

Comparaison des performances de différentes techniques de détection appliquées à un signal AMRC à porteuses multiples dans un canal de Rayleigh

Jean-Yves BAUDAIS, Jean-François HELARD, Jacques CITERNE

INSA/LCST, UPRESA CNRS 6075
20 Avenue des Buttes de Coësmes, CS 14315, 35043 Rennes Cedex, France

jean-yves.baudais@insa-rennes.fr, jean-francois.helard@insa-rennes.fr
jacques.citerne@insa-rennes.fr

Résumé – Ce papier traite de la comparaison de différentes techniques de détection appliquées à un signal AMRC à porteuses multiples dans un canal de Rayleigh. Les résultats obtenus montrent que les techniques de détection multi-utilisateurs à annulation d’interférences offrent un bon compromis performances / complexité.

Abstract – The combination of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) with Code Division Multiple Access (CDMA) systems is analysed in this paper. The simulation results show that interference cancellation multi-user detection techniques could be a good compromise between performance and complexity.

1. Introduction

Le développement de systèmes permettant le transfert de données multimédia à haut débit pour un grand nombre d’utilisateurs simultanés est primordiale pour les générations futures de communications hertziennes. C’est dans ce contexte que s’inscrit cette étude traitant de la combinaison des techniques d’étalement de spectre et des modulations à porteuses multiples.

Les techniques d’étalement de spectre ont des propriétés bien connues actuellement : immunité face aux distorsions apportées par les trajets multiples du canal, faible puissance d’émission, capacité d’accès multiples. La fonction d’étalement de spectre peut être réalisée par séquence directe (Direct Sequence Code Division Multiple Access ou DS-CDMA), un code d’étalement étant attribué à chaque utilisateur. Les performances de ces systèmes dépendent des propriétés d’inter et d’autocorrélation des codes choisis, du nombre d’utilisateurs et donc du nombre de codes partageant la même bande de fréquence. En présence de propagation à trajets multiples, on utilise généralement des récepteurs du type RAKE qui cherchent à tirer profit de la diversité par combinaison de trajets. Les performances obtenues dépendent fortement du nombre de branches du récepteur RAKE [1]. Ce nombre est généralement limité à quelques unités (4 à 6) pour des raisons de complexité de mise en œuvre. C’est pourquoi la difficulté principale en DS-CDMA est d’exploiter toute l’énergie diffusée dans le domaine temporel et de travailler avec tous les utilisateurs.

Par ailleurs, les modulations à porteuses multiples orthogonales, connues sous le nom de OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), sont bien adaptées pour des applications à haut débit, comme la télédiffusion numérique. Elles ont l’avantage d’être particulièrement robustes face aux perturbations apportées par les canaux sélectifs en fréquence. Le principe de base, maintenant bien connu, consiste à répar-

tir l’information à transmettre sur un grand nombre de porteuses modulées à bas débit, afin de réduire la sélectivité en fréquence du canal. L’insertion au début de chaque symbole d’un intervalle de garde de durée supérieure à l’étalement de la réponse impulsionnelle du canal, permet de s’affranchir de l’interférence intersymbole résiduelle. De plus, les modulations à porteuses multiples offrent une grande efficacité spectrale, obtenue grâce au recouvrement des différents spectres des sous-porteuses, qui cependant vérifient des conditions d’orthogonalité qui rendent l’interférence entre porteuses inexistante. Après s’être imposée en Europe grâce à ses qualités intrinsèques dans le domaine de la radiodiffusion sonore numérique (Digital Audio Broadcasting ou DAB) [2], la technique OFDM a été retenue pour la diffusion terrestre de la télévision numérique européenne [3] et, dans le même temps, est devenue sous l’acronyme DMT (Discrete Multi-Tone) la base d’un standard mondial pour les systèmes ADSL.

