SER monostatique d'un objet au-dessus de la mer par une méthode rigoureuse

Monostatic RCS of an object above a sea surface from a rigorous method

Gildas Kubické*, Christophe Bourlier*, Joseph Saillard*

*IREENA, Fédération CNRS Atlanstic, Université Nantes Angers Le Mans, Polytech'Nantes, La Chantrerie, BP 50609, 44306 Nantes, gildas.kubicke/christophe.bourlier/joseph.saillard@univ-nantes.fr

Résumé

Le calcul rigoureux de la SER (Surface Equivalente Radar) monostatique d'un objet situé au-dessus d'une surface de mer monodimensionnelle (cas 2D) nécessite de résoudre un problème possédant un grand nombre d'inconnues. Pour ce calcul, une méthode numérique rapide récemment développée, nommée E-PILE (Extended Propagation-Inside-Layer Expansion), est combinée à la FB-SA (Forward-Backward with Spectral Acceleration). Deux objets sont considérés dans ce papier : l'obstacle cruciforme (la croix) et le cylindre. L'étude des résultats issus de la méthode E-PILE+FB-SA permet de bien comprendre les mécanismes physiques du couplage de l'obstacle et de la surface de mer. L'application visée est la détection d'obstacles pour la télédétection en milieu maritime.

Abstract

The rigorous computation of the monostatic RCS (Radar Cross Section) of an object above a one-dimensional sea surface (2D case) needs to solve a problem involving a high number of unknowns. Thus, a recently developed fast numerical method, called E-PILE (Extended Propagation-Inside-Layer Expansion), is combined with FB-SA (Forward-Backward with Spectral Acceleration). Two objects are considered in this paper : the cross and the cylinder. Results obtained from E-PILE+FB-SA allow us to understand well the physical mechanisms involved in the coupling between the object and the sea surface. The application is the object detection and remote sensing in a maritime context.

Mots clés : Détection d'objet, Domaine maritime, SER monostatique, Méthode numérique rapide
Keywords : Object detection, Remote sensing, monostatic RCS, Fast numerical method

Introduction

Les études de la diffusion d'une onde par un ou plusieurs diffuseurs situés proche d'une surface rugueuse concernent de nombreuses applications en télédétection, en optique, en surveillance radar, en acoustique. Puisque la surface de la mer peut être modélisée comme une surface rugueuse, ces études sont utiles pour des applications maritimes pour lesquelles des réflecteurs radar sont employés : montés sur des bouées pour marquer les récifs, montés sur des mâts de bateaux pour la surveillance du trafic maritime par exemple. De telles scènes impliquent de nombreux paramètres tels que l'angle d'incidence, la fréquence, la forme et la taille du réflecteur ainsi que sa position au-dessus de la mer etc. Ainsi, des modèles théoriques sont nécessaires pour dimensionner les réflecteurs et pour les utiliser efficacement. De même, la détection d'objets placés dans un contexte maritime nécessite la résolution du problème inverse. Cette résolution est basée nécessairement sur la maîtrise du problème directe.

La modélisation et la résolution de ce problème peuvent être réalisées à l'aide de méthodes rigoureuses. Mais, lors des simulations numériques, la longueur de la surface de mer joue un rôle important puisqu'une onde atténuée gaussiennement est utilisée pour s'affranchir des effets de bord du fait de la troncature de la surface [1-2] : l'onde de Thorsos. En effet, le faisceau incident doit être suffisamment large pour respecter l'équation d'Helmholtz et illuminer à la fois l'objet et la surface de mer. Il est de ce fait nécessaire d'étudier et d'utiliser des méthodes numériques rapides pour traiter des problèmes avec de nombreuses inconnues.

Dans ce papier, une méthode numérique rapide est proposée pour calculer rigoureusement la diffusion par un objet au-dessus d'une surface rugueuse. Un rappel de la méthode, de l'étude de sa validité et de sa convergence sont donnés dans le premier paragraphe. Cette méthode est ensuite utilisée pour calculer les SER monostatiques d'une croix et d'un cylindre au-dessus de la mer. Afin de tenir compte du caractère aléatoire de la surface de la mer, 50 réalisations indépendantes (mais de statistiques identiques) de la surface sont générées : il s'agit de la méthode de Monte-Carlo. Finalement, des études comparatives sont menées sur les résultats obtenus afin de mieux comprendre l'influence de l'état de la mer et de la forme de l'objet sur la SER.

