

Modèle semi-analytique pour l’altimétrie SAR/Doppler sur océan

Abderrahim HALIMI¹, Corinne MAILHES¹, Jean-Yves TOURNERET¹, Francois BOY², Thomas MOREAU³,

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

²Centre National d’Études Spatiales (CNES), Toulouse, France

³Collecte Localisation Satellite (CLS), Toulouse, France

abderrahim.halimi@enseeiht.fr, corinne.mailhes@enseeiht.fr
jean-yves.tourneret@enseeiht.fr, Francois.Boy@cnes.fr, tmoreau@cls.fr

Résumé – Le concept de radar altimétrique SAR/Doppler est apparu au milieu des années 90. Cette technologie permet de réduire le bruit de mesure (par augmentation du nombre d’observations) et d’augmenter la résolution le long de la trace (along-track) en utilisant l’information contenue dans la fréquence Doppler. Cet article propose un nouveau modèle semi-analytique, basé sur une approche géométrique, pour modéliser les échos SAR/Doppler. Ce modèle est validé à l’aide de données synthétiques puis à l’aide de données réelles issues du satellite Cryosat-2. Les résultats obtenus sont très prometteurs et montrent le bon fonctionnement du modèle proposé.

Abstract – The concept of delay/Doppler radar altimeter has been under study since the mid 90’s, aiming at reducing the measurement noise (by increasing the number of observations) and increasing the along-track resolution (by using the information of the Doppler frequency) in comparison with the conventional pulse limited altimeters. This paper introduces a semi-analytical model for delay/Doppler altimetry. The performance of the proposed model and the resulting estimation strategy are evaluated via simulations conducted on synthetic and real data. A comparison between conventional altimetry and delay/Doppler altimetry provides very promising results in favor of the proposed model.

1 Introduction

L’altimétrie spatiale, apparue dans les années 1970, s’est rapidement imposée comme un outil d’observation de la terre, en particulier pour l’étude et l’observation de la surface océanique. En altimétrie conventionnelle, l’altimètre reçoit un écho retour (appelé aussi “forme d’onde”) dont les caractéristiques reflètent l’état de la mer. Cet écho altimétrique s’écrit comme la double convolution entre trois termes qui sont la réponse impulsionnelle d’une mer (RIM) plate, la densité de probabilité de la hauteur des points de dispersion (DP) et la réponse impulsionnelle du radar (RIR) [1]. Plusieurs études ont été réalisées sur la modélisation de cet écho afin d’améliorer la qualité des paramètres altimétriques estimés. La nouvelle génération d’altimètres SAR/Doppler s’inscrit dans cette logique d’amélioration des mesures altimétriques et a deux objectifs : le premier est la réduction du bruit affectant les mesures par augmentation du nombre d’observations. Le deuxième objectif est d’augmenter la résolution le long de la trace en utilisant l’information contenue dans la fréquence Doppler.

Contrairement aux altimètres conventionnels qui envoient des impulsions radar de manière continue et à intervalles suffisamment longs pour éviter la corrélation de leurs échos, un altimètre SAR/Doppler repose sur l’émission d’impulsions par paquets successifs (bursts) (voir Fig. 1). Le décalage dans le temps entre impulsions d’un même paquet est choisi suffisamment court pour introduire une corrélation entre les échos re-

