

Une nouvelle technique de reconnaissance de modulation numérique utilisant la fiabilité du détecteur de phase

Daniel LE GUENNEC, Adel METREF, Jacques PALICOT

IETR / SUPELEC, Campus de Rennes

Avenue de la Boulaie, CS 47601, 35576 Cesson-Sévigné cedex, France

daniel.leguennec@supelec.fr, adel.metref@hotmail.fr, jacques.palicot@supelec.fr

Résumé – Dans ce papier nous présentons un nouvel algorithme d'identification automatique de la modulation numérique d'un signal de communication entrant dans un récepteur de radio intelligente. Contrairement aux algorithmes existants, la solution proposée ne nécessite pas d'étape spécifique de reconnaissance de la modulation numérique et ne repose pas sur des seuils de décision, elle utilise une caractéristique du détecteur de phase, appelée fiabilité, directement extraite de la boucle existante de récupération de la phase de la porteuse (PLL). Appliquée à des constellations 8-PSK, 16-QAM, 16-APSK, 64-QAM, l'algorithme proposé montre un très bon taux de bonne reconnaissance de la modulation même en présence d'un fort niveau de bruit et pour des modulations numériques d'ordre élevé.

Abstract – A new feature based digital modulation identification algorithm has been developed and presented in this paper. The algorithm developed uses the reliability of a decision-directed (DD) phase detector as a modulation scheme classification feature. Unlike feature based methods found in literature, the classification decision of the proposed algorithm does not use a specific equipment to recognize the modulation and does not rely on decision thresholds. Simulation results covering 64-QAM, 16-QAM, 16-APSK and 8-PSK modulation schemes show promising identification statistics with high probability of correct classification in the presence of noise even with high order modulation schemes.

1 Introduction

Les systèmes de communication sont capables aujourd'hui d'adapter et de changer leur fonctionnement pour maintenir une connectivité face à des conditions et des circonstances qui varient constamment. Pour cela, des fonctionnalités intelligentes ont été introduites dans les équipements de communication sans fil conduisant au concept de radio intelligente (RI) [1]. L'idée générale derrière le concept de RI est de concevoir des systèmes sans fil intelligents capables d'évaluer l'environnement dans lequel ils opèrent et effectuent des observations par exemple sur la présence ou l'absence de signal, sur les caractéristiques des signaux présents, la qualité du signal reçu, etc. Ces observations sont alors utilisés comme entrées d'un processus de décision afin de déterminer comment les paramètres de la transmission de la RI peuvent être adaptées. A titre d'exemple, les systèmes WiMAX peuvent adapter les caractéristiques des signaux qu'ils transmettent afin de maintenir la qualité et la stabilité de la liaison, ceci en transmettant une information de changement. Dans un scénario sans information de changement transmise, un émetteur pourrait par exemple changer sa modulation pour une modulation appropriée en fonction de la capacité du canal. Le récepteur devra alors incorporer une reconnaissance automatique de modulation [2] pour considérer ces changements en temps réel. Ce rôle est aussi important dans des applications militaires, où aucune connaissance a priori sur le signal entrant n'est disponible, tel est le cas en interception de signal. Deux catégories principales d'algorithmes de reconnaissance automatique de modulation peuvent être distinguées : les algorithmes basés vraisemblance (Likelihood Based algorithms LBa) et les algorithmes basés caractéristiques (Feature Based algorithms FBa) [3], [4]. La première utilise des probabilités et des hypothèses de test d'arguments pour formuler le problème de reconnaissance. Les FBa peuvent être vus comme un cas particulier du problème général de la reconnaissance des formes. Des travaux récents utilisent ces approches de reconnaissance des formes, par exemple, les travaux de Wong

