

Traitements SAR Ultra Large Bande

Bruno Juhel, Georges Vezzosi *
Emmanuel Legros, Marc Le Goff **

* Laboratoire de Traitement du Signal et de l'Image
 Campus de Beaulieu, Université de Rennes 1
 35042 Rennes Cedex
 Email : Bruno.Juhel@univ-rennes1.fr

** Centre d'Électronique de l'Armement (DGA)
 35170 Bruz

RÉSUMÉ

Une approche temporelle des traitements SAR à base de signaux Ultra Large Bande est proposée dans cet article. Un radar SAR fonctionne habituellement en bande étroite, mais ici le radar émet des impulsions courtes de durée une nanoseconde. Tout d'abord, nous présentons une modélisation de ce radar ULB et une définition de la SER ULB. Il existe alors différentes manières de traiter les signaux mesurés. Nous développons les algorithmes de reconstruction d'image basés sur la sommation cohérente et la compression d'impulsion, ainsi qu'une méthode originale de calibration. A partir des données expérimentales recueillies par un radar ULB prototype, ces algorithmes sont validés et les résultats obtenus sur un trièdre permettent d'atteindre une résolution d'image de 20 cm.

1 Introduction

Dans le cadre des études sur les apports des signaux Ultra Large Bande à l'imagerie radar, il convient de définir les traitements SAR (Synthetic Aperture Radar) ULB (Ultra Large Bande) possibles. Une image SAR est représentative de la réflectivité électromagnétique des terrains et des cibles. Largement répandue dans les systèmes d'observation aussi bien civils que militaires, l'imagerie SAR bande étroite à base des signaux Chirp présente des limitations (essentiellement en terme de résolution). Grâce au large contenu spectral instantané des signaux ULB (impulsions très courtes d'une durée d'environ une nanoseconde), le radar peut améliorer sa résolution et pénétrer ces écrans. Le développement récent de la technologie Ultra Large Bande motive cette étude qui a permis l'élaboration d'un code de traitement prenant en compte les spécifications ULB. Cet article présente les algorithmes mis au point et analyse les résultats des traitements issus des premières expérimentations ULB effectuées au CÉLAR.

ABSTRACT

In this paper, a time domain approach of SAR processings with Ultra Wide Band signals is presented. Usually a SAR is a narrow band system, but in our case transmitted signals are nanosecond short pulses. First, modelisations of this UWB radar are computed. The UWB Radar Cross Section is developed in this section. The measured signals can be processed by using different algorithms. We develop SAR image algorithms all based on coherent summation and matched filter, and an original method to calibrate the SAR images. These algorithms are tested with experimental data measured by an UWB prototype radar and we obtain 20 cm resolution results on a trihedral SAR image.

2 Modélisations en imagerie SAR ULB

2.1 Modélisation des impulsions

La configuration géométrique du SAR embarqué sur un mobile de vitesse v est illustrée sur la figure 1 [1].

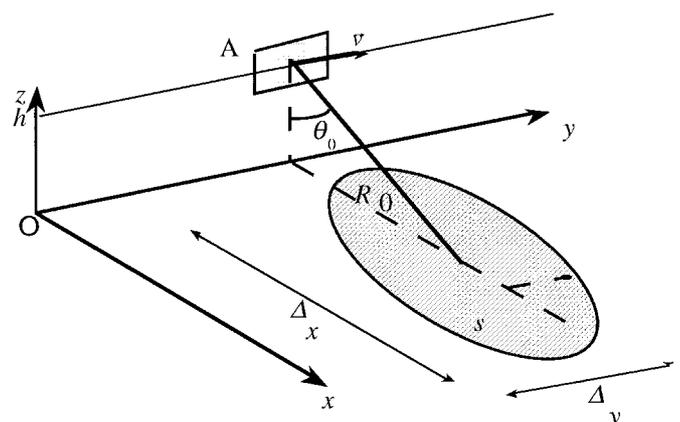


Figure 1 : Configuration d'un radar SAR

L'impulsion ULB (figure 2), dotée d'un large spectre instantané, est transmise par l'intermédiaire des antennes ayant un diagramme de rayonnement ULB. Puis elle est rétrodiffusée par une cible élémentaire de réflectivité σ_0 . Le signal capté par l'antenne de réception [2] est donné par intégration des signaux élémentaires S_e renvoyés par la scène illuminée s :

$$R_x(t) = \iint_s S_e((x, y), t) dx dy. \quad (1)$$

Les signaux bruts mesurés constituent alors un tableau temps - position radar (Pos_ant : nombre maximum de positions).