Les avantages et le succès des modulations à porteuses multiples et de l’Accès Multiple par Répartition de Codes (AMRC), s’appuyant sur les techniques d’étalement de spectre, ont conduit les chercheurs à combiner ces deux techniques afin de tirer parti des points forts de chacune d’elles. Depuis 1993, trois combinaisons connues sous le nom générique de modulations à porteuses multiples et à spectre étalé ont été proposées : l’AMRC multiporteuses ou MC-CDMA (Multi-Carrier CDMA), l’AMRC multipilotes ou MT-CDMA (Multi-Tone CDMA) et l’AMRC multiporteuses à séquence directe ou MC-DS-CDMA (Multi-Carrier Direct Sequence CDMA). Elles se distinguent par la manière dont elles combinent les fonctions multiporteuses et l’accès multiple par répartition de codes [4]. Cet article porte sur l’étude de la première de ces structures, l’AMRC multiporteuses ou MC-CDMA, qui réalise l’opération d’étalement de spectre dans le domaine fréquentiel avant l’opération de modulation OFDM. En particulier, les performances de différentes techniques de

détection appliquées à un signal MC-CDMA en voie descendante sont comparées dans un canal de Rayleigh.

2. Le signal MC-CDMA

Dans le modulateur MC-CDMA représenté sur la figure 1, le flux de données est tout d'abord étalé dans le domaine fréquentiel en utilisant un code d'étalement, puis transmis sur les différentes sous-porteuses du multiplex OFDM. Une fraction de chaque donnée d'origine, correspondant à un chip du code d'étalement de longueur L , est ainsi transmise par chacune des N sous-porteuses.

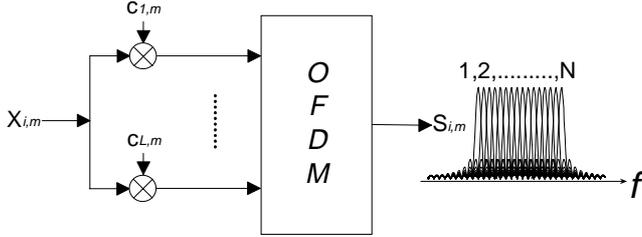


FIG. 1 : modulateur MC-CDMA du $m^{\text{ème}}$ utilisateur, et spectre du signal émis.

Dans le cas d'une liaison descendante où les différents signaux s'adressant aux différents utilisateurs sont émis de façon synchrone, les codes utilisés sont généralement choisis orthogonaux, ce qui permet d'obtenir en réception une meilleure réjection des interférences entre utilisateurs. Ainsi, avec des codes de Walsh-Hadamard, le nombre maximal d'utilisateurs est égal au nombre de chips par code. Généralement, le nombre L de chips du code d'étalement est choisi égal au nombre N de sous-porteuses mais des variantes sont possibles pour mieux adapter le signal au canal.

Dans le cas de liaisons descendantes, les différents signaux s'adressant aux différents utilisateurs peuvent être sommés « chip à chip » juste après la fonction d'étalement. Le symbole ainsi constitué de la superposition des séquences d'étalement est ensuite transformé en un symbole OFDM par une opération de Transformée de Fourier Inverse.

3. Les techniques de détection

3.1 Les techniques de détection mono-utilisateurs

Dans un récepteur MC-CDMA, le désétalement est réalisé dans le domaine fréquentiel après l'opération de Transformée de Fourier Directe. L'utilisation de codes orthogonaux, tels que les codes de Walsh-Hadamard dans le cas d'un système synchrone, garantit dans un canal parfait l'absence d'interférences d'accès multiple. En revanche, lors d'une transmission dans un canal sélectif en fréquence, l'orthogonalité entre les codes est détruite ce qui crée une interférence entre utilisateurs. Dans l'hypothèse où la durée de l'intervalle de garde est plus longue que l'étalement de la réponse impulsionnelle du canal, et que celui-ci varie lentement par rapport à la durée du symbole, l'effet du canal sur la $k^{\text{ème}}$ sous-porteuse peut être approximé sur toute la durée symbole par $H_k = \rho_k e^{j\theta_k}$. Le nombre N de sous-porteuses doit donc être choisi suffi-

samment grand pour garantir la non-sélectivité en fréquence du canal sur chacune de ces sous-porteuses. Les techniques de détection mono-utilisateur consistent à détecter le signal utile sans prendre en compte l'interférence entre utilisateurs. Après l'opération de Transformée de Fourier Directe, le signal reçu est égalisé dans le domaine fréquentiel en multipliant chaque symbole reçu par un coefficient G_k propre à chaque sous-porteuse, dans le but de compenser l'atténuation ρ_k et le déphasage θ_k introduit par le canal à la fréquence considérée. Les différentes méthodes de détection sont les suivantes :

