

Étalement de spectre par séquence directe et constellations tournées pour communications tactiques

Tarak ARBI¹, Oudomsack Pierre PASQUERO², Alexis BAZIN², Benoît GELLER¹

¹U2IS, ENSTA Paris, IP Paris
828 Bd des Maréchaux, 91120 Palaiseau, France *

²DGA-MI, Ministère des Armées
35998 Rennes cedex 9, France

tarak.arbi@ensta-paris.fr, oudomsack.pasquero@intradef.gouv.fr,
alexis.bazin@intradef.gouv.fr, benoit.geller@ensta-paris.fr

Résumé – Les systèmes de communications sans fil sont vulnérables aux attaques par interférences car le média étant partagé, toute entité mal intentionnée peut facilement accéder au canal et envoyer des signaux de brouillage qui interfèrent avec le signal légitime et empêchent sa bonne réception. Les techniques à étalement de spectre par séquence directe (Direct-Sequence Spread Spectrum - DSSS) sont alors utiles pour limiter ce risque dans des situations critiques. Dans cet article, on propose d'utiliser conjointement le signal DSSS avec les constellations tournées. Les simulations, prenant en compte des phénomènes physiques comme un fort décalage Doppler, montrent que la méthode proposée permet un gain en robustesse de plusieurs dBs par rapport au DSSS utilisé avec des constellations conventionnelles.

Abstract – Radio communication systems are vulnerable to jamming-type attacks since the medium can easily be accessed by attackers to send jamming signals that interfere with the legitimate signals and prevent its reception. To cope with this issue, it is common to use Direct-Sequence Spread Spectrum (DSSS). This paper proposes to use the DSSS method along with Rotated Constellations. Our simulations, which consider several physical phenomena such as a high Doppler shift, show that our proposal enhances the resistance against jamming by several dBs compared to the conventional DSSS.

1 Introduction

Les systèmes de communication sans fil communiquent via des canaux accessibles à tous, ce qui les rendent sensibles aux activités malveillantes, en particulier aux attaques par brouillage. Pour limiter les détériorations du brouillage sur des communications tactiques, les techniques à étalement de spectre sont souvent utilisées. Les techniques à étalement de spectre par séquence directe (DSSS) consistent à multiplier le signal du côté de l'émetteur par une séquence de N chips qui varie plus rapidement dans le temps que le signal originel. Par ailleurs, cette technique offre traditionnellement une certaine discrétion ; en effet, la densité spectrale de puissance (PSD) du signal étalé est divisée par le facteur d'étalement. Pour un facteur d'étalement assez élevé, la PSD du signal émis est inférieure à celle du bruit, ce qui rend assez difficile la détection du signal émis [1, 2].

Les constellations tournées permettent de meilleures performances que les constellations conventionnelles sur les canaux à évanouissements grâce à un ordre de diversité implicite [4–9] i.e. sans l'introduction de redondance supplémentaire au prix d'une augmentation de la complexité en réception. Cette technique consiste dans le cas bidimensionnel à corrélérer les composantes en phase (I) et en quadrature (Q) d'un symbole d'une

constellation conventionnelle à l'aide d'une rotation et à envoyer séparément les deux composantes obtenues sur deux canaux indépendants, par exemple par entrelacement temporel. Du côté du récepteur, chaque composante apporte toute l'information portée par le symbole bidimensionnel originel, ce qui permet de réduire les effets des évanouissements du canal. Les constellations tournées ont notamment été étudiées pour les réseaux cellulaires [10] et adoptées par la norme DVB-T2.

Cet article propose d'utiliser conjointement le signal DSSS avec les constellations tournées afin d'améliorer la résistance au brouillage. On montre à travers plusieurs simulations que l'association du DSSS et des constellations tournées permet un gain de plusieurs dBs par rapport au DSSS avec les constellations conventionnelles. Nous avons considéré dans ces simulations plusieurs phénomènes physiques et considéré les différentes étapes de la chaîne de communication, pour obtenir des résultats dans des conditions réalistes. Cet article est organisé comme suit. La section suivante rappelle le principe DSSS, présente très brièvement les algorithmes de synchronisation que nous avons utilisés dans nos simulations, et les modèles de brouilleurs considérés. La section 3 détaille l'utilisation conjointe du DSSS avec les constellations tournées. La section 4 présente les résultats de simulations et la section 5 conclut cet article.

