

Filtrage Adapté Stochastique passif pour la détection de plongeurs

Léa BOUFFAUT, Richard DRÉO, Valérie LABAT, Abdel BOUDRAA

Institut de Recherche de l'École Navale - IRENav, BCRM Brest, CC600 - 29240 Brest Cedex 9, France

lea.bouffaut@ecole-navale.fr

Résumé – De par sa discrétion, la détection passive est un atout majeur pour la surveillance de zones maritimes, notamment dans le cas de détection de plongeurs intrus dans les zones portuaires. Des outils de traitement du signal adaptés au contexte passif sont nécessaires afin de minimiser le temps de réaction des opérateurs, voire même d'automatiser le processus. En pratique, les méthodes basées sur la démodulation d'amplitude ou DEMON (DEModulation Of Noise) sont les plus utilisées, mais atteignent leurs limitations pour la détection de sources à faible Rapport Signal sur Bruit (RSB) (bateaux, plongeurs, AUV...). Une stratégie pour maximiser le RSB est le Filtrage Adapté Stochastique (FAS), que nous étendons dans ce travail au contexte passif. La contribution majeure, réside dans l'étape cruciale de l'estimation du bruit de fond qui ne nécessite plus d'information *a priori* sur la répartition du bruit dans l'observation. Cette nouvelle méthode est alors appliquée sur un enregistrement de cycles respiratoires de deux plongeurs en piscine. Les résultats montrent qu'il est possible d'adapter les hypothèses du FAS au contexte passif pour maximiser le RSB en sortie de processus, permettant ainsi d'optimiser la détection.

Abstract – Due to its inherent discretion, passive detection is a convenient way for acoustic monitoring of maritime zones e.g. scuba divers detection in a context of harbor protection. However, the need for instantaneous reaction opens a field of research to improve the human operators' detection tools. This work proposes an extension of the Stochastic Matched Filter (SMF) for online passive detection and is tested on scuba divers' breathing records in a swimming pool. Results show that the original SMF assumptions can be relaxed and that the use of this method can drastically improve the output Signal to Noise Ratio.

1 Introduction

Dans un contexte de protection portuaire, l'atout majeur de l'utilisation de l'acoustique passive pour la détection d'intrus, notamment de plongeurs, est sa discrétion. Cependant, les portées des systèmes de surveillance passifs restent faibles comparées aux autres méthodes connues (optique, électromagnétique, sonar actif...) [1]. Afin de proposer un outil tout aussi performant, permettant aux opérateurs de réagir de manière quasi-instantanée, voire même de tendre vers un processus autonome, il est nécessaire de développer un outil de traitement du signal fiable et robuste.

Le Filtrage Adapté Stochastique (FAS) est une technique permettant la maximisation du Rapport Signal sur Bruit (RSB) en sortie. L'approche, habituellement utilisée en sonar actif, est une extension du filtrage adapté pour des signaux aléatoires noyés dans du bruit coloré. Elle est présentée ici comme un outil innovant pour la détection et la classification de signaux de plongeurs dans un contexte passif. Après une présentation du FAS classique § 2, les différentes améliorations apportées à la méthode sont présentées au § 3 puis, le nouveau FAS est appliqué à un enregistrement de plongeurs en piscine § 4.

2 Principe du FAS

Le FAS introduit par Cavassillas [2] est une extension du filtrage adapté pour des signaux aléatoires noyés dans du bruit coloré. Modélisé par la suite comme un filtre linéaire variant

dans le temps [3], il est entre autres utilisé en traitement de sonar actif. Cependant, des travaux plus récents [4][5] mettent en avant sa capacité à détecter des signaux impulsionnels comme des clics d'orques, suggérant qu'il pourrait être exploité comme outil de traitement du signal passif. En effet, l'intérêt de la méthode réside dans sa capacité à maximiser le RSB en sortie du filtre, en recherchant temporellement des similarités entre un signal de référence et une observation donnée. Il est alors possible de détecter et classifier ce signal en une seule opération. D'un autre côté le FAS nécessite une estimation précise du bruit de fond, difficilement réalisable dans un contexte passif. Les contributions pour faire du FAS un outil applicable en passif pour la détection de plongeurs sont présentées au § 3.

