

Modélisation autorégressive de la réverbération. Application en détection active large-bande.

Valérie Carmillet, Geneviève Jourdain.

CEPHAG/ENSIEG, Domaine Universitaire, BP 46
38402 Saint Martin d'Hères, France

RÉSUMÉ

Dans ce papier, nous essayons de répondre au problème posé par la présence du phénomène de réverbération en détection active. Dans le cas où ce phénomène résulte de la propagation dans le milieu marin de signaux à modulations hyperboliques de fréquence, nous mettons en place un détecteur sous-optimal existant déjà dans la littérature pour d'autres types de signaux. Ce détecteur sous-optimal exploite les 0 statistiques du bruit de réverbération : coloration et non-stationnarité. Il consiste d'une part à s'affranchir du problème de la non-stationnarité, d'autre part à estimer la fonction de covariance de la réverbération et ainsi de construire un filtre de blanchiment. Ce filtre va ensuite nous permettre de blanchir le signal reçu. Ensuite la dernière étape sera de faire un filtre adapté au signal modifié par son passage dans le filtre précédent. Finalement, nous présentons des comparaisons entre les performances obtenues par le détecteur classique utilisé habituellement et ce nouveau détecteur.

ABSTRACT

In this paper, we try to solve some problems caused in active Sonar detection by the existence of the reverberation phenomenon. When this phenomenon results from the propagation of hyperbolic FM's, we extend a suboptimal detector that already existing in the literature for FP's signals. This suboptimal detector uses the statistics properties of the reverberation noise : coloration and non-stationarity. It consists firstly in solving the problem of non-stationarity, secondly in estimating the covariance function of the reverberation to build a prewhitener filter. We used this filter for whitening the received signal and finally, we make a filter matched to the signal distorted by the prewhitener. At last, we present comparisons between the performances of the classical detector currently used and this new detector processing.

1 Introduction.

En acoustique sous-marine, les problèmes résultant de la présence de la réverbération en détection par sonar actif sont depuis longtemps connus. Ils sont particulièrement importants lorsque l'on cherche à détecter une cible de faible Doppler au voisinage de la surface de la mer ou du fond. Les difficultés provoquées par la présence de la réverbération viennent principalement de trois choses, d'une part la dépendance très forte entre le signal émis et la réverbération, ce qui explique le nombre de fausses alarmes important lors de l'utilisation du filtrage adapté classique, d'autre part des propriétés statistiques du bruit de réverbération : coloration et non-stationnarité. En effet, si l'on cherche à détecter une cible dans un bruit fortement coloré, le filtrage adapté classique donne des résultats décevants. Pour résoudre cette difficulté, un blanchiment préalable des données est nécessaire avant d'effectuer le filtrage adapté. Or le blanchiment requiert la connaissance de la structure de covariance du bruit. Si cette information n'est pas connue a priori, on doit estimer cette fonction de covariance. Dans le cas du bruit de réverbération, cette estimation est rendue plus difficile du fait de sa non-stationnarité. De ce fait, on doit s'orienter vers des stratégies sous-optimales basées sur quelques hypothèses fortes comme la stationnarité locale de la réverbération.

Ce papier présente la philosophie du détecteur sous-optimal proposé. Nous discutons de la manière d'inclure l'hypothèse de stationnarité locale dans l'algorithme de détection et comment utiliser un modèle autorégressif pour réaliser le filtre de blanchiment. On établit ensuite le détecteur d'un signal à modulations hyperboliques (FMH) de fréquence modifié par son

passage dans le filtre précédent noyé alors dans un bruit blanc supposé gaussien. Finalement nous montrons l'efficacité de ce détecteur par comparaisons avec le détecteur classique sur des données semi-réelles : bruit de réverbération réel et cible simulée.