* Cette étude a bénéficié du support du projet CODIT2 de l'AID-DGA.

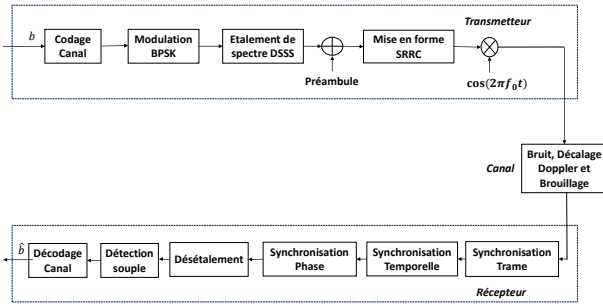


FIGURE 1 – Modèle du système.

2 Communications tactiques à étalement de spectre

2.1 Modèle du système DSSS

La Figure 1 illustre le modèle du système. Tout d'abord, les bits d'information sont codés puis transformés en une suite de symboles. Les symboles obtenus sont ensuite multipliés par une séquence pseudo-aléatoire à haut débit. Pour réduire le risque de détection d'une communication tactique, la séquence d'étalement est pseudo-aléatoire (Pseudo Noise - PN) et change à chaque temps symbole [11]. L'émetteur ajoute alors un préambule au début de chaque trame afin de faciliter la synchronisation du côté du récepteur. Enfin, le préambule et les chips sont filtrés avec un filtre en racine de cosinus surélevé (SRRC) et sont transmis sur une porteuse f_0 .

Du côté du récepteur, le signal reçu est la superposition de plusieurs composantes : le signal utile, un bruit additif blanc Gaussien et un potentiel signal de brouillage. Une attention particulière doit être accordée à la synchronisation car, effectuée en tête de réception, elle est directement soumise aux interférences et peut paralyser l'ensemble du récepteur. Pour la synchronisation de la trame, nous avons considéré l'algorithme détaillé dans [3]; cet algorithme permet également une estimation initiale grossière du décalage Doppler. Il est à noter que lorsque cet algorithme détecte la réception répétée de plusieurs versions de puissance suffisante du signal étalé, le récepteur ne considère que la première de ces versions reçues. En effet, les versions suivantes pourraient provenir d'un brouilleur répéteur et constituer ainsi une menace à la bonne réception du signal légitime ; synchroniser toutes les versions du signal reçues avec un récepteur RAKE n'est donc pas judicieux dans notre cadre d'application. Pour la synchronisation temporelle, nous avons implémenté l'algorithme proposé dans [12,13]. Dans nos simulations, la synchronisation fine en phase et en fréquence ont été effectuées par l'algorithme décrit dans [14].

Ensuite, le récepteur désétalement les observations à l'aide des séquences PN et calcule le logarithme du rapport de vraisemblance (LLR) pour chaque bit reçu. Enfin, à partir des LLRs obtenus, le récepteur estime les bits d'information.

2.2 Modèles de brouillage

Dans cet article, on suppose que le brouilleur connaît la fréquence centrale et la bande passante du signal. Pour rendre le brouillage le plus efficace possible, les attaquants peuvent utiliser de nombreux types de brouillage étudiés dans la littérature [15, 16]. Dans nos simulations, nous considérons trois types de brouillage : le brouilleur Gaussien, le brouilleur peigne de raies et le brouilleur répéteur.

2.2.1 Brouilleur Gaussien

Le signal de brouillage s'écrit comme suit :

$$B_G(t) = \sqrt{2P_b}p_G(t)\cos(2\pi f_0 t), \quad (1)$$

où P_b est la puissance du signal de brouillage et $p_G(t)$ est un bruit Gaussien à bande limitée ; le brouilleur perturbe toute la bande passante du signal légitime de façon uniforme.

2.2.2 Brouilleur peigne de raies

Le signal de brouillage s'écrit comme suit :

$$B_C(t) = \sqrt{2P_b} \sum_{i=-N_R}^{N_R} \cos(2\pi(f_0 + i\delta_f)t), \quad (2)$$

où N_R et δ_f sont fixés de façon à ce que le signal de brouillage couvre toute la bande du signal légitime.