Soit l'observation $Z[m] = \sigma_S S_0[m] + \sigma_N N_0[m]$ de taille M , superposition additive du signal et de bruit, avec $S_0[m]$ et $N_0[m]$ leurs réalisations centrées respectives et $\sigma_{S,N}^2$ les puissances associées [3]. Le FAS consiste en une étape de pré-traitement présentée sur le schéma fonctionnel Fig. 1 suivie d'une procédure en ligne illustrée sur la Fig. 2. La méthode

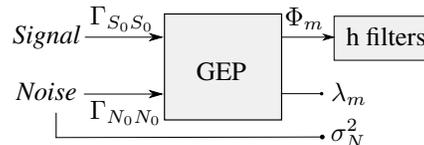


FIGURE 1 – Pré-traitement du FAS.

nécessite deux paramètres d'entrée (Fig. 1) : une référence de

signal et une référence de bruit. Elles permettent de calculer leurs matrices de covariance, respectivement notées $\Gamma_{S_0 S_0}$ et $\Gamma_{N_0 N_0}$, qui interviennent dans le problème aux valeurs propres généralisées (GEP) [3]

$$\Gamma_{S_0 S_0} \Phi_m = \lambda_m \Gamma_{N_0 N_0} \Phi_m, \quad (1)$$

où les λ_m représentent les valeurs propres et Φ_m les vecteurs propres. La résolution du GEP conduit à l'élaboration d'une banque de filtres notée h . L'opération en ligne se fait par fe-

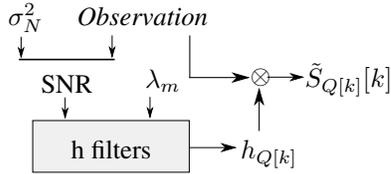


FIGURE 2 – FAS en ligne.

nêtre glissante d'indice central k . Le RSB courant ρ_k de l'observation Z_k est alors évalué à partir du rapport de puissance

$$\rho_k = \frac{\sigma_{Z_k}^2 - \sigma_N^2}{\sigma_N^2}, \quad (2)$$

permettant de choisir à chaque instant quel filtre appliquer à Z_k . La sortie du filtre est notée $\tilde{S}_{Q[k]}[k]$. Une faible valeur de ρ_k indique l'absence du signal dans l'observation; le premier filtre est alors appliqué. En atténuant fortement le bruit, il permet la maximisation du RSB en sortie de l'opération. *A contrario*, un ρ_k élevé indique la présence du signal dans l'observation, le nombre maximal de filtres de h est alors appliqué, conduisant à la reconstruction de l'observation dans la bande de fréquences du signal. L'utilisation du FAS classique nécessite donc une référence de bruit de fond, une connaissance *a priori* du contenu spectral du signal utile, un outil d'estimation du RSB.

Le § 3 présente les ajustements nécessaires pour satisfaire ces trois conditions dans le cas où le FAS est utilisé pour la détection de plongeurs par acoustique passive.

3 FAS amélioré pour la détection passive de plongeurs

Tandis que le § 2 présente le FAS classique, il est présenté ici comme un outil innovant pour la détection de plongeurs dans un contexte d'acoustique passive. Tout d'abord la référence de signal est créée en accord avec la physique liée à la génération du signal de respiration (§ 3.1) puis, basée sur la technique développée dans [6], les estimations du bruit de fond (§ 3.2) et du RSB dépendant du temps (§ 3.4) sont adaptées au contexte passif.

