

Apprentissage des systèmes de communications sans fil à base de plateformes SDR

Ch. Jabbour et G. Pham

Département ComElec, Telecom Paris

Contact email : chadi.jabbour@telecom-paris.fr

Cet article présente des enseignements sous forme de travaux pratiques et de projets pour l'apprentissage des systèmes de communications sans fil. Ces enseignements sont basés sur des plateformes SDR faciles à utiliser par les étudiants. Deux applications principales ont été abordées : i) la prédistorsion numérique des amplificateurs de puissance ii) le brouillage des communications sans fil. Le public visé est divers allant d'étudiants en première année d'un cycle ingénieur généraliste en Télécommunications à des étudiants en Master 2 en microélectronique.

I. Introduction

Les systèmes de communications sans fil sont omniprésents dans notre monde actuel avec une grande diversité en termes de débit, de fréquence centrale, de consommation d'énergie. La connaissance voire la maîtrise de ce domaine est ainsi nécessaire pour tout diplômé en télécommunications ou en micro-électronique.

Contrairement à d'autres domaines de l'électronique telle que l'instrumentation, les expérimentations pratiques sur ce genre de systèmes en utilisant des instruments de mesure classiques, sont coûteuses et complexes dues aux fréquences centrales utilisées qui peuvent s'élever à plusieurs centaines de MHz voire plusieurs GHz. Ceci a conduit pendant longtemps les formateurs dans le domaine à favoriser des enseignements basés sur la simulation système (Matlab, Python ...) ou avec des outils spécialisés (Cadence, ADS, Mentor).

Dans la dernière décennie, un grand nombre de plateformes SDR (« Software Defined Radio ») a été mis sur le marché [1-4]. La chute du prix de ces plateformes les a rendues accessibles pour les intégrer dans les enseignements en télécommunications et en micro-électronique permettant ainsi aux enseignants de ré-équilibrer les formations en termes de manipulations expérimentales, très appréciées par les étudiants.

Dans cet article, nous allons présenter les enseignements que nous avons développés à Telecom Paris pour des étudiants en cycle ingénieur et en Master 2. Nous allons commencer d'abord par présenter le matériel utilisé notamment les plateformes SDR puis nous détaillerons les enseignements réalisés avant de conclure le papier.

II. Présentation du matériel

Le matériel utilisé se base principalement sur des cartes SDR Analog Devices qui utilise le circuit AD9631 [5]. C'est un émetteur/récepteur reconfigurable avec une fréquence

centrale allant de 70 MHz à 6 GHz et des canaux d'émission allant de 200 kHz 56 MHz. Le AD9631 intègre 2 voies d'émission et 2 voies de réception.

Le circuit est utilisé dans plusieurs cartes d'évaluation notamment dans les 2 modèles présentés ci-dessous: FMCOMMS3 [3] et ADALM-PLUTO [4].

La première est une carte fille RF dont le PCB est optimisé pour exploiter tout le potentiel du AD9631 avec la possibilité d'utiliser les 2 voies d'émission et de réception et l'horloge externe sur toute la plage de fréquence centrale possible du circuit intégré. Cette carte communique avec un FPGA Zed Board qui intègre un noyau linux qui permet de piloter la carte. Un pilotage à distance est possible vu que le FPGA intègre un port Ethernet.

La deuxième carte utilisée est l'ADALM-PLUTO. C'est un boîtier périphérique qui intègre le FPGA et le circuit RF sur un même PCB. C'est en quelque sorte une version faible coût de la solution décrite précédemment mais bien évidemment ce qui se traduit par des performances réduites mais qui restent très intéressantes. Ainsi la fréquence centrale est réduite à 325-3800 MHz et on a la possibilité d'utiliser qu'une seule voie d'émission et une seule voie de réception. Le pilotage et l'alimentation de la carte se fait à l'aide d'un câble USB et donc elle nécessite l'utilisation d'un ordinateur.