2.2.3 Brouilleur répéteur

Ce brouilleur répète simplement le signal légitime :

$$B_R(t) = \sqrt{2P_b}x(t - \tau), \quad (3)$$

où τ est un délai et $x(t)$ est le signal légitime.

3 DSSS et constellations tournées

Afin d'améliorer la robustesse du système de communication vis-à-vis du brouillage, on propose d'utiliser conjointement un signal DSSS avec les constellations tournées. D'abord, on considère que les trames de l'émetteur sont envoyées sur deux canaux indépendants, par exemple sur deux bandes fréquentielles disjointes. Avec les constellations conventionnelles (i.e. non tournées), l'émetteur envoie deux trames indépendantes sur ces deux canaux. En revanche, avec les constellations tournées, les symboles de ces deux trames sont d'abord tournés avec l'angle de rotation $\alpha = \text{atan}(1/\sqrt{M})$, où M est la taille de la constellation. Le symbole tourné $s^i(n)$ de la i -ième trame à l'instant n s'écrit :

$$s^i(n) = s_1^i(n) + js_2^i(n) = a(n)\exp(j\theta), \quad (4)$$

où $a(n)$ est le symbole originel à l'instant n , appartenant à la constellation conventionnelle M-QAM.

Ensuite, les composantes en phase de la première trame tournée

TABLEAU 1 – Paramètres de simulation

Paramètres	
Longueur du préambule	511 symboles
Débit chip	10^7 chip/s
Nombre de bits d'information par paquet	1000 bits
Codage canal	Turbo (13,15)
Taux de codage	1/3
Facteur d'étalement	4
Décalage Doppler/Fréquence porteuse	$\approx 10^{-2}$
Nombre de raies (brouilleur peigne de raies)	200

sont envoyées avec les composantes en quadrature de la deuxième trame tournée sur le premier canal, et les symboles émis s'écrivent donc comme suit :

$$x^1(n) = x_1^1(n) + jx_2^1(n) = s_1^1(n) + js_2^2(n). \quad (5)$$

Similairement, les composantes en phase de la deuxième trame tournée sont envoyées avec les composantes en quadrature de la première trame tournée sur le deuxième canal. Les symboles émis sur ce canal s'écrivent donc comme suit :

$$x^2(n) = x_1^2(n) + jx_2^2(n) = s_1^2(n) + js_2^1(n). \quad (6)$$

En supposant une parfaite synchronisation dans le but d'obtenir l'expression de la détection idéale, le symbole reçu à l'instant n sur le i -ième canal s'écrit

$$y^i(n) = x^i(n) + v^i(n) + B^i(n), \quad (7)$$

où $v^i(n)$ est un bruit Gaussien et $B^i(n)$ est le signal potentiel de brouillage à l'instant n .

Le récepteur commence alors par désentrelacer les composantes en phase et en quadrature afin d'obtenir les observations $r^i(n)$ qui correspondent à chaque symbole tourné $s^i(n)$, où i est un indice dans $\{1, 2\}$. Ensuite, il calcule le LLR pour chaque bit reçu sur le premier canal. Par exemple, avec la constellation BPSK tournée, le LLR s'obtient comme suit :

$$\Lambda(b^1(n)) = \left[\frac{|r_1^1(n) - s_1^1|^2}{N_1(n)} + \frac{|r_2^1(n) - s_2^1|^2}{N_2(n)} \right] - \left[\frac{|r_1^1(n) - s_1^0|^2}{N_1(n)} + \frac{|r_2^1(n) - s_2^0|^2}{N_2(n)} \right], \quad (8)$$

où $s_1^{(k)} = s_1^{(k)} + js_2^{(k)}$ est le symbole tourné associé avec le bit k dans $\{0, 1\}$, $N_i(n)$ est la variance totale du bruit Gaussien et du signal de brouillage sur le i -ième canal.

Il est donc nécessaire que le récepteur estime d'abord $N_1(n)$ et $N_2(n)$, en utilisant les algorithmes d'estimation conventionnels [3] pour pouvoir calculer les LLRs. Il est utile de souligner que $N_1(n)$ et $N_2(n)$ doivent être des variables indépendantes pour que les constellations tournées permettent de meilleures performances que les constellations conventionnelles ; cette condition peut être satisfaite en pratique en transmettant les composantes des symboles tournés sur deux canaux indépendants.