1. Principe et convergence de la méthode E-PILE+FB-SA

Puisque les milieux en présence sont considérés homogènes, un formalisme intégral rigoureux peut être utilisé. La discrétisation des équations intégrales par la Méthode des Moments (MdM) aboutit alors à un système linéaire. C'est dans le but de résoudre efficacement et rigoureusement un tel système que la méthode E-PILE (Extended Propagation-Inside-Layer Expansion) a été récemment développée [3-5] pour traiter le cas de la diffusion par un objet au-dessus d'une surface rugueuse. Son principe repose sur l'inversion par bloc de la matrice impédance de la scène totale **Z** permettant ainsi de contrôler les différents phénomènes physiques entrant en jeu. En effet, deux calculs sont dédiés à la résolution des interactions locales sur chaque surface et deux autres sont dédiés au couplage. Ainsi, on peut montrer après quelques développements mathématiques [5] que les inconnues surfaciques sur la surface S_1 (surface de l'objet) s'écrivent :

$$\mathbf{X}_1 = \sum_{p=0}^{p=P_{\mathrm{PILE}}} \mathbf{Y}_1^{(p)} \ , \tag{1}$$

où

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_1^{(0)} = \bar{\mathbf{Z}}_1^{-1}\left(\mathbf{b}_1 - \bar{\mathbf{Z}}_{21}\bar{\mathbf{Z}}_2^{-1}\mathbf{b}_2\right) & \text{pour} \quad p=0 \\ \mathbf{Y}_1^{(p)} = \bar{\mathbf{M}}_{c,1}\mathbf{Y}_1^{(p-1)} & \text{pour} \quad p>0 \end{cases} . \tag{2}$$

$\mathbf{M_{c,1}}$ est la matrice caractéristique du système "Objet+Mer" telle que $\mathbf{M_{c,1}} = \mathbf{Z_1}^{-1}\mathbf{Z_{21}}\mathbf{Z_2}^{-1}\mathbf{Z_{12}}$ et $\mathbf{b_1}$ est le champ incident sur S_1. $\mathbf{Z_1}$ et $\mathbf{Z_2}$ sont les matrices impédances de l'objet et de la mer, respectivement, alors que $\mathbf{Z_{12}}$ et $\mathbf{Z_{21}}$ peuvent être considérées comme des matrices de couplage entre les deux surfaces. Un calcul similaire est réalisé pour obtenir les inconnues surfaciques sur la surface S_2 (surface de la mer). Dans l'équation (1), la somme est tronquée à l'ordre P_{PILE} qui correspond physiquement au nombre de réflexions entre l'objet et la mer et est obtenu à l'aide d'un critère de convergence. Le calcul de la diffusion par un objet au-dessus de la mer peut donc se décomposer, à travers une procédure itérative, en un calcul des interactions locales sur la surface de l'objet (inversion de $\mathbf{Z_1}$ et calcul du produit matrice-vecteur $\mathbf{Z_1}^{-1}\mathbf{u}$, où **u** est un vecteur), un calcul des interactions locales sur la surface de la mer (inversion de $\mathbf{Z_2}$ et calcul du produit matrice-vecteur $\mathbf{Z_2}^{-1}\mathbf{u}$) et le calcul des couplages (produits matrice-vecteur $\mathbf{Z_{12}u}$ et $\mathbf{Z_{21}u}$). Ainsi, à l'aide de la décomposition par la méthode E-PILE, il est alors possible d'utiliser des méthodes efficaces et rapides valides pour le calcul de la diffusion par une surface rugueuse en espace libre comme la FB-SA (Forward-Backward with Spectral Acceleration) de Chou et Johnson [6] de complexité O(N) où N est le nombre d'inconnues sur la surface rugueuse. Cette méthode est basée sur la méthode Forward-Backward qui propose une procédure itérative qui décompose les interactions locales d'un point courant en contributions avant (Forward) et arrière (Backward). En appliquant l'accélération spectrale (SA), les interactions locales (contributions forward et backward) sont décomposées en interactions fortes et faibles. Tandis que les fortes sont calculées de manière classique, les interactions faibles sont calculées approximativement à l'aide d'une décomposition de la fonction de Green. Les paramètres clés de la FB-SA sont l'ordre P_{FB} de la procédure itérative de la FB et la distance des interactions fortes x_{d0} (distance horizontale séparant les interactions faibles des interactions fortes) dans la SA.
La méthode E-PILE combinée à la FB-SA permet de résoudre des problèmes possédant un très grand nombre d'inconnues, comme par exemple le calcul rigoureux de la SER monostatique d'un objet au-dessus de la mer. Pour cela, la méthode est employée pour calculer les champs surfaciques et leurs dérivées normales (sur la surface de l'objet et sur la surface de la mer). Le principe de Huygens est ensuite utilisé pour calculer le champ diffusé par la scène (objet au-dessus de la mer) en champ lointain (à une distance r') : ψ_s. Alors, la SER normalisée de la scène est donnée par :

