

Modélisation des signaux altimétriques en présence de pics

Abderrahim HALIMI¹, Corinne MAILHES¹, Jean-Yves TOURNERET¹, Pierre THIBAUT²

¹University of Toulouse, IRIT-ENSEEIH-TéSA, Toulouse, France

²Collecte Localisation Satellite (CLS), Ramonville Saint-Agne, France

abderrahim.halimi@enseeiht.fr, corinne.mailhes@enseeiht.fr

jean-yves.tourneret@enseeiht.fr, pierre.thibaut@cls.fr

Résumé – Un nouveau modèle altimétrique a été récemment introduit pour modéliser les échos altimétriques affectés par des pics. Ce modèle suppose l'écho altimétrique reçu comme étant la somme d'un écho de Brown et d'un pic Gaussien. Bien que ce modèle présente d'intéressants résultats pour les échos affectés par des pics symétriques, il reste néanmoins moins performant dans le cas d'échos perturbés par des pics asymétriques. Cet article propose un nouveau modèle construit comme la somme d'un écho de Brown et d'un pic asymétrique. L'estimation des paramètres est faite par la méthode du maximum de vraisemblance. Les performances du modèle proposé ainsi que la méthode d'estimation associée ont été évaluées à l'aide de simulations effectuées sur des données synthétiques et réelles.

Abstract – Coastal altimetric waveforms may be corrupted by peaks. A simple parametric model was recently introduced to model peaky altimetric waveforms. This model assumes that the received altimetric waveform is the sum of a Brown echo and a Gaussian peak. This model has provided interesting results for symmetric peaks affecting altimetric signals. However, it is not appropriate for altimetric signals corrupted by asymmetric peaks. This paper introduces a Brown with asymmetric Gaussian peak model for altimetric waveforms. The parameters of this model are estimated by a maximum likelihood estimator. The performance of the proposed model and the resulting estimation strategy are evaluated via simulations conducted on synthetic and real data.

1 Introduction

Le signal altimétrique océanique a une forme bien définie avec un front de montée abrupt suivi par une diminution graduelle de l'énergie. Cette forme peut être altérée lors de la réflexion sur le sol ou des surfaces autres qu'océaniques. Plusieurs études se sont intéressées à ces échos modifiés afin d'améliorer le traitement des signaux en zone côtière [1]. Le projet CNES/PISTACH fait partie de ces études et vise l'amélioration de l'altimétrie côtière et ce, en classifiant les échos suivant leurs formes géométriques comme le montre la figure 1 [2]. Le but de cette classification est d'isoler les échos présentant la même forme afin d'estimer leurs paramètres grâce à des algorithmes de poursuite bien spécifiques. Plusieurs modèles simples ont été récemment proposés dans [3,4] supposant que l'écho côtier est la somme d'un écho de Brown (adapté à la réflexion sur une surface océanique) et de pics Gaussiens. Cependant, ces modèles s'avèrent insuffisants pour des échos présentant des pics asymétriques tels que ceux apparaissant à la fin du front de montée comme pour les signaux de la classe 7 de la figure 1. Cet article étudie un modèle de signal altimétrique adapté aux signaux côtiers présentant des pics asymétriques (récemment introduit dans [5]) et une méthode d'estimation des paramètres de ce modèle. Des simulations effectuées sur signaux synthétiques et réels permettent d'apprécier les performances de ce modèle et de la méthode d'estimation associée.

