

Réception par satellite de messages AIS avec annulation successive d'interférences et un algorithme de Viterbi à liste optimisé

Linda KANAAN^{1,2} Karine AMIS¹ Frédéric GUILLOUD¹ Rémi CHAUVAT³

¹IMT Atlantique, Lab-STICC Technopôle Brest-Iroise, CS 83818, 29238 Brest cedex 03, France

²TéSA, 7 boulevard de la Gare, 31500 Toulouse, France

³Kinéis, 11 rue Hermès, Parc Technologique du Canal, 31520 Ramonville-Saint-Agne, France

Résumé – Les satellites qui reçoivent les paquets AIS (Automatic Identification System) émis depuis des zones de trafic maritime dense subissent les effets d'une surcharge du canal AIS due au nombre élevé des navires. Les collisions entre messages AIS peuvent alors empêcher leur détection. Dans cet article, nous nous intéressons à l'amélioration du processus d'annulation successive d'interférences à partir de l'algorithme de détection élémentaire d'un message AIS. Pour cela, nous considérons la combinaison de l'algorithme de Viterbi à liste parallèle (PLVA) avec le détecteur du code CRC (contrôle de redondance cyclique) dont nous avons établi l'efficacité dans une étude précédente. L'intérêt du PLVA dans un récepteur par annulation successive d'interférences est démontré au travers des simulations avec un modèle simple mais suffisamment réaliste du système AIS.

Abstract – Satellites receiving Automatic Identification System (AIS) packets in dense areas are particularly prone to AIS channel overload due to the extensive number of vessels. Thus a failure of detection might be caused by the collisions among AIS messages. In this paper, we aim at improving the successive interference cancellation (SIC) performance by enhancing each elementary AIS message detection step. To that purpose, we consider the combination of the Parallel-List Viterbi Algorithm (PLVA) with cyclic redundancy check (CRC) detection whose efficiency in the AIS context we have studied in a previous work. Simulations of the SIC receiver carried out with a simplified yet sufficiently realistic AIS system model show the interest of the PLVA.

1 Introduction

Le standard AIS [8] est utilisé dans le milieu maritime pour sécuriser le trafic des navires. Il permet notamment aux navires d'échanger des informations entre eux et avec des stations côtières dans un rayon de 20 à 30 milles nautiques. Depuis 2007, des récepteurs AIS sont embarqués à bord de satellites en orbite basse (Sat-AIS) [1], permettant de superviser le trafic maritime à l'échelle mondiale. Le système AIS étant initialement dédié aux communications terrestres, la réception Sat-AIS doit relever de nombreux défis posés notamment par les collisions entre les messages, le délai de propagation, une atténuation accrue ainsi que l'effet Doppler. Dans les zones de fort trafic maritime, la probabilité de collision entre les messages augmente puisque les navires ne peuvent pas coordonner leurs transmissions au-delà d'une distance nettement inférieure à la largeur de la fauchée du satellite. Mettre en oeuvre des procédés de décodage efficaces est indispensable pour garantir l'intégrité de l'information émise.

Il existe différentes méthodes pour détecter les messages AIS en présence d'interférences : le traitement par réseaux d'antennes [13, 6], le traitement par sous-bande avec recouvrement spectral [3] et les techniques d'annulation d'interférences [7, 10, 11] mais leurs performances restent limitées dans les environnements denses. Dans [5], nous avons étudié l'application de l'algorithme de Viterbi à liste parallèle (PLVA) au contexte de la réception Sat-AIS. Le principe est de générer grâce au PLVA une liste ordonnée de candidats en sortie du démodulateur GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). Un post-traitement est ensuite appliqué pour vérifier l'intégrité du message AIS (notamment la validité du CRC). Dans le cas où

le format AIS est validé, le processus est stoppé. Sur un canal gaussien sans interférence, nous avons observé que la diversité de candidats permet au récepteur basé sur le PLVA d'augmenter le taux de récupération des messages AIS par rapport à un détecteur de référence tel que [3] et que l'optimisation de ses paramètres lui permet d'atteindre des performances proches du meilleur détecteur AIS de l'état de l'art proposé dans [7] mais dont la complexité limite l'usage. Dans cet article, nous étudions les performances d'un récepteur SIC utilisant pour la démodulation des signaux AIS le PLVA assisté du post-traitement AIS décrit précédemment.