2.2 Modélisation FDTD

La réponse d'un trièdre (1,5 m d'arête) en espace libre à une impulsion incidente de bande 3 GHz a été modélisée par FDTD (Finite Difference Time Domain) à l'IRCOM (Université de Limoges). Sont alors présentées successivement, figure 2, l'impulsion incidente et la réponse temporelle du trièdre.

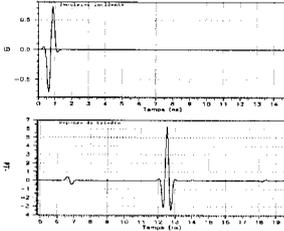


Figure 2 : Réponse temporelle du trièdre

2.3 SER Ultra Large Bande

Pour calibrer les images avec un étalon (§3.1), on définit la SER ULB d'une cible de la façon suivante :

$$SER_{ULB} = 4\pi r^2 \frac{\sum E_d(t)^2}{\sum E_i(t)^2}. \quad (2)$$

E_d est le champ diffracté à l'infini par la cible et E_i le champ incident à sa surface.

On remarque bien qu'avec la relation (2) la valeur de la SER ULB dépend de la forme de l'impulsion émise ou plus exactement de son spectre. Si l'on utilise l'impulsion de la figure 2, on obtient une SER ULB de 27,7 dBm² pour un trièdre de 1,5 m d'arête.

Le résultat de la SER ULB d'un trièdre de 0,5 m utilisé comme calibrateur est de 9 dBm² pour l'impulsion réellement émise lors de l'expérimentation (§4).

3 Algorithmes d'imagerie SAR ULB

L'algorithme développé pour le traitement de données SAR ULB est celui de la sommation cohérente. A celui-ci peuvent venir s'ajouter des options :

- possibilité d'utiliser la cartographie du terrain,
- filtrage adapté 1D ou compression en distance,
- filtrage adapté 2D ou compression en distance et azimutale.

3.1 Sommation cohérente

Cette méthode consiste à sommer de façon cohérente les réponses impulsionnelles mesurées sur le secteur angulaire correspondant au déplacement du radar. Cette méthode est déjà utilisée en holographie où les réponses impulsionnelles sont calculées par FFT de l'hologramme (réponse en fréquence sur une bande relativement large). En Ultra Large Bande, les réponses dites impulsionnelles sont directement issues de la mesure. Il est important de noter que les réponses mesurées correspondent à la vraie réponse impulsionnelle convoluée avec l'impulsion émise par l'antenne. La sommation cohérente peut se résumer par la formule suivante :

$$I(x_i, y_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{pos_ant} R_x(d(x_i, y_i), p_k). \quad (3)$$

Le calcul d'image est réalisé pixel par pixel. Pour chaque pixel $I(x_i, y_i)$, l'algorithme identifie, sur chaque réponse impulsionnelle R_x et grâce à la distance réelle $d(x_i, y_i)$ antenne - pixel considéré, la case distance correspondante. Ce point ayant peu de chance de correspondre exactement à une case distance mesurée, sa valeur est calculée par interpolation linéaire entre les valeurs des deux cases les plus proches. On obtient la valeur de chaque pixel en sommant ces valeurs obtenues à partir de toutes les réponses impulsionnelles qui ont constitué la mesure et qui correspondent aux différentes positions du radar p_k (hyperbole de migration en distance).

Un des objectifs des traitements est de construire des images dont on pourra, par post-traitement, extraire des valeurs de σ_0 . Ces images doivent donc être parfaitement calibrées et non-entachées d'erreurs. Deux corrections sont alors apportées :

- Correction en distance

L'énergie du signal reçu par le radar varie avec l'inverse de la puissance 4ème de la distance. Comme on s'intéresse à la SER (ou σ_0) en champ lointain, il faut corriger la mesure de manière à abaisser le niveau des contributeurs placés en avant d'un point de référence de la scène (par exemple un trièdre) et à rehausser les contributeurs placés plus loin. L'énergie reçue variant en $1/d^4$, le niveau du signal mesuré varie donc en $1/d^2$. La valeur de la correction à appliquer sur les données brutes est donc :

$$Correct(d) = \left(\frac{d}{d_{ref}} \right)^2 \quad (4)$$

avec d_{ref} la distance antenne - point de référence.

- Calibration énergétique des images

Du fait des gains successifs des différents appareils de mesure et des dégradations de transmission, le niveau global du signal mesuré n'est pas celui auquel on peut s'attendre. On utilise alors une cible de référence (ici un trièdre) dont on connaît parfaitement les propriétés de rétrodiffusion et sa SER. Le but de la calibration (ou étalonnage) est de comparer la réponse de cet étalon extraite des fichiers de mesures et la réponse théorique donnée en ULB par FDTD (§2) et ensuite de corriger l'ensemble des mesures en conséquence. La méthode employée consiste à calculer l'énergie réémise par l'étalon sur une zone de l'image non calibrée et de la comparer à sa SER théorique (§2).