et Nandi [5], Azzouz et Nandi [6] exploitent l'information extraite de l'amplitude et de la phase instantanée du signal reçu et utilise des réseaux de neurones pour classifier certains schémas de modulation linéaire. Une autre caractéristique utilisée pour l'identification de modulations numériques est la transformée en ondelettes (WT) qui a la possibilité d'extraire des caractéristiques transitoires du signal [7], [8]. Les algorithmes à base de statistiques tels que les cumulants ont été proposées dans [9] pour identifier l'ordre de modulations APSK, PSK, et QAM. Dans [11] et [12] des caractéristiques basées sur les cumulants cycliques (CC) de différents ordres ont été proposées en classification de modulation. Ces caractéristiques se sont révélées robustes à un décalage de fréquence porteuse et à un bruit de phase en classification de modulations QAM.

Dans ce papier nous proposons, pour la première fois, l'utilisation d'une caractéristique appelée la " fiabilité " du détecteur de phase extraite de la boucle de récupération de la phase de la porteuse afin de discriminer certaines modulations numériques linéaires. L'accrochage sur la phase de la porteuse est obtenu sans connaissance a priori sur la modulation en utilisant une décision dite hiérarchique 4-QAM quelque soit la constellation reçue. Cette méthode ne nécessite pas la détermination de seuils de décision puisque la modulation est identifiée par recherche de la fiabilité maximale à partir d'un ensemble de détecteurs d'erreur de phase correspondant aux différentes modulations considérées.

2 Courbes en S et variance du détecteur de phase

Les techniques adaptatives de récupération de la phase de la porteuse utilisent couramment des structures bouclées à base de décisions (Decision-Directed Maximum Likelihood Feedback ou DDMLFB) [13, 14] et comprenant un élément crucial appelé détecteur d'erreur de phase (voir Fig. 1). Le détecteur de

phase génère un signal d'erreur $e(k)$ fournissant une mesure de la différence entre la phase de la porteuse $\theta(k)$ et son estimée courante $\hat{\theta}(k)$. Elle sert donc à piloter la boucle qui itérativement cherche le maximum d'une fonction de vraisemblance en gardant l'erreur de phase $\varphi(k) = \theta(k) - \hat{\theta}(k)$ aussi petite que possible. Dans la littérature de nombreux détecteurs de phase

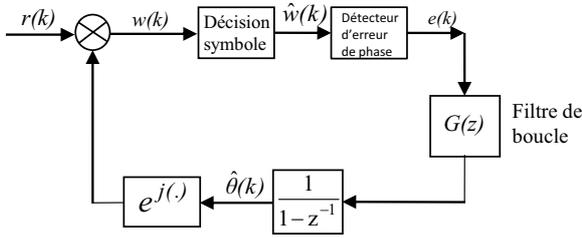


FIGURE 1 – Boucle de phase (PLL) de type DDLMFB

à base de décisions ont été proposés [15]. Dans ce papier nous nous intéressons à celui-ci :

$$e(k) = \text{Im}[c\text{sgn}(w(k))(\hat{w}(k) - w(k))^*] \quad (1)$$

où $w(k) = r_k e^{-j\hat{\theta}(k)}$, $\text{Im}(\cdot)$ représente la partie imaginaire et l'astérisque le complexe conjugué, r_k est le signal complexe échantillonné à l'entrée de la boucle de récupération de la porteuse, $\hat{w}(k)$ est le symbole estimé et $c\text{sgn}(\cdot)$ représente la fonction signe, définie pour des variables complexes par :

$$c\text{sgn}(x) = \text{sgn}(\text{Re}(x)) + j\text{sgn}(\text{Im}(x)).$$

Les courbes en S d'un détecteur de phase (aussi appelées caractéristiques en boucle ouverte) permettent de comprendre comment l'erreur de phase est prise en compte dans la boucle et ainsi de prédire la trajectoire, en moyenne, de l'erreur de phase instantanée. Une telle information est essentielle pour évaluer les performances d'acquisition de la boucle de récupération de la porteuse. La courbe en S, $S(\varphi)$ est définie comme la moyenne de la sortie du détecteur de phase, conditionnelle à une erreur de phase fixée [15] :

$$S(\varphi) = E_{d_k, n_k}[e(k)|\varphi] \quad (2)$$

où $E_{d_k, n_k}[\cdot]$ représente la moyenne statistique sur le couple données d_k et bruit n_k .