- **Maximum Ratio Combining (MRC)** : la méthode MRC est optimale vis à vis du taux d'erreurs dans le cas où un seul utilisateur est actif. Elle consiste à multiplier chaque symbole par la réponse complexe conjuguée du canal :

$$G_k = H_k^* \quad (1)$$

- **Equal Gain Combining (EGC)** : la technique de détection EGC corrige uniquement la distorsion de phase du canal :

$$G_k = H_k^* / |H_k| \quad (2)$$

- **Orthogonality Restoring Combining (ORC) ou Zero Forcing (ZF)** : la technique ORC permet d'éliminer intégralement l'interférence entre utilisateurs en restituant l'orthogonalité entre les différents codes d'étalement. Dans ce cas, les coefficients sont égaux à :

$$G_k = 1 / H_k \quad (3)$$

Cependant, le principal inconvénient de cette méthode est que, pour les faibles amplitudes de H_k , la multiplication par une fonction inverse du canal se traduit par une forte amplification du bruit, ce qui dégrade rapidement le taux d'erreurs.

- **Controlled equalization (CE) ou Threshold ORC (TORC)** : la technique CE consiste à multiplier le signal reçu par la fonction inverse du canal uniquement lorsque le module $|H_k|$ de la réponse fréquentielle du canal pour la porteuse considérée dépasse un certain seuil. Une amélioration de ce procédé peut être obtenue en appliquant l'EGC pour les porteuses ayant été fortement atténuées, ce qui permet de compenser la distorsion de phase du canal pour les sous-porteuses considérées.

- **Minimum Mean Square Error (MMSE) equalization** : l'égalisation selon le critère MMSE a pour but de minimiser la valeur quadratique moyenne de l'erreur entre le vecteur \mathbf{S} du signal transmis et son estimation $\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{G}\mathbf{R}$ générée en sortie de l'égaliseur :

$$J = E \left\{ |\boldsymbol{\varepsilon}|^2 \right\} = E \left\{ |\mathbf{S} - \mathbf{G}\mathbf{R}|^2 \right\} \quad (4)$$

où $\mathbf{R} = (R_1, \dots, R_k, \dots, R_N)$ et $\mathbf{G} = (G_1, \dots, G_k, \dots, G_N)$ sont respectivement le vecteur symbole restitué en sortie de la FFT et le vecteur de gain de l'égaliseur.

Cette erreur quadratique moyenne J est minimale lorsque les gains G_k de l'égaliseur sont tels que le signal reçu et le signal d'erreur sont orthogonaux, ce qui signifie que :

$$E \left\{ \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{R}^{*T} \right\} = 0 \quad (5)$$

Lorsque le nombre d'utilisateurs est égal à la longueur L du code, il en résulte que les coefficients optimaux de l'égalisation

seur selon le critère de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne sont égaux à :

$$G_k = \frac{H_k^*}{|H_k|^2 + 1/\gamma_k} \quad (6)$$

où γ_k est le rapport signal à bruit pour la sous-porteuse k .

Pour les faibles valeurs de $|H_k|$, le coefficient d'égalisation est faible, ce qui évite une amplification excessive du bruit. En revanche, pour les fortes valeurs de $|H_k|$, le facteur de correction est proportionnel à l'inverse $1/|H_k|$ de la réponse du canal, dans le but de restituer complètement l'orthogonalité entre les utilisateurs. Le calcul exact de ces coefficients nécessite d'estimer le rapport signal à bruit pour chaque sous-porteuse. Pour éviter cette complexité supplémentaire, une solution appelée MMSE sous-optimale consiste à fixer le rapport signal à bruit γ_k égal à une constante λ pour laquelle avec l'égalisation optimale MMSE, on obtient le taux d'erreur maximal acceptable.

