

Reconstruction d'image pour la mission SMOS

Ali KHAZAAL et Eric ANTERRIEU

Observatoire Midi-Pyrénées - Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse-Tarbes

Équipe Signal, Image et Instrumentation

14 avenue Edouard Belin - 31400 Toulouse - France

Tél : (+33) 05-6133-2929 – Fax : (+33) 05-6133-2840

Ali.Khazaal@ast.obs-mip.fr, Eric.Anterrieu@ast.obs-mip.fr

Résumé – Les radiomètres imageurs à synthèse d'ouverture sont des instruments très prometteurs pour l'observation de la Terre dans le domaine des micro-ondes. C'est dans ce contexte que l'Agence Spatiale Européenne poursuit les développements de la mission SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) dédiée à la mesure de l'humidité des sols et de la salinité de surface des océans à une échelle globale depuis l'espace à l'aide d'un interféromètre opérant en bande L. Cette mission constitue la première tentative d'appliquer à l'observation de la Terre le concept d'imagerie radiométrique à synthèse d'ouverture, technique initialement développée en radio-astronomie. Cet article s'intéresse à la reconstruction de cartes de température de brillance à partir de mesures interférométriques. Plus exactement, il étend la méthode d'inversion sélectionnée par l'Agence Spatiale Européenne au cas du traitement de données interférométriques obtenues en polarisation verticale et horizontale.

Abstract – Synthetic aperture imaging radiometers are powerful sensors for high-resolution observations of the Earth at low microwaves frequencies. Within this context, the European Space Agency is currently developing the SMOS mission devoted to the monitoring of Soil Moisture and Ocean Salinity at global scale from L-band space borne radiometric observations obtained with a two-dimensional interferometer. This mission is the first attempt to apply to remote sensing of the Earth's surface, the concept of imaging radiometry by aperture synthesis, initially developed in radio astronomy. This paper is concerned with the reconstruction of radiometric brightness temperature maps from interferometric measurements. More exactly, it extends the approach selected by the European Space Agency to the case of the processing of interferometric data obtained in horizontal and vertical polarization.

1 Introduction

L'objectif de la mission spatiale SMOS [1] (Soil Moisture and Ocean Salinity) est la mesure, depuis l'espace et à une échelle globale, de l'humidité des sols et de la salinité de surface des océans. Elle est conduite par l'Agence Spatiale Européenne dans le cadre de son programme d'exploration de la Terre. L'instrument MIRAS [2] (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis) est l'unique charge utile de la mission. Il s'agit d'un radiomètre à synthèse d'ouverture dédié à l'observation de la Terre dans la bande L ($f_o = 1.415$ GHz). Il utilise une technique d'interférométrie passive micro-ondes initialement développée en

radio-astronomie. Comme cela est illustré sur la figure 1, l'instrument est composé de trois bras disposés en Y comprenant chacun 23 antennes également espacées.

Le problème de la reconstruction de cartes de la distribution de la température de brillance d'une scène observée à partir de données interférométriques a déjà été traité. Il a été démontré qu'il s'agit d'un problème mal posé qui doit être régularisé afin de fournir une solution unique et stable [3]. Cette contribution étend l'approche « bande-passante limitée » [4] retenue par l'Agence Spatiale Européenne pour être implémentée dans le segment sol au cas du traitement de données interférométriques obtenues simultanément en polarisation verticale et horizontale.



FIG. 1 – Vue d'artiste de SMOS.

2 Cadre théorique

Les quantités interférométriques fournies, appelées visibilités, sont les mesures de la fonction de cohérence spatiale de la scène observée pour certaines fréquences spatiales angulaires \mathbf{u}_{kl} associées à des couples d'antennes distantes A_k et A_l qui pointent dans la même direction.

2.1 Problème direct

La relation liant la distribution de la température de brillance $T(\boldsymbol{\xi})$ de la scène observée à la mesure de la fonction de cohérence spatiale $V(\mathbf{u})$ a été récemment actua-

lisée [5] pour prendre en compte des effets de couplage d'antennes :

$$V_{kl} = \frac{1}{\sqrt{\Omega_k \Omega_l}} \iint_{\|\boldsymbol{\xi}\| \leq 1} F_k(\boldsymbol{\xi}) \bar{F}_l(\boldsymbol{\xi}) (T(\boldsymbol{\xi}) - T_{rec}) \times \tilde{r}_{kl}(t) \frac{e^{-2j\pi \mathbf{u}_{kl} \boldsymbol{\xi}} d\boldsymbol{\xi}}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\xi}\|^2}}, \quad (1)$$

