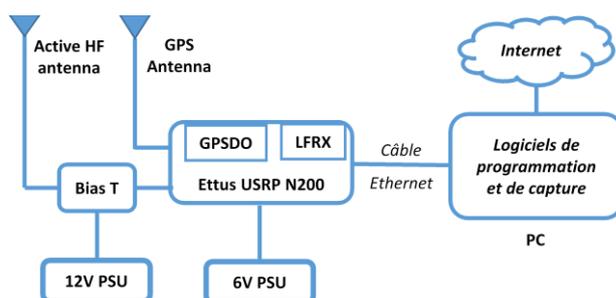


Figure 1. Diagramme fonctionnel du récepteur

## 2. Description du Récepteur

L'équipement de réception se compose de matériels, de scripts et de logiciels.

### 2.a. Architecture du Récepteur

Le diagramme fonctionnel du système récepteur est illustré sur la Figure 1. L'équipement SDR Ettus USRP N200 est connecté au PC à l'aide d'un câble Ethernet. Il se compose d'un convertisseur analogique-numérique (ADC) à échantillonnage direct capable d'échantillonner jusqu'à 100 MHz, couplé à un FPGA qui assure le sous-échantillonnage et la conversion de fréquence. Le facteur de décimation maximum qui peut être utilisé pour la réduction de la bande de fréquence étudiée est de 512, ce qui correspond à une bande d'observation minimale de 195,3125 kHz. La carte fille Ettus LFRX peut accepter des signaux de DC à 30 MHz. Le boîtier Ettus USRP N200 est capable de filtrer, et de transposer le signal en bande de base. L'antenne HF active est alimentée par un bloc d'alimentation de 12 V par un coupleur directionnel. Le kit GPSDO permet l'horodatage des échantillons avec l'heure GPS GMT et la synchronisation de l'horloge du FPGA et de l'ADC. La précision du signal est de  $\pm 50$  ns [9]. Le kit GPSDO permet à plusieurs USRP de synchroniser leurs captures avec la même référence temporelle quelle que soit la localisation des récepteurs.

La configuration matérielle est contrôlée par un ordinateur connecté par Ethernet. L'ordinateur se compose de plusieurs programmes qui sont utilisés pour planifier et capturer des données selon les besoins de l'utilisateur. Le schéma fonctionnel de la Figure 2 représente l'organisation de ces programmes. Les fichiers "Config" et "Start Stop" permettent à l'utilisateur de configurer l'heure de début et de fin pour la saisie des données, la durée de la capture, la fréquence centrale et le taux d'échantillonnage. L'ordonnancement des tâches est réalisé par un interpréteur Java. Il gère le lancement de scripts Python, qui assurent l'interface entre le matériel et le logiciel, selon le standard GNURadio [10]. La capture génère deux fichiers : les fichiers DAT contiennent les échantillons complexes mesurés tandis que les fichiers HDR contiennent les métadonnées (base de temps, fréquence centrale, etc.). Le script de synchronisation fournit l'heure GPS à l'interpréteur de

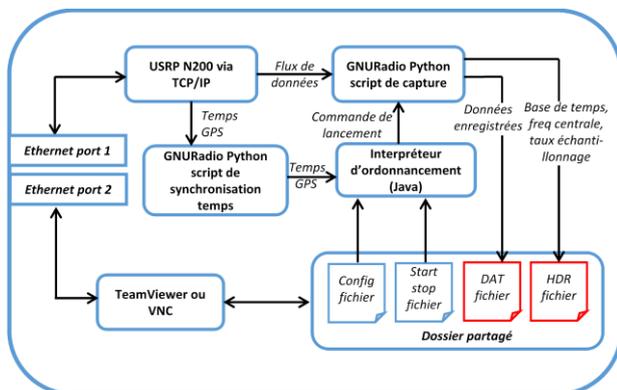


Figure 2. Diagramme des logiciels pour l'enregistrement des données

planification, ce qui permet de synchroniser régulièrement l'ordinateur avec l'horloge GPS pour s'assurer de la bonne exécution des travaux selon le calendrier programmé.

### 2.b. Mise en réseau du récepteur prototype

La configuration du récepteur est tout à fait compacte, de faible coût et facile à utiliser. Le récepteur est capable de capturer les signaux HF émis par un émetteur distant. La première étape est d'installer un réseau de 4 récepteurs sur le territoire français et d'enregistrer l'amplitude de signaux d'émetteurs de radiodiffusion. Un système central permet de contrôler ces récepteurs. Les fichiers de configuration et de démarrage sont chargés à distance sur chaque récepteur en utilisant un logiciel de partage via Internet installé sur toutes les machines du réseau. De même, les données mesurées sont téléchargées de tous les récepteurs vers la machine centrale, via un protocole FTP. Les données enregistrées à partir de ces récepteurs sont post-traitées et la position géographique de l'émetteur peut ainsi être obtenue en utilisant la méthode TDoA ou ToA [1].