L'article est organisé comme suit. Le modèle de système est décrit dans la Section 2. Dans la Section 3, nous introduisons l'algorithme PLVA et le post-traitement AIS avant de détailler la procédure SIC mise en oeuvre. La Section 4 est dédiée aux résultats de simulation obtenus avec un modèle simplifié du système AIS réel en faisant varier la densité de navires sous l'hypothèse d'une estimation parfaite des paramètres du canal.

2 Modélisation du système

2.1 Définition du signal AIS

La norme ITU-R M.1371-5 [8] décrit le protocole d'accès ainsi que le format des messages AIS. L'accès multiple à répartition dans le temps est appliqué à l'échelle d'une trame AIS (2250 intervalles de transmission AIS). Un paquet AIS de rapport de position comporte N bits avec $N \geq 224$. Un intervalle de transmission AIS correspond à 256 périodes symboles (rapidité de modulation égale à 9600 bauds) et sous l'hypothèse d'un accès multiple par répartition dans le temps auto-organisé

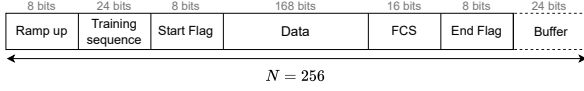


FIGURE 1 : Structure d'un paquet AIS de rapport de position

(SOTDMA) parfait, une seule trame AIS peut être transmise par intervalle de transmission. La composition d'un paquet AIS de rapport de position est indiquée sur la Figure 1. Le champ de données comporte 168 bits. Les 16 bits de redondance du CRC permettent de calculer la séquence de contrôle de trame (FCS pour frame check sequence). Un bit de bourrage (valeur '0') est ensuite inséré après chaque suite '1111' pour empêcher la confusion avec les motifs '0111110' qui définissent les fanions de début et de fin (start flag/end flag). Un préfixe (séquence d'apprentissage suivie du fanion de début) et un suffixe (fanion de fin) sont ensuite insérés de part et d'autre du bloc ainsi obtenu. Un codage de type non retour à zéro est alors appliqué suivi d'une modulation GMSK.

Notons $s(t, \mathbf{a})$ l'enveloppe complexe du signal modulé GMSK où $\mathbf{a} = \{a_i\}_{0 \leq i \leq N-1}$ désigne la séquence de symboles en sortie du codeur de type non retour à zéro ($a_i \in \mathcal{M} = \{\pm 1\}$). Le signal GMSK s'écrit sous la forme

$$s(t, \mathbf{a}) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} e^{j\theta(t, \mathbf{a})} \quad (1)$$

avec E_s l'énergie moyenne par symbole et T_s la durée symbole. Le signal $\theta(t, \mathbf{a})$ est une fonction de la séquence $\mathbf{a}$ telle que

$$\theta(t, \mathbf{a}) = 2\pi h \sum_{i=0}^{N-1} a_i q(t - iT_s) \quad (2)$$

avec h l'indice de modulation et $q(t)$ le filtre de mise en forme de la phase dérivé d'un filtre gaussien avec $L = 3$ et $BT = 0.4$. Le lecteur trouvera tous les paramètres dans [8, 7].

2.2 Modèle de transmission AIS

Dans cet article, nous supposons que le satellite est équipé d'une seule antenne de réception et que chaque navire utilise une unique antenne pour émettre le signal AIS. Le canal de propagation entre un navire et le satellite comporte uniquement un trajet direct et varie lentement sur chaque intervalle de transmission AIS. Le modèle équivalent en bande de base du signal reçu sur un intervalle de transmission AIS est donné par

$$r(t) = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}} \alpha_i s_i(t - \tau_i, \mathbf{a}_i) e^{j(2\pi f_{d,i}(t) + \phi_i)} + n(t) \quad (3)$$