où \mathbf{u}_{kl} est la fréquence spatiale angulaire associée aux deux antennes A_k and A_l (en clair, l'espacement \mathbf{d}_{kl} entre A_k and A_l divisé par la longueur d'onde centrale d'observation λ_o), les composantes $\xi_1 = \sin \theta \cos \phi$ et $\xi_2 = \sin \theta \sin \phi$ de la variable de position angulaire $\boldsymbol{\xi}$ sont les cosinus directeurs dans le repère lié à l'instrument MIRAS (θ et ϕ sont les coordonnées sphériques traditionnelles), T_{rec} est la température physique des récepteurs, F_k et F_l sont les gains complexes des antennes A_k et A_l (Ω_k et Ω_l sont leurs angles solides équivalents), \tilde{r}_{kl} est la fonction qui rend compte des effets de décorrélation dus à la largeur de bande non nulle des filtres des récepteurs, et $f_o = c/\lambda_o$ est la fréquence centrale d'observation.

En désignant par ℓ le nombre d'antennes du réseau interférométrique, le nombre de visibilité complexes V_{kl} (c'est à dire le nombre de lignes de base \mathbf{d}_{kl}) fournies par l'instrument est égal à $\ell(\ell-1)/2$ lorsqu'on tient compte du caractère hermitien de la relation (1). Cependant, certaines fréquences spatiales angulaires \mathbf{u}_{kl} peuvent être redondantes puisque différents couples d'antennes peuvent engendrer la même ligne de base. En raison des dimensions finies de l'instrument, les fréquences spatiales angulaires \mathbf{u}_{kl} échantillonnées par l'interféromètre sont confinées dans une région du domaine de Fourier : la couverture fréquentielle expérimentale H . Dans le cas de MIRAS, les visibilité sont échantillonnées à l'intérieur d'une couverture fréquentielle en forme d'étoile aux nœuds d'une grille hexagonale \mathbb{G}_u . Enfin, pour des raisons de mise en œuvre informatique, une intégration numérique est utilisée afin de discrétiser l'intégrale (1) sous la forme d'une somme sur n^2 pixels d'une grille du domaine spatiale \mathbb{G}_ξ , duale de la grille \mathbb{G}_u du domaine de Fourier.

2.2 Problème inverse

La résolution du problème inverse vise à inverser l'intégrale (1) discrétisée dans le but de retrouver la distribution de température T à partir des visibilité V . Il s'agit donc de résoudre le système linéaire :

$$\mathbf{G}T = V, \quad (2)$$

où \mathbf{G} est l'opérateur linéaire de l'espace objet E dans l'espace des données F qui décrit la relation (1). Comme le problème direct est formulé par une équation intégrale, (2) n'a généralement pas de solution simple. De plus, la dimension de l'espace objet E (les n^2 pixels nécessaires à l'échantillonnage de T) étant supérieure à la dimension de l'espace des données F (les $\ell(\ell-1)/2$ échantillons de V), le système linéaire (2) est sous contraint et présente donc de multiples solutions. En conséquence, le minimum du

critère des moindres carrés

$$\min_{T \in E} \|V - \mathbf{G}T\|_F^2, \quad (3)$$

qui est aussi la solution de l'équation normale $\mathbf{G}^* \mathbf{G}T = \mathbf{G}^* V$, n'est pas unique puisque la matrice carrée $\mathbf{G}^* \mathbf{G}$ est singulière. En résumé, le problème inverse est mal posé et doit être régularisé afin de faire émerger une solution unique et stable.

2.3 Régularisation

Une méthode de régularisation a récemment été proposée à l'Agence Spatiale Européenne qui l'a retenue pour être mise en œuvre dans le segment sol de la mission [4]. Cette méthode se réfère à la résolution angulaire limitée de l'instrument. Elle reconstruit une carte de température T_r dont la transformée de Fourier est confinée à la couverture fréquentielle expérimentale H . Cette solution à bande-passante limitée réalise le minimum du problème :

$$\begin{cases} \min_{T \in E} \|V - \mathbf{G}T\|_F^2 \\ (\mathbf{I} - \mathbf{P}_H)T = 0 \end{cases} \quad (4)$$

où \mathbf{P}_H est le projecteur sur le sous-espace \mathcal{E} (de E) des fonctions à bande-passante limitée dans H . La solution unique de (4) est :

$$T_r = \mathbf{U}^* \mathbf{Z} \mathbf{A}^+ V, \quad (5)$$

où $\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^* \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^*$ est l'inverse généralisé de la matrice rectangulaire $\mathbf{A} = \mathbf{G} \mathbf{U}^* \mathbf{Z}$, \mathbf{U} est l'opérateur de transformation de Fourier discrète et \mathbf{Z} est un opérateur de bourrage de zéros au delà de H .