3.2 Les techniques de détection multi-utilisateurs

Ces techniques de détection s'appuient sur l'hypothèse importante que les différents codes d'étalement des multiples utilisateurs sont connus du récepteur. Il existe principalement deux grandes catégories de détecteurs : les détecteurs à maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Detectors MLD) et les détecteurs à annulation d'interférences.

S'appuyant sur le critère du maximum de vraisemblance, les détecteurs MLD sont optimaux mais leur complexité augmente de façon exponentielle avec le nombre d'utilisateurs et avec la longueur des séquences d'étalement. Ceci explique que cette méthode n'est applicable que seulement lorsque les codes d'étalement sont courts.

Les détecteurs à annulation d'interférence de type parallèle ou série cherchent à estimer l'interférence due aux autres signaux afin de retrancher cette interférence multi-utilisateur du signal reçu. Ce procédé peut être mis en œuvre de façon itérative, à l'aide de plusieurs étages de détection successifs. Différentes techniques de détection peuvent ainsi être combinées dans les différents étages.

4. Avec un codage de canal convolutif

Selon le critère du maximum de vraisemblance, les pondérations à présenter à l'entrée d'un décodeur de Viterbi sont données par le rapport du logarithme de vraisemblance :

$$L_i = \ln \left(\frac{P(X_i = +1/Y_i)}{P(X_i = -1/Y_i)} \right) \quad (7)$$

où $X_i \in [-1, +1]$, est l'une des deux composantes I ou Q codées indépendamment du symbole MDP4 transmis, et Y_i est le symbole correspondant reçu affecté par une atténuation ρ_k . En présence d'évanouissements non sélectifs en fréquence sur chaque sous-porteuse k d'un multiplex OFDM "classique" et d'un bruit blanc gaussien d'écart-type σ , la probabilité d'occurrence $P(Y_i/X_i)$ s'écrit :

$$P(Y_i/X_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma^2} (Y_i - \rho_k X_i)^2 \right\} \quad (8)$$

En utilisant (7), (8) et la loi de Bayes, le rapport du logarithme de vraisemblance pour un système OFDM/MDP4 "classique" devient égal à :

$$L_i = \ln \left(\frac{P(Y_i/X_i = +1)}{P(Y_i/X_i = -1)} \right) = \ln \left(\frac{\exp \left\{ -\frac{1}{\sigma^2} (Y_i - \rho_k)^2 \right\}}{\exp \left\{ -\frac{1}{\sigma^2} (Y_i + \rho_k)^2 \right\}} \right) = 4Y_i \frac{\rho_k}{\sigma^2} \quad (9)$$

En MC-CDMA, où chaque donnée est multipliée par la séquence d'étalement puis transmise en parallèle sur les N sous-porteuses affectées par des processus de Rayleigh indépendants, une valeur approchée du rapport de vraisemblance est donnée par :

$$L_i = \frac{4}{\sigma^2} \frac{\sum_{k=1}^N \rho_k Y_i}{N} \quad (10)$$

5. Les résultats de simulation

La modulation utilisée est une MDP4 et les codes d'étalement sont des codes de Walsh-Hadamard. Le canal est modélisé dans le domaine fréquentiel par N sous-canaux correspondant aux N sous-porteuses du multiplex OFDM affectées par des processus de Rayleigh indépendants. L'effet du canal peut être ainsi approximé sous les conditions que l'absence d'interférences intersymboles et interporteuses puissent être garantie et qu'un entrelacement fréquentiel et temporel appropriés soient utilisés. L'estimation de la réponse fréquentielle du canal pour chacune des sous-porteuses est supposée parfaite. La figure 1 regroupe les performances de différentes techniques de détection mono-utilisateurs pour un système MC-CDMA à 64 porteuses avec $N = L = K_u = 64$, où K_u est le nombre d'utilisateurs. Ces différents résultats ne prennent pas en compte la perte d'efficacité en puissance due à l'intervalle de garde.