## 3. Résultats expérimentaux

### 3.a. Spectre du signal capturé

Afin de tester et valider la capacité du récepteur intégré d'enregistrer des signaux HF à partir d'émetteurs lointains, plusieurs captures de signaux HF ont déjà été initialisées à l'aide du récepteur. La configuration du récepteur pour capturer les signaux HF est illustrée à la Figure 3. La Figure 4 montre le spectre d'amplitude, enregistré à Brest, d'un signal radio AM de l'émetteur "Galbeni" situé en Roumanie pendant une durée de 10 secondes à 15h11 UTC le 9 mars 2017 et échantillonné à une cadence de 200 kHz. Cet émetteur fonctionne à 15,31 MHz entre 14h00 et 14h57 UTC [11]. La liaison radio est une propagation de 2350 km environ. Le signal audio enregistré a été post-traité sous Matlab pour obtenir le signal en bande de base. Pour cet émetteur, un

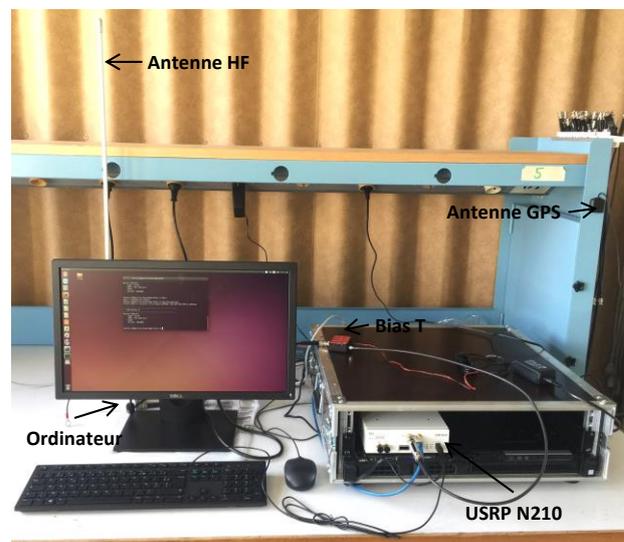
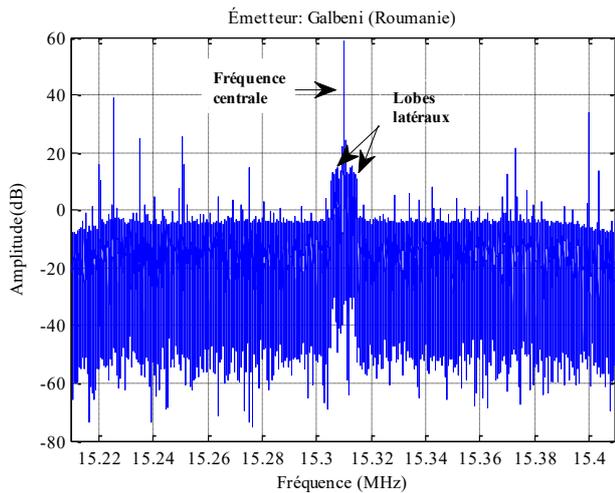


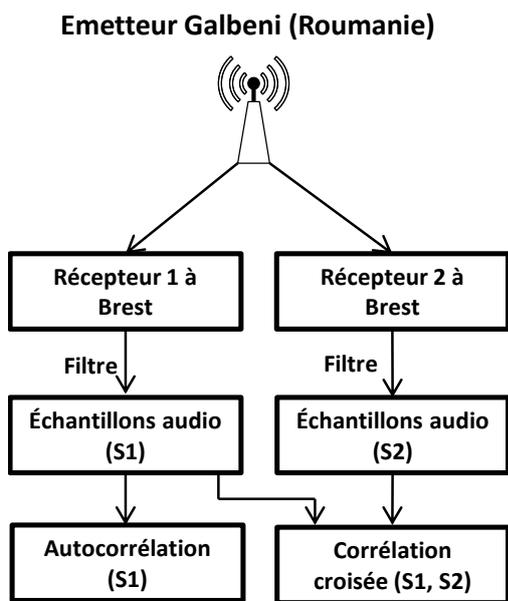
Figure 3. Configuration du récepteur pour capturer les signaux HF



**Figure 4. Spectre d'amplitude du signal HF enregistré**

pic important de 60 dB est visible sur la fréquence de la porteuse, et on distingue des lobes latéraux de part et d'autre, correspondant à la modulation AM (Figure 4).

