



**HAL**  
open science

## **Système de contrôle d'antennes pour un réseau linéaire uniforme basé sur la radio logicielle**

C. Campo, M Stefer, H Boeglen, L. Bernard, S. Hengy, Jean-Marie Paillot

► **To cite this version:**

C. Campo, M Stefer, H Boeglen, L. Bernard, S. Hengy, et al.. Système de contrôle d'antennes pour un réseau linéaire uniforme basé sur la radio logicielle. XXèmes Journées Nationales Microondes, May 2017, Saint-Malo, France. hal-01939226

**HAL Id: hal-01939226**

**<https://hal.science/hal-01939226>**

Submitted on 29 Nov 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.

## Système de contrôle d'antennes pour un réseau linéaire uniforme basé sur la radio logicielle

C. Campo<sup>1,2</sup>, M. Stefer<sup>1</sup>, H. Boeglen<sup>2</sup>, L. Bernard<sup>1</sup>, S. Hengy<sup>1</sup>, J.-M. Paillot

2

<sup>1</sup> Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL), Saint-Louis, France, [clement.campo@isl.eu](mailto:clement.campo@isl.eu)

<sup>2</sup> Université de Poitiers, Laboratoire XLIM, Futuroscope Chasseneuil, France, [herve.boeglen@univ-poitiers.fr](mailto:herve.boeglen@univ-poitiers.fr)

**Résumé** – Les techniques de dépointage de lobe (*beam steering*) et d'estimation d'angle d'arrivée (*DoA*) sont habituellement appliquées aux réseaux d'antennes à l'aide de circuits électroniques hyperfréquences dédiés, pour pondérer chaque élément rayonnant du réseau. Le travail présenté ici a pour but le développement d'un système capable de réaliser des opérations de *beamforming* à l'aide de cartes de radio logicielle large bande et adaptable à différentes applications sans modification de ses circuits électroniques. Des programmes d'estimation d'angle d'arrivée et de *beamforming* ont été implémentés sur GNU Radio et les performances du système ont été évaluées à l'aide d'un réseau linéaire uniforme (ULA) de 4 antennes, déjà caractérisé à l'ISL.

### 1. Introduction

L'évolution des communications sans fil requiert une flexibilité et une agilité toujours plus grandes des antennes utilisées. Les réseaux d'antennes permettent de réaliser ces objectifs grâce à leur capacité à modifier leur diagramme de rayonnement par pondération de leurs éléments rayonnants constitutifs [1 ; 2].

Généralement, les pondérations de ces éléments rayonnants sont réalisées à l'aide de circuits radiofréquences (RF) dédiés, tels que des atténuateurs et des déphaseurs. Mais cette solution peut souffrir des limites des composants utilisés en terme de résolution (nombre fini d'états de phase pour les déphaseurs, plage de fréquences d'utilisation, etc). Dans l'hypothèse de développements pour des applications spécifiques, les composants de haute résolution demeurent très chers et souffrent toujours d'un manque d'adaptabilité en fréquence d'une application à une autre.

Un autre moyen de reconfigurer dynamiquement le réseau phasé d'antennes consiste alors à appliquer les pondérations à chaque élément dans le domaine numérique, en bande de base. Bien que cette solution implique l'utilisation d'un émetteur-récepteur par élément, augmentant ainsi la complexité et le coût du système, elle offre une résolution dépendante d'un algorithme implanté dans un FPGA (Field Programmable Gate Array), donc bien plus grande. De plus, les récentes avancées dans le domaine de la radio logicielle, parmi lesquelles les USRPs (Universal Software Radio Peripherals) de National Instruments (NI) [3], offrent aujourd'hui des cartes RF couvrant une bande de

fréquence de 10 MHz à 6 GHz. L'utilisation de ces cartes RF avec les chaînes de conversion nécessaires (convertisseurs analogiques-numériques, mixeurs...) et d'un FPGA est maintenant possible pour un coût abordable.

Des travaux sur des systèmes d'estimation de DoA basés sur la radio logicielle ont été présentés dans [4-6]. Dans [4] la DoA a été estimée à l'aide de deux antennes connectées à une unique USRP. L'écart entre les résultats obtenus et les angles réels sont alors inférieurs à 3° pour des angles variant entre -30 et +30°. Un ULA de 4 éléments et 4 ULAs de 4 éléments ont été utilisés dans [5] et [6] respectivement.

