

Performance du récepteur RAKE pour des applications de communications discrètes à travers un canal acoustique sous-marin

Karim OUERTANI¹, Samir SAOUDI¹, Mahmoud AMMAR², Sébastien HOUCKE¹

¹Ecole Nat. Sup. des Télécommunications de Bretagne
Département Signal et Communications
Technopôle Brest Iroise - CS 83818 - 29238 Brest, France

²Ecole Nat. d'Ingénieurs de Tunis
Département des Technologies de l'Information et de la Communication
BP 37 le Belvédère - 1002 Tunis, Tunisie

Karim.Ouertani@enst-bretagne.fr, Samir.Saoudi@enst-bretagne.fr
Mahmoud.Ammar@enit.rnu.tn, Sebastien.Houcke@enst-bretagne.fr

Résumé – Dans cet article, on se propose d'étudier les performances d'un récepteur RAKE avec estimation de canal pour des applications de transmissions multi-utilisateurs discrètes à travers un canal acoustique sous-marin. Les simulations de la chaîne complète de transmission avec codage canal seront présentées, ainsi que les résultats de dépouillement des données réelles enregistrées en mer pour l'optimisation des paramètres d'estimation du canal.

Abstract – This paper deals with the RAKE receiver performances in the case of a multiuser underwater communication with low probability of intercept (LPI). Computer simulation results are presented for a multiuser coded transmission over an underwater multipath channel. Results from actual data field tests are also presented.

1 Introduction

La technologie d'accès multiple à répartition par code (AMRC) avec étalement par séquence directe ou DS-CDMA pour la dénomination anglaise s'est affirmée comme la technologie de troisième génération pour les systèmes de communication radio mobiles multi-utilisateurs à travers les canaux multi-trajets [1]. C'est naturellement que l'utilisation de la technologie DS-CDMA s'est étendu pour le canal sous-marin qui est un canal à trajets multiple. Ces trajets multiple provoquent des évanouissement en réception et les divers mouvements de la surface et des transducteurs induisent de l'effet Doppler. Plusieurs travaux antérieurs [2]- [4] ont traité le problème des communications acoustiques sous-marine pour des transmissions multi-utilisateurs. Différentes techniques de détection multi-utilisateurs ont ainsi été introduites. Des récepteurs tels que le récepteur RAKE, le récepteur à annulation d'interférence, le détecteur à base de filtre MMSE ont été présenté et leurs performances analysées.

Dans cet article, nous présentons les performances d'un système de communication à base de RAKE pour des transmissions multi-utilisateurs à travers un canal acoustique sous-marin. Le travail proposé dans cet article était soutenu par un contrat industriel [5] en partenariat avec le groupe d'études sous-marine de l'Atlantique (GESMA) pour la réalisation d'un système de communication multi-utilisateurs sous-marin, pour la transmission de courts messages avec un faible débit (10 bits/s minimum).

Deux contraintes majeures doivent être respectées par ce système. La première est la discrétion des communications, i.e. que toutes les transmissions doivent s'effectuer à un rapport signal sur bruit négatif, le signal se trouve donc noyé dans le bruit et devient indétectable. La deuxième contrainte est relative à la performance du système qui doit garantir un taux d'erreurs binaires maximum de 10^{-3} à un rapport signal sur bruit de -10 dB [5].

Une campagne d'expérimentation en mer a été réalisé sur deux sites : au large de Toulon et à la rade de Brest pour les test et la validation du système implémenté.

Après le dépouillement et l'analyse des données réelles enregistrées, nous avons introduit de nouveaux paramètres au niveau de l'estimateur de canal qui permettent de tenir compte des fluctuations rapides du canal sous-marin sans augmenter la complexité de traitement. L'optimisation de ces paramètres est réalisé grâce aux données réelles, les résultats obtenus sont présentés et analysés. Nous avons également procédé à une validation des performances du système avec des simulations sur un canal synthétique. Dans un second temps, afin d'améliorer les performances, nous avons introduit du codage canal avec un code en bloc correcteur d'erreurs. Les résultats de simulations obtenus sont présentés pour la chaîne de transmissions complète avec estimation de canal sans codage et avec codage de canal.

