

Une nouvelle méthode pour focaliser par le calcul les données d'un radar à pénétration de sol à saut de fréquence (GPR) par un algorithme rapide de type radar à synthèse d'ouverture

Patrick MILLOT¹, Elodie BACHELIER², Christian PICHOT³

¹ONERA DEMR

CERT 2, avenue Edouard Belin BP4025 TOULOUSE Cedex

²NOVELTIS

Parc Technologique du Canal 2 avenue de l'Europe 31520 RAMONVILLE

³LEAT Laboratoire Electronique Antennes Télécommunications

Université de Nice Sophia Antipolis/CNRS

Bâtiment 4. 250, rue Albert Einstein 06250 VALBONNE Cedex

millot@onera.fr

Résumé – On présente un nouvel algorithme de type SAR qui puisse traiter les données d'un radar imageur du sous-sol (GPR à saut de fréquence). Les formes champ roche dans l'air et dans le sol sont présentées ainsi que le modèle physique de signal qui est le modèle direct. Le traitement de calibration pour la prise en compte du sol ainsi que des résultats obtenus dans un contexte de déminage humanitaire sont présentés.

Abstract – We present a new algorithm of SAR-type that can process data provided by an imaging radar of the underground (step-frequency ultra-wide band GPR). The near field kinds in air and in the soil are presented as well as the physical model of signal that represents direct modeling. Calibration processing for soil properties and results obtained in the context of humanitarian demining are presented.

1. Présentation du problème :

1.1 Détection par radar des objets dans le sol :

A l'heure actuelle, on assiste au développement constant du GPR (« Ground Penetrating Radar ») essentiellement pour des applications en géophysique et en génie civil [1]. Ce type de radar se compose d'un générateur d'impulsions (impulsions de durée 1ns, spectre centré sur 500 MHz) et d'antennes que l'on pose sur le sol. Il permet de faire un sondage du sous-sol jusqu'à des profondeurs parfois importantes. Cependant, un tel radar reste à mobilité réduite du fait des antennes en contact sol et ne peut permettre un emport sur véhicule ou vol à très basse altitude ce qui ne permet pas une couverture terrain efficace. De plus, du fait du caractère impulsionnel de ces radars, on reste à basse résolution spatiale ce qui pénalise le pouvoir séparateur et aussi les possibilités de reconnaissance des cibles enfouies. En particulier, des objets enterrés très proches de la surface, comme les mines, sont difficilement détectés.

Depuis plusieurs années, l'ONERA étudie un système d'imagerie radar du sous-sol basé sur la technique GPR mais avec détection à distance c'est-à-dire que les antennes sont largement découplées du sol. De façon à garder au maximum le contrôle de la forme d'onde émise, la technique utilisée est celle du radar à modulation de fréquence. On utilise une très large bande de fréquence de façon à accroître la résolution

spatiale. En fait, on émet un certain nombre N_f de fréquences (nombre programmable : typiquement $N_f=100$) sur une bande de fréquence égale au maximum à 500 MHz-8 GHz. L'utilisation de la Transformée de Fourier Rapide en complétant les données par des zéros (« zero-padded FFT ») permet de recréer la réponse temporelle par interpolation.

1.2 Application du traitement type SAR pour le GPR :

On adopte la configuration GPR pour le radar c'est-à-dire des antennes qui pointent vers le sol à la verticale. Du fait de la hauteur de l'antenne par rapport au sol, l'empreinte du faisceau d'antenne au sol est large et ne permet pas l'imagerie faute de focalisation. On se retrouve dans des conditions analogues au radar à synthèse d'ouverture (SAR= « Synthetic Aperture Radar ») ou il est nécessaire de focaliser après coup par le calcul les signaux mis en mémoire dans un ordinateur (type PC).

2. Algorithmes d'imagerie radar :

2.1 Algorithme SAR champ proche temporel dans l'air (traitement anti-migration) :

Soit une antenne A se déplaçant le long d'un axe OX et prenant successivement les N_a positions A_i ($1 < i < N_a$) le long d'un segment de longueur L_s . L'antenne est supposée rester à une hauteur H au dessus du sol. Pour la simplification de l'exposé, on suppose que la même antenne émet et reçoit un signal (onde monochromatique) à la fréquence F, onde qui s'est réfléchi en un point M (FIG. 1). Supposons pour le moment que le point M de coordonnées (x,z) soit un point de la surface du sol donc que la propagation (trajet A_iM) ne se fasse que dans l'air. Dans ce cas, le trajet A_iM a pour valeur :

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + H^2} \quad (1)$$

Comme la distance H est comparable au déplacement x_i , il n'est pas possible d'approximer le terme d_i , comme cela se fait généralement dans le radar à synthèse d'ouverture aéroporté, exception faite du mode « spotlight » [2].