Les images ULB reconstruites sont calibrées en niveau à l'aide de la réponse théorique du trièdre à l'impulsion théoriquement émise. La calibration se fait en deux phases. La première consiste à définir la zone d'apparition de l'étalon dans l'image puis à calculer le rapport énergétique entre la réponse mesurée de l'étalon dans cette zone (appelée masque) et sa réponse théorique. La seconde, effectuée à la fin du calcul d'image puisque ce rapport est le même partout, consiste à multiplier la réponse des pixels par le rapport précédemment calculé puis de calculer le σ_0 . Le gros avantage de cette méthode est de rester tout le long du traitement en temporel. Pour résumer, on a :

Première étape : calcul de la constante de calibration K avec le trièdre

$E_{d_tri_th}^z$ est l'énergie théorique renvoyée par le trièdre pour une énergie incidente E_i^z connue, $E_{tri_mes}^z$ l'énergie du signal mesuré et renvoyé par l'étalon dans le masque de l'image non calibrée, E_{pixel}^z l'énergie d'un pixel de surface S_{pixel} de l'image à calibrer.

$$K = \frac{E_{d_tri_th}^2}{E_{tri_mes}^2} \quad (5)$$

Deuxième étape : calcul de la SER ou du Sigma0

$$SER_{dBm^2} = 10 \log(4\pi R^2 \cdot K \cdot \frac{E_{pixel}^2}{E_i^2}) \quad (6)$$

$$Sigma0_{dBm^2/m^2} = 10 \log(4\pi R^2 \cdot K \cdot \frac{E_{pixel}^2}{E_i^2} \cdot \frac{1}{S_{pixel}}) \quad (7)$$

La sommation cohérente peut aussi être adaptée au terrain numérisé correspondant au site de mesures, afin d'améliorer la focalisation des points. Il ne s'agit pas d'un traitement sur les mesures brutes mais d'un calcul plus précis de la distance antenne - point au sol $d(x_i, y_i)$, connaissant la cartographie du terrain. Bien évidemment, la prise en compte de la cartographie ne peut se faire que sur des données provenant de terrains dont on a connaissance *a priori* de l'altimétrie.

3.2 Compression en distance

De la même façon qu'en SAR bande étroite [3], une compression en distance peut être réalisée sur les mesures brutes en effectuant la corrélation du signal mesuré avec une estimée de l'impulsion T_x émise par l'antenne :

$$I(x_i, y_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{pos} \sum_t^{ant} T_x(t) \cdot R_x \left(\frac{2d(x_i, y_i)}{c} - t, p_k \right) \quad (8)$$

3.3 Compression en distance et azimutale

Une autre possibilité de compression consiste à utiliser le diagramme d'antenne (estimation des impulsions émises suivant la direction d'observation) pour faire une compression en distance avec une impulsion différente selon l'angle d'observation θ_i du pixel :

$$I(x_i, y_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{pos} \sum_t^{ant} T_x(t, \theta_i) \cdot R_x \left(\frac{2d(x_i, y_i)}{c} - t, p_k \right) \quad (9)$$

4 Expérimentations ULB

Dans le cadre d'un arrangement technique avec la DRA (Defence Research Agency), une campagne de mesures s'est déroulée au CÉLAR en novembre 1996 avec un radar ULB prototype (figure 3) [4]. Il est installé sur la plate-forme extérieure STRADI à 30 mètres de hauteur avec un angle de visée de 45°. Le principe essentiel de la mesure est d'émettre, pour une position donnée de la plate-forme, une impulsion ULB et de numériser le signal renvoyé par la scène directement dans le domaine temporel (échantillonnage à 50 ps). Pour diminuer l'effet du bruit UHF ambiant, les réponses sont moyennées sur 16 acquisitions. Ensuite, on recommence l'opération pour une nouvelle position du porteur sur les rails (tous les 60 cm) et ceci pour diverses scènes.