où $\mathcal{N}$ est le nombre de signaux AIS contenus dans le mélange. $s_i(t, \mathbf{a}_i)$ représente le signal AIS émis par le navire d'indice i ($1 \leq i \leq \mathcal{N}$). Le canal de propagation du navire d'indice i vers le satellite est constitué d'un trajet direct caractérisé par une atténuation α_i , un retard τ_i , un déphasage ϕ_i uniformément distribué dans $[0, 2\pi[$ et une variation temporelle du décalage Doppler $f_{d,i}(t)$ définie par $f_{d,i}(t) = f_{d,i} + \eta_i t/2$ avec $f_{d,i}$ le décalage Doppler initial et η_i la vitesse de variation du décalage Doppler. Dans nos simulations, nous considérons que la variation du décalage Doppler est négligeable sur la durée du message AIS ($\eta_i = 0$). Le bruit $n(t) \in \mathbb{C}$ est un

processus aléatoire gaussien circulaire, stationnaire du second ordre de densité spectrale de puissance mono-latérale égale à $2N_0$. Nous faisons également l'hypothèse que les paramètres du canal sont parfaitement estimés au niveau du satellite.

3 Description du récepteur SIC basé sur l'algorithme PLVA

Nous détaillons dans cette section l'algorithme de réception mis en oeuvre dans nos simulations. Nous commençons par décrire la procédure élémentaire de détection d'un message AIS proposée et optimisée dans [5].

3.1 Algorithme de Viterbi à liste parallèle

Il existe différentes versions de l'algorithme de Viterbi à liste : parallèle [9] ou série [9, 12]. Dans cet article qui ne traite pas de la complexité, nous considérons la version parallèle étudiée dans [5].

L'algorithme de Viterbi ne prend pas en compte l'interférence. Sous l'hypothèse d'une synchronisation parfaite, son modèle de référence est l'équation suivante :

$$r(t) = s(t - \tau, \mathbf{a}) e^{j(2\pi f_d t + \phi)} + n(t) \quad (4)$$

et il est régi par le critère de maximisation de la vraisemblance sur la séquence reçue exprimé ci-dessous :

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \max_{\mathbf{a}} \Re \left[\int r(t) s^*(t - \tau, \tilde{\mathbf{a}}) e^{-j(2\pi f_d t + \phi)} dt \right] \quad (5)$$

où $(.)^*$ désigne le complexe conjugué et $\Re$ la partie réelle. La décomposition de la phase du signal GMSK sur l'intervalle $[nT_s, (n+1)T_s]$ sous la forme suivante

$$\begin{aligned} \theta(t, \mathbf{a}) &= 2\pi h \sum_{i=n-L+1}^n a_i q(t - iT_s) + \pi h \sum_{i=0}^{n-L} a_i \\ &= \Theta_n(t) + \theta_n, \end{aligned} \quad (6)$$

met en évidence un terme $\Theta_n(t)$ qui dépend des $(L-1)$ symboles précédents et une phase θ_n contribution des autres symboles plus anciens. Elle permet de décrire le procédé de modulation à l'aide d'un treillis dont les états sont définis par l'ensemble des réalisations possibles de $\sigma(n)$ avec

$$\sigma(n) = [\theta_n, a_{n-L+1}, \dots, a_{n-1}] \quad (7)$$

et dont les branches correspondent à une transition existante entre deux états :

$$[\theta_n, a_{n-L+1}, \dots, a_{n-1}] \rightarrow [\theta_{n+1}, a_{n-L+2}, \dots, a_n] \quad (8)$$

avec $\theta_{n+1} \equiv \theta_n + \pi h a_{n-L+1} \pmod{2\pi}$. L'algorithme de Viterbi à liste parallèle repose sur une accumulation des métriques le long des sections du treillis. Sur chaque section, il retient pour chaque état final les P chemins possédant les métriques cumulées les plus élevées. La métrique cumulée du k -ième chemin le plus vraisemblable convergeant vers σ_i à l'instant n est notée $\Lambda_n(\sigma_i, k)$. A l'instant $n+1$, le vecteur de longueur P regroupant les métriques cumulées des chemins retenus pour l'état σ_i , noté