3.1 Signal de référence

Au cours du cycle de respiration des plongeurs, les phases d'inhalation sont caractérisées par des signaux large bande. Pour

un enregistrement effectué en cuve par un hydrophone Reson TC 4034, à une fréquence d'échantillonnage de $f_s = 44.1$ kHz, le spectrogramme Fig. 3 présente deux bandes fréquentielles plus énergétiques à ~ 6 kHz et ~ 11 kHz. Celles-ci sont dues

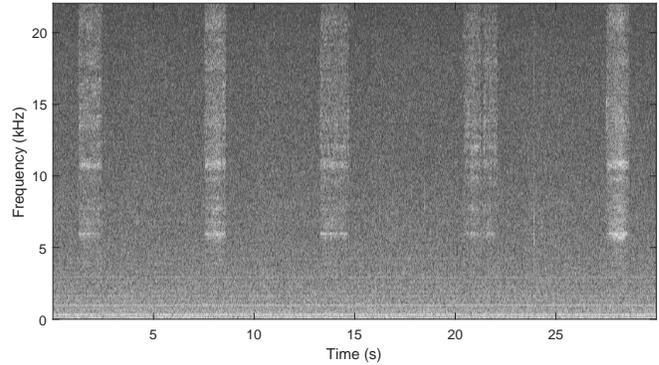


FIGURE 3 – Spectrogramme de la respiration d'un plongeur enregistré en cuve $f_s = 44.1$ kHz

à la modulation du bruit d'inspiration par les détendeurs des équipements de plongée. Cette caractéristique, permet de synthétiser la signature du plongeur en modulant du bruit blanc (Fig. 4). Ce signal très synthétique est utilisé comme en référence pour le calcul de $\Gamma_{S_0 S_0}$ à l'entrée du GEP [7].

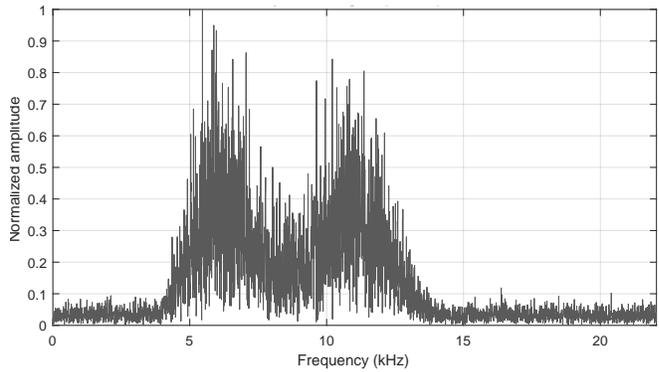


FIGURE 4 – Représentation fréquentielle du signal de référence.

3.2 Estimation du bruit de fond

L'estimation du bruit de fond du FAS classique repose sur l'hypothèse qu'une portion de l'observation peut être constituée uniquement de bruit. Or, cette hypothèse est difficilement vérifiable dans un contexte passif où un signal utile peut se présenter à tout moment. Pour pallier ce problème, l'estimation du bruit de fond est réalisée en utilisant un filtre médian pour atténuer le contraste signal-bruit. Il est appliqué par fenêtre glissante de taille w impaire sur chaque canal fréquentiel de la transformée de Fourier à court terme (STFT) $P(k, f)$ de l'observation de taille K . La sortie est notée $P_{med}(k, f)$. La Fig. 5a représente le spectrogramme de la sortie du filtre médian $|P_{med}(k, f)|^2$, appliqué à une observation de 60 s (Fig. 7a).

La matrice de covariance du bruit $\Gamma_{N_0 N_0}$ de même taille que le signal de référence (~ 0.15 s) est affichée avant (Fig. 5b) et après (Fig. 5c) filtrage médian, mettant en avant les ressemblances avec un processus de blanchiment. Cette amélioration