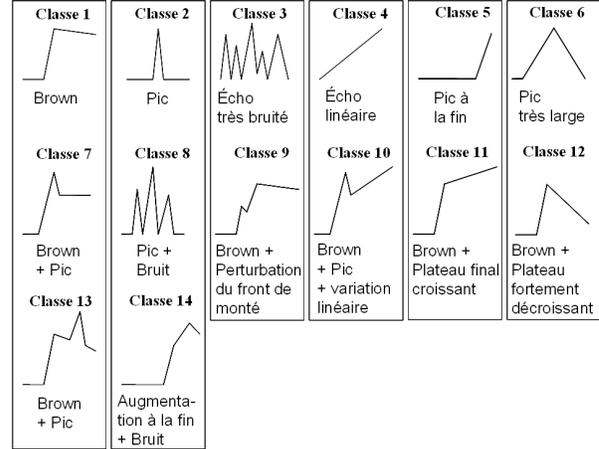


FIGURE 1 – Différentes formes des échos altimétriques obtenues par le projet CNES/PISTACH.

2 Modélisation

Une simplification du modèle de Brown [6] caractérise l'écho altimétrique océanique par trois paramètres, l'amplitude P_u , l'époque τ et la hauteur moyenne des vagues (Significant Wave Height) SWH tels que

$$s_k = \frac{P_u}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{kT_s - \tau - \alpha\sigma_c^2}{\sqrt{2}\sigma_c} \right) \right] e^{-\alpha \left(kT_s - \tau - \frac{\alpha\sigma_c^2}{2} \right)} + N_i \quad (1)$$

avec

$$\sigma_c^2 = \left(\frac{\text{SWH}}{2c} \right)^2 + \sigma_p^2 \quad (2)$$

où $s_k = s(kT_s)$ est le $k^{\text{ème}}$ point de l'écho reçu, T_s est la période d'échantillonnage, $\text{erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-z^2} dz$, c est la vitesse de la lumière, α et σ_p^2 sont des paramètres connus (dépendant du satellite et de l'altimètre) et N_i est le bruit thermique des instruments. Ce bruit thermique N_i est généralement estimé à partir des premiers points du signal observé et est soustrait de ce dernier de manière à avoir $N_i \simeq 0$ dans le modèle (1). Le modèle (1) a reçu un vif intérêt dans le domaine de l'altimétrie océanique. Cependant, il s'avère inefficace pour l'étude des échos issus de surfaces autres qu'océaniques telles que la glace, le sol ou les zones côtières [1–4]. En effet, pour de telles surfaces, l'écho altimétrique peut présenter des pics dus aux réflexions sur des surfaces non océaniques. Un modèle simple récemment introduit dans la littérature [3, 4] modélise le signal reçu comme la superposition du modèle de Brown et d'un pic Gaussien (modèle noté BPG pour "Brown pic Gaussien"). Ce modèle a fourni de bons résultats pour des signaux présentant un pic symétrique sur le plateau final de l'écho de Brown. Cependant, il n'est pas adapté aux échos présentant un pic asymétrique tel que celui apparaissant à la fin du front de montée (voir la classe 7 de la figure 1). Cet article propose un nouveau modèle altimétrique (noté BPGA pour "Brown Pic Gaussien Asymétrique") défini par la superposition de l'écho de Brown et d'un pic Gaussien asymétrique

$$\tilde{s}_k = s_k + p_k \quad (3)$$

avec

$$p_k = A_p \exp \left[\frac{-(kT_s - t_p)^2}{2\nu_p^2} \right] \left\{ 1 + \text{erf} \left[\frac{\alpha_p (kT_s - t_p)}{\sqrt{2}} \right] \right\} \quad (4)$$

où A_p , t_p , ν_p , α_p sont respectivement l'amplitude, la position, la "largeur"¹ et le coefficient d'asymétrie du pic. Notons que le modèle BPGA donné par (3) se réduit au modèle BPG pour $\alpha_p = 0$. Le modèle BPGA peut, par conséquent, être considéré comme une généralisation du modèle BPG. En pratique, en plus du bruit thermique additif N_i inclus dans (1), ces signaux sont entachés d'un bruit multiplicatif, appelé bruit de scintillement (ou "speckle"). Le paragraphe suivant présente une méthode d'estimation par maximum de vraisemblance du vecteur paramètres $\theta = (P_u, \tau, \text{SWH}, A_p, t_p, \nu_p, \alpha_p)^T$ associé au modèle proposé. Notons que θ contient les paramètres du modèle de Brown $\theta_B = (P_u, \tau, \text{SWH})^T$ ainsi que les paramètres du pic $\theta_p = (A_p, t_p, \nu_p, \alpha_p)^T$.