2 Détection en présence de bruit coloré et non-stationnaire.

Le modèle de détecteur sous-optimal que nous développons ici s'appuie donc sur les propriétés statistiques du bruit de réverbération. Cette méthode qui utilise le modèle autorégressif (AR) pour modéliser le bruit de réverbération et faciliter l'estimation de sa fonction de covariance fut initialement proposée dans [1] par S.Kay et J.Salisbury. Le détecteur proposé a été établi pour traiter le cas où la réverbération résulte de l'émission d'une sinusoïde (FP) à travers le milieu marin. Cependant les signaux à modulations de fréquence et les signaux large-bande en général sont de plus en plus employés à l'heure actuelle en détection active. Or la forme du détecteur proposé dans [1] est inadapté pour traiter ce type de signaux. C'est pourquoi, dans un premier temps, nous avons étendu ce détecteur sous-optimal au cas des signaux à modulations linéaires de fréquence (FML) cf.[2]. Ici, nous nous intéressons à celui des FMH.

Pour pouvoir détecter en présence de bruit coloré et stationnaire, il faut être capable d'estimer la fonction de covariance de ce bruit et ainsi construire le filtre de blanchiment. Si l'on suppose que le bruit de réverbération peut se modéliser par un

processus autorégressif, et si l'on dispose de données contenant seulement du bruit, on va voir qu'il est facile d'estimer cette fonction. Pour cela nous allons nous servir comme dans [1] de la méthode du maximum de vraisemblance (MLE) pour identifier les paramètres du modèle AR et ainsi ceux du filtre inverse. Après blanchiment des données contenant éventuellement le signal recherché à l'aide de ce filtre, nous nous retrouvons alors dans une situation classique de détection : rechercher un signal déformé par l'utilisation d'un filtre blanchissant dans un bruit blanc gaussien.

Il nous reste finalement deux problèmes à résoudre : comment tenir compte de la non-stationnarité et s'en affranchir d'une part, et d'autre part résoudre le problème de détection d'une FMH noyée dans un bruit autorégressif gaussien.

2.1 Hypothèse de stationnarité locale

Le bruit de réverbération est fortement non-stationnaire. Cependant, c'est un phénomène de longue durée par rapport à la durée de l'écho recherché (peu différente de celle du signal émis). De ce fait à l'échelle de la durée du signal d'émission, nous pouvons raisonnablement faire l'hypothèse que la réverbération est stationnaire. C'est cette propriété que nous 0 stationnarité locale. Le signal reçu est alors découpé en blocs de longueur égale à la longueur 0 du signal émis. Ainsi, grâce à l'hypothèse de stationnarité locale, la fonction de covariance du bruit de réverbération est supposée évoluer lentement entre deux blocs. On supposera aussi dans un premier temps que la cible est localisée principalement à l'intérieur d'un bloc et que le premier bloc au moins ne contient que du bruit de réverbération. En effet, il est essentiel que l'estimation des paramètres du modèle AR s'effectue en présence de bruit seul. Sur chaque bloc à présent, nous devons décider de la présence ou non de la cible. Le numéro du bloc où la cible est détectée nous donnera alors la distance séparant la cible du sonar.

2.2 Détection d'une FMH dans un bruit autorégressif

Nous supposons que le signal reçu a été découpé en M blocs de N points (nombre de points du signal émis). Nous supposons aussi que la cible a déjà été recherchée dans K blocs et qu'elle n'a pas été trouvée parmi ceux-ci. Nous devons alors décider si la cible se trouve dans le bloc K+1. Nous allons maintenant détailler le procédé de détection, c'est-à-dire rechercher l'écho d'une cible ponctuelle à fluctuations lentes dans un bruit autorégressif complexe gaussien.

2.2.1 Première étape : Modélisation

Sur le bloc K+1, le problème de détection s'écrit (après démodulation complexe autour de f_0)

$$\begin{cases} H_0 & : & x_t = n_t \\ H_1 & : & x_t = s_t + n_t \end{cases} \quad t = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

où $s_t = A \exp(-j2\pi(f_0 t + \alpha \ln(1 + \gamma t)))$ avec $\alpha = \frac{T F_{max} F_{min}}{B}$, $\gamma = \frac{-B}{T(f_0 + B/2)}$.