$S(\varphi)$ est périodique de période $\pi/2$ pour des constellations QAM et π/M pour des constellations M-PSK et $\varphi = 0$ est la seule solution stable de $S(\varphi) = 0$ sur $[0, \pi/2]$ ($[0, \pi/M]$ pour des M-PSK). La variance du détecteur de phase $\sigma_e^2(\varphi)$ mesure

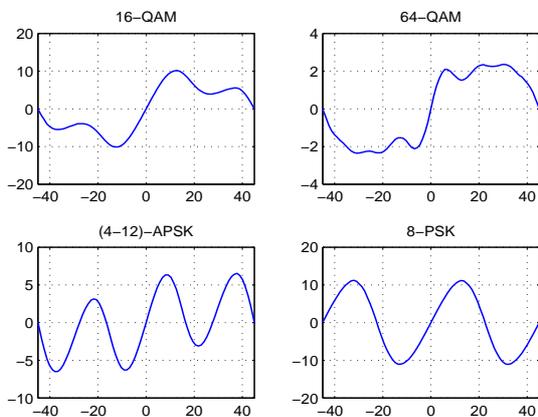


FIGURE 2 – Courbes en S pour différentes constellations normalisées en puissance, $S(\varphi)$ en degrés en fonction de φ en degrés

la puissance des fluctuations de la sortie du détecteur d'erreur

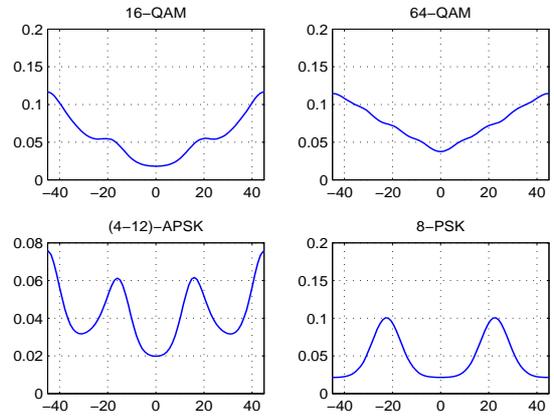


FIGURE 3 – Variations normalisées pour différentes constellations normalisées en puissance, $\frac{\sigma_e^2(\varphi)}{K_e^2}$ en radians en fonction de φ en degrés

de phase autour de sa valeur moyenne dont l'origine provient du bruit additif et des erreurs d'estimation de symboles. Elle se définit comme suit :

$$\begin{aligned} \sigma_e^2(\varphi) &= E_{d_k, n_k}[\{e(k) - S(\varphi)\}^2|\varphi] \\ &= E_{d_k, n_k}[e^2(k)|\varphi] - S^2(\varphi) \end{aligned} \quad (3)$$

Dans ce papier, parmi les constellations les plus souvent utilisées dans les systèmes de communications pratiques, on considère des modulations 16-QAM, 64-QAM, (4-12)-APSK et 8-PSK à puissance normalisée. Pour ces différentes modulations les figures Fig. 2 et Fig. 3 montrent les courbes en S et les variances normalisées (par le gain K_e du détecteur de phase (1) dans la gamme $([-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}])$ pour un rapport signal sur bruit par bit $\frac{E_b}{N_0} = 10 \text{ dB}$. La forme des courbes en S et des variances dépend du format de la modulation, particulièrement la taille de la réponse linéaire et les positions des points d'accrochage stables et instables, lesquels déterminent les performances d'acquisition de la boucle de récupération de la porteuse. On note que la courbe en S dans le cas d'une modulation 64-QAM montre la plus grande variance autour du point d'équilibre stable.