2 Description du système

2.1 Modèle de l'émetteur

On considère une communication avec K utilisateurs actifs. Chaque utilisateur transmet une trame de longueur $P = 144$ symboles durant une période de $T_t = 9.6$ s. Pour chaque utilisateur on définit un canal pour la transmission des symboles de données (voie I) et un canal pour la transmission des symboles pilotes (voie Q). Pour chaque branche les symboles sont modulés avec une modulation BPSK et étalé au rythme chip avec une séquence d'étalement de Walsh $s_k(t)$ de longueur $SF = 256$. Le signal étalé est convolué avec un code de brouillage complexe C_{sc_k} de longueur $P * SF$. Le code de brouillage est un code Gold complexe. Deux codes de Walsh orthogonaux $s_{[I]k}$ et $s_{[Q]k}$ sont utilisés respectivement pour l'étalement de la voie de données I et la voie pilote Q.

Par simplification, on considère le signal transmis du $k^{\text{ème}}$ utilisateur comme suit

$$x_k(t) = A_k \sum_{i=0}^{P-1} b_k(i) s_k(t - iT) C_{sc_k}(t - iT_c) \quad (1)$$

où A_k est l'amplitude du signal, T et T_c sont respectivement la durée symbole et la durée chip.

La fonction de transfert du canal considéré, pour le $k^{\text{ème}}$ utilisateur s'écrit comme suit

$$h_k(t) = \sum_{l=1}^L c_{k,l}(i) \delta(t - \tau_{k,l}) \quad (2)$$

où les $c_{k,l}$ définissent les coefficients du canal et $\tau_{k,l}$ les retards de propagation pour l'utilisateur k et le trajet l . L est le nombre de trajets multiple considéré.

Le signal reçu, pour le $k^{\text{ème}}$ utilisateur, est la convolution du signal transmis avec la réponse du canal, il est exprimé par

$$r_k(t) = x_k(t) * h_k(t)$$

$$r_k(t) = A_k \sum_{i=0}^{P-1} b_k(i) \sum_{l=1}^L c_{k,l}(i) s_k(t - iT - \tau_{k,l}) C_{sc_k}(t - iT_c) \quad (3)$$

Le signal reçu est la superposition des signaux des K utilisateurs plus un bruit blanc additif Gaussien

$$r(t) = \sum_{k=1}^K r_k(t) + w(t) \quad (4)$$

$w(t)$ est un bruit blanc Gaussien complexe de moyenne nulle et de densité spectrale de puissance σ^2 . Pour les canaux multi-trajets à évanouissement variant dans le temps, les coefficients $c_{k,l}$ sont modélisés par un processus Gaussien complexe de moyenne nulle suivant le modèle de Jakes.

2.2 Le récepteur RAKE

Une fois les retards de propagation et les coefficients du canal estimés, le récepteur RAKE combine de façon cohérente les contributions des différents trajets en utilisant un banc de filtre adapté à la forme d'onde de l'utilisateur

dont on désire détecter le signal. A la sortie du récepteur on obtient la statistique suivante

$$y_{k,l}(i) = \int_{iT+\hat{\tau}_{k,l}}^{(i+1)T+\hat{\tau}_{k,l}} r(t) s_k(t - iT + \hat{\tau}_{k,l}) C_{sc_k}^*(t - iT_c) dt \quad (5)$$

$$l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, K \text{ et } i = 0, \dots, P - 1$$

où $C_{sc_k}^*(t)$ est le conjugué du code de brouillage pour le $k^{\text{ème}}$ utilisateur. La recombinaison cohérente (MRC) maximise le rapport signal sur bruit au niveau du récepteur. L'atténuation introduite au cours de la propagation du signal est corrigée grâce aux estimés des coefficients du canal, comme le montre l'équation 6

$$y_{[MRC]k}(i) = \sum_{l=1}^L y_{k,l}(i) c_{k,l}^*(i) \quad (6)$$

$c_{k,l}^*(i)$ est le conjugué du coefficient de canal estimé pour l'utilisateur k et le trajet l .

