

Algorithme de projection pour l'imagerie microonde à haute résolution en temps réel

Thomas Fromenteze, Ettien Lazare Kpré, Cyril Decroze, David Carsenat, Jonah Gollub, David R. Smith

▶ **To cite this version:**

Thomas Fromenteze, Ettien Lazare Kpré, Cyril Decroze, David Carsenat, Jonah Gollub, et al.. Algorithme de projection pour l'imagerie microonde à haute résolution en temps réel. XIXèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2015, Bordeaux, France. hal-01213880

HAL Id: hal-01213880
https://unilim.hal.science/hal-01213880

Submitted on 9 Oct 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

XIX^{èmes} Journées Nationales Microondes
3-4-5 Juin 2015 - Bordeaux

Algorithme de projection pour l'imagerie microonde à haute résolution en temps réel

Thomas Fromenteze[1], Ettien. L. Kpré[1], Cyril Decroze[1], David Carsenat[1], Jonah Gollub[2], David R. Smith [2]

[1]*Institut de Recherche Xlim, Université de Limoges, France*
[2]*Duke University, Durham NC, USA*
thomas.fromenteze@unilim.fr

Résumé

Une technique de calcul de projection 2D d'images radar est présentée dans cet article. Dans de nombreux cas tels que les scanners d'aéroport, une projection d'image 3D est suffisante pour détecter les éléments visés et apporte plus d'informations qu'une simple coupe 2D, notamment lorsque la distance de l'objet n'est pas connue précisément. En réalisant une projection des voxels à reconstruire sur un plan, il est possible de diminuer le temps de calcul et la mémoire nécessaires à l'obtention des images. Le principe théorique de cette méthode est développé dans ce papier suivi de résultats issus de simulations. Enfin, les gains apportés en termes de temps de calcul sont présentés.

1. Introduction

Les développements récents dans le domaine des radars microondes ont permis de mettre au point des systèmes d'imagerie appliqués au domaine médical et à la détection d'armes enfouies. Afin de maximiser les diversités spatiale et temporelle des informations mesurées, des systèmes MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs) utilisant conjointement plusieurs antennes d'émission et de réception ont été mis au point [1], fonctionnant dans le domaine ultra large bande (ULB) [2]. Le contrôle indépendant des signaux ULB émis et reçus par les systèmes d'imagerie s'accompagne cependant de fortes contraintes technologiques et financières, limitant l'implémentation à grande échelle de telles techniques. Ainsi, des méthodes de compression ont récemment été développées afin de réduire la complexité des systèmes actifs requis en imagerie microonde [3, 4, 5, 6], menant au développement d'une technique compressive de RADAR MIMO ULB [7]. Le principe d'un telle technique est illustré par la figure (1). Un composant compressif à une entrée et N sorties est conçu de façon à présenter N fonctions de transfert quasi-orthogonales entre elles. Ainsi, en connectant des antennes ULB au système, les formes d'ondes émises et reçues sont codées lors de la propagation dans le composant. Il a ainsi été démontré qu'une unique mesure en réflexion à l'entrée du composant permet de reconstruire une estimation fiable de la matrice MIMO correspondant à l'interaction entre chaque couple d'antennes d'émission et de réception. De façon conventionnelle, cette matrice mesurée peut ensuite être traitée par des algorithmes d'imagerie MIMO ULB conventionnels de façon à reconstruire l'image de la cible [7].

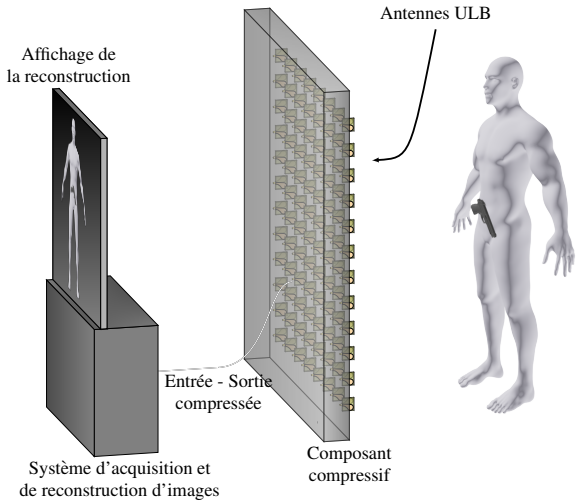


Figure 1. Implémentation d'une technique d'imagerie microonde MIMO ULB compressive appliquée à la détection d'objets enfouis.