Enfin, le récepteur calcule le LLR pour chaque bit reçu sur le deuxième canal de façon similaire.

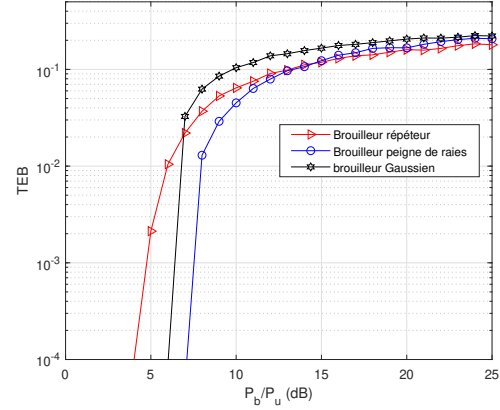


FIGURE 2 – TEB avec BPSK conventionnelle (1er scénario).

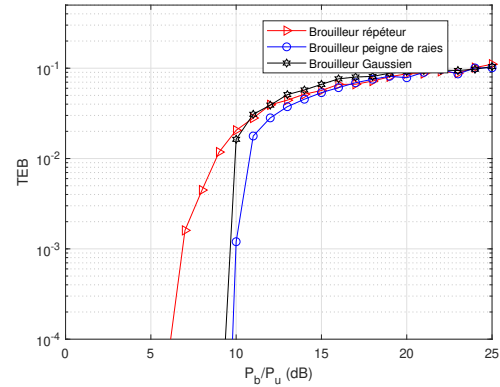


FIGURE 3 – TEB avec BPSK tournée (1er scénario).

4 Résultats des simulations

Cette section compare le signal DSSS avec les constellations tournées au DSSS conventionnel. Les paramètres principaux des simulations sont résumés dans le tableau 1. Le Rapport Signal sur Bruit (RSB) est fixé à 10 dB.

On considère le scénario suivant : la probabilité qu'un brouilleur soit actif sur un canal est égale à $p = 0.5$ et est indépendante de la probabilité qu'un brouilleur soit actif sur l'autre canal.

La Figure 2 (resp. Fig. 3) montre les performances en termes de Taux d'Erreur Binaire (TEB) obtenus avec les 3 types de brouillage considérés, pour la BPSK conventionnelle (resp. tournée).

On constate que les performances obtenues avec le DSSS et la constellation BPSK tournée dépassent celles du DSSS conventionnel de 2 à 3 dB selon le type de brouillage.

On considère maintenant un second scénario : les deux canaux sont toujours brouillés ; la puissance totale des signaux de brouillage est constante et égale à P_J , en revanche la puissance de brouillage répartie sur chaque canal est différente et suit une variable aléatoire uniforme. La Figure 4 (resp. Fig. 5) montre les performances en termes de TEB obtenus avec la constellation BPSK conventionnelle (resp. tournée). On observe à nouveau que notre méthode permet un gain d'environ 3

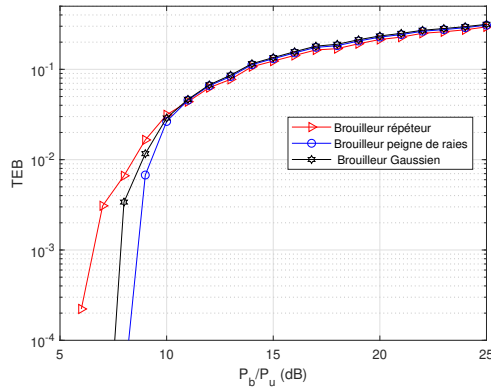


FIGURE 4 – TEB avec BPSK conventionnelle (2ème scénario).

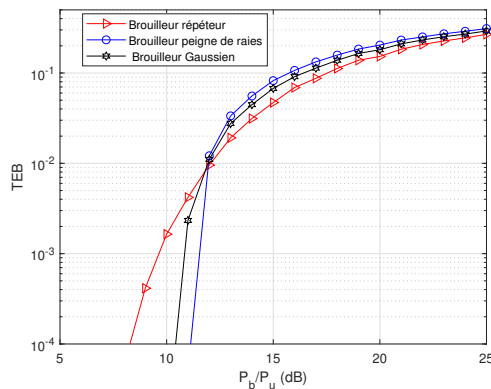


FIGURE 5 – TEB avec BPSK tournée (2ème scénario).

dB par rapport au DSSS conventionnel.