$$\sigma(\theta_s) = \frac{r' \left|\psi_s(\theta_s)\right|^2}{2\eta_0 P_i}, \tag{3}$$

où r' est la distance séparant la scène du récepteur, η_0=120π et P_i est la puissance incidente de l'onde de Thorsos sur le plan moyen de la surface de mer ; elle est donnée dans [1].
Dans un récent article [5], la validité de la méthode E-PILE+FB-SA a été analysée pour des surfaces parfaitement conductrices et des surfaces diélectriques. La surface de la mer est très conductrice dans le domaine des microondes et E-PILE+FB-SA est facilement étendue à ce type de surface par l'emploi de l'approximation IBC (Impedance Boudary Condition). Le problème est alors réduit à une combinaison linéraire du cas PC en polarisations H et V pour lesquelles E-PILE+FB-SA est considérée comme une méthode de référence [5]. Ainsi, il est possible de montrer que pour le cas d'un objet au-dessus d'une surface de mer, la méthode E-PILE+FB-SA converge vers la MdM. Il est important de noter que les paramètres de la FB-SA peuvent être obtenus en étudiant la diffusion par la surface de mer seule (sans l'objet). Par une étude de l'erreur relative avec les résultats obtenus par la MdM, on montre que l'ordre P_{FB} peut être choisi égal à 5 en polarisation H et à 2 en polarisation V pour assurer une erreur relative inférieure à 10^{-2} sur la SER quelque soit la fréquence, l'état de la mer et l'angle d'incidence. Avec cette même valeur de seuil, ce critère d'erreur implique une valeur minimale de x_{d0}=0.05 L_c , où L_c = $0.154u_{10}^{2.04}$ est la longueur de corrélation pour une surface de mer [7].

2. Résultats numériques

La scène est illustrée sur la figure 1. La distribution des hauteurs de la surface de mer (surface S_2) est supposée gaussienne et le spectre des hauteurs est le spectre de Elfouhaily [8] dont le paramètre clé est la vitesse du vent u_{10} à 10 mètres au-dessus de la surface. L'objet (surface S_1) est une croix (obstacle cruciforme) ou un cylindre parfaitement conducteur.

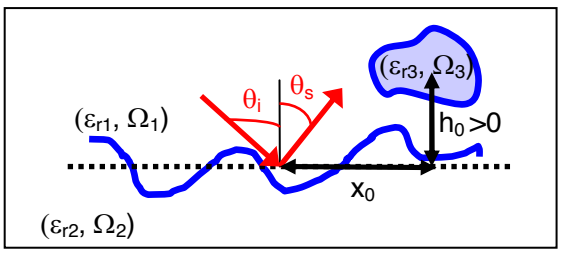

Figure 1 : Illustration de la scène

Pour tenir compte du caractère aléatoire de la surface de la mer la méthode de Monte-Carlo est utilisée : 50 réalisations indépendantes (mais de statistiques identiques) de la surface sont générées. Pour chaque scène (numérotée « p »), le champ diffusé Ψ_p est calculé à l'ordre P_{PILE} en fonction de l'angle d'incidence ; leur moment statistique d'ordre 2 permet d'obtenir la SER normalisée (ou coefficient de diffusion total) :

$$\sigma(\theta_i, P_{\text{PILE}}) = \frac{r' \left\langle \left|\Psi_{P_{\text{PILE}}}(\theta_i)\right|^2 \right\rangle}{2\eta_0 P_i}, \tag{4}$$

avec

$$\left\langle \left|\Psi_{P_{\text{PILE}}}(\theta_i)\right|^2 \right\rangle = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^{p=P} \left|\Psi_p(\theta_i, P_{\text{PILE}})\right|^2 . \tag{5}$$

La convergence de la méthode E-PILE+FB-SA dépend de l'ordre P_{PILE} (voir paragraphe 1) : plus l'ordre est élevé et plus la méthode converge vers la MdM. Dans ce papier, les auteurs proposent un critère de convergence simple pour déterminer l'ordre P_{PILE} (nommé $P_{PILE\text{-}conv}$). La SER normalisée est calculée à l'aide de la méthode E-PILE+FB-SA avec P_{PILE} = {1,2,...,$P_{PILE\text{-}max}$}. $P_{PILE\text{-}conv}$ est obtenu avec le critère suivant (avec θ_i in [0°;70°]):

$$\max(|\sigma(\theta_i, P_{\text{PILE}}+1)| - \sigma(\theta_i, P_{\text{PILE}})) < 0.1 \text{ dB}$$

(6)

où max(x) calcule la valeur maximum du vecteur x, on a alors $P_{PILE\text{-}conv}= P_{PILE\text{-}}+1$.