Ces trois travaux utilisent l'algorithme MUSIC, très gourmand en puissance de calcul, pour l'estimation de DoA. Le besoin d'une grande puissance de calcul peut se révéler être une forte contrainte pour certaines applications, comme la miniaturisation du système pour l'embarquer sur des plateformes mobiles et de faible coût. Dans cette optique, ce travail présente un système à bas coût d'estimation de DoA et de contrôle d'antennes, basé sur la radio logicielle et utilisant l'algorithme de DoA Capon [7].

La partie 2 présente rapidement les programmes utilisés pour l'estimation d'angle d'arrivée et l'émission de données respectivement, sur des USRPs de NI synchronisés pour assurer une même fréquence d'oscillation sur chaque chaîne. La partie 3 décrit l'installation utilisée pour réaliser les mesures, présente et commente les performances de la DoA obtenues pour des angles d'arrivée allant de -50° à +50°, et le diagramme de rayonnement obtenu en mode émission. Enfin la partie 4 rassemble nos conclusions et introduit les prochaines étapes de notre travail.

### 2. Programmation sur GNU Radio

Les programmes ont été implémentés sur le logiciel open-source GNU Radio. Les entrées/sorties de chaque bloc sont représentées par des ports de couleur (nodes), et les flux de données entre chaque bloc sont symbolisés par les flèches.

a. DoA pour le mode réception de données :

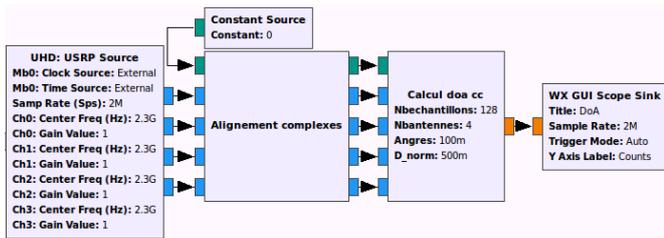


Figure 1. Programme de détection d'angle d'arrivée. 1<sup>er</sup> bloc : données USRPs ; 2<sup>ème</sup> : calibration des phases et amplitudes ; 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> blocs : estimation et affichage de l'angle d'incidence du signal.

La figure 1 présente le graphique générant le programme exécuté par les USRPs.

Les données récupérées par les USRPs sont accessibles par le premier bloc. Les signaux numérisés de chaque élément, sont alignés en phase et en amplitude par le deuxième bloc pour compenser les déphasages et différences de gain entre chaînes : la position du réseau à l'initialisation est alors référencée comme la « position 0° ». Le 3<sup>ème</sup> bloc a été implémenté en C++ pour estimer l'angle d'arrivée du signal reçu à partir des signaux numérisés de chaque chaîne et renvoyer la valeur calculée au 4<sup>ème</sup> bloc pour affichage. L'algorithme utilisé est la méthode de Capon.

b. Mode émission de données :

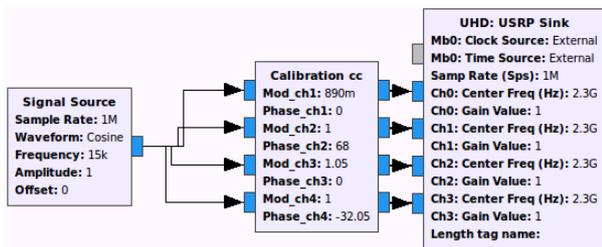


Figure 2. Programme d'émission de données. 1<sup>er</sup> bloc : signal émis sur chaque voie ; 2<sup>ème</sup> : calibration en phase et amplitude ; 3<sup>ème</sup> : USRPs.

La figure 2 présente le programme utilisé pour le mode émission.

Un même signal est émis sur chaque voie. Comme les différences de gain et de phase entre les différentes voies ne peuvent pas être calculées en software, les signaux émis ont été observés à l'oscilloscope. Les paramètres appliqués dans le deuxième bloc sont choisis pour y observer des signaux alignés. Cette calibration doit être réalisée périodiquement pour compenser la dérive inhérente aux USRPs et est indispensable pour l'obtention d'une pondération correcte de chaque antenne du réseau.