Le paramètre T définit la durée du signal émis, F_{max} et F_{min} ses fréquences maximales et minimales et B sa bande. s_t est le signal FMH recherché caractérisé par son amplitude A , ses paramètres α et γ définissant la modulation hyperbolique de fréquence, inconnus et où n_t représente le bruit

de réverbération. Sous (H_1) la cible est supposée être présente dans le bloc traité, alors qu'elle est supposée ne pas l'être sous (H_0). Le bruit n_t est modélisé par un processus complexe autorégressif gaussien d'ordre p

$$n_t = - \sum_{k=1}^p a_k n_{t-k} + \varepsilon_t, \quad (2)$$

où ε_t est un bruit blanc gaussien complexe centré de variance σ^2 . Les paramètres du modèle AR sont inconnus et sont supposés varier lentement d'un bloc à un autre.

2.2.2 Seconde étape : Estimation

Cette étape consiste à estimer $\{a_1, \dots, a_p, \sigma^2, p\}$ (les paramètres du modèle AR) sur le bloc K+1 en présence de bruit seulement. Comme la cible n'a pas été trouvée sur le bloc K et en utilisant l'hypothèse de stationnarité locale, nous pouvons estimer ces paramètres sur le bloc K. Pour cela, nous employons la méthode de la covariance modifiée de prédiction linéaire cf.[3]. L'ordre du modèle est trouvé selon le critère d'information de description de longueur minimale (MDL). Le filtre blanchissant construit à partir de ces estimateurs est donné par

$$\hat{A}(z) = 1 + \sum_{k=1}^p \hat{a}_k z^{-k}, \quad (3)$$

où p est l'ordre du modèle et où les \hat{a}_k sont les paramètres estimés sur le bloc K. Ce filtre MA est ensuite utilisé pour blanchir les données du bloc K+1.

2.2.3 Troisième étape : Détection

Sous l'hypothèse que les données enregistrées dans le bloc K+1 ont été parfaitement blanchies à la sortie du filtre inverse, c'est-à-dire que les paramètres estimés \hat{a}_k^K sur le bloc K coïncident avec les vraies valeurs des paramètres a_k^{K+1} du modèle sur le bloc K+1, le nouveau problème de détection est alors

$$\begin{cases} H_0 & : & y_t = \varepsilon_t \\ H_1 & : & y_t = s_t^m + \varepsilon_t \end{cases} \quad t = 0, \dots, N-1 \quad (4)$$

où s_t^m est l'écho de la cible modifié par son passage par $\hat{A}(z)$, ε_t est le bruit blanc Gaussien décrit plus haut. On se trouve alors dans un problème 0 de détection, c'est-à-dire détecter un signal connu dans un bruit blanc gaussien. Le détecteur optimal est alors le filtre adapté au signal s_t^m . Cependant, comme certains de ces paramètres sont inconnus, nous utilisons le test du rapport de vraisemblance généralisé (GLRT) [4].

Les trois étapes décrites plus haut sont ensuite répétées sur l'ensemble des blocs jusqu'à ce que la cible soit détectée.

2.3 Détection d'une FMH modifiée par un filtre MA dans du bruit blanc gaussien

Si le signal démodulé à l'entrée du filtre blanchissant est la FMH décrite plus haut alors le signal modifié à sa sortie s'écrit

$$s_t^m = A \sum_{k=0}^p \hat{a}_k \exp(2j\pi f_0 k) \exp(-2j\pi f_0 t) \exp(-2j\pi \alpha \ln(1 + \gamma(t-k))) \quad (5)$$

avec $a_0 = 1$. Si on cherche le détecteur en utilisant le test du rapport de maximum de vraisemblance généralisé,

le test statistique décidant de la présence de la cible est la maximisation par rapport au paramètre γ de la fonctionnelle

$$F(\gamma) = 2N \ln \left[1 - \frac{I(\gamma)}{\sum_{t=0}^{N-1} |y_t|^2} \right]^{-1} \quad (6)$$

où

$$I(\gamma) = \frac{1}{\sum_{t=0}^{N-1} |s(t, \gamma)|^2} \left| \sum_{t=0}^{N-1} y_t s^*(t, \gamma) \right|^2 \quad (7)$$

avec $s(t, \gamma) = s_t^m / A$. Explicitement, le test décide (H_1) si $\text{Max}_\gamma (F(\gamma)) > \eta$ avec η un seuil préalablement choisi (* indique la conjugaison complexe). Notons que le test est indépendant de A . Grâce au lien existant entre le paramètre γ et le facteur de compression communiqué par la cible, on peut ainsi déterminer la vitesse de la cible.