A chaque distance d_i on associe un retard $\tau_i = 2d_i/c$.

Au cours du déplacement de l'antenne A_i , la réponse du point M se déplace le long d'une hyperbole dont M est l'apex (migration hyperbolique).

Pour compenser cette migration, il est nécessaire d'aller « chercher » les instants d'arrivée τ_i pour chaque position d'antenne x_i de façon à réaliser une addition cohérente des signaux d'arrivée décalés dans le temps.

On enregistre le signal complexe pour chaque fréquence F_i comprise entre F_{\min} et F_{\max} et pour chaque position d'antenne x_i soit $S(x_i, F_i)$ un tel signal.

- le signal est transformé en $s(x_i, t_k)$ par transformée de Fourier après ajout de N_z zéros ($1 < i < N_a$, $1 < k < N_j + N_z$)
- on calcule la réponse (proportionnelle à la réflectivité) du point M par :

$$\eta(x, z) = \sum_{i=1}^{N_a} s(x_i, t_k = t_{ka}) e^{j \frac{4\pi}{c} F_c d_i} \quad (2)$$

L'équation (2) s'interprète de la façon suivante : on fait la somme des impulsions après avoir compenser la migration en les décalant dans le temps de l'instant d'arrivée t_a . Le terme de phase dans (2) est la compensation de la phase de la fréquence porteuse $F_c = (F_{\min} + F_{\max})/2$ puisque l'impulsion synthétique est portée par la fréquence centrale.

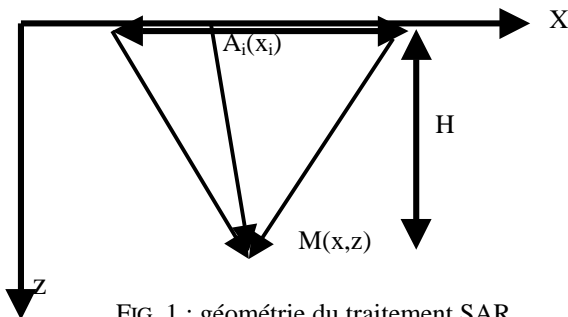


FIG. 1 : géométrie du traitement SAR

2.2 Forme fréquentielle de l'algorithme SAR champ proche :

L'équation (2) est un traitement de la migration sous forme temporelle. En partant de réponses en fréquence, le pré-traitement par Transformée de Fourier s'apparente à un filtrage adapté à un terme de phase près du à la compensation de la phase de la porteuse F_c .

D'après le théorème de Parseval, on a :

$$\eta(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s_0(t - t_a(x), x) dt dx =$$

$$\int_{L_s} \int_T s_0(t - t_a(x), x) dt dx = \quad (3)$$

$$2\pi \int_{L_s} \int_{F_1}^{F_2} S_0(F, x) e^{j2\pi F t_a} dF dx$$

Ici T désigne le temps de mesure, l'indice 0 caractérise le signal démodulé de sa porteuse et F_1 et F_2 les limites hautes et basses du spectre de ce signal.

On en déduit une forme fréquentielle équivalente à l'équation (2). Cette forme est utile dès que l'on doit prendre en compte des termes dépendant de la fréquence, comme la réponse de l'antenne ou bientôt le comportement dispersif du sol.

$$\eta(x, z) = \sum_{l=1}^{N_f} \sum_{i=1}^{N_a} S(x_i, F_l) e^{j \frac{4\pi}{c} F_l d_i} \quad (4)$$

2.3 Un modèle de signal pour les cibles enfouies :

On considère maintenant un point M dans le sol (FIG.2).

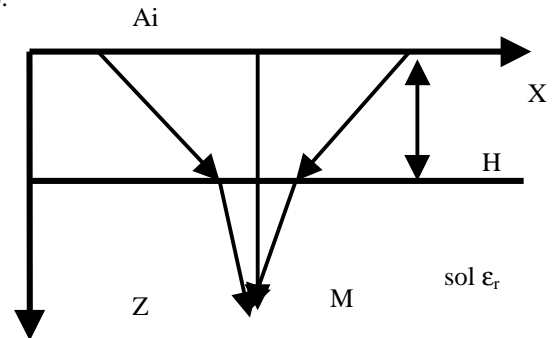


FIG. 2 : géométrie du traitement SAR dans le sol

Le signal émis à partir de l'antenne A_i est injecté dans le sol et se réfléchit en un point M appartenant à la cible. Le sol est modélisé comme un milieu de permittivité complexe ϵ_r éventuellement dépendant de la fréquence (dispersion). Cette fois, la distance d_i est celle du trajet A_iI dans l'air et IM dans le sol. Pour calculer le retard τ_i , on utilise l'équation suivante :

$$\tau_i = \frac{2A_i I}{c} + 2 \frac{IM}{v} = \frac{2A_i I}{c} + 2n' \frac{IM}{c} \quad (5)$$

où v désigne la vitesse de l'onde dans le sol, I le point d'inflexion de l'onde à la surface du sol (phénomène de réfraction : voir FIG. 2) et n' la partie réelle de l'indice de réfraction du sol. Dans (5), il est nécessaire de connaître l'abscisse du point I , x_I qui est obtenue en résolvant la loi de Descartes au niveau de l'interface [3].