tour et pour les traiter par groupe, de façon cohérente, sur un principe similaire à la technique SAR des imageurs. L’altimètre SAR/Doppler permet donc d’accumuler plus de vues par point de mesure, diminuant le bruit de scintillement (speckle) et de surcroît le niveau de bruit des paramètres géophysiques. Ce concept utilise, par ailleurs, l’information Doppler¹ le long de la trace pour améliorer la résolution azimutale de l’altimètre [2]. Un intérêt immédiat de cette augmentation de résolution est d’avoir des échos côtiers valides jusqu’à une distance de 300 mètres de la côte alors que la distance minimale est de l’ordre de 10 km en altimétrie conventionnelle. Le premier altimètre SAR/Doppler a été placé en orbite en 2010 (Cryosat-2) et il sera suivi par d’autres missions futures telles que Sentinel-3. Plusieurs études préalables ont été faites sur la modélisation et l’estimation des paramètres de ces nouvelles formes d’onde, mais à ce jour, aucun modèle analytique équivalent à celui existant en altimétrie conventionnelle [1] n’a été proposé. Ce papier propose et valide un modèle semi-analytique pour les échos SAR/Doppler. Des simulations effectuées sur signaux synthétiques et réels permettent d’apprécier les performances du modèle proposé et de la méthode d’estimation associée. Une comparaison avec les résultats de l’altimétrie conventionnelle met en évidence l’intérêt de l’altimétrie SAR/Doppler.

1. Le nombre des fréquences Doppler obtenues est lié au nombre d’impulsions corrélées émises. Dans le cas de l’altimètre de Cryosat-2, 64 impulsions radar sont émises dans chaque paquet ce qui donne 64 bandes Doppler (voir Fig. 1).

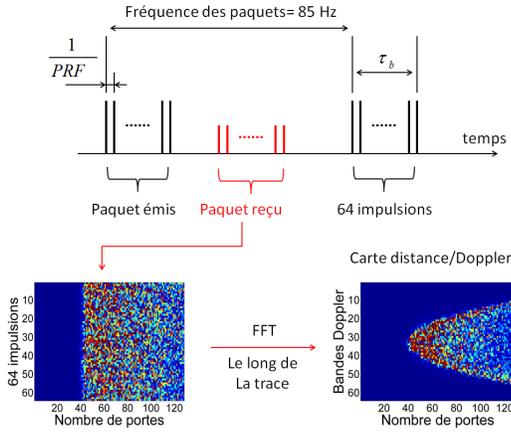


FIGURE 1 – Configuration de l'altimètre SAR/Doppler et construction de la carte distance/Doppler.

2 Altimétrie conventionnelle

L'écho altimétrique conventionnel s'exprime à l'aide d'une double convolution comme suit [1]

$$s_c(t) = DP(t) * RIR_T(t) * RIM(t) \quad (1)$$

$$\text{où} \quad \begin{cases} DP(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_s^2}\right) \\ RIR_T(t) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi t}{T}\right)}{\pi \frac{t}{T}} \right|^2 \end{cases} \quad (2)$$

avec $\sigma_s = \frac{SWH}{2c}$ et où c est la vitesse de la lumière, SWH est la hauteur moyenne des vagues et T est la période d'échantillonnage. La RIM est obtenue par la somme de l'énergie réfléchie par la surface observée, i.e., par l'intégrale suivante [1]

$$RIM(t) = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 L_p} \int_{\mathbb{R}^+ \times [0, 2\pi[} \frac{\delta(t - \frac{2r}{c}) G^2(\rho, \phi) \sigma^0}{r^4} \rho d\rho d\phi \quad (3)$$

où ρ , ϕ sont le rayon et l'angle des coordonnées polaires, λ est la longueur d'onde, L_p est un coefficient de perte, G est le gain de l'antenne du radar, δ est l'impulsion de Dirac transmise, σ^0 est le coefficient de réflectivité de la surface (supposé constant dans la suite de l'article²) et $r = \sqrt{\rho^2 + h^2}$ est la distance entre le satellite et la surface observée avec h la hauteur du satellite (voir Fig. 2). L'intégrale en fonction de ρ permet de lier ce paramètre au temps par la présence de la fonction de Dirac. Ainsi, chaque instant temporel sera lié à un rayon de propagation $\rho(t)$ et la RIM à un instant t_0 sera donnée en sommant l'énergie contenue dans le cercle de rayon $\rho(t_0)$, i.e., en intégrant ϕ entre $[0, 2\pi[$ (voir Fig. 3). Après calculs, en faisant l'hypothèse d'une antenne non dépointée, on obtient la formule suivante pour la RIM [1]

$$RIM(t) = P_u \exp\left[-\frac{4c}{\gamma h} \left(t - \frac{2h}{c}\right)\right] U\left(t - \frac{2h}{c}\right) \quad (4)$$

où P_u est l'amplitude de l'écho, γ est un paramètre lié à l'antenne et $U(\cdot)$ représente la fonction de Heaviside. L'échantillonnage de l'écho altimétrique $s_c(t)$ se fait avec $t = t_k =$