Face aux dimensions des matrices spatio-temporelles à traiter, des méthodes basées sur la décomposition en ondes planes ont été introduites dans [2] afin d'exploiter l'efficacité des transformées de Fourier rapides et de réduire les temps de calculs d'images RADAR 3D. Certaines applications telle que la détection d'objets enfouis peuvent parfois se satisfaire d'une simple projection 2D d'une image 3D (Fig. 1). Ainsi, à partir des formulations introduites dans [2], il a été démontré qu'une projection de la scène à imager est réalisable en isolant un opérateur indépendant des signaux mesurés. Il est ainsi montré qu'un important gain en temps de calcul peut être réalisable pour des scenarii où une simple projection est satisfaisante. Ce type de projection s'avère particulièrement intéressant dans le cas

des techniques compressives nécessitant la mesure d'un grand nombre de points fréquentiels. Dans la prochaine section, le principe théorique est introduit, suivi de résultats issus de simulations. Enfin, une étude des gains apportés en terme de temps de calcul est présentée.

2. Principe théorique

Le principe théorique est développé pour le cas d'un système MIMO, comprenant m_t antennes d'émission de positions (x_t, z_t) et m_r antennes de réception de positions (x_r, z_r). Ces réseaux sont placés dans le plan $y = 0$, avec y l'axe de propagation. Les signaux mesurés correspondant à l'interaction entre chaque couple d'antennes d'émission et de réception sont stockés sous la forme d'une matrice $M(x_t, z_t, x_r, z_r, f)$. Au moyen de la première approximation de Born, cette matrice peut être exprimée en fonction de la réflectivité de la cible dans l'espace $R(\vec{r})$ de la façon suivante :

$$M(x_t, z_t, x_r, z_r, f) = \int_r G(\vec{r_t}, \vec{r}, f) R(\vec{r}) G(\vec{r}, \vec{r_t}, f) \partial r^3 \tag{1}$$

où $G(\vec{r_1}, \vec{r_2}, f)$, correspond à la fonction de Green en espace libre entre les points $\vec{r_1}$ et $\vec{r_2}$. $\vec{r}$ représente ainsi l'espace décrit par la matrice R. Les positions des antennes d'émission et de réception sont notées de façon vectorielle telles que $\vec{r_t} = x_t\vec{e_x} + y_t\vec{e_y}$ et $\vec{r_r} = x_r\vec{e_x} + y_r\vec{e_y}$. Le but de l'algorithme d'imagerie développé est ainsi de reconstruite une projection 2D de la réflectivité.

Il est démontré dans [2] qu'il est possible d'extraire cette signature en développant l'expression du couplage entre les ondes planes émises et reçues. Ainsi, une décomposition en fréquences spatiales est réalisée à l'aide d'une transformée de Fourier 4D :

$$M(k_{xt}, k_{zt}, k_{xr}, k_{zr}, f) = \mathfrak{F}_{4D}\left[M(x_t, z_t, x_r, z_r, f)\right] \tag{2}$$

avec $(k_{xt}, k_{zt}, k_{xr}, k_{zr})$ les fréquences spatiales transverses correspondant réciproquement aux axes (x_t, z_t, x_r, z_r). Afin de calculer le couplage entre chaque couple d'ondes planes émises et reçues, la relation de dispersion suivante a été introduite :

$$k_y = \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - k_{xt}^2 - k_{zt}^2} + \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - k_{xr}^2 - k_{zr}^2} \tag{3}$$

Il est alors possible de projeter l'axe des fréquences sur les distances y au moyen d'une transformée de Fourier :

$$M(k_{xt}, k_{zt}, k_{xr}, k_{zr}, y) = \int_f M(k_{xt}, k_{zt}, k_{xr}, k_{zr}, f) e^{jk_y y} df \tag{4}$$

Ensuite, des fréquences spatiales composites sont définies telles que :

$$k_x = k_{xt} + k_{xr} \tag{5}$$

$$k_z = k_{zt} + k_{zr} \tag{6}$$

et les composantes spectrales de M sont sommées de la même façon afin d'obtenir une nouvelle matrice *3D* $M(k_x, k_z, y)$. Enfin, la signature des cibles à imager est calculée à l'aide d'une transformée de Fourier inverse *2D* :

$$R(x, z, y)|_{rec} = \mathfrak{iF}_{2D}\left[M(k_x, k_z, y)\right] \tag{7}$$

Ces différentes étapes sont notamment réalisables à partir de transformées de Fourier rapides et d'interpolations, permettant ainsi d'obtenir des images *3D* en quelques secondes. Cependant, l'utilisation de matrices *5D* est un facteur limitant, impliquant des quantités de mémoire et des temps de calcul croissant de façon exponentiellement avec les dimensions du problème. Cette contrainte apparaît notamment dans le cas des techniques compressives introduites précédemment qui nécessitent un grand nombre d'échantillons fréquentiels afin de réaliser une estimation acceptable de la matrice MIMO.