5 Conclusion

Les systèmes tactiques de radiocommunications utilisent traditionnellement les techniques à étalement de spectre pour s'affranchir partiellement de leur vulnérabilité face aux attaques par brouillage. Cet article propose d'utiliser conjointement le signal DSSS et les constellations tournées pour mieux protéger les communications dans ces conditions hostiles. Les simulations, tenant compte de plusieurs phénomènes physiques montrent que la méthode proposée permet un gain de plusieurs dBs par rapport au signal DSSS conventionnel.

Références

[1] D. Torrieri, "Principles of Spread Spectrum communication systems", 4th ed., Springer, 2018.
 [2] Yao Liu et al., "Randomized differential dsss : Jamming-resistant wireless broadcast communication", In Proc. of IEEE INFOCOM, pages 695-703, March 2010.

[3] J. G. Proakis, "Digital Communications", 5th ed., McGraw Hill, (pages 786-794), 2007.
 [4] J. Boutros and E. Viterbo, "Signal space diversity : a power- and bandwidth-efficient diversity technique for the Rayleigh fading channel", IEEE Trans. on Inform. Theory, 44(4), pp. 1453-1467, July 1998.
 [5] T. Arbi, B. Geller, J. Yang, C. Abdel Nour and O. Rioul, "Uniformly Projected RCQD QAM : A Low-Complexity Signal Space Diversity Solution Over Fading Channels With or Without Erasures," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 64, no. 4, pp. 803-815, Dec. 2018.
 [6] T. Arbi and B. Geller, "Joint BER Optimization and Blind PAPR Reduction of OFDM Systems With Signal Space Diversity," in IEEE Communications Letters, 23 (10), pp. 1866-1870, Oct. 2019.
 [7] T. Arbi, I. Nasr and B. Geller, "Near Capacity RCQD Constellations for PAPR Reduction of OFDM Systems," IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) pp. 5110-5114, May 2020.
 [8] J. Yang, M. Li, M. Li, C. Abdel Nour, C. Douillard, B. Geller, "Max Log Demapper Architecture Design for DVB T2 Rotated QAM Constellations," Proceedings of IEEE SIPS, Hangzhou, Oct. 2015.
 [9] J. Yang, K. Wan, B. Geller, C.A. Nour, O. Rioul, C. Douillard, "A Low-Complexity 2D Signal Space Diversity Solution for Future Broadcasting Systems," Proc. of ICC 2015, pp. 2762-2767, London, June 2015.
 [10] F. M. Assis and E. S. Sousa, "Rotated constellation MC-CDMA system," Seamless Interconnection for Universal Services. Global Telecommunications Conference. GLOBECOM'99. pp. 996-1001 vol. 1b. 1999.
 [11] Céline Boudier, Stéphane Azou, Gilles Burel, "Performance analysis of a spreading sequence estimator for spread spectrum transmissions", Journal of The Franklin Institute, 341 (7), pp. 595-614, October 2004.
 [12] I. Nasr, L. Najjar Atallah, S. Cherif, B. Geller, "Near MAP Dynamical Delay Estimator and Bayesian CRB for QAM Coded Signals", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, pp. 636 - 651, Jan. 2018.
 [13] I. Nasr, L. Najjar Atallah, S. Cherif, B. Geller, J. Yang, "A Soft Maximum Likelihood Technique for Time Delay Recovery," Proc. of IEEE COMNET, Tunis, March 2014.
 [14] J. Yang, B. Geller, "Near Optimum Low Complexity Smoothing Loops for Dynamical Phase Estimation—Application to BPSK Modulated Signals," IEEE Trans. on Signal Process., pp. 3704-3711, Sept. 2009.
 [15] Richard Poisel, "Modern Communications Jamming Principles and Techniques," Artech House, 2011.
 [16] K. Grover et al., "Jamming and anti-jamming techniques in wireless networks : A survey," Int. J. Ad Hoc Ubiquitous Comput., 17(4), pp. 197-215, Dec. 2014.