En dehors du signal de puissance élevée à la fréquence centrale, plusieurs autres signaux avec une forte puissance ont également été capturés, ce qui est évident à partir du spectre d'amplitude représenté sur la Figure 4. La capture de ces signaux n'était pas prévue, mais est due aux transmissions simultanées à des fréquences de fonctionnement proches pour un temps donné pendant une journée. Afin d'utiliser ces signaux pour la localisation ou la modélisation de canal HF, il est nécessaire de filtrer la partie inutile du signal capturé. Les propriétés de corrélation du signal audio capturé sont évaluées pour vérifier la faisabilité de la localisation et sont discutées dans la sous-section suivante.



**Figure 5. Schéma explicatif de l'ensemble de données sur lequel l'autocorrélation et la corrélation croisée ont été évaluées**

### 3.b. Propriétés de corrélation des données capturées

Pour évaluer les propriétés de corrélation des signaux audio capturés, les mêmes signaux audio provenant de l'émetteur Galbeni en Roumanie ont été capturés à Brest de manière simultanée en utilisant 2 prototypes de récepteurs différents. Les antennes des deux récepteurs ont été placées à environ 1 mètre l'une de l'autre. Les échantillons audio sur lesquels l'autocorrélation et la corrélation croisée ont été calculées sont expliqués à la Figure 5.

L'autocorrélation est un moyen d'identifier le degré de similitude entre un signal et ses versions retardées. La Figure 6 représente l'autocorrélation des échantillons audio capturés. Le post-traitement du signal a été réalisé en utilisant Matlab. Les échantillons IQ obtenus à partir des récepteurs SDR ont d'abord été recalés à une moyenne nulle de manière à supprimer la composante continue. Puis, le signal a été transformé dans le domaine fréquentiel pour éliminer les fréquences indésirables. Tout le spectre, à l'exception de 5 kHz de part et d'autre de la fréquence centrale, a été filtré. Le signal est ensuite à nouveau converti dans le domaine temporel. Comme le signal radio capturé était modulé en amplitude, la largeur de bande de signal utilisée pour le traitement était de 10 kHz.

Comme on le voit sur la Figure 6, l'autocorrélation présente un pic centré en zéro avec un rapport signal à bruit (SNR) approximativement égal à 12 dB. Les échantillons qui ont été utilisés pour calculer l'autocorrélation étaient les échantillons audio qui étaient audibles et le niveau de bruit négligeable. Ainsi, le pic observé sur la Figure 6 n'est pas généré en raison du bruit. Il a également été noté par différentes captures que le pic d'autocorrélation en termes de SNR pouvait être réduit à environ 4-6 dB, lorsque la voix audible comportait une quantité plus importante de bruit.

La Figure 7 montre la corrélation croisée évaluée sur 2 échantillons audio capturés en même temps à Brest en utilisant deux récepteurs différents. Les deux signaux ont été filtrés de la même manière que celle décrite lors du calcul de l'autocorrélation. Le pic de corrélation croisée a été obtenu à 5  $\mu$ sec, ce qui indique un décalage de 1 échantillon dans le signal audio capté par 1 récepteur par rapport à un autre signal audio capté par un autre récepteur. Normalement, le pic de corrélation croisée obtenu aurait dû être centré en zéro puisque les 2 antennes sont séparées d'environ 1 mètre. Ce décalage d'un échantillon pourrait provenir des oscillateurs de la boîte USRP N210 qui a une fréquence de référence d'environ 2,5 ppm. En outre, la manière dont nous calculons la corrélation croisée aboutit à une différence de temps d'arrivée correspondant à un nombre entier d'échantillons de 5  $\mu$ sec (fréquence d'échantillonnage de 200 kHz). La localisation par TDoA est donc réalisée avec une granularité limitée par ce pas d'échantillonnage. Afin d'obtenir un résultat plus précis, des algorithmes de super-résolution peuvent être utilisés; différentes méthodes pour y parvenir sont discutées dans [12].