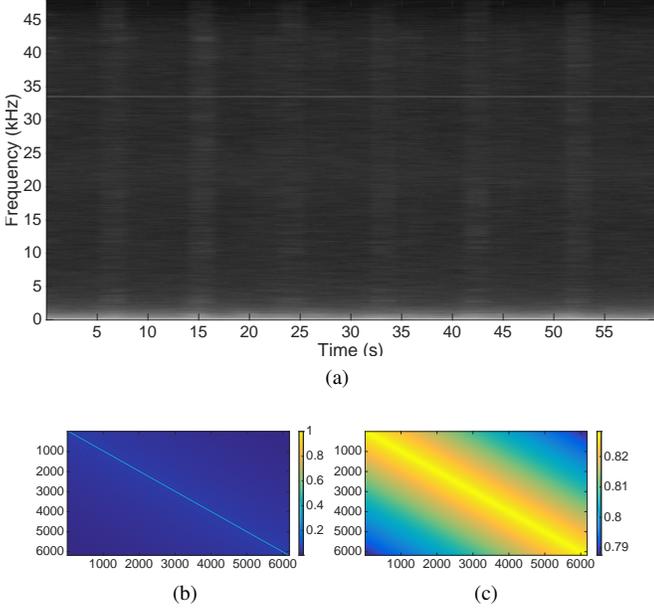


FIGURE 5 – Effet du filtre médian sur l'estimation du bruit de fond de l'observation Fig. 7a. (a) $|P_{med}(k, f)|^2$ spectrogramme, $w = 2.5$ s (impair), (b) $\Gamma_{N_0 N_0}$ entrée FAS classique, (c) entrée FAS Filtre médian $\Gamma_{N_0 N_0}$.

permet de rendre la méthode autonome en s'affranchissant de la sélection de zones de bruit par un opérateur.

3.3 Banque de filtres

Une fois les références de signal, de bruit et les matrices de covariance associées connues, il est possible de résoudre le GEP (Fig. 1) afin de calculer la banque de filtres h appropriée à la détection de plongeurs. L'étape de blanchiment permet de s'affranchir de la dépendance en temps de l'estimation du bruit de fond et donc de conserver h de manière permanente [6]. La Fig. 6 présente la réponse fréquentielle des filtres H_1 , H_{10} and H_{Qmax} , où H_Q représente la superposition des Q -premiers filtres de h (1), comparés au spectre du signal de référence HOpt (§ 3.1). Le premier filtre H_1 est un filtre bande étroite, centré sur la bande d'énergie la plus significative à ~ 11 kHz. Comme le démontre la théorie (§ 2), le rôle de H_1 est de maximiser le RSB en sortie; il permet de supprimer le bruit lorsque l'estimation de ρ_k indique que le signal est absent de l'observation. La superposition des 10 premiers filtres H_{10} produit un filtre un peu plus large bande, dans la même gamme de fréquences. H_{Qmax} représente la superposition de l'ensemble des filtres de la banque h , appliquée lorsque ρ_k est suffisamment grand. Il couvre les mêmes bandes de fréquences que la référence de signal HOpt, permettant lorsqu'il est employé de ne conserver que l'information utile.

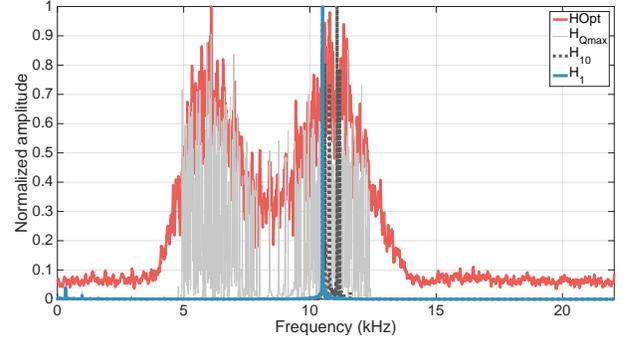


FIGURE 6 – Spectre de trois filtres de la banque de filtre permanente (H_1 , H_{10} and H_{Qmax}) comparés à la représentation fréquentielle du signal de référence (HOpt).

Le paramètre clé, permettant de choisir judicieusement le filtre à appliquer en entrée de la méthode, est l'estimation courante de ρ_k . Elle doit à la fois être robuste au bruit, précise et permettre de détecter des signaux lointains. Elle est ré-évaluée dans le § 3.4, pour convenir au contexte de détection passive.