2. Ce coefficient peut varier dans la scène observée [3] mais sera considéré constant pour simplifier l'étude.

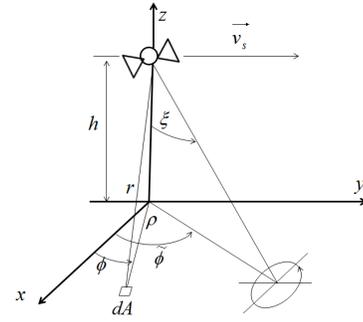


FIGURE 2 – Géométrie du radar pour une surface plate.

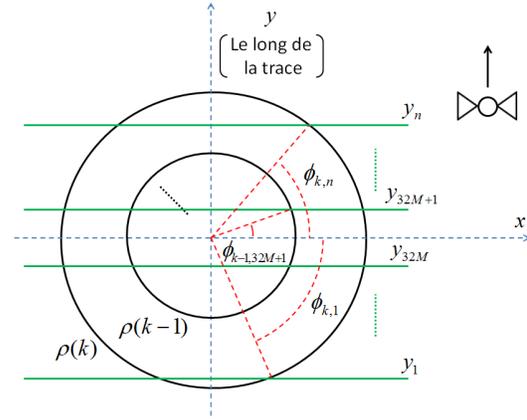


FIGURE 3 – Cercles de propagation et bandes Doppler. L'intégration se fait sur tout le cercle en altimétrie conventionnelle. En altimétrie SAR/Doppler, l'intégration se fait à l'intersection de chacune des bandes Doppler avec les cercles iso-distance.

$\frac{2h}{c} + kT - \tau$, pour $k = 1, \dots, K$, où τ correspond à l'abscisse du point de puissance moitié de l'écho et $K = 104$ est le nombre d'échantillons ou portes³. L'écho altimétrique $s_c(t)$ s'obtient alors par calcul de la double convolution (1) et s'exprime en fonction du vecteur $\theta = (SWH, \tau, P_u)^T$ constitué des paramètres permettant de caractériser l'état de la mer que l'on cherche à estimer à partir des échos mesurés.

3 Modèle SAR/Doppler proposé

L'altimétrie SAR/Doppler prend en compte une dimension supplémentaire constituée par la fréquence Doppler par rapport à l'altimétrie conventionnelle. Ainsi, les échos associés à l'altimétrie SAR/Doppler s'expriment en fonction du temps et de la fréquence Doppler et s'écrivent

$$P(t, f) = DP(t) * RIR(t, f) * RIM(t, f) \quad (5)$$

avec

$$RIR(t, f) = RIR_T(t) RIR_F(f), \quad RIR_F(f) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{F}\right)}{\pi \frac{f}{F}} \right|^2 \quad (6)$$

3. Une porte correspond à un intervalle temporel de largeur T , relié à la résolution spatiale qui est de $cT/2 = 46$ cm.