Afin de réduire l'erreur systématique de reconstruction qui a récemment été analysée [6], il a été proposé de soustraire des visibilité complexes V la contribution \tilde{V} d'une distribution de température de brillance \tilde{T} la plus proche possible de celle de la scène observée T . Plus exactement, le système linéaire différentiel $\delta V = \mathbf{G} \delta T$, où $\delta V = V - \tilde{V}$ et $\tilde{V} = \mathbf{G} \tilde{T}$, est résolu et la distribution synthétique \tilde{T} est ensuite ajoutée à la solution δT_r obtenue, de sorte que (5) s'écrit maintenant :

$$T_r = \mathbf{U}^* \mathbf{Z} \mathbf{A}^+ (V - \mathbf{G} \tilde{T}) + \tilde{T}. \quad (6)$$

Plusieurs méthodes ont été proposées pour synthétiser la scène artificielle \tilde{T} sans recourir à des mesures supplémentaires.

Afin de filtrer autant que possible les effets de Gibbs dus à la troncature de la couverture fréquentielle expérimentale H , la solution est apodisée avec une fenêtre d'apodisation appropriée W [7] :

$$T_r = \mathbf{U}^* \widehat{\mathbf{W}} \mathbf{U} T_r, \quad (7)$$

où $\widehat{\mathbf{W}}$ est la matrice diagonale dont les éléments non nuls sont les valeurs de \widehat{W} aux nœuds de \mathbb{G}_u dans H . Cette carte doit être comparée à $T_w = \mathbf{U}^* \widehat{\mathbf{W}} \mathbf{U} T$ (qui est apodisée avec la même fenêtre W) et pas à T (qui est à une résolution bien plus fine).

3 Mode polarimétrique

En mode polarimétrique, MIRAS mesure des visibilités complexes en polarisation horizontale et verticale. Plus exactement, en désignant par x et y les polarisations (dans le référentiel de l'instrument) sélectionnées dans chacun des deux récepteurs associés à la ligne de base \mathbf{d}_{kl} , l'équation intégrale (1) devient :

$$V_{kl}^x = \frac{1}{\sqrt{\Omega_k \Omega_l}} \iint_{\|\boldsymbol{\xi}\| \leq 1} \left[C_k^x(\boldsymbol{\xi}) \overline{C_l^x(\boldsymbol{\xi})} (T^x(\boldsymbol{\xi}) - T_{rec}) + X_k^x(\boldsymbol{\xi}) \overline{X_l^x(\boldsymbol{\xi})} (T^y(\boldsymbol{\xi}) - T_{rec}) \right] \tilde{r}_{kl}(t) \frac{e^{-2j\pi \mathbf{u}_{kl} \boldsymbol{\xi}}}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\xi}\|^2}} d\boldsymbol{\xi}, \quad (8)$$

$$V_{kl}^y = \frac{1}{\sqrt{\Omega_k \Omega_l}} \iint_{\|\boldsymbol{\xi}\| \leq 1} \left[X_k^y(\boldsymbol{\xi}) \overline{X_l^y(\boldsymbol{\xi})} (T^x(\boldsymbol{\xi}) - T_{rec}) + C_k^y(\boldsymbol{\xi}) \overline{C_l^y(\boldsymbol{\xi})} (T^y(\boldsymbol{\xi}) - T_{rec}) \right] \tilde{r}_{kl}(t) \frac{e^{-2j\pi \mathbf{u}_{kl} \boldsymbol{\xi}}}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\xi}\|^2}},$$

où T^x et T^y sont les distributions des températures de brillance de la scène observée en polarisation x et y [8]. Comme cela est expliqué dans [9], ces températures de brillance au niveau des antennes sont des combinaisons linéaires des températures de brillance T^h and T^v en polarisation horizontale et verticale à la surface de la Terre. Puisque V^x et V^y dépendent simultanément de T^x et de T^y , les deux équations précédentes sont dites couplées. Ici, le niveau de couplage dépend de l'intensité des gains cross-polaires X^x (resp. X^y) comparée à l'intensité des gains co-polaires C^x (resp. C^y). Comme cela est montré sur la figure 2, ce niveau de couplage varie d'une antenne à l'autre. Il est en moyenne de -21.5 dB en polarisation x et de -22.5 dB en polarisation y pour MIRAS.