Le signal total réfléchi par l'environnement est la somme de deux termes : un terme de réflexion par la surface (interface) S_I plus un terme de réflexion par le sous-sol S_s .

Le terme S_I peut s'écrire de la façon suivante :

$$S_I(x_i, F_l) = \sum_{x_I} R(\epsilon_r, x_i) e^{-j \frac{4\pi}{c} F_l d_1} \quad (6)$$

d_1 est le trajet dans l'air ($d_1 = A_1 I$, fonction de x_I)

La somme sur x_I désigne la somme sur les points I de l'interface (régulièrement échantillonnée à $\lambda_{\min}/8$). Le coefficient R est un coefficient de réflexion sur l'interface. Dans un modèle d'interface plane, il est donné par la différence d'impédance entre l'air et le sol (lois de Fresnel).

Le terme S_s est modélisé de la façon suivante :

$$S_s(x_i, F_l) = \sum_{x_c} T_{as}(\epsilon_r, x_i) T_{sa}(\epsilon_r, x_i) R_c(\epsilon_r, \epsilon_c, x_i) \quad (7)$$

$$e^{-j \frac{4\pi}{c} F_l (d_1 + \sqrt{\epsilon_r(F_l)} d_2)}$$

d_2 est le trajet dans le sol, T_{as} est la transmission air-sol, T_{sa} la transmission sol-air et R_c la réflexion sur la cible qui dépend du contraste diélectrique air-cible. Dans l'équation (7), l'introduction d'une permittivité complexe ϵ_r dépendant de la fréquence compense automatiquement l'affaiblissement du signal dans le sol.

2.4 Inversion du modèle : algorithme SAR champ proche adapté au sol :

2.4.1 Algorithme SAR adapté au sol :

Pour remplacer l'équation (4) dans le cas de cibles enterrées, on propose le nouvel algorithme suivant qui est un algorithme d'inversion symétrique de la synthèse du signal pour des cibles enterrées (7).

$$\eta(x, z) = \sum_{l=1}^{N_f} \sum_{i=1}^{N_a} S(x_i, F_l) e^{j \frac{4\pi}{c} F_l (d_1 + \sqrt{\epsilon_r(F_l)} d_2)} \quad (8)$$

Dans l'équation (8), l'introduction d'une permittivité complexe permet de compenser l'affaiblissement du signal en apportant un gain différentiel sur chaque fréquence.

L'équation (8) omet de compenser les termes R (réflexion) et T (transmission) qui modulent l'amplitude du signal et qui apparaîtront donc sur le résultat. On omet aussi les termes de rayonnement (dépendance de l'amplitude en fréquence) et de divergence sphérique (dépendance de l'amplitude en distance) qui alourdissent le traitement et qui restent du second ordre par rapport aux termes de phase.

Cet algorithme présente un temps de calcul de 10 secondes en MATLAB y compris le calcul des termes de phases qui peuvent d'ailleurs être pré-calculés rendant l'algorithme temps réel.

2.4.2 Avantages et limitations de la méthode :

En principe, la méthode permet une focalisation efficace dans le sol par compensation de la migration distance et compensation des pertes. L'algorithme SAR qui est basé sur l'inversion de la formule (6) qui en fait traduit un phénomène de diffraction au sens de Kirchoff (intégrale de contour de l'objet) a donc un sens physique en restant cohérent avec le traitement radar [4]. La limitation physique de la résolution limitée à une demi longueur d'onde en découle.

Une première limitation de la méthode est la méconnaissance à priori du sol et de sa permittivité. Ceci doit se faire au préalable par une technique de calibration (cf 2.4.3).

Généralement sur les signaux issus de FFT, il est facile d'identifier l'interface air-sol en distance, interface qui migre peu en distance. Il faut donc décider arbitrairement ce qui est sur le sol et sous le sol (c'est à dire à partir d'une certaine distance $H+\epsilon$). Pour $z < H+\epsilon$, on applique le traitement (4) et pour $z > H+\epsilon$, on applique le traitement (8).