Fig. 2 Plateforme ADALM PLUTO

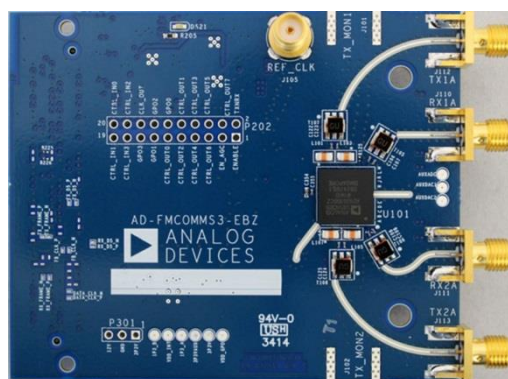


Fig. 1 Plateforme FMCOMMS3

Pour piloter ces deux cartes ainsi que toutes les cartes de cette famille, il est possible d'utiliser le logiciel IIO Osc développé par Analog Devices [6]. Il est aussi possible les programmer en utilisant le langage Python qui possède de nombreuses bibliothèques permettant de contrôler cette famille de plateformes telles que Adi et IIO. Il est également possible de faire la programmation en Matlab à l'aide d'un plug-in dédié.

TABLEAU 1: Liste du matériel

Produit	Description	Prix unitaire (€TTC)
AnalogDevices FMCOMMS3-EBZ	Cartes-filles RF	870
Avnet - Zed Board	Cartes-mères FPGA	528
Analog Devices Adalm Pluto	Cartes complètes 325 MHz – 3800 MHz	163
Mini-Circuits ZX60-V62/63+	Amplificateur de puissance Large bande Pout=20 dBm	60

Mini-circuits K3-VAT+	Kit-Atténuateurs	64
Snaptain SC5 JJRC Mini RC Sgile RC.	Voitures et drones télécommandés	<70

En plus de ces plateformes, nos enseignements nécessitaient des amplificateurs de puissance, des atténuateurs et des systèmes télécommandés. Le tableau ci-dessous résume la liste du matériel utilisé ainsi que son prix.

III. Travaux Pratiques & Projets réalisés

III.A Pré-distorsion numérique pour des signaux large-bande

L'amplificateur de puissance est un élément clé dans les chaînes de communications radio-mobiles. Il a pour rôle d'amplifier le signal émis avec le meilleur rendement possible tout en évitant de dégrader, dû à ses non-linéarités, l'efficacité spectrale dans les canaux adjacents. En outre, les nouveaux standards de communications tels que le LTE, LTE-A et la 5G accentuent les contraintes sur l'amplificateur de puissance à cause de l'augmentation des bandes passantes et de la complexification des modulations utilisées. La linéarisation par prédistorsion numérique est une solution attrayante permettant d'augmenter le rendement d'un amplificateur de puissance en pré-compensant numériquement ses non-linéarités intrinsèques comme illustré ci-dessous [7].

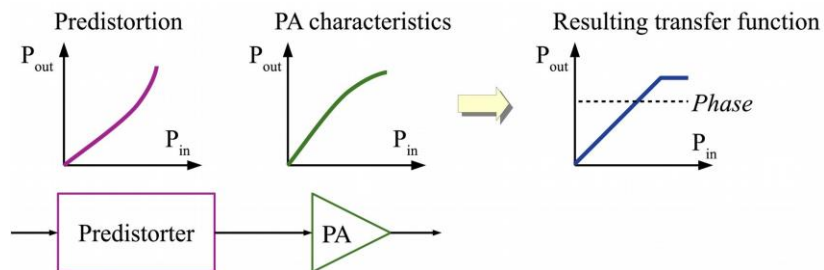


Fig. 3 Principe général de prédistorsion numérique

Nous avons proposé un enseignement principal sur cette thématique. Il consiste en une série de 2 TPs. Le premier est destiné à l'étude du fonctionnement d'un amplificateur de puissance, à l'analyse des phénomènes de non-linéarité et au calcul des principales métriques de performances telles que l'ACPR, l'IIP3 ou le P1dB. Le deuxième TP est consacré à la modélisation de l'amplificateur de puissance à l'aide de modèle non-linéaire à mémoire notamment le modèle « Memory Polynomial » et au dimensionnement du système de pré-distorsion.