En désignant encore par \mathbf{G} la matrice qui décrit les relations (8), le problème inverse (2) s'écrit maintenant :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{G}_{xx} & \mathbf{G}_{xy} \\ \mathbf{G}_{yx} & \mathbf{G}_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T^x \\ T^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V^x \\ V^y \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Les blocs diagonaux \mathbf{G}_{xx} et \mathbf{G}_{yy} ne dépendent que des gains co-polaires C^x et C^y alors que les blocs \mathbf{G}_{xy} et \mathbf{G}_{yx}

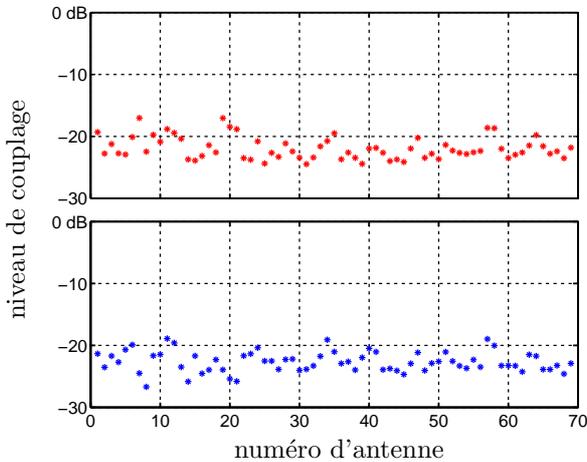


FIG. 2 – Niveau de couplage des 69 antennes de MIRAS en polarisation x (rouge) et y (bleu).

ne dépendent que des gains cross-polaires X^x et X^y . La solution à bande-passante limitée s'écrit maintenant :

$$\begin{pmatrix} T_r^x \\ T_r^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}^* \mathbf{Z} & 0 \\ 0 & \mathbf{U}^* \mathbf{Z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{xx} & \mathbf{A}_{xy} \\ \mathbf{A}_{yx} & \mathbf{A}_{yy} \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} V^x \\ V^y \end{pmatrix}, \quad (10)$$

où $\mathbf{A}_{xx} = \mathbf{G}_{xx} \mathbf{U}^* \mathbf{Z}$, $\mathbf{A}_{xy} = \mathbf{G}_{xy} \mathbf{U}^* \mathbf{Z}$, $\mathbf{A}_{yx} = \mathbf{G}_{yx} \mathbf{U}^* \mathbf{Z}$ et $\mathbf{A}_{yy} = \mathbf{G}_{yy} \mathbf{U}^* \mathbf{Z}$ sont les quatre blocs de la nouvelle matrice \mathbf{A} .

En ce qui concerne la réduction de l'erreur systématique qui a été illustrée en l'absence de gains cross-polaires [6], le couplage de ces derniers avec les gains co-polaires ne change pas l'analyse que l'on peut en faire. La même stratégie peut donc être utilisée de sorte que les solutions (10) s'écrivent maintenant :

$$\begin{pmatrix} T_r^x \\ T_r^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}^* \mathbf{Z} & 0 \\ 0 & \mathbf{U}^* \mathbf{Z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{xx} & \mathbf{A}_{xy} \\ \mathbf{A}_{yx} & \mathbf{A}_{yy} \end{pmatrix}^+ \times \left[\begin{pmatrix} V^x \\ V^y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{G}_{xx} & \mathbf{G}_{xy} \\ \mathbf{G}_{yx} & \mathbf{G}_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{T}^x \\ \tilde{T}^y \end{pmatrix} \right] + \begin{pmatrix} \tilde{T}^x \\ \tilde{T}^y \end{pmatrix}, \quad (11)$$

où les distributions des températures de brillance \tilde{T}^x et \tilde{T}^y sont ici encore les plus proches possibles de celles de la scène observée.