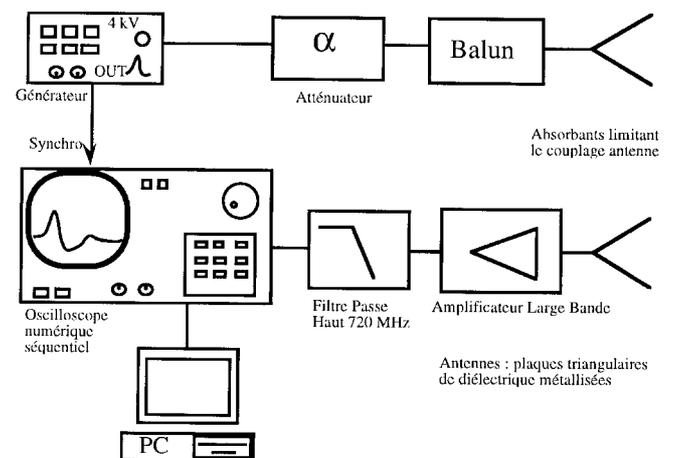


Figure 3 : Configuration du radar ULB

5 Résultats des traitements

La figure 4 montre le signal mesuré renvoyé par un grand trièdre (1,5 m), vu en spéculaire, non épuré du bruit. Les diffractions d'arêtes ne sont pas visibles lors de la mesure car elles doivent être noyées dans le bruit ambiant UHF et le clutter de sol. L'autre raison de la différence avec le signal théorique de la figure 2 résulte de la déformation du signal émis par l'antenne ULB lors de l'expérimentation.

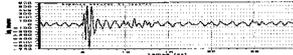


Figure 4 : Réponse temporelle mesurée du trièdre

Les données brutes de la mesure du trièdre sur une zone non labourée sont représentées figure 5 : on peut y observer le phénomène de migration en distance.

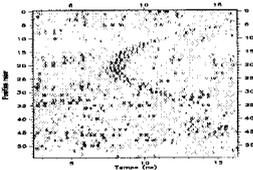


Figure 5 : Image brute du trièdre

La résolution sur l'image du trièdre obtenue par sommation cohérente est de 30 cm en distance et 25 cm en azimut, comme on peut le constater sur le zoom de 1 m x 1 m présenté figure 6. A l'aide d'un masque sur la zone où signe le trièdre, on retrouve bien la SER ULB du petit trièdre valant 9 dBm² en simulation.

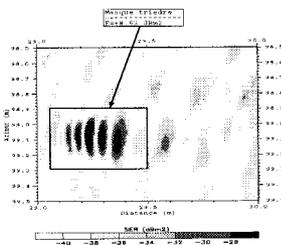


Figure 6 : Zoom sur l'image du trièdre (SER)

En vue d'améliorer la résolution et de mieux détecter des cibles noyées dans le clutter, la sommation avec compression 1D ou 2D modifie l'image du trièdre : forte atténuation du clutter et image mieux focalisée (figure 7). Si l'on comprime avec l'estimée de l'impulsion émise, on voit apparaître des lobes secondaires plus faibles sur l'image, ce qui induit une meilleure résolution de l'ordre de 20 cm. On peut aussi vérifier que si l'on recherche une cible particulière (ex : le trièdre), on obtient une image mieux résolue en la comprimant par la réponse temporelle de cette cible.

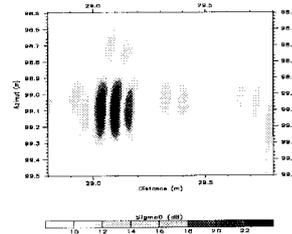


Figure 7 : Image du trièdre avec compression (sigma0)

D'autres zones de labours orientés à 90° et 0° et une zone de sapins ont été mesurées. Ces mesures seront prochainement reprises avec un nouveau radar ULB du CÉLAR.

6 Conclusion

Nous proposons dans ce document des algorithmes de traitements SAR dédiés aux signaux Ultra Large Bande. L'originalité de ces méthodes se situe au niveau de l'aspect temporel des traitements. Les mesures présentées permettent de valider ces traitements et de vérifier un des avantages des technologies ULB (*i.e.*, l'hyper-résolution). Aujourd'hui, ce travail ne constitue qu'une première étape dans la spécification des traitements SAR ULB engagée par la DGA.

7 Références

- [1] B. Juhel "Application de l'Ultra Large Bande à l'imagerie SAR" Rapport d'avancement LTSI Université de Rennes 1 Mai 1996
- [2] K.A. Shubert, G.T. Ruck "Canonical representation of the radar range equation in the time domain" SPIE 1631 UltraWideBand Radars 1992
- [3] D.C. Munson Jr, R.L. Visentin "A signal processing view of strip mapping SAR" IEEE T.A.S.S.P. vol 37 n°12 Dec. 1989
- [4] IETA M. Le Goff Rapport d'essais CÉLAR "Campagne de mesures ULB sur STRADI" Mai 1997