Dans le cas où les paramètres du signal FMH recherché sont connus, le détecteur décide (H_1) si

$$F(\gamma) = 2N \ln \left[1 - \frac{I(\gamma)}{\sum_{t=0}^{N-1} |y_t|^2} \right]^{-1} > \eta \quad (8)$$

On peut montrer qu'asymptotiquement (lorsque $N \rightarrow \infty$), $F(\gamma)$ est distribuée selon une loi du χ_2^2 sous (H_0) comme dans le cas du détecteur sous-optimal adapté au cas des FM linéaires cf.[2]. De façon équivalente, lorsque N est grand, on peut aussi maximiser le test statistique suivant :

$$F'(\gamma) = \frac{I(\gamma)}{(1/2N) \sum_{t=0}^{N-1} |y_t|^2}. \quad (9)$$

Le fait qu'asymptotiquement la sortie du détecteur soit distribuée asymptotiquement selon une loi du χ_2^2 sous (H_0) est très important car cette propriété conduit à une normalisation en puissance entre blocs, c'est-à-dire en distance. C'est un des principaux avantages de ce détecteur par rapport au filtrage adapté classique dont la sortie ne sera pas elle normalisée en puissance.

Dans le paragraphe suivant, nous allons montrer l'efficacité du détecteur sous-optimal proposé en comparant ses résultats avec le filtre adapté classique qui suppose lui que le bruit de réverbération est blanc.

3 Application sur des données réelles de réverbération et cible simulée.

On suppose que l'on cherche à détecter une cible en présence de forte réverbération due au fond. De ce fait, on transmet un signal à modulation hyperbolique de fréquence montant de durée 4s, de fréquence centrale 1000 Hz, de bande 100 Hz. Ce signal s'écrit donc pour $t \in [0, T]$,

$$s_t = \text{réel}(A \exp(-2j\pi\alpha \ln(1 + \gamma t))) \quad (10)$$

$$\text{où } \alpha = \frac{TF_{\max} F_{\min}}{B}, \gamma = \frac{-B}{T(f_0 + B/2)}.$$

Le signal renvoyé par une cible ponctuelle se déplaçant à la vitesse v s'écrit alors pour $t \in [0, (1 + \lambda)T]$

$$s_{(1+\lambda)t} = \text{réel}(A \exp(-2j\pi\alpha \ln(1 + \gamma(1 + \lambda)t))) \quad (11)$$

où $\lambda = \pm 2v/c$ est le facteur de compression communiqué par la cible et c la vitesse du son dans l'eau. Après démodulation complexe autour de la fréquence f_0 , le signal recherché est de la forme

$$s_t^{\gamma'} = A \exp(-2j\pi(f_0 t + \alpha \ln(1 + \gamma' t))) \quad (12)$$

Le but est donc de retrouver γ' ou de façon similaire λ le facteur de compression communiqué par la cible. Les résultats que nous allons montrer ont été réalisés à l'aide d'une cible simulée de faible Doppler se déplaçant vers le sonar à la vitesse $v = 4m/s$ soit un facteur de compression de $\lambda = 0.0053$.

Le signal réverbéré résultant de la propagation du signal décrit plus haut, de durée 34s, est reçu sur un nombre fini de capteurs. Ce signal est démodulé, sous-échantillonné et on effectue une formation de voies. Le signal ainsi obtenu comportant 4096 échantillons, est découpé en blocs de longueur $N = 480$, nombre de points du signal émis. On a choisi d'insérer l'écho de la cible avec $\lambda = 0.0053$ dans le bloc 4 selon un rapport signal sur bruit défini par

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{A^2}{(1/N) \sum_{t=0}^{N-1} |n_t|^2} \text{dB} \quad (13)$$

où n_t pour $t = 0, \dots, N-1$ est le bruit de réverbération contenu dans le bloc 4. Nous avons choisi ici un rapport signal sur bruit de -15dB. La partie réelle du signal obtenu : réverbération réelle et cible simulée est montrée sur la figure (1) ainsi que le périodogramme du signal complexe.