### 3. Expérimentations

a. Installation expérimentale

L'installation utilisée est représentée Figure 3. Le réseau d'antennes utilisé pour les mesures est un réseau uniforme linéaire de 4 éléments caractérisé à l'ISL lors d'études antérieures [8]. Les 4 voies sont gérées par 2

USRPs dont les horloges sont synchronisées par signal GPS à l'aide d'un Octoclock-G [9]. Le réseau est placé dans la chambre anéchoïque de l'ISL, au centre d'un mât rotatif. Une antenne cornet est alignée avec l'axe y (cf Fig. 3). Pour  $\theta = 0^\circ$ , les signaux de chaque chaîne sont alignés et l'angle d'incidence estimé est de  $0^\circ$ . Une ouverture de la chambre assure que l'émetteur est placé en champ lointain : en mode réception le signal reçu par le réseau est alors assimilable à un front d'onde et le déphasage entre éléments n'est lié qu'à la géométrie du réseau et à l'angle d'incidence sur le réseau.

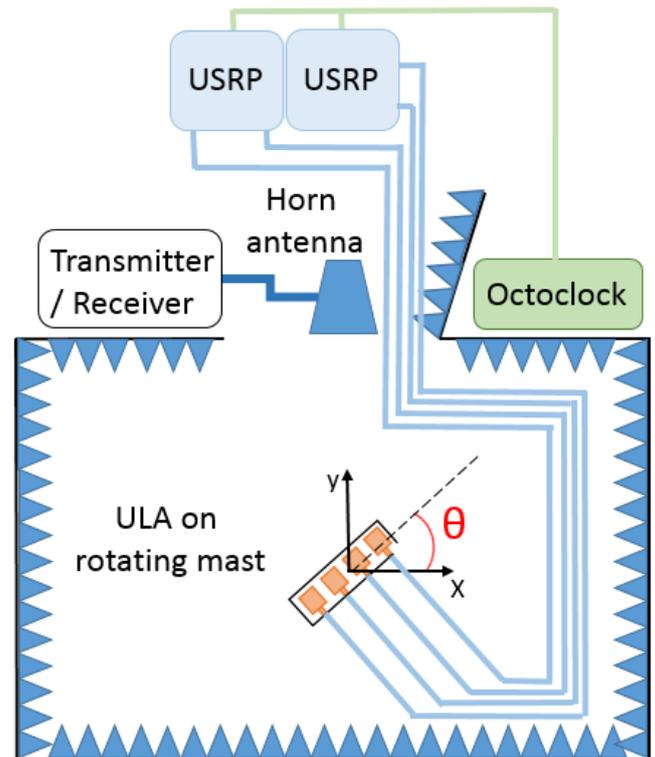
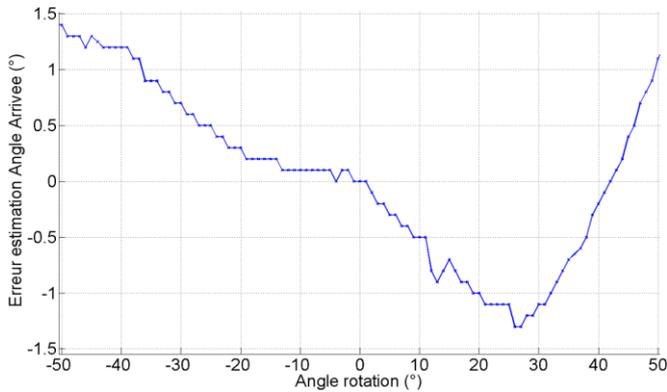


Figure 3. Installation expérimentale.

b. Mode réception : estimation de DoA

La première expérience, en mode réception, compare l'angle physique  $\theta$  entre l'axe du réseau et l'angle d'arrivée estimé par le programme. L'expérience a été réalisée pour des valeurs de  $\theta$  comprises dans l'intervalle  $[-90^\circ ; +90^\circ]$  mais l'erreur augmentant rapidement lorsque la direction d'arrivée se rapproche de l'axe du réseau, seuls les résultats pour  $\theta$  compris entre  $[-50^\circ ; +50^\circ]$  sont résumés ici. Le réseau est replacé régulièrement en position  $\theta = 0^\circ$  pour réaligner les phases et ainsi compenser les dérives des cartes RF. Les résultats sont ainsi affranchis à  $0,1^\circ$  près de cet effet de dérive. Aucune matrice de calibration n'est appliquée pour prendre en compte les effets de couplage et les effets de bord du réseau réel : le réseau est considéré comme un alignement de sources ponctuelles parfaitement isotropes et indépendantes.