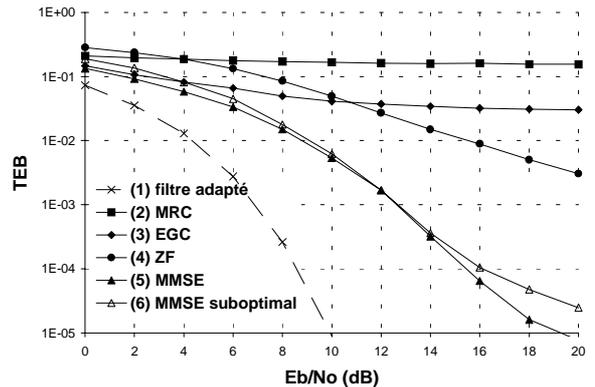


Fig.2 : performances des récepteurs mono-utilisateurs.

La courbe (1) représente les performances obtenues dans le cas idéal de l'annulation des interférences d'accès multiples. Cette borne, appelée performances du système idéal MC-CDMA à filtre adapté, correspond à la probabilité d'erreur obtenue en présence d'un utilisateur dans le cas d'une transmission sur un nombre N de canaux de Rayleigh statistiquement indépendants, avec en réception la mise en œuvre de la technique MRC. Lorsque le nombre N de sous-porteuses augmente, cette borne tend vers les performances obtenues

sur canal Gaussien. Elle est ici donnée pour $N = 64$. La technique ORC ou ZF -courbe (4)- rétablit l'orthogonalité entre les différents signaux et évite ainsi l'interférence inter-utilisateurs, mais au prix d'une amplification importante du bruit, en particulier pour les faibles rapports E_b/N_0 . Les performances les plus mauvaises sont obtenues à pleine charge avec la technique MRC -courbe (2)- qui accentue l'interférence inter-utilisateurs. La détection selon le critère de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE) -courbe (5)- offre les meilleurs résultats, mais elle nécessite d'estimer le rapport signal à bruit. Une alternative possible est de mettre en œuvre une égalisation dite MMSE sous-optimale -courbe (6)- pour laquelle le rapport signal à bruit n'est plus estimé mais fixé à une valeur donnée qui, dans ce cas, a été choisie égale à 12,6 dB.

Les résultats obtenus pour différentes techniques de détection multi-utilisateurs à annulation d'interférences sont présentés sur la figure 3 pour $N = L = K_u = 8$.

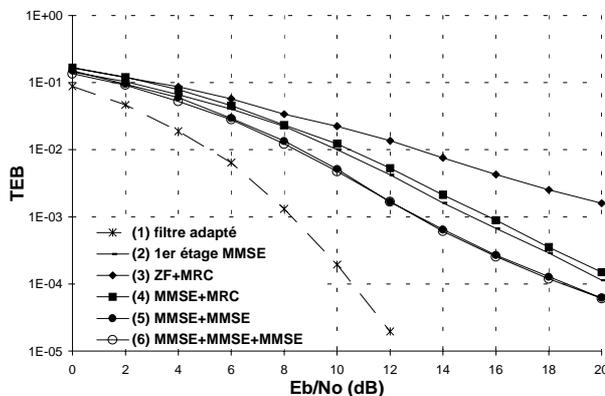


Fig.3 : performances des récepteurs multi-utilisateurs.

L'opération d'annulation d'interférences est réalisée de façon parallèle avec un premier étage de détection mono-utilisateur suivi par plusieurs étages d'annulation d'interférences. Dans l'étage initial, les données des utilisateurs actifs sont détectées en parallèle, les étages suivants travaillent itérativement en utilisant les décisions de l'étage précédent pour estimer la contribution de l'interférence dans le signal. L'interférence obtenue est soustraite au signal reçu, et la détection est améliorée par réduction successive des interférences d'accès multiple.

