



HAL
open science

Architectures de traitement du signal pour les réseaux de capteurs pour des applications aérospatiales

Julien Henaut

► **To cite this version:**

Julien Henaut. Architectures de traitement du signal pour les réseaux de capteurs pour des applications aérospatiales. 2010. hal-00475635

HAL Id: hal-00475635

<https://hal.science/hal-00475635>

Preprint submitted on 23 Apr 2010

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.

Architectures de traitement du signal pour les réseaux de capteurs pour des applications aérospatiales

Julien HENAUT

CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

Ce travail vise à étudier et à développer des interfaces radio pour le développement de nouveaux réseaux de capteurs sans fils pour le secteur des essais aéronautiques et spatiaux. Il est démontré, notamment par plusieurs campagnes de mesure en conditions réelles, que le choix de la modulation MB-OFDM associé à une architecture réseau de type arbre permet de répondre aux spécifications. Le développement d'interfaces simplifiées et spécifiques sur FPGA permettent d'obtenir des débits de l'ordre de 100Mbits/s.

I. INTRODUCTION

Lors du développement d'un nouvel avion, la phase précédant l'obtention du certificat de navigabilité est basée sur de nombreux essais réalisés au sol ou dans les conditions de vol. L'une des formes d'essai les plus critiques est la mesure de la pression de l'air « autour » de l'aile. Ces mesures permettent à la fois de mesurer les deux composantes fondamentales de l'aérodynamisme : la portance et la traînée, et de valider les résultats de simulation et d'améliorer les données d'entrée des souffleries virtuelles pour les futurs développements.

Dans le domaine spatial, le lancement est l'une des phases les plus critiques pour les systèmes. En effet, les structures doivent faire face à des vibrations importantes et à un stress mécanique qui ne doivent endommager ni le satellite ni les instruments embarqués. Des essais sol particulièrement rigoureux sont donc réalisés préalablement au lancement afin de vérifier que la charge utile ne sera pas endommagée.

Des milliers de capteurs de pression ou des jauges de contrainte sont utilisés par les industriels du secteur pour ce type d'essais. Tous ces éléments sont aujourd'hui connectés entre eux par des fils. La première difficulté liée à ce type d'installation est le poids supplémentaire sur la structure. Ce dernier représentant une préoccupation importante en aéronautique, il est très délicat d'alourdir l'avion en ajoutant, le temps de l'essai, une quantité importante de câbles sur l'aile dans le seul but de connecter des capteurs entre eux. Il ne s'agit pas de la seule contrainte associée au déploiement de ces réseaux de capteurs. Le déploiement de ces systèmes de mesure filaire, engendre un coût important à la fois en raison du prix des câbles mais surtout de la très longue immobilisation de l'appareil nécessaire à

l'installation du système. Cette contrainte financière très lourde est de plus en plus difficile à supporter pour les industriels.

Le remplacement des réseaux de mesure par des réseaux de capteurs sans fil permet à la fois de limiter les difficultés d'installation, mais aussi d'augmenter le nombre de points de mesure. Malheureusement les verrous technologiques sont encore très nombreux.

Avec l'identification de sources d'énergie autonomes suffisamment efficaces dans les environnements concernés, le développement d'interfaces radio basse consommation, fiables et répondant aux attentes en termes de débits constitue un défi majeur.

Après le choix du type de modulation et d'une architecture du réseau, les résultats des campagnes de mesures en conditions réelles sont présentés. Avant de conclure, le développement de la partie numérique d'une interface radio reposant sur une technologie MB-OFDM est détaillé.

II. Choix de l'architecture du réseau et de la modulation

A. Une modulation OFDM haut-débit

L'une des principales attentes des aérodynamiciens vis-à-vis du passage aux réseaux sans fil est la possibilité d'accroître le nombre de points de mesure (objectif de plus de 400 capteurs par aile). Ce point, associé à l'exigence d'un fort taux de rafraichissement des mesures, engendre le besoin d'interface radio haut débit (100 Mbits/s). Le réseau de capteurs étant un système embarqué et auto alimenté, il est impératif d'utiliser des architectures d'émetteurs-récepteurs aussi simples que possible.

Mais, dans l'industrie aérospatiale où la sécurité est l'impératif premier, il est extrêmement difficile d'obtenir l'ouverture d'une nouvelle bande de fréquence autorisant un niveau d'émission compatible avec les modulations bande étroite classiques de type FSK ou PSK [1]. C'est pourquoi il est impératif de considérer des modulations de type Ultra Large Bande (ULB). L'utilisation d'une bande large permet en effet une réduction de la puissance d'émission à des niveaux extrêmement bas (inférieur à -41.3dBm/MHz) qui ne perturberont pas les éléments utilisant la même bande de fréquence comprise entre 6GHz et 8.5 GHz.