Les SER normalisées d'une croix (orientée de telle sorte que deux branches sont horizontales et les deux autres sont verticales) et d'un cylindre au-dessus de la mer sont tracées en fonction de l'angle d'incidence θ_i respectivement sur les Figures 2 et 3. La croix est décrite par 560 échantillons et la longueur d'une plaque de la croix est de 0,5 m (envergure de 1 m). Le cylindre est décrit par 444 échantillons et le rayon est de 0,5 m (même envergure que la croix). La vitesse du vent est u_{10}=5 m/s, f=5,3 GHz et la polarisation H est considérée. Les objets sont situés à une hauteur h_0=3 m. La longueur de la surface de mer est L=80 m (11307 inconnues avec le pas considéré) et ε_{r2}=69+i35 à cette fréquence. La SER est comparée avec celle obtenue en considérant la mer en espace libre (sans l'objet), et celle obtenue avec l'objet au-dessus d'une surface plane.

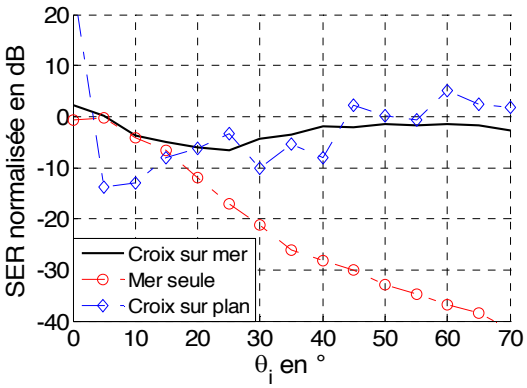

Figure 2 : SER normalisée de la croix au-dessus de la mer (H et u_{10}=5 m/s).

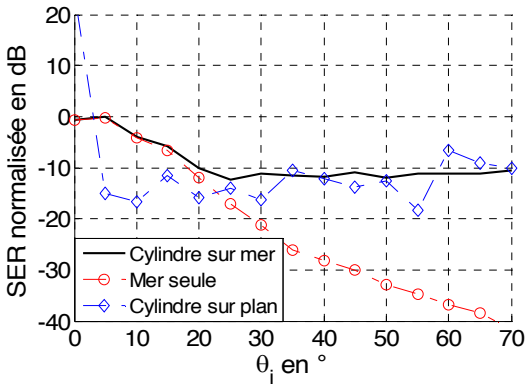

Figure 3 : SER normalisée d'un cylindre au-dessus de la mer (H et u_{10}=5 m/s).

Les SER normalisées d'une croix et d'un cylindre au-dessus de la mer sont tracées en fonction de l'angle d'incidence θ_i respectivement sur les Figures 4 et 5, en considérant les mêmes paramètres que pour les figures 2 et 3 sauf u_{10}=10 m/s.

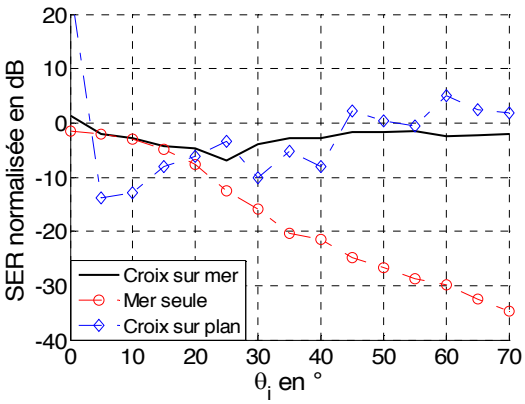

Figure 4 : SER normalisée de la croix au-dessus de la mer (H et u_{10}=10 m/s).