La figure 1 montre la structure d'un récepteur RAKE basé sur la recombinaison cohérente. L'estimée de la valeur du symbole transmis est donné par

$$\hat{b}_k(i) = \text{sign} \left[\Re \left\{ \sum_{l=1}^L y_{k,l}(i) c_{k,l}^*(i) \right\} \right] \quad (7)$$

$$k = 1, \dots, K \text{ et } i = 0, \dots, P - 1$$

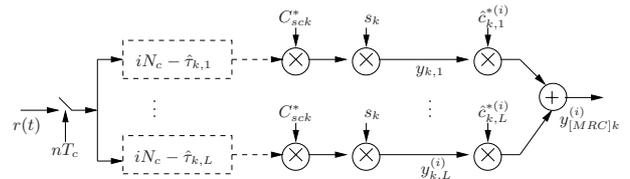


FIG. 1 – Structure du récepteur RAKE

3 Résultats de simulations

Le canal acoustique est un canal multi-trajets à évanouissement qui introduit des atténuations et des retards sur le signal transmis au cours de la propagation. Pour que la recombinaison des trajets multiple au niveau du récepteur RAKE soit efficace il faut que les retards de propagations et les coefficients du canal soient d'abord estimés. L'estimateur de canal que nous avons utilisé est basé sur la corrélation du signal reçu avec le code d'étalement de la voie pilote Q convolué avec le code de brouillage (signature complexe). Tous les symboles de la séquence pilote transmise sont mis à '1' ainsi les valeurs des retards de propagation et des coefficients du canal peuvent être estimés directement à partir de la voie pilote. Une recherche exhaustive des retards de propagation est alors opérée à l'intérieur d'une fenêtre de recherche des trajets, en utilisant un banc de τ_{max} corrélateurs. τ_{max} étant le retard maximal pouvant être introduit par le canal. Les retards qui donnent le maximum de corrélation sont sélectionnés comme étant les trajets de propagation. Il s'agit de faire du filtrage adapté du signal reçu avec la forme d'onde du signal de la voie pilote. La sortie des filtres adaptés

donnent le profil de puissance des différents trajets du canal. La figure 2 montre un exemple de résultat du filtrage adapté entre le signal reçu avec la signature complexe de la voie pilote pour l'utilisateur 1, pour une transmission réelle réalisé au large de Toulon. La taille de la fenêtre de recherche considéré est $\tau_{max} = 15$ ms.

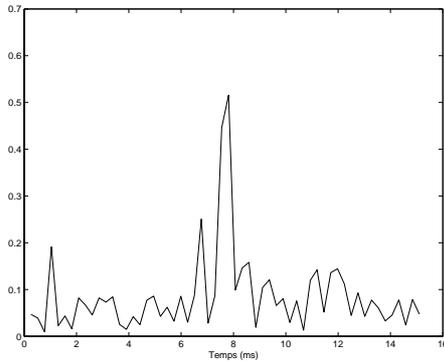


FIG. 2 – Résultat du filtrage adapté pour l'utilisateur 1 avec une fenêtre de 15 ms - essai au large de Toulon

Les L trajets ayant les pics de corrélation les plus puissants sont sélectionnés

$$\hat{\tau}_{k,l} = \underset{t=0 \dots \tau_{max}}{\operatorname{argmax}} \left(\|y_{kl}(t)\|^2 \right) \quad (8)$$

On a considéré $L = 6$ trajets de propagation durant les simulations. Le nombre de trajets significatifs porteurs d'énergie peut varier selon la zone géographique d'immersion des transducteurs, on observe par exemple dans la figure 2 qu'en méditerranée au large de Toulon, seulement 3 trajets significatifs peuvent être sélectionnés.

Une fois les retards des trajets estimés, ils sont utilisés pour calculer les coefficients du canal, supposés constant pendant la durée d'un temps symbole, comme suit

$$\Re(\hat{c}_{kl}) = \Im \left(\int_{iT_s + \hat{\tau}_{kl}}^{(i+1)T_s + \hat{\tau}_{kl}} r_{k,l} s_k(t - iT_s) c_{sc_k}^*(t - iT_C) dt \right) \quad (9)$$

$$\Im(\hat{c}_{kl}) = -\Re \left(\int_{iT_s + \hat{\tau}_{kl}}^{(i+1)T_s + \hat{\tau}_{kl}} r_{k,l} s_k(t - iT_s) c_{sc_k}^*(t - iT_C) dt \right)$$

3.1 Simulations sur canal synthétique

Les résultats de simulations sur un canal synthétique sont montrés ci-dessous. L'analyse des résultats obtenus à partir des données réelles enregistrées pendant la campagne d'expérimentation ne permet pas de conclure quant aux performances du système réalisé du point de vue taux d'erreurs binaires (TEB) en fonction des différents rapports signal sur bruit (RSB) puisque les statistiques de réalisations que l'on peut obtenir avec le dépouillement des données réelles n'est pas suffisant. Néanmoins, il est important d'observer le comportement du système dans les conditions réelles de fonctionnement.