Cet enseignement a l'avantage et la difficulté d'aborder un large de spectre de compétences allant de la manipulation de composants RF, passant par de la modélisation mathématique avancée à de la programmation système sur Matlab. Le schéma bloc du banc de mesure est illustré figure 4. La figure 5 illustre des exemples de résultats obtenus par les étudiants.

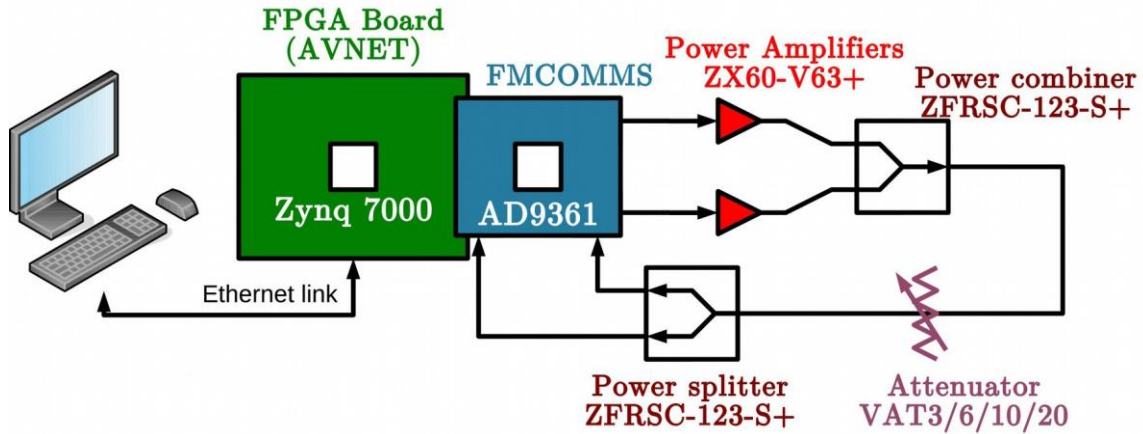


Fig.4 Schéma de la plateforme en phase de test.

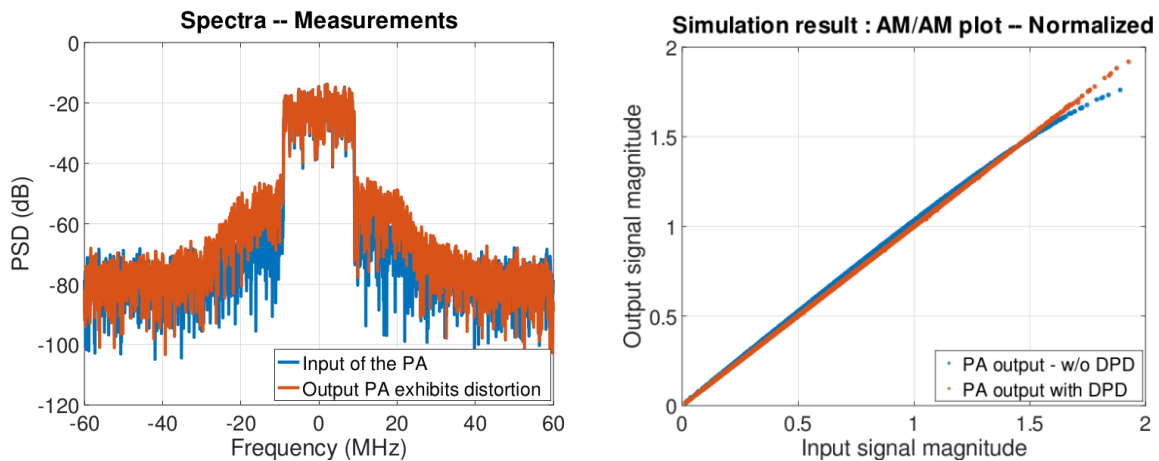


Fig.5 Spectre de l'amplificateur de puissance et fonction AM/AM.