Un autre problème provient des défauts de planéité de l'interface air-sol. Dans le cas d'une interface air-sol très rugueuse, on est en présence d'un bruit de phase très important sur la mesure qui peut perturber fortement l'imagerie radar SAR. La rugosité devient critique dans le cas de variations de hauteur voisine de la demi-longueur d'onde, ce qui oblige donc d'utiliser seulement les basses fréquences dans l'équation (8) et d'y perdre en résolution. Nous avons montré par une simulation électromagnétique exacte (équations de Maxwell) qu'une petite rugosité ne détruit pas le résultat d'imagerie radar. De plus, l'effet étant de défocaliser la cible, on peut refocaliser (c'est-à-dire corriger les termes de phases) adaptivement sur une critère énergétique.

2.4.3 Calibration sur objet test

Une calibration préalable est nécessaire afin de valider les paramètres du sol pris en compte (permittivité) dans (8). Cette procédure préliminaire consiste à placer un objet test à une profondeur connue (de 5 à 10 centimètres) en l'occurrence une plaque métallique. Il est facile de d'en déduire la vitesse du signal électromagnétique par calcul du retard du signal réfléchi par la plaque. Cette donnée est suffisante pour ne pas faire d'erreur sur la compensation de la migration. La compensation des pertes est plus délicate car elle peut entraîner une amplification du bruit de mesure. Nous avons mis au point une routine d'optimisation en MATLAB qui détermine les bonnes valeurs de ϵ_r pour un ensemble restreint de 4 fréquences comprises entre F_{\min} et F_{\max} . En reprenant le modèle transmission-réflexion combiné à (8), le principe est d'optimiser ϵ_r jusqu'à obtenir $\eta=1$ en module (réflexion

métallique). Cette approche donne de bons résultats sauf dans les sols trop argileux et humides on remonte par là même le bruit de mesure.

3 . Exemple de résultat :

On présente ici un résultat de mesure d'imagerie radar du sol avec 4 cibles enterrées proches de la surface dans le cadre d'applications de déminage humanitaire (FIG. 3).

Les objets sont de gauche à droite 2 boules de pétanque, une plaque métallique de 30 cm de diamètre, une boîte en plastique de 20 cm (tous à 10 cm de profondeur), une mine anti-personnel affleurante. La représentation se comprend en coupe verticale. Les 3 vignettes correspondent à 3 bandes différentes 2 à 3 GHz, 2 à 5 GHz et 2 à 8 GHz pour bien montrer l'apport de définition apportée par le SAR très large bande (terre peu humide). On distingue aussi : un aller-retour plaque-sol (réflexion double) et le haut et le bas de la boîte. Une hauteur par rapport au sol de 20 à 70 cm donne des résultats comparables.

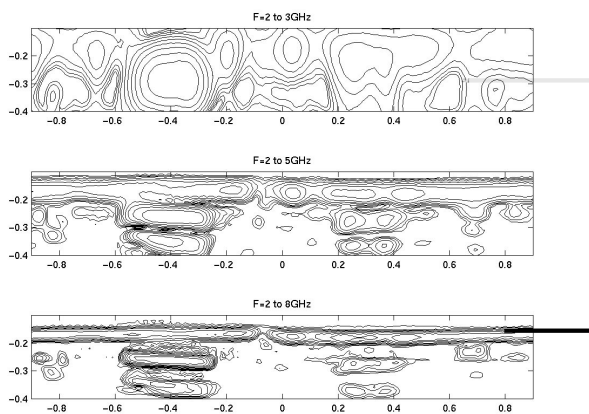


FIG.3 exemple d'imagerie SAR sur objets test

5 . Conclusion:

On a présenté un nouvel algorithme de type SAR qui peut être utilisé par un radar de détection de cibles enfouies. Cet algorithme est compatible avec une distance proche, une large bande de fréquence et peut prendre en compte les paramètres du sol. Un modèle physique qui prend en compte la propagation du signal et la physique de la diffraction a été conçu. Il lui est directement symétrique et permet une validation de l'algorithme. L'ensemble est aussi un couple prédictif de ce qu'il est possible d'attendre du radar en contexte réel.

Des perspectives d'amélioration s'ouvrent aussi comme la prise en compte d'un modèle d'antenne qui devrait améliorer la résolution spatiale.

La synergie traitement du signal et modélisation électromagnétique devrait aussi permettre d'aboutir à des

stratégies d'inversion plus complexes certes mais plus performantes sur le plan de l'identification de cibles enfouies.

Références

- [1] J. Daniels *Surface Penetrating Radar* The Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [2] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Processing* Willey InterSciences, 1999.
- [3] E. Johanssen, J.E.Mast *Three Dimensionnal Ground Penetrating Radar Using Synthetic Aperture Time Domain Focusing* Proc. SPIE Advanced Microwave Detectors Vol 2725 Pages 25-27 July 1994
- [4] N.Osumi, K.Ueno *Microwave Holographic Imaging of Underground Objects* IEEE Trans. on Antennas and Propagation Vol AP-33 no2 Février 1985