3.4 Estimation du RSB en fonction du temps

L'estimation du RSB variant dans le temps ρ_k est utilisée à l'entrée de l'étape en ligne du FAS comme un critère de décision sur le nombre de filtres à appliquer à une observation Z_k . Tandis que sa définition classique (eq. (2)) ne convient pas à un contexte de détection passive, en particulier à faible RSB, la méthode d'estimation est améliorée pour rendre ρ_k plus robuste au bruit de mer et ainsi réduire les fausses alarmes. Un critère fréquentiel est introduit, à la suite du calcul de $P_{med}(k, f)$ (§ 3.2). Ainsi, pour chaque échantillon de l'observation k , le RSB courant est :

$$\rho_k = 20 \log \left(\frac{1}{J} \sum_{j=1, \dots, J} \left| \frac{\max_{f \in A_j} P(k, f)}{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_{med}(k, f')} \right| \right), f' \in A_j \quad (3)$$

avec J le nombre de bandes d'énergie du signal considéré et A_j leur intervalle fréquentiel.

Les différents ajustements et innovations apportés au FAS sont donc :

- la référence du signal a un spectre connu, modélisé en accord avec la physique de génération des respirations,
- la sélection du bruit de fond par un opérateur n'est plus nécessaire grâce à un blanchiment par filtre médian,
- l'estimation du RSB variant dans le temps ρ_k est ajustée par analyse temps-fréquence.

De plus, les modifications du signal et du bruit de référence permettent maintenant un calcul préalable "hors ligne" de la banque de filtres h , entraînant un gain en temps de calcul et une amélioration de la robustesse au bruit.

4 Application à la détection de plongeurs

La version passive du FAS est appliquée sur des signaux enregistrés en piscine en présence de deux plongeurs. Sur la Fig. 7a, le spectrogramme de l'enregistrement d'une minute, échantilloné à $f_s = 96$ kHz met en avant leurs inspirations. L'un, plus proche de l'hydrophone, est facilement identifiable.

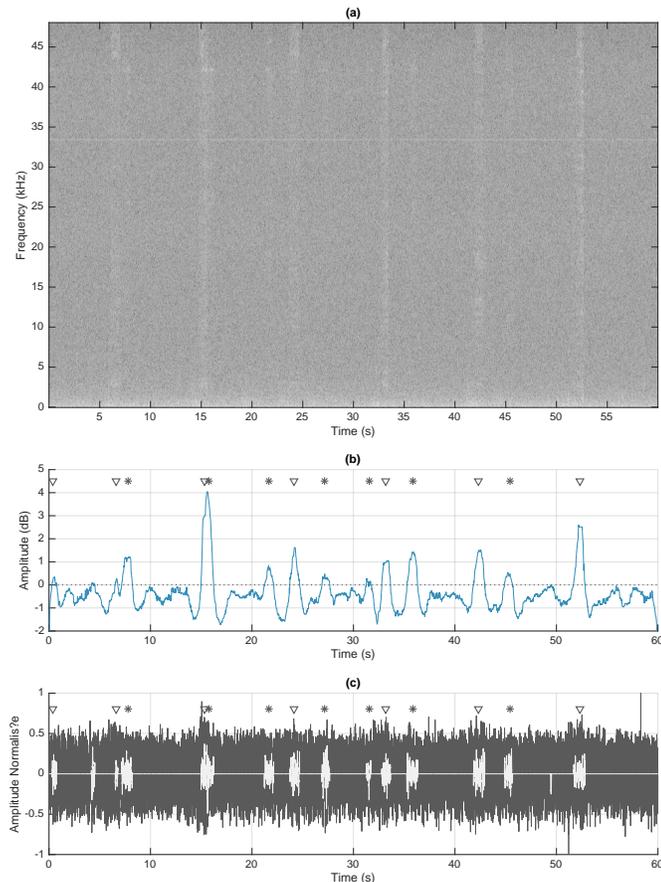


FIGURE 7 – FAS appliqué à la détection de deux plongeurs en piscine ($f_s = 96$ kHz.) (a) Spectrogramme de l'enregistrement. (b) Estimation de ρ_k . (c) Entrée (gris) et sortie (blanc) du FAS en valeurs naturelles. Marquage manuel des respirations des plongeurs 1 ∇ et 2 $*$.