Nous avons simulés 3 utilisateurs présents dans le canal. Ils émettent d'une façon intermittente des trames d'une longueur de 144 bits. On considère un récepteur RAKE

avec 6 doigts de traitements, un par trajet. Nous avons testé 3 scénari de simulations différents. Dans le premier, appelé S1, les 3 utilisateurs émettent en permanence. La figure 4 illustre le temps de communication de chaque utilisateur pour les scénari 2 et 3. La figure 3 montre les performances obtenues en simulant dans un premier temps le récepteur RAKE avec estimation de canal, sans codage et dans un deuxième temps la chaîne complète du récepteur avec estimation de canal en intégrant un codage canal avec un code BCH (16,11) correcteur d'erreurs [6]. Le codage canal introduit a permis de ramener les performances du système à un taux d'erreurs binaires autour de 10^{-5} pour un rapport signal sur bruit de -13 dB.

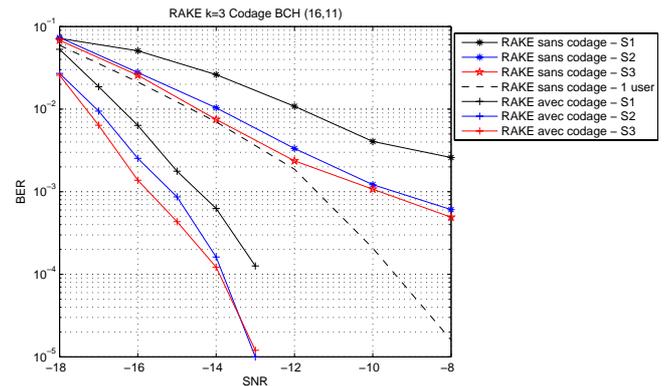


FIG. 3 – Performances de la chaîne de transmission complète

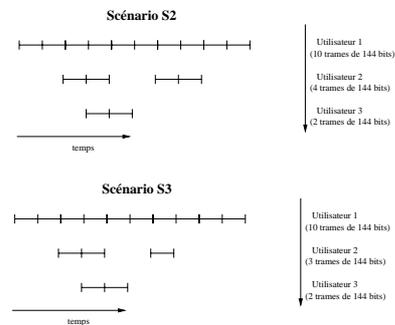


FIG. 4 – Scénarios de simulations 2 et 3

3.2 Simulations sur un canal réel

Après l'analyse des résultats de dépouillement des données réelles enregistrées en mer, nous avons introduits dans l'estimateur de canal de nouveaux paramètres afin de tenir compte au mieux des caractéristiques du canal sous-marin à savoir la non stationnarité, le nombre de trajets multiples qu'il faut considérer pour une démodulation fiable des données, les instants d'arrivée de ces trajets qui dépendent de la réponse impulsionnelle du canal au moment de l'acquisition De cette manière, le système implémenté s'adapte d'une façon efficace et sans augmenter la complexité de traitement aux caractéristiques inhérente à l'emplacement géographique d'immersion des stations de

réception sous-marine.

3.2.1 Facteur d'oubli

L'introduction d'un facteur d'oubli α dans l'estimation des coefficients du canal permet de tenir compte des précédentes estimations des amplitudes du canal et de considérer ainsi un nombre plus élevé d'échantillons pour l'estimation au temps symbole courant i . Le coefficient du canal $c_{k,l}^{(i)}$ en fonction du facteur d'oubli est donné par :

$$c_{k,l}^{(i)} = (1 - \alpha) \cdot y_{k,l}^{(i)} + \alpha \cdot c_{k,l}^{(i-1)} \quad (10)$$

$c_{k,l}^{(i-1)}$ est l'estimation du coefficient du canal à l'instant $i - 1$, $y_{k,l}$ est la sortie du filtre adapté au signal du $k^{\text{ème}}$ utilisateur pour un trajet l . Les critères de décision considérés pour le choix de la valeur de α à retenir sont la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (EQM) ainsi que la minimisation du taux d'erreurs binaires obtenues sur les trames analysées. La figure 5 montre l'EQM en fonction du facteur d'oubli α . Le tableau Tab. 1 consigne le nombre d'erreurs obtenues pour 600 bits démodulés à partir d'un fichier de données enregistrées, cité ici comme un exemple de dépouillement des données.