Dans le domaine de l'ULB, il existe deux candidats pour les interfaces radio : la technologie par impulsion (IR-UWB) et la méthode à porteuse orthogonale (MB-OFDM). La technologie par impulsion, présente de très nombreux avantages dont une consommation très faible. Mais la nécessité de disposer de convertisseurs numériques analogiques puissants et sa faible efficacité spectrale font qu'une approche basée sur une technologie multi porteuse à porteuses orthogonales (MB-OFDM) est préférable [1].

B. Une architecture en arbre

La topologie la plus courante dans le déploiement de réseau de capteur est dite « en grille ». Tout nœud peut échanger avec n'importe quel autre nœud du réseau. Un nœud émettant les informations récoltées vers l'élément central du réseau (appelé concentrateur dans l'application visée et situé à l'intérieur de la cabine ou du poste opérateur) peut choisir de les transmettre vers n'importe quel autre nœud intermédiaire. Ce dernier les transmettra vers un autre nœud. L'opération est ainsi répétée jusqu'au concentrateur. Cette technique offre l'avantage d'un lien systématique entre l'élément communiquant et le concentrateur ainsi que la redondance du lien de communication. Mais, dans le contexte d'un réseau où la synchronicité de la prise de mesure est un élément clé, la quantité de données gérée par un nœud à un instant précis doit être la somme de toutes les mesures des nœuds à portée radio. Dans ces conditions, la consommation d'énergie d'un nœud est très importante.

La configuration offrant le meilleur compromis est la topologie en arbre où le réseau est divisé en trois niveaux. Le sommet (le concentrateur) est connecté à plusieurs éléments de niveau

inférieur, appelés ici répéteurs. Ces répéteurs sont situés au niveau des prises 28V de l'aile. Par conséquent, ils peuvent disposer d'une alimentation électrique et ainsi d'une puissance de calcul et d'une portée radio plus importantes. Les répéteurs sont connectés à plusieurs éléments de niveau inférieur, appelé nœuds et contenant chacun huit éléments sensibles. Les nœuds sont auto alimentés et ne disposent ainsi que de peu d'énergie. Mais ils sont toujours suffisamment proche d'un répéteur pour que les portées radio et donc la consommation soient faibles.

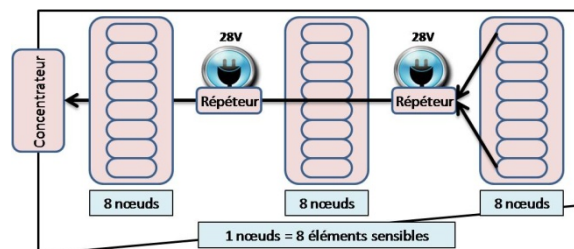


FIG. 2. Topologie du réseau de communication

III. Mesure en conditions réelles

L'existence de kits de développement basé sur le MB-OFDM a permis la mise en place de nombreuses campagnes de mesure en conditions réelles pour évaluer le choix de cette modulation dans le contexte particulier de ce développement. Le kit de développement utilisé ici est le kit DV9110M de la société israélienne Wisair. La plupart des tests ont consisté à mesurer les taux d'erreur paquets dans différentes conditions

A. Mesure sur avion

Une première campagne [2] de tests en laboratoire et en extérieur ayant pour objectif de valider le protocole de mesure a permis de retrouver en environnement « bureau » les valeurs de simulation annoncées par les concepteurs de la norme MB-OFDM.

La campagne réalisée sur A340-600 a permis d'évaluer les distances maximum atteignables dans la configuration avion. De nombreuses configurations physiques et différents types d'antenne ont été testés. Les résultats sont présentés en [2] et résumés en figure 3 pour la liaison répéteur-concentrateur.

Pour un débit fixé à 60 Mbits/s, la communication est correcte (taux d'erreur binaire inférieur à 10^{-5}) pour des distances entre le concentrateur (antenne cornet dans la cabine) et le répéteur (antenne patch sur l'aile) comprises entre 7m et 17m.

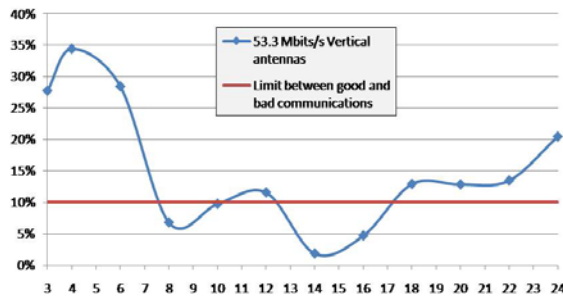


FIG. 3. Taux d'erreur paquet enregistré sur l'aile en fonction de la distance

B. Mesure sur satellite

La campagne réalisée sur une structure Eurostar-3000, a eu pour objectif l'évaluation du débit maximum atteignable dans la situation satellite. L'émetteur et le récepteur sont situés de part et d'autre de la structure métallique, comme présenté en figure 4. Cette structure étant métallique, elle agit comme une cage de Faraday empêchant toute communication entre l'intérieur et l'extérieur. Il est donc indispensable d'utiliser un répéteur passif [3]. Les résultats détaillés sont présentés en [4] et résumés en figure 4.