La présence du second plongeur, plus éloigné, est plus difficile à distinguer et seules quelques respirations sont remarquables, notamment aux secondes 22 et 26. La Fig. 7b représente la variation de l'estimation du RSB ρ_k . Seules les valeurs positives conduisent à une reconstruction de l'observation. La nouvelle estimation de ρ_k met en avant l'ensemble des respirations des deux plongeurs, y compris le plus éloigné. La Fig. 7c représente l'entrée et la sortie du FAS passif. Comme reporté au § 2, le bruit est sensiblement atténué dans les zones où ρ_k est négatif tandis que l'observation est reconstruite dans la bande du signal de référence quand ρ_k est positif. Il est alors possible de reconnaître deux "cycles" de respiration, rendant la présence d'un second plongeur indiscutable.

5 Conclusion

Cet article propose une extension innovante du FAS comme outil de traitement du signal pour un contexte passif. Les différentes étapes et modifications sont illustrées sur un enregistrement de respirations de plongeurs en piscine. Alors que le FAS classique nécessite une estimation du bruit de fond et une connaissance *a priori* du signal utile, les ajustements présentés dans cet article sont :

- la simulation du signal de référence en accord avec la physique de génération du signal de respiration et une analyse temps-fréquence d'enregistrements en cuve,
- l'estimation du bruit de fond à partir d'une nouvelle méthode basée sur le blanchiment via l'application d'un filtre médian sur chaque canal fréquentiel de la STFT de l'observation, permettant de s'affranchir de la sélection de zones de bruits par un opérateur,
- l'estimation du RSB dépendant du temps, révisée par analyse temps-fréquence.

L'application de la nouvelle méthode permet de démontrer sa faisabilité en mettant en avant ses qualités en matière de maximisation du RSB, détection et classification, même sur des signaux faibles et non déterministes. Les perspectives de ce travail sont d'évaluer les améliorations en termes de performances (courbes COR et courbes de performances) ainsi que de tester le FAS passif sur la détection de plongeurs en milieu marin.

Références

- [1] R. Stolkin, A. Sutin, S. Radhakrishnan, M. Bruno, B. Fullerton, A. Ekimov, and M. Raftery, "Feature based detection of underwater threats," *Proc. SPIE*, vol. 6204, pp. 620408–620410, 2006.
- [2] J.-F. Cavassillas and B. Xerri, "Extension de la notion de filtre adapté. Contribution à la détection de signaux courts en présence de termes perturbateurs," *Traitement du Signal*, vol. 10 n. 3, pp. 215–221, 1993.
- [3] P. Courmontagne, G. Julien, and M. Bouhier, "An improvement to the pulse compression scheme," in *OCEANS 2010 IEEE - Sydney*, pp. 1–5, 2010.
- [4] F. Caudal and H. Glotin, "Stochastic Matched Filter outperforms Teager-Kaiser-Mallat for tracking a plurality of sperm whales," *IEEE PASSIVE 2008*, pp. 1–9, 2008.
- [5] J. Bonnal, P. Danes, and M. Renaud, "Detection of acoustic patterns by stochastic matched filtering," in *Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1970–1975, 2010.
- [6] L. Bouffaut, R. Dréo, V. Labat, A.-O. Boudraa, and G. Barruol, "Antarctic blue whale calls detection based on an improved version of the stochastic matched filter," in *EU-SIPCO 2017*, (Greece), August 2017.
- [7] L. Bouffaut and A.-O. Boudraa, "Passive stochastic matched filter : Application to scuba divers detection," in *ICASSP 2017*, (USA), March 2017.