3 Utilisation de la fiabilité du détecteur de phase comme caractéristique de classification de modulation

Nous avons observé, par simulation, qu'une mesure déduite du calcul de la courbe en S et de la variance du détecteur de phase donne une bonne indication sur la modulation présente à l'entrée de la boucle de synchronisation. Cette mesure est appelée la " fiabilité " du détecteur de phase, introduite par D. Mottier [16] comme critère de performances des détecteurs de phase. Cette quantité peut être vue comme un rapport signal sur bruit. Elle est définie comme suit :

$$F(\varphi) = \frac{S^2(\varphi)}{\sigma_e^2(\varphi)}$$

Nous avons tracé en Fig. 4 les fiabilités du détecteur de phase en fonction de l'erreur d'estimation de la phase φ dans l'intervalle $[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}]$ pour $E_b/N_0 = 10 \text{ dB}$, pour une modulation transmise 8-PSK, pour toutes les décisions de symboles correspondant aux différentes modulations considérées, ceci en l'absence de toute information sur le format de modulation dans le signal d'entrée. On peut voir que la fiabilité correspondant à la modulation transmise montre la plus grande valeur, de part

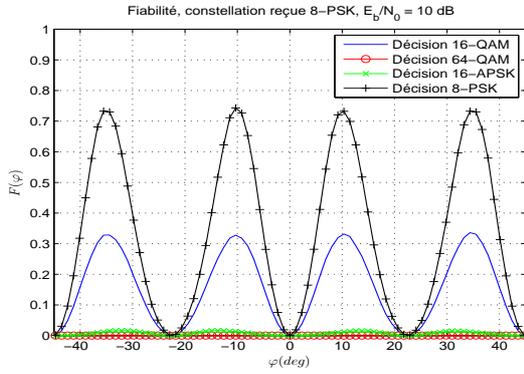


FIGURE 4 – Fiabilité du détecteur de phase pour différentes décisions de constellation.

et d'autre des points d'équilibre stables, aux environs de plus ou moins 10 degrés par exemple. Donc, la fiabilité, en l'observant à $\varphi = 10$ degrés, peut être utilisée comme un indicateur de la modulation présente dans le signal d'entrée. Notons que les mêmes remarques s'appliquent pour les autres schémas de modulations et pour d'autres valeurs de E_b/N_0 , et aussi que la taille du voisinage et la valeur de la fiabilité dans celui-ci sont sensibles au bruit additif particulièrement pour des constellations d'ordre élevé (64-QAM).

4 Classification automatique de modulation

Basée sur cette observation, nous proposons le système d'identification de modulation décrit Fig. 5. En l'absence d'information sur la modulation entrante dans le récepteur, le Détecteur de Phase à Décision Hiérarchique (DPDH) introduit dans [17] est utilisé pour réaliser l'accrochage de phase. Quand cet accrochage de phase est atteint, nous effectuons une rotation du signal $w(k)$ d'un angle φ_δ égal à 10 degrés correspondant à la zone de fiabilité maximale. Comme le montre la Fig. 5 le signal tourné est alors injecté dans un ensemble de détecteurs de phase à décision classique du maximum de vraisemblance ML (DPDC), chacun utilisant une décision de symbole conventionnelle ML pour chaque modulation possible. Les fiabilités des détecteurs de phase $\hat{F}(\varphi_\delta)$ sont estimées (l'estimation est effectuée par un processus de moyennage pondéré utilisant un facteur d'oubli) pour chaque constellation et l'identification de la modulation se fait à partir de la recherche de la valeur maximale dans les fiabilités estimées des détecteurs de phase. Nous supposons la récupération de fréquence et de rythme préalablement établie et que le canal de transmission est un canal à bruit additif blanc gaussien (BABG).