3 Estimateur du Maximum de Vraisemblance

La réduction du bruit multiplicatif affectant les échos altimétriques se fait en moyennant une séquence de L échos successifs. En supposant l'indépendance statistique entre ces échos,

1. ν_p est lié linéairement à la largeur à -3dB du pic.

on obtient une séquence de bruit indépendante et identiquement distribuée de loi gamma dont les paramètres de forme et d'intensité sont égaux au nombre de vues noté L . Dans le cas du modèle BPGA, l'écho altimétrique observé s'écrit alors

$$y_k = \tilde{s}_k n_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (5)$$

où K est le nombre d'échantillons et n_k est un bruit de loi marginale gamma. L'expression de la vraisemblance de $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_K)^T$ notée $f(\mathbf{y}|\theta)$ est obtenue en utilisant (5) ainsi que les propriétés statistiques du bruit $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_K)^T$

$$f(\mathbf{y}|\theta) = \left[\frac{L^L}{\Gamma(L)} \right]^K \exp \left(-L \sum_{k=1}^K \frac{y_k}{\tilde{s}_k} \right) \left(\prod_{k=1}^K y_k \right)^{L-1} \times \left(\prod_{k=1}^K \tilde{s}_k \right)^{-L} \prod_{k=1}^K \mathcal{I}_{\mathbb{R}^+}(y_k) \quad (6)$$

où $\mathcal{I}_{\mathbb{R}^+}(y_k)$ représente la fonction indicatrice ($\mathcal{I}_{\mathbb{R}^+}(y_k) = 1$ si $y_k \in \mathbb{R}^+$ et $\mathcal{I}_{\mathbb{R}^+}(y_k) = 0$ sinon). L'estimateur du maximum de vraisemblance (MV) de θ (noté $\hat{\theta}_{\text{MV}}$) est alors obtenu en maximisant $f(\mathbf{y}|\theta)$ par rapport à θ . L'obtention d'une expression analytique de $\hat{\theta}_{\text{MV}}$ est impossible du fait de la complexité de $f(\mathbf{y}|\theta)$, d'où la nécessité de l'utilisation d'une technique d'optimisation numérique pour déterminer l'estimateur MV. Une technique basée sur l'algorithme de Nelder-Mead a été proposée dans [5] pour calculer $\hat{\theta}_{\text{MV}}$. Cet article étudie une alternative basée sur une généralisation de l'algorithme de Newton-Raphson (NR). Cet algorithme permet de minimiser une fonctionnelle dans un espace à plusieurs dimensions (voir [7] pour plus de détails).

4 Résultats

4.1 Qualité de l'estimation

Cette section introduit les critères utilisés pour évaluer la qualité de l'estimation suivant les différents modèles (modèle de Brown, BPG, BPGA). Pour des échos synthétiques générés suivant le modèle (5), la qualité de l'estimation peut être évaluée en comparant les paramètres estimés aux paramètres réels en utilisant la racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM)

$$\text{REQM}(\theta_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\ell=1}^n [\theta_i - \hat{\theta}_i(\ell)]^2} \quad (7)$$

où θ_i et $\hat{\theta}_i(\ell)$ sont les paramètres réel et estimé du $\ell^{\text{ème}}$ écho et n est le nombre des échos synthétiques générés avec le même vecteur paramètre $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_7)^T$ et différentes réalisations du bruit. Pour les échos réels, l'erreur de reconstruction (ER) a été utilisée pour l'évaluation de la qualité de l'estimation

$$\text{ER} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (y_k - \hat{y}_k)^2} \quad (8)$$

Cette ER mesure la distance entre l'écho observé y_k et sa reconstruction \hat{y}_k obtenue en remplaçant les paramètres estimés

dans (3). L'erreur de reconstruction moyennée donnée par

$$\text{ERM} = \sqrt{\frac{1}{nK} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i\|^2} \quad (9)$$

a aussi été utilisée lors du traitement de n échos synthétiques.