Selon le niveau de couplage, les blocs hors diagonale de \mathbf{G} peuvent être négligés. Le problème inverse (9) se réduit alors à la régularisation de deux problèmes inverses de tailles réduites, ceux correspondant aux blocs diagonaux de \mathbf{G} , à savoir $\mathbf{G}_{xx} T^x = V^x$ et $\mathbf{G}_{yy} T^y = V^y$. Si cette éventualité arrivait, les blocs hors diagonale de \mathbf{A} pourrait, eux aussi, être négligés et les solutions (11) s'écriraient alors :

$$T_r^x = \mathbf{U}^* \mathbf{Z} \mathbf{A}_{xx}^+ (V^x - \mathbf{G}_{xx} \tilde{T}^x) + \tilde{T}^x, \quad (12)$$

$$T_r^y = \mathbf{U}^* \mathbf{Z} \mathbf{A}_{yy}^+ (V^y - \mathbf{G}_{yy} \tilde{T}^y) + \tilde{T}^y.$$

En effet, dans une telle situation, le calcul du pseudo-inverse \mathbf{A}^+ se réduirait *de facto* au calcul des pseudo-inverses \mathbf{A}_{xx}^+ et \mathbf{A}_{yy}^+ . Comme la matrice \mathbf{A} est 4 fois plus large que les blocs \mathbf{A}_{xx} et \mathbf{A}_{yy} , on comprend que le temps de calcul serait fortement réduit.

Cette éventualité est étudiée dans la section suivante où les solutions (11) sont comparées aux solutions (12) à l'aide de simulations numériques.

4 Simulations numériques

Les résultats présentés ici sont basés sur des simulations numériques conduites dans le cadre contractuel du projet SMOS. Compte tenu du nombre d'antennes, $\ell = 69$, le nombre de visibilités complexes V_{kl} est égal à $n_b = 2346$. Cependant certaines lignes de bases étant redondantes, on ne compte que $n_f = 1395$ fréquences spatiales angulaires dans la couverture fréquentielle expérimentale H . Trois radiomètres sont utilisés pour mesurer le degré de cohérence spatiale pour l'espace nul. Compte tenu du critère de Shannon, la dimension des grilles d'échantillonnage hexagonales \mathbb{G}_u et \mathbb{G}_ξ a été fixé à $n^2 = 128 \times 128$. La taille de la matrice \mathbf{A} à valeurs réelles impliquée dans le processus

d'inversion des visibilitées complexes en mode polarimétrique est donc de 9390×5582 . Un exemple de scène test est montré sur la figure 3 à son plus haut niveau de résolution ainsi qu'au niveau de résolution de l'instrument MIRAS et apodisée avec une fenêtre de Blackman. Le champ de vue synthétisé par MIRAS étant sujet à des repliements de champ en raison de l'espacement des antennes [1], \mathcal{T}_w^x et \mathcal{T}_w^y sont montrées dans cette partie du champ synthétisé exempte de repliements alors que T^x et T^y sont montrées dans le demi-espace qui fait face à l'instrument.

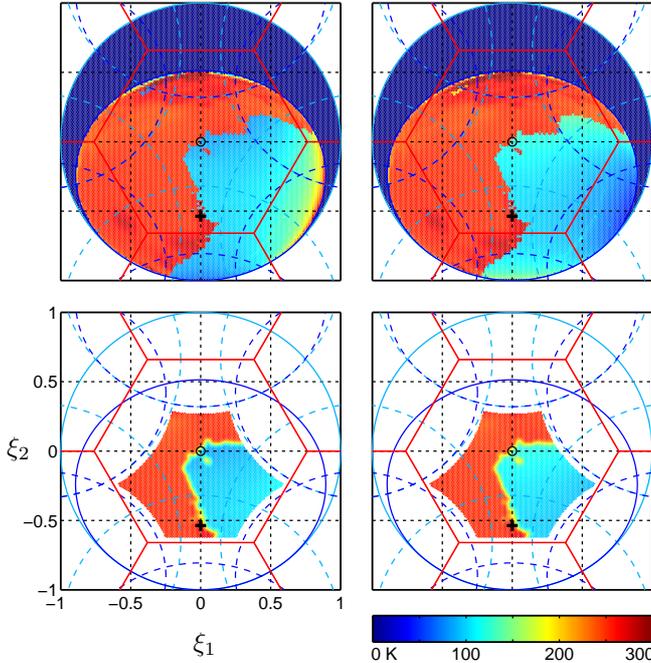


FIG. 3 – Un exemple de scène test en polarisation x (à gauche) et y (à droite) à son plus haut niveau de résolution T (en haut) et les cartes à reconstruire \mathcal{T}_w au niveau de résolution de l'instrument (en bas).