5 Résultats et performances

Pour illustrer le fonctionnement de l'algorithme proposé, considérons une transmission d'un signal à modulation 8-PSK sur 20 000 symboles à $E_b/N_0 = 10$ dB. Dans cette simulation on considère un résidu de fréquence porteuse (Δf) normalisée par le rythme symbole : $\Delta f T_s = 1.10^{-4}$. Une valeur $\varphi_\delta = 10$ degrés est choisie, c'est une valeur pour laquelle la fiabilité du détecteur de phase est proche ou égale à la valeur maximale pour toutes les modulations considérées et aussi pour différents niveaux de bruit. Le tracé de la fiabilité instantanée estimée du détecteur de phase Fig. 7 pour différentes modulations (16-QAM, 64-QAM, 16-APSK et 8-PSK) permet d'observer que la fiabilité estimée du détecteur de phase est maximum pour le dé-

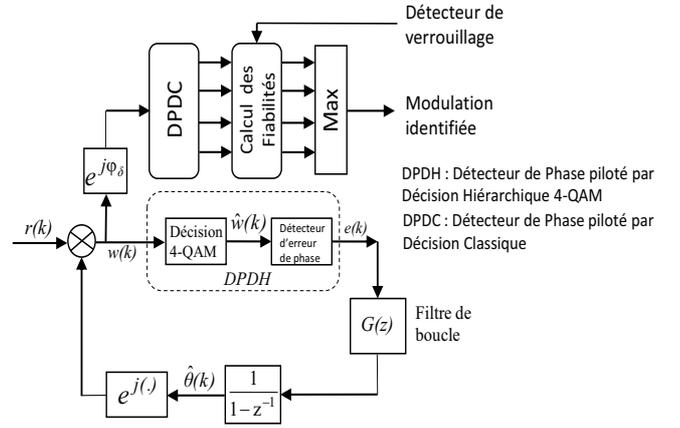


FIGURE 5 – Bloc diagramme du système d'identification de modulation proposé.

tecteur de phase correspondant à la modulation reçue. Comme

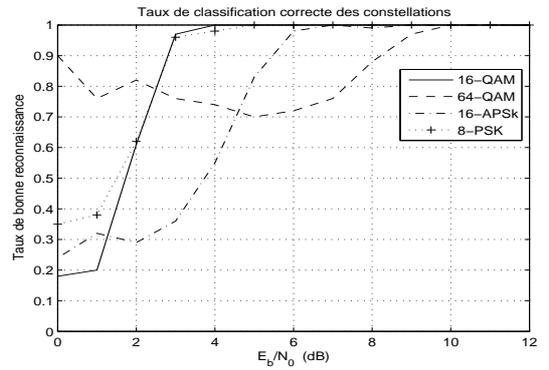


FIGURE 6 – Probabilité estimée de classification correcte, $\varphi_\delta = 10$ deg

mesure de performance, on calcule le pourcentage de bonne classification de la i ème modulation représentant une estimation de la probabilité de bonne reconnaissance de la modulation i lorsque celle-ci est présente dans le signal d'entrée, soit $P_c^{(i/i)}$ cette probabilité. Pour une classification de N_{mod} modulations équiprobables, la probabilité moyenne de bonne classification est donnée par [3] :

$$P_{cc} = \frac{1}{N_{mod}} \sum_{i=1}^{N_{mod}} P_c^{(i/i)} \quad (4)$$

Les probabilités $P_c^{(i/j)}$ ($i, j = 1, \dots, N_{mod}$) définissent les éléments de la matrice $N_{mod} \times N_{mod}$, appelée matrice de confusion. $P_c^{(i/j)}$ est la probabilité de mauvaise reconnaissance correspondant à décider la modulation j lorsque c'est la modulation i qui a été transmise. Evidemment, la probabilité de classification correcte pour une modulation donnée dépend du nombre et du type des modulations candidates.