où F est la résolution Doppler. Comme expliqué précédemment, l'altimétrie SAR/Doppler utilise l'information contenue dans les fréquences Doppler pour augmenter la résolution le long de la trace [2]. Dans ce cas, l'intégration de l'énergie ne se fait plus sur des cercles comme dans le cas conventionnel ($\phi \in [0, 2\pi]$) mais plutôt sur des bandes rectangulaires liées aux fréquences Doppler [4] (voir Fig. 3). Après calculs, la RIM résultante s'écrit

$$\text{RIM}(t, n) = \frac{P_u}{\pi} \left(\frac{2h}{tc} \right)^3 \exp \left\{ -\frac{4}{\gamma} \left[1 - \left(\frac{2h}{tc} \right)^2 \right] \right\} \times (\phi_{t, n+1} - \phi_{t, n}) U \left(t - \frac{2h}{c} \right), \quad (7)$$

pour $n = 1, \dots, 64M$, M étant le coefficient de sur-échantillonnage fréquentiel et où

$$\phi_{t, n} = \text{Re} \left[\arctan \left(\frac{y_n}{\sqrt{\rho^2(t) - y_n^2}} \right) \right] \quad (8)$$

avec $\rho = \sqrt{\left(\frac{tc}{2}\right)^2 - h^2}$, $y_n = \frac{h\lambda}{2v_s} f_n$ est l'ordonnée de la $n^{\text{ième}}$ bande Doppler, $f_n = [n - (32M + 0.5)] \frac{F}{M}$ est la $n^{\text{ième}}$ valeur de la fréquence Doppler, v_s est la vitesse du satellite et $\text{Re}(x)$ est la partie réelle de x . La double convolution (5) est ensuite calculée numériquement pour obtenir le modèle semi-analytique proposé de $P(t, f)$ qui dépend du même vecteur paramètre θ que dans le cas de l'altimétrie conventionnelle.

3.1 Echo SAR/Doppler

Le signal résultant de la formule (5) est composé de deux dimensions, le temps (ou distance) et la fréquence. Ce signal appelé carte distance/Doppler (delay/Doppler map) présente une allure elliptique (voir Fig. 1) qu'il faut corriger par une "migration en distance" qui consiste à ramener le début des contributions des bandes Doppler à la même porte temporelle (voir [2, 5] pour plus de détails). L'écho SAR/Doppler est alors obtenu en sommant les signaux des bandes Doppler migrés en distance. Ces traitements sont décrits par l'expression $s_d(t) = \sum_{n=1}^{64} P(t - \delta t_n, f_n)$, où δt_n est la migration des distances exprimée en secondes. La figure 4 montre deux échos, conventionnel et SAR/Doppler, obtenus pour les mêmes paramètres altimétriques. L'écho SAR/Doppler est plus étroit du fait de l'application de la migration en distance.

4 Estimation paramétrique

Les échos altimétriques sont affectés d'un bruit multiplicatif de scintillement (speckle). Dans le cas de l'altimétrie conventionnelle, ce bruit est réduit par moyennage de $L_c = 100$ échos décorrélés successifs. Dans le cas de l'altimétrie SAR/Doppler, la carte distance/Doppler est moyennée par $L_d \simeq 4$ pour réduire le bruit. L'écho SAR/Doppler est ensuite obtenu en sommant les 64 bandes Doppler de cette carte. Les échos observés (conventionnels ou SAR/Doppler) sont donc obtenus après un moyennage d'un grand nombre de signaux et le bruit les affectant peut être considéré comme étant Gaussien.

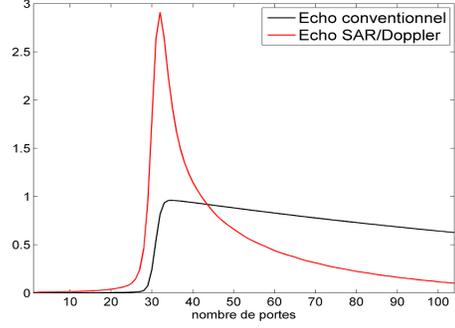


FIGURE 4 – Echos SAR/Doppler et conventionnel pour les mêmes paramètres altimétriques ($P_u = 1$, $\tau = 31$ portes et SWH = 2 m).