$\Lambda_{n+1}(\sigma_i) = [\Lambda_{n+1}(\sigma_i, 1), \Lambda_{n+1}(\sigma_i, 2), \dots, \Lambda_{n+1}(\sigma_i, P)]^T$ avec $(\cdot)^T$ l'opérateur de transposition, est calculé ainsi :

$$\Lambda_{n+1}(\sigma_i) = \max_{\substack{\sigma_j \rightarrow \sigma_i \\ k \in \llbracket 1, P \rrbracket}}^{(P)} (\{\Lambda_n(\sigma_j, k) + \delta_n(\sigma_j, \sigma_i)\}) \quad (9)$$

avec $\max^{(P)}(\mathcal{S})$ la fonction qui calcule les P valeurs les plus élevées dans l'ensemble $\mathcal{S}$ et $\delta_n(\sigma_j, \sigma_i)$ la métrique de branche entre σ_j et σ_i définie par

$$\delta_n(\sigma_j, \sigma_i) = \Re \left[\int_{nT_s}^{(n+1)T_s} r(t) s^*(t - \tau, \tilde{\mathbf{a}}) e^{-j(2\pi f_d t + \phi)} dt \right]. \quad (10)$$

A la fin du parcours des N sections du treillis, le PLVA produit une liste de P chemins survivants par état qui sont ensuite traités selon la procédure décrite dans la Section 3.2.

3.2 Traitement postérieur à l'algorithme PLVA

Une liste de C candidats ordonnée par ordre décroissant de métriques cumulées est établie à partir de la liste produite par l'algorithme PLVA. Un post-traitement est appliqué en partant du premier candidat de la liste. Il consiste à décoder le code non-retour à zéro, à retirer le préfixe, le suffixe puis les bits de bourrage. Si la longueur du mot obtenu vaut 184, le test CRC est effectué. Si ce test est validé, le processus s'arrête et délivre le message de 168 bits comme le message AIS estimé. Sinon, il passe au candidat suivant. Si aucun candidat ne valide les contraintes du standard AIS, l'algorithme déclare un échec de décodage.

3.3 Annulation successive d'interférence

Nous considérons que le satellite traite les messages détectés par ordre décroissant des rapports E_s/N_0 , lesquels sont supposés parfaitement estimés au récepteur. L'ordre de traitement pourrait encore être optimisé (par ordre décroissant des rapports signal sur interférences plus bruit par exemple). Nous supposons que le satellite connaît parfaitement le nombre $\mathcal{N}$ de signaux dans le mélange ainsi que les paramètres du canal ($\alpha_i, \tau_i, f_{d,i}, \phi_i$). Sans nuire à la généralité, nous supposons $\tau_i < \tau_{i+1}$. Dans un premier temps, les $\mathcal{N}$ messages sont recherchés les uns après les autres. A la i -ième itération, le récepteur cherche à extraire $\mathbf{a}_i$ du signal $r^{(i)}$. L'algorithme PLVA considère le modèle $r^{(i)}(t) = \alpha_i s_i(t - \tau_i, \mathbf{a}_i) e^{j(2\pi f_{d,i}(t) + \phi_i)} + \tilde{n}^{(i)}(t)$ avec $\tilde{n}^{(i)}$ la superposition du bruit et des interférences résiduelles. Si le post-traitement produit un message AIS valide, le signal est reconstruit ($\hat{s}_i$) et soustrait : $r^{(i+1)}(t) = r^{(i)}(t) - \alpha_i \hat{s}_i(t - \tau_i, \hat{\mathbf{a}}_i) e^{j(2\pi f_{d,i}(t) + \phi_i)}$. Sinon $r^{(i+1)} = r^{(i)}$.

S'il reste des messages AIS non récupérés à l'issue de la première phase, la procédure est répétée en partant de $r^{(\mathcal{N})}$. Elle s'arrête lorsque l'algorithme ne trouve plus de messages dans la fenêtre temporelle traitée.