La Fig. 6 montre la probabilité estimée de classification correcte pour chaque modulation par la méthode d'identification proposée en fonction de E_b/N_0 . La simulation est basée sur 100 tirages, dans chacun desquels 5000 symboles sont utilisés pour estimer la fiabilité du détecteur de phase, un décalage de phase de $\varphi_\delta = 10^\circ$ et un facteur d'oubli de 0.9999 pour l'estimation de la fiabilité ont été choisis. Les résultats montrent que le classifieur proposé atteint 100% de bonne classification pour toutes les modulations choisies pour un E_b/N_0 supérieur à 10 dB. Le classifieur montre une forte probabilité de reconnaissance correcte pour une modulation 64-QAM (supérieure à 70%) pour des faibles valeurs de E_b/N_0 , ceci parce que cette

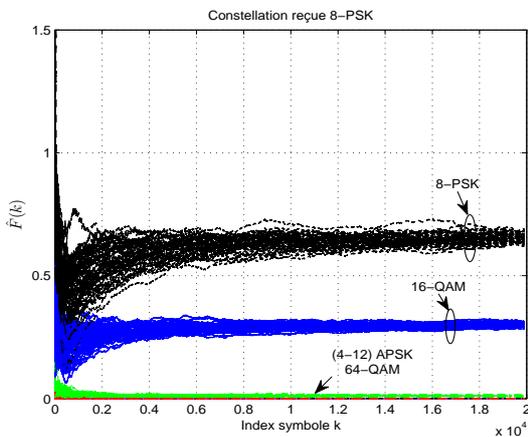


FIGURE 7 – Fiabilité instantanée estimée du détecteur de phase pour différentes décisions de constellations, $\varphi_\delta = 10^\circ$, $E_b/N_0 = 10 \text{ dB}$

modulation présente la plus faible variance des détecteurs de phase (à $\varphi_\delta = 10$ degrés) puisque c'est la constellation la plus dense (la probabilité de prendre une décision 64-QAM est la plus élevée pour des échantillons du signal reçu très bruité). Notons que le classifieur proposé montre une probabilité de 100% de classification correcte pour les modulations 8-PSK et 16-QAM pour $E_b/N_0 \geq 5 \text{ dB}$. En analysant les courbes en S, on observe que ceci est dû à la plus grande valeur de la courbe en S du détecteur de phase qu'ils fournissent à $\varphi_\delta = 10$ degrés pour des valeurs de E_b/N_0 supérieures ou égales à 5 dB. Il est important de noter que le classifieur proposé n'utilise pas de valeurs de seuil pour prendre sa décision de classification. De plus, il n'est pas nécessaire d'estimer le SNR du signal entrant et donc le prétraitement nécessaire pour l'étape de classification est significativement réduit. Notons aussi que nous avons considéré, dans ces simulations, que la détection du verrouillage de phase était fournie par un quelconque détecteur de verrouillage de phase extérieur fonctionnant sans connaissance a priori de la modulation du signal reçu. Le but de ce papier étant avant tout de montrer comment la fiabilité du détecteur de phase peut être utilisée pour extraire de l'information sur le schéma de modulation du signal entrant.

6 Conclusion

La contribution présentée dans ce papier est l'introduction d'un nouvel indicateur de classification de modulation, appelé fiabilité, dérivé du détecteur d'erreur de phase DD. Appliqué à des modulations 64-QAM, 16-QAM, 16-APSK et 8-PSK, l'algorithme proposé montre un bon taux de bonne reconnaissance même en présence de forts niveaux de bruit et de modulations numériques d'ordre élevé, mais pour un jeu de modulations prédéfinies et connues à l'avance. Notre proposition ne nécessite ni l'estimation du SNR ni seuils de décision. Bien que cette étude aie montré des résultats prometteurs pour la classification de certaines modulations, elle mérite des améliorations. Des travaux futurs porteront sur la façon optimale de choisir le décalage de phase φ_δ approprié et aussi sur l'évaluation de l'influence du facteur d'oubli sur la probabilité de bonne classification. D'autres modulations numériques pourront aussi être prises en compte pour analyser les limites de cette approche. La fiabilité du détecteur de phase a été utilisé avec succès pour concevoir un système de récupération de porteuse flexible dans les applications de radio intelligente.