La combinaison de la technique ZF au premier étage avec la technique MRC au second semble théoriquement intéressante [5]. Le premier étage ZF permet de restaurer l'orthogonalité entre les codes et donc de présenter au second étage un signal très approprié à la technique MRC, puisque sans interférences inter-utilisateurs. Cependant -courbe (3)-, la forte amplification du bruit générée par la technique de détection du premier étage introduit des erreurs de décision et les performances du second étage restent faibles devant les performances obtenues avec un seul étage MMSE -courbe (2)-, [6].

L'utilisation de la technique MMSE aux deux étages donne les meilleurs résultats -courbe (5)-, le deuxième étage améliorant de 2 dB pour un TEB de 10^{-3} les performances du premier. L'introduction d'un troisième étage de détection -courbe (6)- augmente la complexité du récepteur et n'améliore que très faiblement les performances (gain $< 0,1$ dB).

La figure 4 illustre les performances d'un système MC-CDMA à 8 porteuses (avec $N = L = K_u = 8$) obtenues dans le cas d'une détection MMSE simple avec un code convolutif à 64 états, de rendement $R = 1/2$ et de polynômes générateurs 133 et 171. L'optimisation de la génération des métriques d'échantillons à l'entrée du décodeur de Viterbi conformément à (10) permet d'obtenir en décision douce une amélioration des performances de 3 dB pour un TEB = 10^{-4} par rapport à la courbe en décision dure.

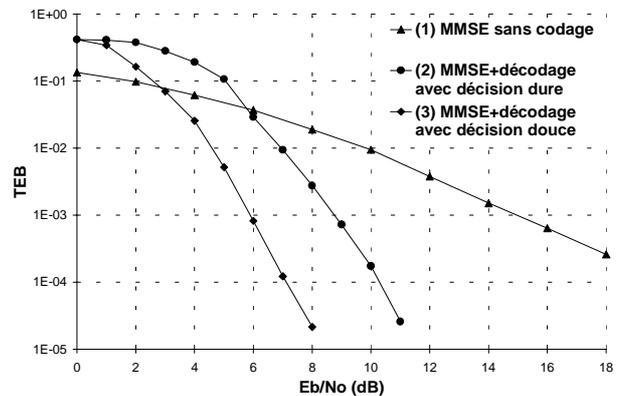


Fig.4 : performances des récepteurs MMSE avec codage.

6. Conclusion

Différentes techniques de détection appliquées à un signal MC-CDMA ont été analysées et comparées pour des communications en liaisons descendantes synchrones sur un canal sélectif en fréquence. Les résultats obtenus montrent que l'égalisation basée sur le critère de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne offre les meilleures performances en détection mono-utilisateur comme en détection multi-utilisateurs à annulation d'interférences.

Références

- [1] G.L. Turin, « *Introduction to Spread-Spectrum Antimultipath Techniques and Their Application to Urban Digital Radio* », Proceedings of the IEEE, vol 68, n°3, pp 328-353, mars 1980.
- [2] B. Le Floch, J-F. Héland, R. Halbert, J-M. Lemesle, « *Modulation et codage de canal pour la radiodiffusion sonore numérique vers les mobiles* », Colloque GRETSI Juan-Les-Pins, 12-16 juin 1989.
- [3] ETSI ETS 300 744, « *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television (DVB-T)* », mars 1997.
- [4] S. Hara, R. Prasad, « *Overview of multicarrier CDMA* », IEEE Communications Magazine, pp 126-133, déc. 1997.
- [5] S. Hara, T-H. Lee, R. Prasad, « *BER Comparison of DS-SS-CDMA and MC-CDMA for Frequency Selective Fading Channels* », Signal Processing in Telecommunications, pp 3-14, sept. 1995.
- [6] S. Kaiser, « *On the Performance of Different Detection Techniques for OFDM-CDMA in Fading Channels* », IEEE GLOBECOM'95, pp 2059-2063, nov. 1995.