4 Résultats de simulation

4.1 Comparaison de détecteurs élémentaires sur un canal gaussien sans interférence

L'efficacité de la procédure décrite en Section 3.2 est illustrée sur la Figure 2. Elle est appliquée à différents démodulateurs

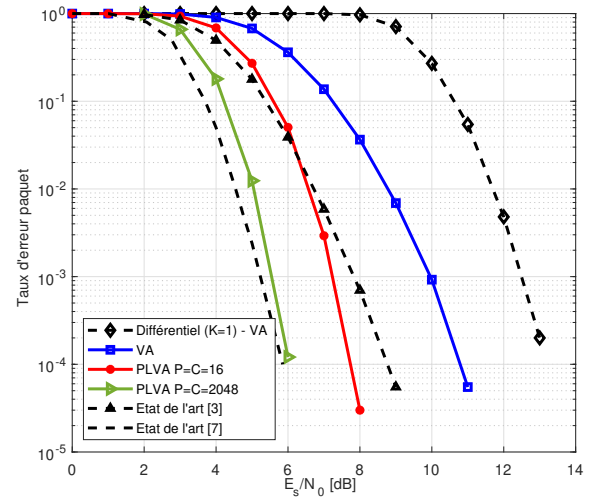


FIGURE 2 : Comparaison de différents détecteurs élémentaires du signal AIS sur un canal à bruit additif blanc et gaussien.

GMSK (différentiel sans optimisation autrement dit avec un retard $K = 1$ [4], cohérent avec $P = C = 1$, cohérent PLVA avec différents couples (P, C)) et comparée à deux récepteurs de référence ([3],[7]). L'optimisation de (P, C) permet de surpasser [3] en assurant un compromis complexité-performances voire d'atteindre des performances proches de [7].

4.2 Modèle du système AIS

Nous considérons un scénario réaliste de réception des signaux AIS. L'altitude du satellite en orbite basse vaut 656.5 km et les navires émetteurs sont uniformément répartis dans la fauchée du satellite (jusqu'à 0 degré d'élévation du sol). Pour simplifier, un accès aléatoire slotté est utilisé ici. Cette approximation est couramment utilisée [2] et raisonnable dans le contexte d'un satellite à large fauchée. Le nombre d'arrivées par trame AIS est fixé et les indices d'intervalles de transmission AIS alloués à chaque navire sont indépendants et identiquement distribués. Les rapports E_s/N_0 , les retards de propagation et les paramètres Doppler sont calculés en considérant des émetteurs fixes et un bilan de liaison incluant un modèle d'évanouissement lognormal avec un écart-type égal à 4 dB.

4.3 Performances du récepteur SIC

Les performances en termes de débit réel du récepteur SIC détaillé en Section 3.3 sont étudiées dans le contexte décrit en Section 4.2 en faisant varier la charge du système. La procédure est appliquée avec les algorithmes de Viterbi avec (PLVA, $(P, C) = (64, 256)$) et sans (VA) liste et comparée au cas où aucune annulation d'interférence n'est mise en oeuvre. Le couple (P, C) retenu résulte d'un compromis performances-temps d'exécution de l'algorithme. Nous observons d'une part l'intérêt du PLVA par rapport au VA (gain de 10.3% et 12.7% pour une charge de 1.8 paquets/slot du PLVA par rapport au VA respectivement sans et avec SIC). Notons également le gain de 56.6% (respectivement 60%) apporté par l'annulation successive d'interférences par rapport au VA sans SIC (respectivement par rapport au LVA sans SIC) pour la charge de 1.8 paquets/slot.

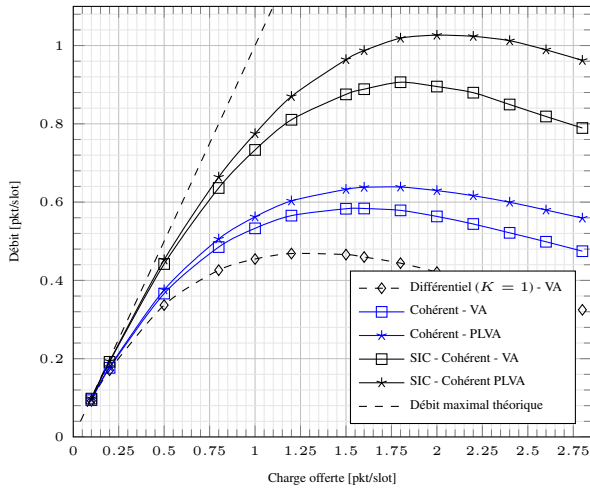


FIGURE 3 : Apport de l’annulation successive d’interférences (SIC) sur le débit effectif en fonction de la charge offerte. Modèle du système AIS de la Section 4.2. PLVA(64, 256).