Références

- [1] D. Linda *Essentials of cognitive radio*, Cambridge Wireless Essentials Series, Cambridge University Press, 2009.
- [2] O.A. Dobre, Y. Bar-Ness, *Blind Modulation Classification : A Concept Whose Time Has Come*, IEEE/Sarnoff Symposium, pp. 223-228, April 18-19, 2005.
- [3] O.A. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness, W. Su, *A Survey of Automatic Modulation Classification Techniques : Classical Approaches and New Trends*, IET Commun., vol 1, Issue 2, April 2007.
- [4] S. Bilén, A. Price, O. Azarmanesh, J. Urbina, *Modulation Classification for Radio Interoperability via SDR*, SDR'07 Conference, November 2007.
- [5] M.L.D. Wong, A.K. Nandi, *Automatic digital modulation recognition using spectral and statistical features with multi-layer perceptrons*, Proc. Int. Symp. Signal Processing and its Applications, pp. 390-393, Kuala Lumpur, Malaysia, 2001.
- [6] A.K. Nandi, E.E. Azzouz, *Algorithms for Automatic Modulation Recognition of Communication Signals*, IEEE Trans. on Communications, Vol. 46, No. 4, April 1998.
- [7] K.C. Ho, W. Prokopiw, Y.T. Chan, *Modulation identification of digital signals by the wavelet transform*, IEE Proc., Radar, Sonar Navig., Vol. 47, pp. 169-176, 2000.
- [8] P. Prakasam, M. Madheswaran, *Modulation Identification Algorithm for Adaptive Demodulator in Software Defined Radios Using Wavelet Transform*, International Journal of Signal Processing, pp. 74-81, 2009.
- [9] A. Swami, B.M. Sadler, *Hierarchical digital modulation classification using cumulants*, IEEE Trans. on Communications, Vol. 48, pp. 416-429, 2000.
- [10] W. Dai, Y. Wang, J. Wang, *Joint power and modulation classification using second and higher statistics*, Proc. WCNC, pp. 155-158, 2002.
- [11] O.A. Dobre, Y. Bar-Ness, W. Su, *Higher-order cyclic cumulants for high order modulation classification*, Proc. IEEE MILCOM, pp. 112-117, 2003.
- [12] O.A. Dobre, Y. Bar-Ness, W. Su, *Robust QAM modulation classification algorithm based on cyclic cumulants* Proc. WCNC, pp. 745-748, 2004.
- [13] F.M. Gardner, *Demodulator Reference Recovery Techniques Suited For Digital Implementation*, European Space Agency, Final Report, ESTEC Contract No. 6847/86/NL/DG, August 1988.
- [14] T. Jesupret, M. Moeneclaey, G. Ascheid, *Digital Demodulator Synchronization Performance Analysis*, European Space Agency, Final Report, ESTEC Contract No. 8437/89/NL/RE, June 1991.
- [15] A. Leclert, P. Vandamme, *Universal carrier recovery loop for QASK and PSK signal sets*, IEEE Trans. on Communications, vol. COM-31, pp. 130-136, January 1983.
- [16] D. Mottier, *Associations des fonctions d'égalisation, de synchronisation et de décodage canal pour les transmissions numériques à grande efficacité spectrale*, Ph.D thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 1997.
- [17] A. Metref, D. Le Guennec, J. Palicot, *A Carrier Recovery loop for Cognitive Radio Applications*, Circuits, Systems and Signal Processing Journal (CSSP), Volume 30, Issue 4, 2011, pp. 847-870, DOI : 10.1007/s00034-011-9307-8.