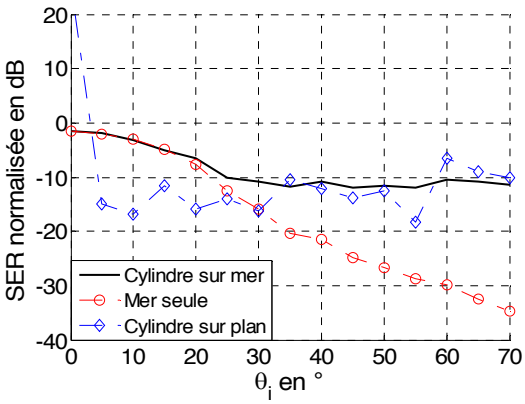

Figure 5 : SER normalisée d'un cylindre au-dessus de la mer (H et u_{10}=10 m/s).

Les SER normalisées d'une croix et d'un cylindre au-dessus de la mer sont tracées en fonction de l'angle d'incidence θ_i respectivement sur les Figures 6 et 7, en considérant les mêmes paramètres que pour les figures 4 et 5 sauf la polarisation : la polarisation V est ici considérée.

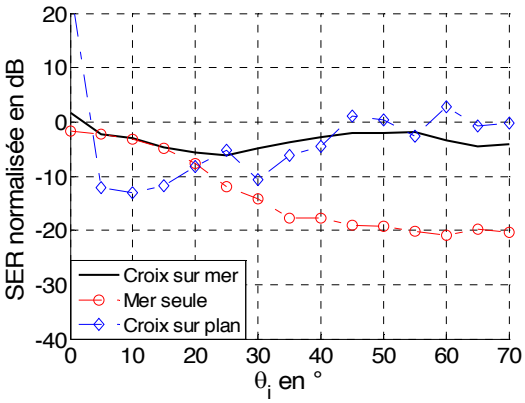

Figure 6 : SER normalisée de la croix au-dessus de la mer (V et u_{10}=10 m/s).

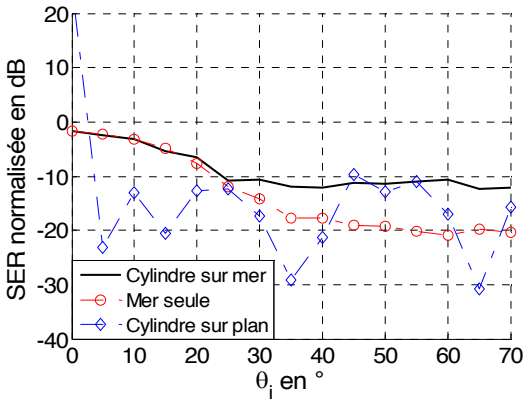

Figure 7 : SER normalisée d'un cylindre au-dessus de la mer (V et u_{10}=10 m/s).

La convergence (sous le critère donné par l'équation (6)) est obtenu avec $P_{PILE\text{-}conv}$=3 pour les résultats des figures 2, 4, 6 et 7 et avec $P_{PILE\text{-}conv}$=4 pour les résultats des figures 3 et 5. Ainsi, la méthode E-PILE+FB-SA a convergé en seulement quelques itérations.

A partir des figures 2 à 7, on remarque que pour θ_i <15°, le comportement de l'objet sur la mer est très proche de celui de la mer seule. En effet, pour des angles d'incidence faible, proches de la normale, la direction de rétrodiffusion est proche de la direction spéculaire. L'effet de l'objet est noyé sous la forte contribution de la mer seule. Le pic à 0° pour le cas de la croix permet d'entrevoir l'effet de l'objet seulement à cet angle : il s'agit ici de la contribution en spéculaire des simples réflexions des deux branches horizontales de la croix. La réflexion spéculaire du cylindre est beaucoup plus faible et n'est de ce fait quasiment pas observable. A partir de θ_i >15°, la direction de rétrodiffusion s'écarte beaucoup de la direction spéculaire, la mer seule contribue de moins en moins, l'effet de l'obstacle est prépondérant. Quand la mer est plus rugueuse (comparaison des figures 2 et 4 par exemple), la SER monostatique est plus élevée : plus la surface est rugueuse et plus l'énergie est diffusée sur tout l'espace d'observation, donc notamment en rétrodiffusion.

En comparant les figures 2 et 3, on remarque qu'à partir de θ_i >15°, la croix sur la mer produit une SER monostatique plus élevée que le cylindre sur la mer. Le même constat est fait en observant les courbes correspondant aux cas de la croix et du cylindre sur une surface plane. Ceci s'explique physiquement par la forme de l'obstacle : par nature, la croix va favoriser le retour de l'onde incidente via des doubles réflexions entre ses faces tandis que le cylindre va diffuser l'énergie sur un secteur angulaire plus large. Ce phénomène est également observable en comparant la figure 4 et la figure 5 ainsi que les figures 6 et 7 : la forme de l'objet joue un rôle prépondérant dans la SER de la scène.