La figure 4 ci-après présente l'évolution de l'erreur entre l'angle d'arrivée estimé par le programme et l'angle  $\theta$  réel, en fonction de ce dernier.



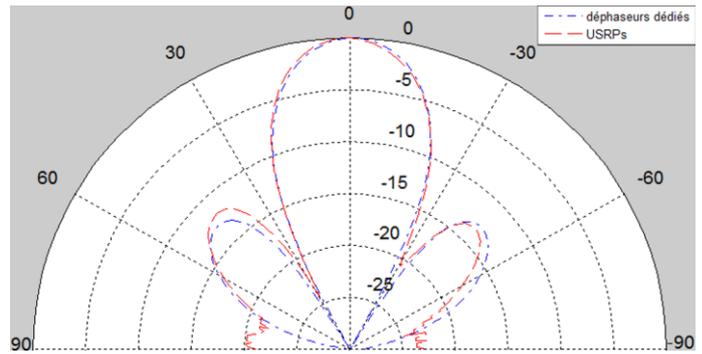
**Figure 4. Evolution de l'erreur dans l'estimation de l'angle d'arrivée du signal, en fonction de l'angle réel  $\theta$ .**

L'erreur faite par le programme reste inférieure à  $1,5^\circ$  sur toute la plage angulaire  $[-50^\circ ; +50^\circ]$ . Cependant cette erreur tend à augmenter au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la position d'initialisation du programme  $\theta = 0^\circ$ . Pour des angles supérieurs à  $50^\circ$  par rapport à la position  $\theta = 0^\circ$ , la direction d'arrivée du signal est trop proche de l'axe du réseau : l'erreur augmente considérablement et l'estimation de DoA n'est plus pertinente.

### c. Mode émission : diagrammes de rayonnement

La seconde expérience, en mode émission, évalue la capacité du système à contrôler le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes selon la consigne rentrée par l'utilisateur. L'antenne cornet est reliée à un mesureur de puissance pour mesurer la puissance émise par le réseau pour chaque angle  $\theta$ . Les niveaux de puissance relatifs obtenus permettent alors de reconstruire le diagramme de rayonnement du réseau piloté par les USRPs pour le comparer avec les résultats obtenus lors des études antérieures (cf. figures 5 et 6 ci-après). Les phases de chaque voie ont été ajustées à l'oscilloscope (cf. méthode décrite en partie 2b). Les amplitudes des signaux ont été égalisées à l'aide d'un mesureur de puissance.

Dans un premier temps, aucun déphasage supplémentaire n'a été introduit entre les signaux des différentes voies, impliquant que le lobe principal doit être orienté perpendiculairement à l'axe du réseau. Cette direction est représentée par l'angle  $0^\circ$  dans les diagrammes de rayonnement présentés. La figure 5 compare ainsi le diagramme de rayonnement obtenu par le pilotage du réseau à l'aide de déphaseurs dédiés avec celui obtenu par pilotage à l'aide d'USRPs lorsque le lobe principal pointe dans la direction  $0^\circ$ .

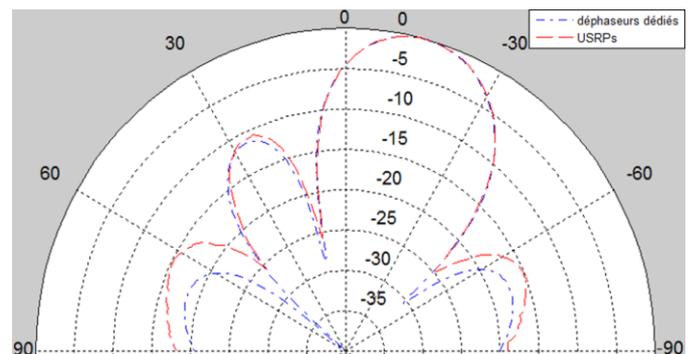


**Figure 5. Diagrammes de rayonnement obtenus pour une consigne  $\theta = 0^\circ$ , respectivement avec des déphaseurs dédiés et avec des USRPs.**