Deux jeux V_1 et V_2 de visibilitées complexes $V = (V^x, V^y)^t$ ont été simulés pour la scène $T = (T^x, T^y)^t$:

- V_1 a été simulé sans gains cross-polaires de sorte que V^x ne dépend que de T^x et V^y ne dépend que de T^y ;
- V_2 a été simulé avec les gains co-polaires et cross-polaires de sorte que V^x et V^y dépendent tous les deux de T^x et T^y .

Trois couples de cartes $T_r = (T_r^x, T_r^y)^t$ ont été reconstruits :

- T_{1r} a été reconstruit à partir de V_1 à l'aide de (12) puisqu'il n'y a pas de couplage entre V_1^x et V_1^y ;
- T_{2r} a été reconstruit à partir de V_2 à l'aide de (11) pour tenir compte du couplage entre V_2^x et V_2^y ;
- T_{3r} a été reconstruit à partir de V_2 mais à l'aide de (12) en négligeant le couplage entre V_2^x et V_2^y .

Dans les trois cas, les cartes d'erreur $\Delta \mathcal{T}_r = T_r - \mathcal{T}_w$ sont pratiquement identiques : le biais $\overline{\Delta \mathcal{T}_r}$ et la déviation standard $\sigma_{\Delta \mathcal{T}_r}$ sont du même ordre (0.07 K et 0.23 K en polarisation x , 0.05 K et 0.16 K en polarisation y). La comparaison entre T_{1r} et T_{2r} montre qu'il n'y a pas d'effet de taille qui affecte la qualité de la reconstruction. Enfin, la comparaison entre T_{2r} et T_{3r} montre que le couplage entre les gains co-polaires et cross-polaires de MIRAS est suffisamment faible pour être négligé.

5 Conclusions

Le sujet de cet article concernait la reconstruction de cartes de température de brillance à partir de données interférométriques fournies par le radiomètre imageur à synthèse d'ouverture MIRAS dans le cadre de la mission spatiale SMOS de l'Agence Spatiale Européenne. Dans un contexte contractuel européen, nous avons étendu l'approche « bande-passante limitée » qui sera implémentée dans le segment sol au cas du traitement de données interférométriques obtenues dans le mode polarimétrique de MIRAS (polarisation verticale et horizontale). Nous avons en particulier montré qu'il n'y a pas d'effet de taille qui affecte la qualité de la reconstruction et que le couplage entre les gains co-polaires et cross-polaires de MIRAS est suffisamment faible pour être négligé ce qui permet d'envisager des reconstructions rapides et indépendantes pour chaque polarisation.

Références

- [1] Y.H. Kerr, P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, J.-M. Martinuzzi, J. Font et M. Berger, *Soil Moisture Retrieval from Space : the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission*, IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sens., 39(8), pp. 1729-1735, 2001.
- [2] M. Martin-Neira, Y. Menard, J.-M. Goutoule et U. Kraft, *MIRAS, a two-dimensional aperture synthesis radiometer*, Proc. International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS'94), Pasadena (California, USA), pp. 1323-1325, 1994.
- [3] B. Picard et E. Anterrieu, *Comparizon of regularized inversion methods in Synthetic Aperture Imaging Radiometry*, IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sens., 43(2), pp. 218-224, 2005.
- [4] E. Anterrieu, *A resolving matrix approach for synthetic aperture imaging radiometers*, IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sens., 42(8), pp. 1649-1656, 2004.
- [5] I. Corbella, N. Duffo, M. Vall-llossera, A. Camps et F. Torres, *The visibility function in interferometric aperture synthesis radiometry*, IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sens., 42(8), pp. 1677-1682, 2004.
- [6] E. Anterrieu, *On the reduction of the reconstruction bias in synthetic aperture imaging radiometry*, IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sens., 45(3), pp. 592-601, 2007.
- [7] E. Anterrieu, P. Waldteufel et A. Lannes, *Apodization functions for 2D hexagonally sampled synthetic aperture imaging radiometers*, IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sens., 40(12), pp. 2531-2542, 2002.
- [8] M. Martin-Neira, S. Ribó et A.J. Martin-Polegre, *Polarimetric mode of MIRAS*, IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sens., 40(8), pp. 1755-1768, 2002.
- [9] S. Ribó et M. Martin-Neira, *Faraday rotation correction in the polarimetric Mode of MIRAS*, IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sens., 42(7), pp. 1405-1410, 2004.