En polarisation V, la signature de la mer est plus élevée qu'en polarisation H pour des angles d'incidence plus élevés alors que la SER d'un objet sur la mer semble peu dépendant de la polarisation. En effet, pour des angles d'incidence plus élevés, l'effet de l'obstacle est plus important ; ceux-ci signant à des niveaux sensiblement équivalents pour les deux polarisations.

Les couplages entre la surface et l'obstacle impliquent des résultats radicalement différents selon le type de la surface. Pour un objet sur une surface plane, un comportement oscillant est observé du à des contribution constructives et destructives. Pour un objet au-dessus de la mer, la réponse est lissée.

On peut conclure de ces différentes remarques :

- un objet favorisant intrinséquement une SER monostatique élevée (ici la croix) favorise la détection de l'obstacle.
- un état de mer faible (u_{10}=5 m/s) favorise la discrimination de l'obstacle sur la mer : la dynamique entre la SER de la mer seule et celle d'un obstacle au-dessus de la mer est plus importante que pour u_{10}=10 m/s.
- l'introduction de la rugosité induit un lissage de la SER monostatique.
- la polarisation H favorise la discrimination de l'obstacle sur la mer : la dynamique entre la SER de la mer seule et celle d'un obstacle au-dessus de la mer est plus importante qu'en V.

3. Conclusion

Dans ce papier, une méthode rigoureuse a été présentée pour calculer la SER monostatique d'un objet situé au-dessus d'une surface de mer. Ce problème possédant un grand nombre d'inconnues, la Méthode des Moments peut ne pas être applicable. La méthode proposée est basée sur la méthode E-PILE combinée à la FB-SA (Forward-Backward with Spectral Acceleration). Ainsi, si le nombre d'inconnues sur l'objet (N_1) est petit devant le nombre d'inconnues sur la surface de mer (N_2), la complexité (en temps de calcul et en espace mémoire) de la méthode E-PILE+FB-SA est $O(N_2)$. Deux objets sont considérés dans ce papier : l'obstacle cruciforme (la croix) et le cylindre. En appliquant la méthode de Monte-Carlo, des résultats réalistes issus de la méthode E-PILE+FB-SA sont présentés et les mécanismes physiques du couplage de l'obstacle et de la surface de mer sont étudiés. Ainsi, on montre que la détection de l'objet en configuration monostatique est plus aisée en polarisation H, avec une mer moins rugueuse, à angles plus élevés et lorsque l'obstacle possède une forme favorisant une SER monostatique élevée.

Références bibliographiques

1- L. Tsang, J. A. Kong, K.-H. Ding, C. O. Ao, Scattering of electromagnetics waves: Volume II. Numerical Simulations, Wiley Series in Remote Sensing, 2001.

2- E. I. Thorsos, *the validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a gaussian roughness spectrum*, Journal of Optical Society of America A, vol. 83, pp. 78-92, 1988.

3- N. Déchamps, N. De Beaucoudrey, C. Bourlier, S. Toutain, *Fast numerical method for electromagnetic scattering by rough layered interfaces: Propagation-Inside-Layer Expansion Method*, Journal of Optical Society of America A, Vol. 23, pp. 359-369, 2006.

4- C. Bourlier, G. Kubické, N. Déchamps, *A fast method to compute scattering by a buried object under a randomly rough surface: PILE combined with FB-SA*, Journal of Optical Society of America A, Vol. 25, pp. 891-902, 2008.

5- G. Kubické, C. Bourlier, J. Saillard, *Scattering by an object above a randomly rough surface from a fast numerical method: extended PILE method combined with FB-SA*, Waves in Random and Complex Media, Vol. 18, pp. 495-519, 2008.

6- H. T. Chou, J. T. Johnson, *A novel acceleration algorithm for the computation of scattering from rough surfaces with the Forward-Backward method* , Radio Science, vol. 33, pp. 1277-1287, 1998.

7- C. Bourlier, G. Berginc, *Microwave analytical backscattering models from randomly rough anisotropic sea surface – Comparison with experimental data in C and Ku bands*, Progress In Electromagnetics Research, vol. 37, pp. 31-78, 2002

8- T. Elfouhaily, B. Chapron, K. Katsaros, D. Vandermark, *A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves*, Journal of Geophysical Research, vol. 102, pp. 781-796, 1997.