Résumons maintenant le procédé de détection :

La cible est supposée ne pas se trouver dans le premier bloc. Sur ce bloc, nous estimons à l'aide du modèle AR, la fonction de covariance du bruit de réverbération. Nous pouvons ensuite construire le filtre de blanchiment et grâce à l'hypothèse de stationnarité locale de la réverbération nous pouvons alors blanchir les données contenues dans le second bloc. Nous calculons ensuite la sortie de notre détecteur, c'est-à-dire le test statistique donné par le GLRT. On a choisi ici de présenter directement la sortie en fonction de λ , facteur de compression, au lieu de γ . On cherche donc ensuite le maximum par rapport à λ , on le compare au seuil préalablement choisi et on décide de la présence ou l'absence de la cible à la distance donné par le second bloc. Si le test décide que la cible est absente de ce bloc, alors les paramètres d'un nouveau filtre de blanchiment sont estimés à l'aide des données contenues dans le second bloc et on recommence ainsi le processus de détection jusqu'à la découverte de la cible.

Nous montrons les diverses sorties du détecteur pour des blocs successifs dans la figure (2) et celles du détecteur classique dans la figure (3). Nous avons choisi délibérément de tester notre détecteur sur les sept premiers blocs du signal représenté dans la figure (1). En effet, ces blocs représentent la partie de la réverbération la plus non stationnaire.

On peut voir que la cible est facilement détectée par notre détecteur dans le bloc 4. De plus, aucune fausse alarme n'est présente aussi bien sur le bloc contenant la cible que sur les autres blocs. De la même façon, on ne verra la présence d'aucune fausse alarme dans les blocs suivants que nous ne présenterons pas ici faute de place. Par contre pour ce qui est du détecteur classique, la cible 0 que très faiblement dans le bloc 4. A l'intérieur de ce même bloc, on note déjà la présence de plusieurs fausses alarmes d'amplitudes plus importantes que

celle de la cible De même dans les blocs précédents et suivants, les fausses alarmes sont nombreuses. La vitesse de la cible est bien estimée par notre détecteur sous-optimal puisque la valeur estimée de λ est 0.0058 soit une vitesse v de 4.35 m/s.

On remarque que le premier bloc de données 0 pas en sortie du détecteur, puisqu'il sert exclusivement à estimer les paramètres du filtre blanchissant pour traiter les données contenues dans le bloc 2.

4 Conclusions

On constate que sur nos données de réverbération provenant essentiellement du fond, le détecteur sous-optimal proposé donne de bons résultats. Cela vient sans doute du fait que le détecteur arrive à tenir compte du fait que le "Doppler moyen" résultant de la réverbération de fond est nul et donc légèrement différent de celui communiqué par la cible. Par contre dans le cas où ces Doppler sont égaux, c'est-à-dire lorsque la cible recherchée est immobile, ce détecteur n'arrivera pas à la détecter, car il ne pourra plus différencier l'écho renvoyé par la cible des échos dûs à la réverbération.

Pour résoudre le cas où l'écho de la cible se trouve à cheval entre deux blocs, nous proposons la méthode suivante. Si la stationnarité locale est assez prononcée, on peut se servir de l'estimation du modèle AR sur le premier bloc pour blanchir les deux blocs suivants et calculer le test statistique de décision sur ces deux blocs. Si l'écho de la cible se trouve dans l'un de ces blocs ou à cheval, le test répondra 'oui'. Après cette localisation plutôt grossière, on pourra affiner la localisation en répétant ces opérations non plus sur des blocs mais en utilisant une fenêtre glissante. Le test sera alors maximum lorsque la fenêtre contiendra la cible. Grâce à la localisation par blocs, cette opération ne sera effectuée que sur un nombre peu important de points et donc coûtera peu en temps de calcul.