Le diagramme de rayonnement retrouvé pour le pilotage par USRPs est semblable à celui obtenu avec des déphaseurs classiques. Le lobe principal n'est pas dépointé, indiquant que les déphasages entre voies sont correctement compensés. Les différences de gain observées au niveau des lobes secondaires sont de l'ordre de 1dB au maximum.

Les inconsistances dans le diagramme de rayonnement observées pour des angles de plus de  $70^\circ$  peuvent être attribuées aux conditions de mesure : le réseau est alors presque perpendiculaire à l'axe de l'antenne cornet (axe y) et la réflexion due aux câbles SMA est plus importante.

Une seconde mesure compare les diagrammes de rayonnement obtenus par pilotage à l'aide des déphaseurs dédiés et des USRPs respectivement, pour un déphasage de  $45^\circ$  imposé entre voies adjacentes. Pour un ULA de 4 éléments séparés d'une demi-longueur d'onde, un tel déphasage inter-voies  $\beta$  entraîne un dépointage du lobe principal de  $14,5^\circ$  [2]. La figure 6 rassemble les résultats obtenus pour cette mesure.



**Figure 6. Diagrammes de rayonnement obtenus pour une consigne  $\beta = 45^\circ$ , respectivement avec des déphaseurs dédiés et avec des USRPs.**

Pour cette configuration également, le diagramme de rayonnement retrouvé est comparable à celui obtenu à l'aide de déphaseurs dédiés. Le lobe principal est dépointé de  $14,5^\circ$  dans les deux cas. Les lobes secondaires présentent des différences de gain de l'ordre de 2dB au maximum.

## 4. Conclusion

Un système d'estimation de l'angle d'arrivée du signal basé sur la radio logicielle est présenté pour un réseau linéaire uniforme, ce qui constitue un premier pas vers un système numérique de beamforming en bande de base. Pour cela, deux USRPs ont été synchronisés sur un signal d'horloge GPS et les fonctions nécessaires ont été implémentées sur GNU Radio.

Des diagrammes de rayonnement ont été mesurés et comparés à ceux obtenus à l'aide de déphaseurs dédiés pour l'utilisation des USRPs en mode émission de données. La capacité du système à reconfigurer le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes selon la consigne rentrée par l'utilisateur a été évaluée. Un système d'automatisation de la calibration sera développé pour la faciliter et l'accélérer.

Les performances du système ont été évaluées en environnement de laboratoire sans matrice de calibration.

Un programme intégrant une telle matrice de calibration (prise en compte des effets de bord, de couplage...) pour des géométries diverses de réseaux a été implémenté et fait l'objet de mesures à l'ISL.

## Références

- [1] R. J. Mailloux, "*Phased Array Antenna Handbook*", 2<sup>ème</sup> édition, édition ArtechHouse.
- [2] Constantine A. Balanis, "*Antenna Theory, analysis and design*", édition Wiley.
- [3] <http://www.ettus.com>
- [4] Păun Mirel, Răzvan Tamas, and Ion Marghescu. "A Software-Defined Radio Approach for Direction Finding.", U.P.B. Scientific Bulletin Vol.7, 2015.
- [5] Meng-Chang Hua, Cheng-Han Hsu and Hsin-Chin Liu, "Implementation of direction-of-arrival estimator on software defined radio platform," *2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing*.
- [6] M. C. Hua, C. H. Hsu, W. J. Liao, C. C. Yao, T. H. Yeh and H. C. Liu, "Direction-of-arrival estimator using array switching on software defined radio platform," *2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*.
- [7] J. Capon, "High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis", *Proceedings of the IEEE* 1969.
- [8] L. Bernard, V. Jaeck, "Investigations on Bandwidth Enhancement of low-cost Printed Phase Array with Reactive Impedance Substrates", *Phased Array Systems & Technology, 2013 IEEE International Symposium*.
- [9] <https://www.ettus.com/product/details/OctoClock-G>