4.2 Résultats sur échos synthétiques

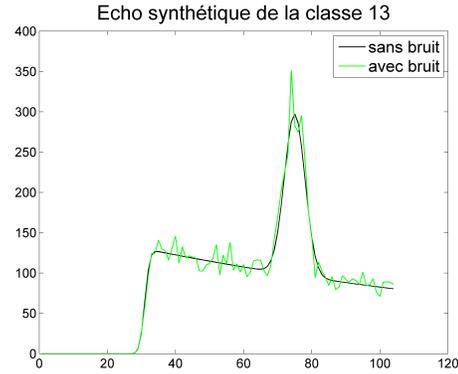
Les premiers résultats ont été obtenus sur des échos synthétiques correspondant à la classe 13 de la figure 1. Ces échos présentent un pic symétrique sur le plateau final du modèle de Brown et ont été générés avec les paramètres $P_u = 130$, $\tau = 31 T_s$ et $A_p = 200$, $t_p = 75 T_s$, $\nu_p = 3 T_s$, $\alpha_p = 0$ (comme le montre la figure 2.a). Tous les résultats fournis ont été obtenus en moyennant 100 simulations de Monte Carlo (avec différentes réalisations de bruit) pour SWH variant dans l'intervalle $[0, 12]$ mètres ce qui couvre la totalité des applications pratiques. La figure 2.b montre les REQMs obtenues à l'aide des trois modèles. Pour plus de clarté, nous ne donnons que les REQMs des deux principaux paramètres SWH et τ . Le modèle de Brown offre de grandes REQMs puisqu'il ne tient pas compte de la présence du pic. Les deux autres modèles, BPG et BPGA, fournissent de meilleures performances avec des résultats similaires. Le deuxième groupe de simulations s'est porté sur des échos synthétiques présentant un pic asymétrique à la fin du front de montée comme le montre la figure 3.a (voir aussi les échos de la classe 7 dans la figure 1). Les paramètres des échos synthétiques utilisés ont été fixés à $P_u = 130$, $\tau = 31 T_s$ et $A_p = 200$, $\nu_p = 3 T_s$, $\alpha_p = 1/T_s$. La figure 3.b montre les REQMs obtenues pour les trois modèles. Ces résultats montrent l'efficacité du modèle BPGA puisqu'il fournit les plus petites REQMs. Le modèle BPG offre des résultats acceptables pour de fortes hauteurs de vague SWH. Cependant, les performances de ce modèle diminuent significativement pour de faibles hauteurs de vagues. La supériorité du modèle BPGA par rapport au modèle BPG est due à la nature asymétrique du pic présent dans le signal (qui n'est pas capturée par le modèle BPG). La table 1 montre les ERMes obtenues pour 100 échos synthétiques avec les différents modèles : colonne BPGA-C7 - échos de la classe 7, colonne BPGA-C13 - échos de la classe 13. Le modèle BPGA offre les plus faibles ERMes au prix d'un plus grand temps de calcul (voir la table 2). A noter que le temps de calcul a été mesuré avec une implémentation MATLAB sur un ordinateur de 2.93 GHz i7 CPU. Tous les résultats obtenus dans cet article avec l'algorithme de Newton-Raphson confirment les résultats de [5] basés sur la méthode de Nelder-Mead.

TABLE 1 – ERMes associées à l'algorithme NR pour 100 échos synthétiques.