Ce papier propose d'estimer les paramètres altimétriques par la méthode des moindres carrés. Le critère à minimiser s'écrit $\mathcal{C} = \text{argmin}_{\theta} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K g_k^2(\theta)$, où $g_k(\theta) = y_k - s_k(\theta)$ est le $k^{\text{ième}}$ résidu, $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_K)^T$ est l'écho observé bruité et $\mathbf{s} = (s_1, \dots, s_K)^T$ est l'écho théorique (s_c ou s_d) qui dépend du vecteur θ . L'obtention d'une expression analytique de θ est impossible du fait de la complexité de \mathcal{C} , d'où la nécessité de l'utilisation d'une technique d'optimisation numérique pour déterminer l'estimateur des moindres carrés. On propose dans cet article de résoudre ce problème à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquardt [6].

5 Résultats

Cette section introduit les critères utilisés pour évaluer la qualité de l'estimation des paramètres altimétriques. Pour des échos synthétiques, où les paramètres réels sont connus, la racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) peut être utilisée pour évaluer la qualité de l'estimation. Ce critère est donné

par $\text{REQM}(\theta_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\ell=1}^n [\theta_i - \hat{\theta}_i(\ell)]^2}$, où θ_i et $\hat{\theta}_i(\ell)$ sont

les paramètres réel et estimé du $\ell^{\text{ème}}$ écho et n est le nombre d'échos synthétiques générés avec le même vecteur paramètre $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$ et différentes réalisations du bruit. L'écart-

type de l'estimateur donné par $\text{STD}(\theta_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\ell=1}^n [\hat{\theta}_i(\ell) - \bar{\theta}_i]^2}$

avec $\bar{\theta}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{\theta}_i(j)$ peut aussi être utilisé pour évaluer les performances de l'estimation d'échos réels (échos conventionnels ou SAR/Doppler).

5.1 Echos synthétiques

Cette section s'intéresse à l'estimation des paramètres des échos altimétriques synthétiques associés à l'altimétrie conventionnelle et l'altimétrie SAR/Doppler. Ces échos ont été générés avec les paramètres $P_u = 1$, $\tau = 31$ portes et SWH variant dans l'intervalle [1, 8] mètres. La figure 5 montre les REQMs des paramètres altimétriques en fonction de SWH. Les REQMs des paramètres SWH et τ sont nettement meilleures dans le cas de l'altimétrie SAR/Doppler sauf pour l'estimation de SWH

dans le cas de faibles hauteurs de vagues. L'amplitude P_u est mieux estimée par l'altimétrie conventionnelle car l'écho est plus large ce qui réduit la sensibilité de l'amplitude au bruit. À noter aussi que REQM (SWH) croît en fonction de SWH en altimétrie conventionnelle alors qu'elle présente un niveau quasiment constant dans le cas SAR/Doppler.

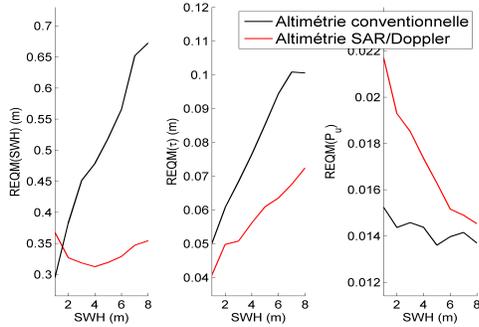


FIGURE 5 – REQMs des paramètres en fonction de SWH avec $P_u = 1$ et $\tau = 31$ portes pour des échos conventionnels et SAR/Doppler.

5.2 Echos Réels

On s'intéresse dans cette section à l'estimation des paramètres d'échos réels obtenus par le satellite Cryosat-2. Les échos traités ont été obtenus durant le mois d'août 2011 et nous ont été fournis par le centre national d'études spatiales (CNES) [7]. La figure 6 montre la superposition d'un écho réel Cryosat-2 et du modèle (5) reconstruit à partir des paramètres estimés sur l'écho par le modèle proposé dans cet article. Cet exemple permet de visualiser la bonne adéquation du modèle proposé (et de la méthode d'estimation des paramètres) avec les formes d'onde réelles. En effet, on observe une différence maximale de l'ordre de 6% entre les deux échos ce qui est en grande partie due au bruit affectant l'écho observé. La figure