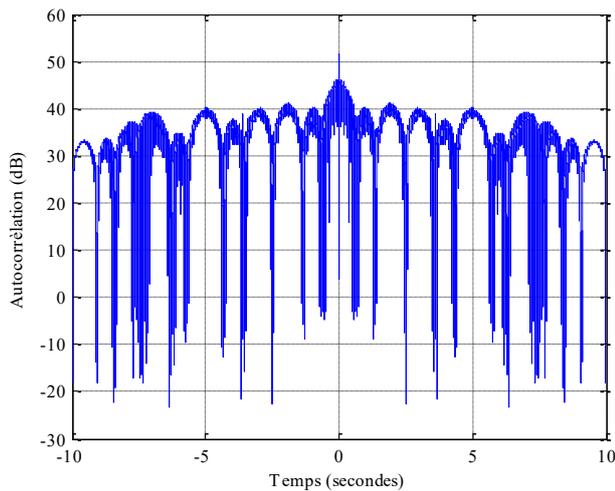


Figure 6. Autocorrélation des échantillons audio

#### 4. Conclusion

Un récepteur original, programmable a été développé afin de capturer des signaux HF distants. Ce récepteur offre de multiples possibilités de configuration selon les besoins de l'utilisateur : Par exemple, il peut programmer l'heure du début et de fin d'acquisition, la fréquence de l'émission choisie, la fréquence d'échantillonnage, etc. Les données capturées peuvent être transférées vers un site central en cas de récepteurs multiples et peuvent être utilisées pour la modélisation de canaux HF, la caractérisation ionosphérique ainsi que pour la géolocalisation.

L'autocorrélation d'un signal audio analogique capturé a donné un SNR d'environ 12 dB. Les données seront capturées pour différentes durées de temps pour voir si elles ont un impact sur l'autocorrélation des échantillons audio. La corrélation croisée calculée avec deux échantillons audio a pu être évaluée avec un SNR significatif. Ceci est encourageant en termes d'utilisation de signaux vocaux analogiques à des fins de localisation. A l'avenir, nous chercherons à évaluer dans quelle mesure l'application de cette technique à des signaux différents, en particulier numériques, permettra d'améliorer les propriétés de corrélation et donc la capacité de localisation.

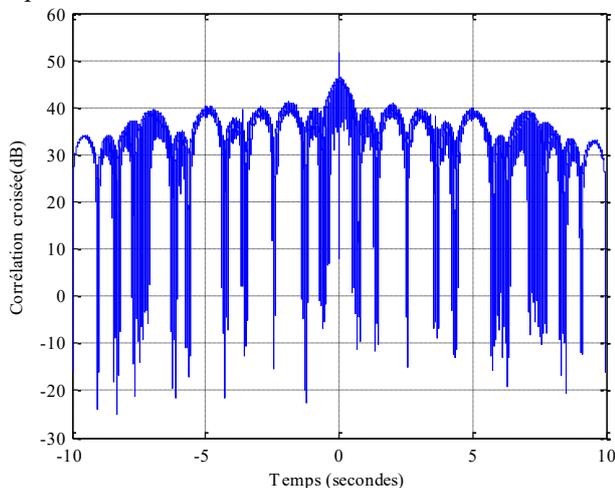


Figure 7. Corrélation croisée sur 2 échantillons audio

#### 5. Remerciements

Ce projet bénéficie du soutien financier de la Région Bretagne et de l'Institut Carnot.

#### Références

- [1] P. Pagani, I. El Mejri, R. Fleury, Y. Le Roux, J. Ménard, M. N. Ney and D. Le Jeune, "Time Domain HF Geolocation: Experimental Measurements and Preliminary Results," in the 10th European Conference on Antennas and Propagation, Davos, Switzerland, April 2016.
- [2] P. Pagani, R. Fleury, Y. L. Roux, and D. L. Jeune, "A study of HF transmitter geolocation through single-hop ionospheric propagation," in the 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), 2014, pp. 2689–2693.
- [3] A. Bensky, "Wireless positioning technologies and applications," Artech House, pp. 161-188, n° ISBN-13: 978-1-59693-130-5.
- [4] D. J. Torrieri, "Statistical theory of passive location systems," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-20, no. 2, pp. 183–198, Mar. 1984.
- [5] A. Jain, P. Pagani, R. Fleury, M. M. Ney, P. Pajusco, "Efficient time domain HF geolocation using multiple distributed receivers," in the 11th European Conference on Antennas and Propagation, Paris, France, March 2017.
- [6] K. Davies, "Ionospheric radio," IEE Electromagnetic Waves Series 31, pp. 124-158, n° ISBN: 0 86341 186 X, May 1989.
- [7] Y. M. L. Roux, M. Niberon, R. Fleury, J. Menard, and J. P. Jolivet, "HF channel modelling and simulation," in Fifth International Conference on Radio Receivers and Associated Systems, 1990, pp. 72–76.
- [8] C. Knapp and G. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 24, no. 4, pp. 320–327, Aug. 1976.
- [9] "GPSDO Selection Guide - Ettus Knowledge Base." Available: <https://kb.ettus.com/GPSDO>.
- [10] "USRP-GNURadio-gnuradio.org." Available: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/USRP>.
- [11] "Shortwave schedules around the world with frequencies in kHz and distance calculator." Available: <http://www.shortwaveschedule.com/>.
- [12] J. A. McEllroy, "Navigation using signals of opportunity in the AM transmission band," DTIC Document, Sep. 2006.