Nous aborderons plus tard les performances théoriques et pratiques de ce nouveau détecteur.

Références

- [1] S. Kay, S. Salisbury, "Improved Active Sonar Detection in Reverberation using autoregressive prewhiteners," JASA, vol. 87, 4, pp. 1603-1611, April 1990.
- [2] V. Carmillet, G. Jourdain, "Wideband Sonar Detection in Reverberation using Autoregressive Models," Oceans 96 MTS/IEEE Sept. 96.
- [3] S. Kay, *Modern spectral estimation*, Prantice Hall, 1987.
- [4] H.L. Van Trees, *Detection, estimation and Modulation Theory*, Vol. III, Wiley, 1968.

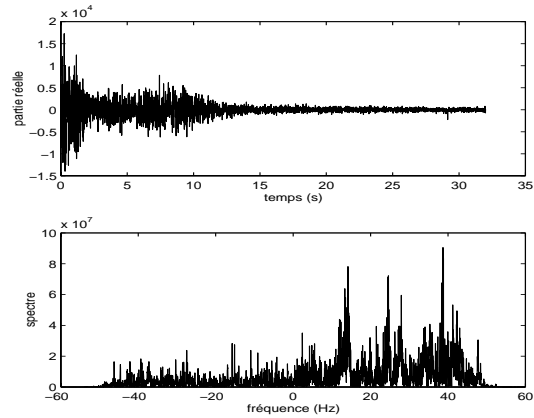


FIG. 1 — Signal réverbéré et son périodogramme.

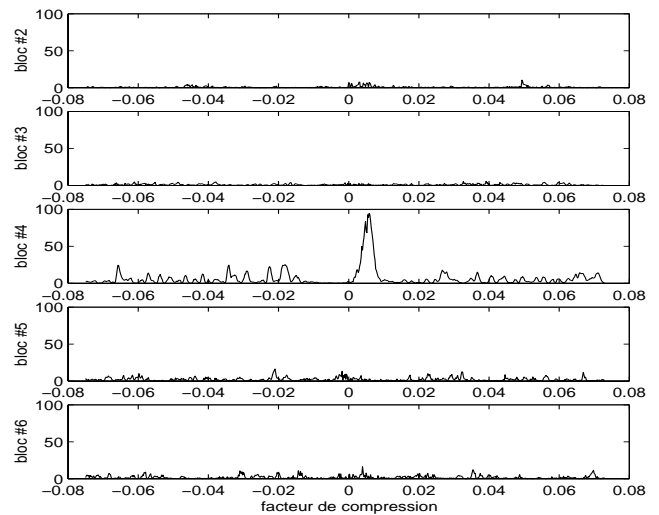


FIG. 2 — Détecteur optimal

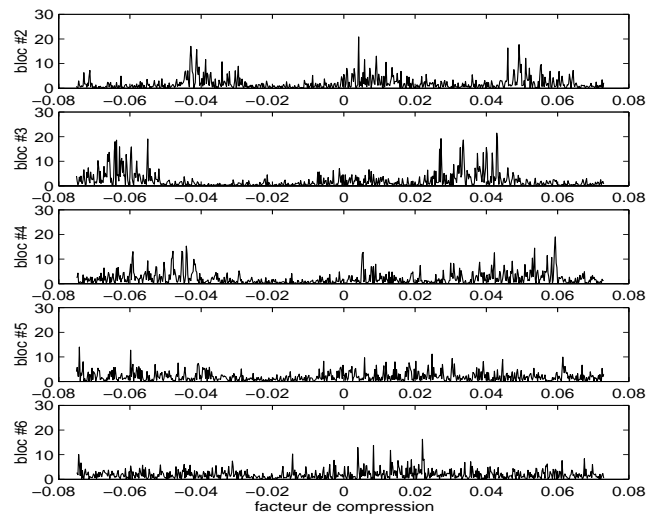


FIG. 3 — Détecteur classique