TAB. 1 – Nombre d'erreurs en fonction du paramètre α - Nombre de bits démodulés = 600 bits

$Alpha$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.95
$Nbr.d'erreurs$	2	1	2	11	89	317

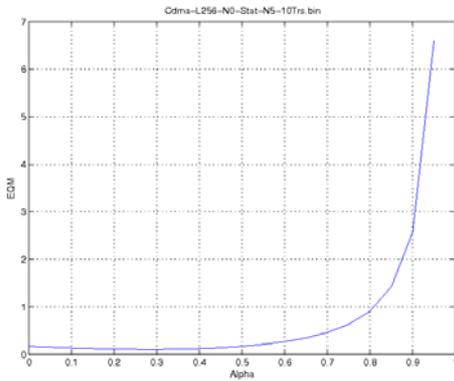


FIG. 5 – Erreur Quadratique Moyenne en fonction de α

3.2.2 Taille de la fenêtre d'observation des trajets

Les performances du récepteur RAKE dépendent du nombre de trajets multiple qu'il arrive à détecter. Il est donc important que la fenêtre d'observation τ_{max} à l'intérieur de laquelle la recherche des trajets est effectuée, soit assez large pour contenir les trajets les plus puissants. Les simulations sur des signaux réels ont permis de fixer la taille de la fenêtre à 15 ms, en ayant comme critère la minimisation de l'erreur quadratique moyenne. La figure 6 montre un exemple d'optimisation de la valeur de τ_{max} à partir d'un fichier de données réelles enregistrées en rade de Brest.

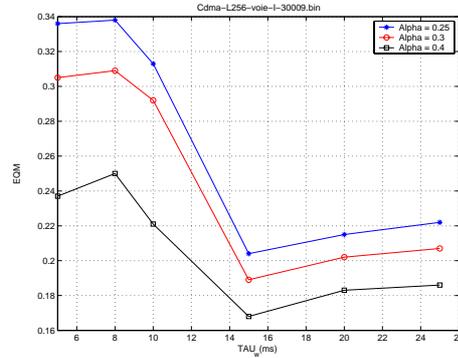


FIG. 6 – Erreur Quadratique Moyenne en fonction de la taille de la fenêtre de recherche

4 Conclusion

Nous avons étudié et mis en oeuvre un récepteur RAKE pour la transmission de données bas débit à travers un canal sous-marin. L'algorithme de démodulation des signaux proposé est basé sur la corrélation et sur l'estimation des retards et des amplitudes du canal. Nous avons présenté les résultats de simulations obtenus sur un canal synthétique pour une chaîne de transmission avec estimation de canal et avec du codage canal. Le codage canal introduit dans un deuxième temps a contribué à améliorer les performances du système ce qui a permis de valider les contraintes de performances exigées par l'application avec une marge confortable. Nous avons également présenté des résultats d'optimisation des nouveaux paramètres d'estimation à partir de simulations sur des données réelles.

Références

- [1] H. Harri. *WCDMA for UMTS : radio access for third generation mobiles communications*. Jhon Wiley & Sons, 2002.
- [2] K. Ouertani, S. Saoudi, M. Ammar et S. Houcke. *Performance comparison of RAKE and SIC/RAKE receivers for multiuser underwater acoustic communication applications*. In Proc. IEEE Oceans07 Conference, Aberdeen, Scotland, U.K., Juin 2007.
- [3] M. Stojanovic, L. Freitag. *Multiuser code acquisition in multipath channels*. In Proc. IEEE Oceans05 Conference, Brest, France, Juin 2005.
- [4] M. Stojanovic et L. Freitag. *Acquisition of direct sequence spread spectrum acoustic communications signals*. In Proc. IEEE Oceans03, San Diego, California, U.S.A, Sept. 2003.
- [5] K. Ouertani, S. Saoudi, M. Ammar et S. Houcke. *Réseau de modems acoustiques discrets. Rapport final de recherche contrat Remodi N° 416001*. Sercel, Sept. 2006.
- [6] S. Houcke. *Performances de certains codes en bloc sur canal additif blanc gaussien*. Rapport intermédiaire de recherche contrat Remodi No. 416001, Sercel, Juillet 2006.