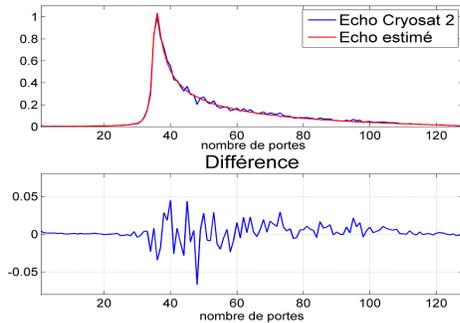


FIGURE 6 – Exemple d'un écho Cryosat-2 et de son estimé par le modèle proposé.

7 montre la variation des écart-types de SWH et τ en fonction de SWH. Ces erreurs ont la même forme que dans le cas de l'étude synthétique et sont meilleures dans le cas de l'altimétrie SAR/Doppler.

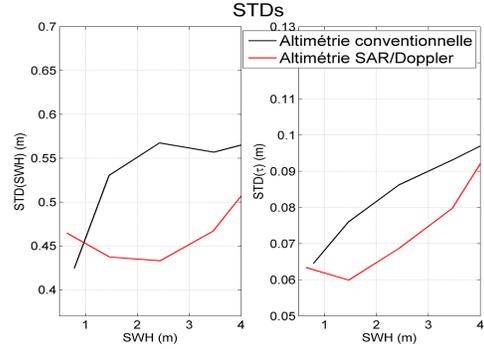


FIGURE 7 – Ecart-types en fonction de SWH des paramètres SWH et τ pour l'altimétrie conventionnelle et SAR/Doppler.

6 Conclusions

Ce papier a introduit un nouveau modèle pour l'altimétrie SAR/Doppler. Le modèle proposé est basé sur une approche géométrique pour le calcul de la réponse impulsionnelle d'une mer plate. La formule analytique obtenue est ensuite convoluée numériquement avec la densité de probabilité de la hauteur des points de dispersion et la réponse impulsionnelle du radar. L'estimation des paramètres altimétriques est effectuée à l'aide de la méthode des moindres carrés en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Les simulations effectuées à l'aide d'échos synthétiques ont montré une amélioration de la qualité des paramètres estimés par rapport à l'altimétrie conventionnelle. Cette amélioration a été confirmée par l'analyse d'échos réels issus du satellite Cryosat-2. Nos travaux futurs s'intéresseront à la généralisation du modèle SAR/Doppler en considérant de nouveaux paramètres tel que le dépointage de l'antenne.

Références

- [1] G. Brown, "The average impulse response of a rough surface and its applications," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 25, no. 1, pp. 67–74, jan 1977.
- [2] R. K. Raney, "The delay/Doppler radar altimeter," *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, vol. 36, no. 5, pp. 1578–1588, sep 1998.
- [3] J. Tournadre, B. Chapron, and N. Reul, "High-resolution imaging of the ocean surface backscatter by inversion of altimeter waveforms," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 28, no. 8, pp. 1050–1062, aug 2011.
- [4] A. Halimi, C. Mailhes, J.-Y. Tournaret, P. Thibaut, and F. Boy, "A semi-analytical model for delay/Doppler altimetry and its estimation algorithm," 2012, submitted.
- [5] D. Wingham, L. Phalippou, C. Mavrocordatos, and D. Wallis, "The mean echo and echo cross product from a beamforming interferometric altimeter and their application to elevation measurement," *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, vol. 42, no. 10, pp. 2305 – 2323, oct. 2004.
- [6] D. P. Bertsekas, *Nonlinear programming*. Belmont, Massachusetts : Athena Scientific, 1995.
- [7] F. Boy, J.-D. Desjonqueres, and N. Picot, "Cryosat LRM, TRK and SAR processing," in *Ocean Surface Topography Science Team Meeting*, San Diego, California, October 2011.