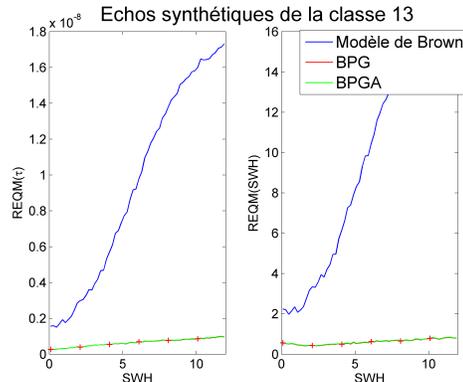
		Modèles pour échos synthétiques	
		BPGA-C7	BPGA-C13
algorithme de NR	Brown	54.73	42.89
	BPG	20.37	10.82
	BPGA	15.56	10.82

TABLE 2 – Temps d'exécution moyen (par écho) associé à l'algorithme de NR (en secondes).

		Modèles pour échos synthétiques	
		BPGA-C7	BPGA-C13
algorithme de NR ($\times 10^{-2}$)	Brown	0.60	1.80
	BPG	2.19	2.38
	BPGA	25.7	37.54



(a) Echo typique (SWH = 2m).

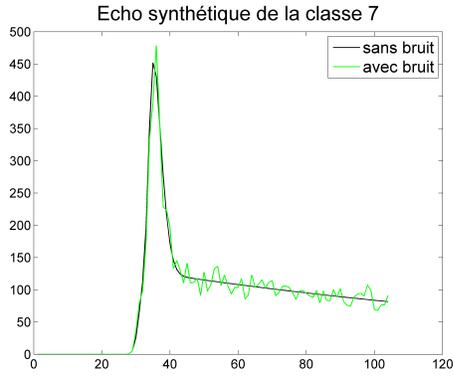


(b) REQM des paramètres.

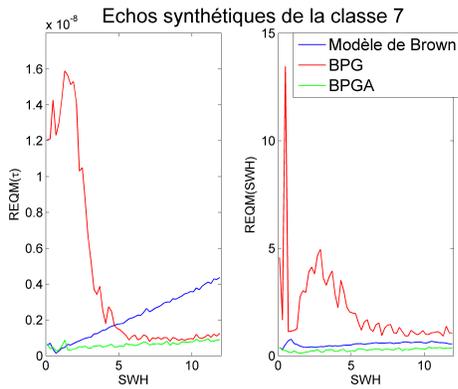
FIGURE 2 – Echos synthétiques de la classe 13.

4.3 Résultats sur échos réels "Jason 2"

Cette section s'intéresse aux performances du modèle proposé sur des échos réels issus du satellite JASON-2. Des échos associés aux classes 7 et 13 ont été isolés en utilisant le classifieur développé dans le cadre du projet PISTACH [2]. Les erreurs de reconstruction obtenues avec ces échos classifiés sont représentées sur la figure 4. Ces résultats montrent que le modèle BPGA offre de plus faibles erreurs de reconstruction que les deux autres modèles ce qui est en accord avec les résultats de [5] obtenus avec l'algorithme de Nelder-Mead. La figure 5 présente des estimés typiques pour les signaux des classes 13 et 7. Les deux modèles BPG et BPGA fournissent des résultats similaires pour le signal de classe 13 (figure 5.a) puisque ce dernier comporte un pic symétrique. Cependant, le signal de classe 7 est mieux estimé par le modèle BPGA (voir en parti-



(a) Echo typique (SWH = 2m).



(b) REQM des paramètres.

FIGURE 3 – Echos synthétiques de la classe 7.

culier le zoom sur le front de montée sur la figure 5.b) ce qui est dû à une meilleure estimation du pic asymétrique.