III.B Brouillage des communications

Le brouillage est aussi un cas d'étude très intéressant pour enseigner les systèmes de communication, car il permet d'analyser l'impact des interférences sur la qualité d'une communication et de comprendre la différence avec un bruit aléatoire [8]. Il permet également d'analyser les mécanismes prévus pour palier à ce problème tels que le « frequency hopping » ou la redondance.

Il a également l'avantage de présenter un côté ludique comme il permet aux étudiants de manipuler des systèmes qu'ils utilisent au quotidien tels que leur réseau WiFi, leur clé sans fil de voiture ou un drone télécommandé.

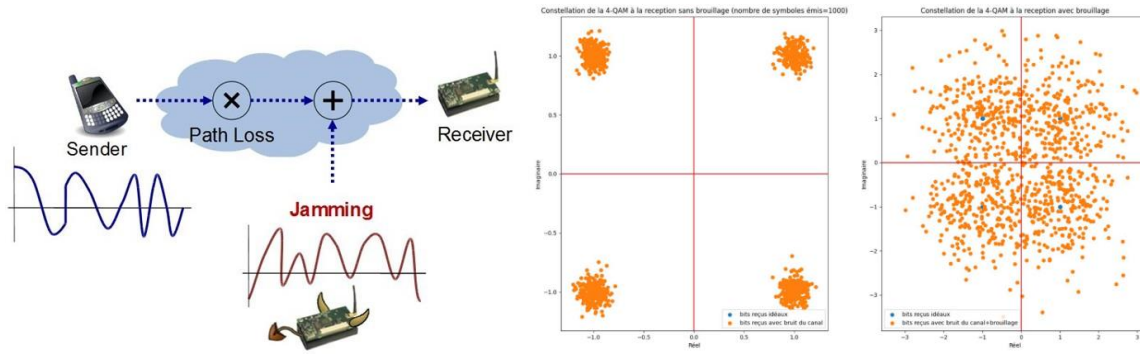


Fig. 6 Schéma du brouillage et exemple de résultats obtenus.

Cet enseignement a été proposé sous forme de projet. Une première version courte a été proposée pour des étudiants en première année du cycle ingénieur. Les étudiants ont commencé par étudier les paramètres de la communication cible (fréquence centrale, modulation, puissance, frequency hopping, ...). Nous avons commencé par des systèmes télécommandés tels que des voitures ou des drones avant de regarder des systèmes plus complexes tels qu'un réseau WiFi. En se basant sur ces résultats, les étudiants ont dû configurer et optimiser leur brouilleur afin qu'il soit le plus performant possible. L'impact de paramètres tels que la distance entre le brouilleur et la cible, la puissance émise par le brouilleur, la génération du signal brouilleur ont été analysés en mesure. Une deuxième version plus longue du projet a été proposée pour des étudiants en 2ème année du cycle ingénieur. Les étudiants ont, dans cette version avancée, développé en plus un simulateur sous Python pour analyser l'impact des paramètres du brouilleur sur le SNR et le BER de la communication.

Pour les expérimentations, nous avons mis à disposition de chaque étudiant une maquette RF du type Adalm Pluto qui permet d'émettre et de recevoir des signaux RF, un système télécommandé (voiture, drone ...) et d'autres composants élémentaires (antenne, amplificateurs). Il est intéressant de souligner que les deux occurrences du projet présentées ci-dessus ont été réalisées en distanciel ou en hybride (alternance entre distanciel et présentiel). Le matériel a été soit récupéré par les étudiants à l'école soit envoyé par courrier. Pour l'alimentation de l'amplificateur de puissance qui utilise une tension de 5 V, nous avons utilisé un câble USB permettant ainsi aux étudiants d'utiliser un simple chargeur pour l'alimenter. Les retours des étudiants étaient très positifs sur cette expérience car cela leur a permis de faire des manipulations matérielles pendant une période où la totalité des cours se faisait en visio.