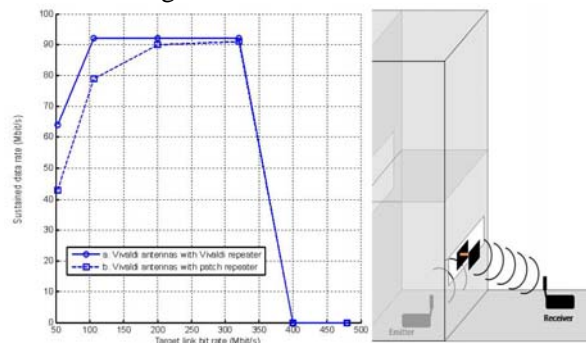


FIG. 4. Débit maximum pour le satellite

Dans cette configuration on peut obtenir des débits tout a fait compatibles avec l'application visée (jusqu'à 93 Mbits/s).

IV. Interface radio adaptée

Les différentes campagnes de mesures réalisées ont permis de valider l'utilisation du standard MB-OFDM (utilisation jusqu'à 17 mètres sur l'aile et jusqu'à 90 Mbits/s dans le satellite). Par contre, de nombreuses limitations à l'utilisation d'un kit commercial ont été relevées ; la principale étant une consommation excessive. Cette dernière découle principalement de l'implémentation dans le standard ECMA-368 de nombreux mécanismes très gourmands en ressources de calcul et non indispensables dans le contexte des réseaux de capteurs. Il est

important de développer une interface radio simplifiée et spécifique mais basée sur le MB-OFDM.

Des prototypes d'émetteurs et de récepteurs, ont été réalisés sur une plateforme FPGA Virtex5. La connexion avec une antenne Vivaldi a été réalisée par l'intermédiaire de convertisseurs analogiques numériques et numériques analogiques et de mixeurs et VCOs commerciaux en attendant le développement d'une tête RF spécifique.

Les convertisseurs n'étant pas compatible avec la gestion de signaux I/Q, le débit physique est défini par la formule (1).

$$Db = \frac{2 \cdot Nb \cdot \sigma_{\text{réseau}}}{\text{Taille FFT}} * f \quad (1)$$

La bande occupée aujourd'hui est de 150 MHz, ce qui donne un débit atteignable de 94 Mbits/s. Avec des convertisseurs adaptés, il est possible d'atteindre un débit double (188 Mbits/s). Les mesures de taux d'erreur sur la liaison sont en cours de réalisation.

V. CONCLUSION

L'exigence industrielle de mise au point de réseaux de capteurs sans fil permettant la description précise du comportement d'avion ou de satellites avant commercialisation a conduit à considérer pour la première fois l'utilisation d'interfaces radio haut débit dans le domaine des réseaux de capteur. Le choix de la modulation MB-OFDM et d'une structure en arbre ont été dictés par les contraintes énergétiques et de débits. Un prototype, atteignant plus de 150 Mbits/s a été développé sur FPGA. Il doit, désormais, il doit être couplé avec les algorithmes de synchronisation des nœuds entre eux, et les choix architecturaux doivent être validés par une campagne de mesure des taux d'erreur sur la liaison.

- [1] J. HENAUT, A. LECOINTRE, D. DRAGOMIRESCU, and R. PLANA, "Radio Interface for High Data Rate Wireless Sensor Networks," *IMETI*, Orlando, FL (USA): IIS, 2008, pp. 104-109.
- [2] J. HENAUT, A. Coustou, D. DRAGOMIRESCU, and S. BERHOUE, *Projet SACER : Transmission UWB MB-OFDM. Mesure de la qualité du lien de communication sur aile A340/600UWB*, Toulouse (France): LAAS-CNRS, 2009.
- [3] A. Ali, A. Coustou, and H. Aubert, "Wide band passive repeaters: Design and measurements," *APSURSI*, 2009, pp. 1-4.
- [4] J. HENAUT, D. DRAGOMIRESCU, F. PERGET, and R. PLANA, "Validation of the MB-OFDM Modulation for High Data Rate WSN for Satellite Ground Testing," *ICONS*, Mennieres (France): IARIA, 2010, p. To Be Published.