5 Conclusion

Cet article traite de l’amélioration de l’annulation successive d’interférences pour la réception par satellite des signaux AIS dans un environnement dense. Nous avons étudié l’utilisation de l’algorithme de Viterbi à liste parallèle assisté d’un post-traitement validant le format AIS pour chaque itération de détection d’un message AIS. Les simulations sur un canal gaussien sans interférence montrent l’efficacité de cette combinaison dont la performance peut être ajustée pour satisfaire un compromis complexité-taux de récupération du message AIS. L’analyse des performances avec un modèle de système AIS simple mais suffisamment réaliste prouve son intérêt pour améliorer les performances du détecteur SIC. Des travaux futurs étudieront les performances limites qui peuvent être atteintes sous l’hypothèse d’une connaissance parfaite du canal (optimisation du PLVA) et évalueront la robustesse du récepteur en présence d’erreurs d’estimation de ses paramètres.

6 Remerciements

Cette étude a été financée par Kinéis, le Centre national d’études spatiales et la Région Bretagne.

Références

- [1] M. A. CERVERA, A. GINESI et K. ECKSTEIN : Satellite-based vessel Automatic Identification System : A feasibility and performance analysis. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 29(2):117–142, 2011.
- [2] F. CLAZZER et A. MUNARI : Analysis of capture and multi-packet reception on the AIS satellite system. *In OCEANS 2015 - Genova*, pages 1–9, 2015.
- [3] G. COLAVOLPE, T. FOGGI, A. UGOLINI, J. LIZARRAGA, S. CIONI et A. GINESI : A highly efficient receiver for satellite-based Automatic Identification System signal

detection. *In 2014 7th ASMS Conference and 13th SPSC Workshop*, pages 120–127, 2014.

- [4] A. JERBI, K. AMIS, F. GUILLOUD et T. BENADDI : Delay Optimization of Conventional Non-Coherent Differential CPM Detection. *IEEE Communications Letters*, 27(1):234–238, 2023.
- [5] L. KANAAN, K. AMIS, F. GUILLOUD et R. CHAUVAT : Application of the List Viterbi Algorithm for Satellite-based AIS Detection. *In 2025 13th IEEE BlackSeaCom*, 2025.
- [6] M. PICARD, M. R. OULARBI, G. FLANDIN et S. HOUCHE : An adaptive multi-user multi-antenna receiver for satellite-based AIS detection. *In 2012 6th ASMS Conference and 12th SPSC Workshop*, pages 273–280, 2012.
- [7] R. PRÉVOST, M. COULON, D. BONACCI, J. LEMAITRE, J.-P. MILLERIOUX et J.-Y. TOURNET : Cyclic redundancy check-based detection algorithms for automatic identification system signals received by satellite. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 31(3):157–176, 2013.
- [8] RECOMMENDATION ITU-R M1371-5 : *Technical characteristics for an automatic identification system using time-division multiple access in the VHF maritime mobile band*. International Telecommunication Union, 2014.
- [9] N. SESHADRI et C.-E.W. SUNDBERG : List Viterbi decoding algorithms with applications. *IEEE Transactions on Communications*, 42(234):313–323, 1994.
- [10] Y. TAKANEZAWA, Y. CHANG, K. FUKAWA et D. HIRAHARA : Separate Detection of Collided Packets using Parallel Interference Cancellation over Space-based AIS Channels. *IEICE Technical Report*, 119(417):33–38, 2020.
- [11] S. UEHASHI, Y. NOUDA, M. HANGAI et T. OHGANE : Successive Interference Cancellation for Asynchronous Signal Collision in Space-based AIS. *In 2022 IEEE Aerospace Conference*, pages 1–7, 2022.
- [12] H. YANG, S. V. S. RANGANATHAN et R. D. WESEL : Serial list Viterbi decoding with CRC : Managing errors, erasures, and complexity. *In 2018 IEEE Global Communications Conference*, pages 1–6, 2018.
- [13] M. ZHOU, A.-J. van der VEEN et R. van LEUKEN : Multi-user LEO-satellite receiver for robust space detection of AIS messages. *In 2012 IEEE ICASSP*, pages 2529–2532, 2012.