IV. Conclusion

Cet article a présenté l'utilisation de plateformes types SDR pour l'apprentissage du fonctionnement des systèmes de communication sans fil. Les enseignements développés ont permis aux élèves d'étudier en pratique des notions telles que la linéarité et la résolution et d'analyser l'impact de la configuration de l'émetteur/récepteur en termes de fréquence centrale, de bande passante ou de gain sur ces métriques.

Les deux enseignements présentés dans ce papier concernaient la pré-distorsion numérique et le brouillage. De nombreuses extensions de ces enseignements sont envisageables. Nous sommes notamment en train de développer un nouveau TP orienté pré-

distorsion MIMO profitant ainsi des deux voies d'émission/réception de la FCOMMS3. D'autres enseignements sont également possibles avec ce genre de plateformes notamment une communication utile entre deux plateformes distantes permettant ainsi d'étudier des notions telles que l'impact du canal sur la résolution et la synchronisation.

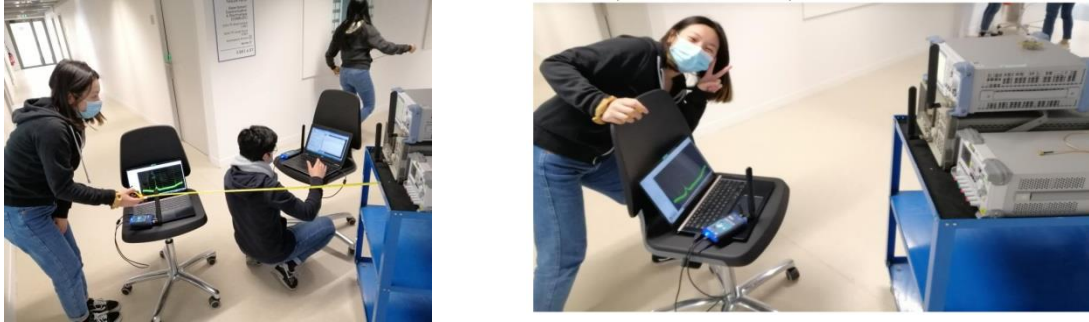


Fig.7 La promenade des Plutos

Remerciements

Les auteurs remercient le CEMIP et le CNFM pour le co-financement de ces enseignements dans le cadre des TP innovants du projet FINMINA [9].

Références

1. Hack RF One <https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/>
2. Lime SDR <https://limemicro.com/products/boards/limesdr/>
3. FCOMMS3 Evaluation board from Analog Devices
<http://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-ad-fmcomms3-ebz.html#eb-buy>
4. ADALM PLUTO from Analog Devices
<https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html>
5. AD9361 <https://www.analog.com/en/products/ad9361.html>
6. FCOMMS IIO Oscilloscope
https://wiki.analog.com/resources/eval/user-guides/ad-fmcomms1-ebz/software/linux/applications/iio_scope
7. F. M. Ghannouchi and O. Hammi, "Behavioral modeling and predistortion," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 10, no. 7, pp. 52-64, Dec. 2009, doi: 10.1109/MMM.2009.934516.
8. A. Mpitziopoulou, D. Gavalas, C. Konstantopoulos and G. Pantziou, "A survey on jamming attacks and countermeasures in WSNs," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 4, pp. 42-56, Fourth Quarter 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090404.
9. IDEFI-FINMINA : Initiative d'Excellence - Formation Innovante en Microélectronique et Nanotechnologies, ANR-11-IDFI-0017. Website: <http://www.cnfm.fr/VersionFrancaise/actualites/FINMINA.htm> (Accès 2021)