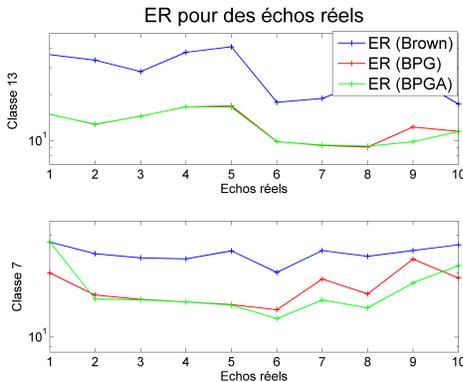
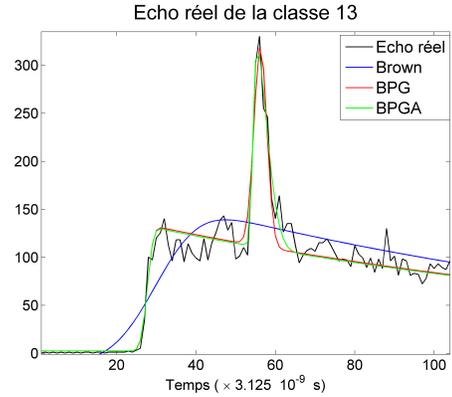


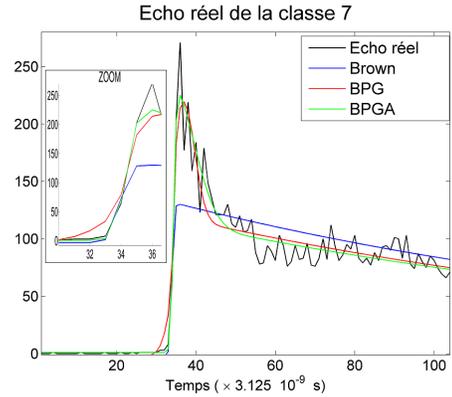
FIGURE 4 – Log(ER) moyennés sur 10 échos des classes 7 et 13.

5 Conclusions

Cet article a étudié un nouveau modèle d'écho altimétrique affecté par la présence d'un pic asymétrique, adapté aux signaux mesurés par les altimètres le long des zones côtières. Un algorithme d'estimation de ses paramètres basé sur la méthode



(a) Un écho réel de la classe 13 et ses estimés.



(b) Un écho réel de la classe 7 et ses estimés.

FIGURE 5 – Echos réels (JASON-2) et leurs estimés.

du maximum de vraisemblance a ensuite été étudié. Les résultats obtenus sur des signaux synthétiques et réels sont très prometteurs. Nos travaux futurs s'intéresseront à l'étude d'échos affectés par plusieurs pics, phénomènes observés lors de certaines campagnes de mesures.

Références

- [1] J. Severini, "Estimation et classification des signaux altimétriques," Ph.D. dissertation, Université de Toulouse, Toulouse, France, 2010.
- [2] P. Thibaut and J. C. Poisson, "Waveform processing in PISTACH project." in *2nd Coastal Altimetry Workshop*, Pisa, Italy, Nov. 2008.
- [3] J. Gómez-Enri, S. Vignudelli, G. D. Quartly, C. P. Gommenginger, P. Cipollini, P. G. Challenor, and J. Benveniste, "Modeling ENVISAT RA-2 waveforms in the coastal zone : Case study of calm water contamination," *IEEE Geosci. and Remote Sensing Lett.*, vol. 7, no. 3, pp. 474–478, 2010.
- [4] J.-Y. Tourneret, C. Mailhes, J. Severini, and P. Thibaut, "Parameter estimation for peaky altimetric waveforms," in *Oceans from Space*, Venice, Italy, april 2010.
- [5] A. Halimi, C. Mailhes, J.-Y. Tourneret, and P. Thibaut, "A new model for peaky altimetric waveforms," in *Proc. IEEE IGARSS*, Vancouver, Canada, 2011, to appear.
- [6] G. Brown, "Average impulse response of a rough surfaces and its applications." *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 25, no. 1, pp. 67–74, 1977.
- [7] D. P. Bertsekas, *Nonlinear programming*. Belmont, Massachusetts : Athena Scientific, 1995.