A partir de l'équation (4), il est possible de calculer une matrice $M_{\Sigma y}$ équivalente à la projection de l'image 3D sur le plan 2D xz en sommant les contributions des ondes planes selon l'axe de propagation :

$$M_{\Sigma y}(k_{xt}, k_{zt}, k_{xr}, k_{zr}) = \int_f M(k_{xt}, k_{zt}, k_{xr}, k_{zr}, f) \int_y e^{jk_y y} dy\, df \tag{8}$$

Cette reformulation permet de faire apparaître l'opérateur de projection $\int_y e^{jk_y y} dy\, df$, dont les variables dépendent uniquement du système d'imagerie. Il est alors possible de pré-calculer l'expression de cet opérateur indépendant des signaux mesurés. Afin de présenter les performances de cette méthode, un cas théorique est simulé dans la prochaine section.

3. Application de l'algorithme

Une simulation d'imagerie MIMO ULB est programmée avec le logiciel *Matlab*.

Le réseau d'émission est constitué de 30×30 antennes isotropes régulièrement espacées sur une largeur et une hauteur de 70 cm. Le réseau de réception est quant à lui constitué de 2×2 antennes espacées selon x et z de 50 cm (Fig. 2). L'expérience est simulée pour une bande de fréquence allant de 10 à 20 GHz régulièrement échantillonnée par un nombre de points variant de 50 à 5000 afin d'étudier les temps de calcul de chaque méthode. En appliquant la première approximation de Born, la cible est

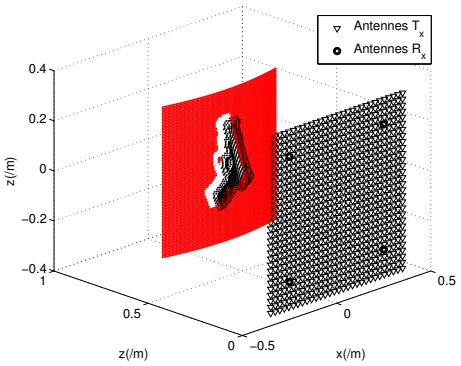


Figure 2. Radar MIMO ULB simulé sous Matlab. Une forme d'arme à feu est placée devant un tronçon cylindrique simulant la réflexion d'un corps humain.

divisée en un ensemble d'éléments à surface équivalente radar isotrope. Pour cette expérience, la scène à imager est une arme à feu métallique, placée devant un tronçon de cylindre représentant un corps humain (points rouges). Les signatures des éléments composant le corps sont arbitrairement fixées comme étant 0.6 fois moins importantes que celles de l'arme. Une comparaison est réalisée entre l'image calculée à l'aide de l'algorithme présenté dans [2] et celle obtenu par la méthode proposée en utilisant 2001 points fréquentiels (Fig. 3).

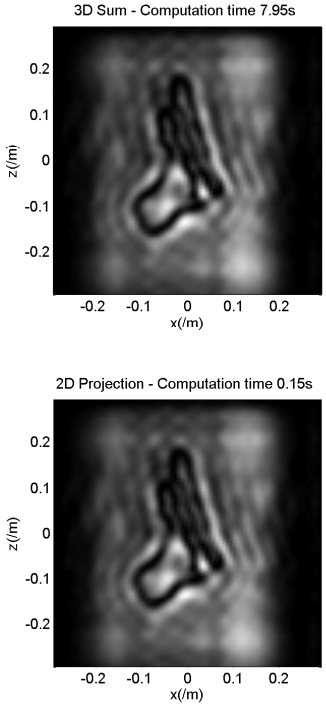


Figure 3. Haut : Image obtenue par sommation des voxels sur l'axe de propagation à partir d'une matrice 3D. Bas : Image obtenue dans les mêmes conditions à partir de la méthode de projection 2D proposée.

Les images calculées sont équivalentes mais un gain de temps d'un facteur 53 est obtenu dans le cas de la méthode proposée par rapport à l'algorithme introduit dans [2]. Le temps de calcul de chaque méthode en fonction du nombre de points fréquentiels est présenté en figure (4).

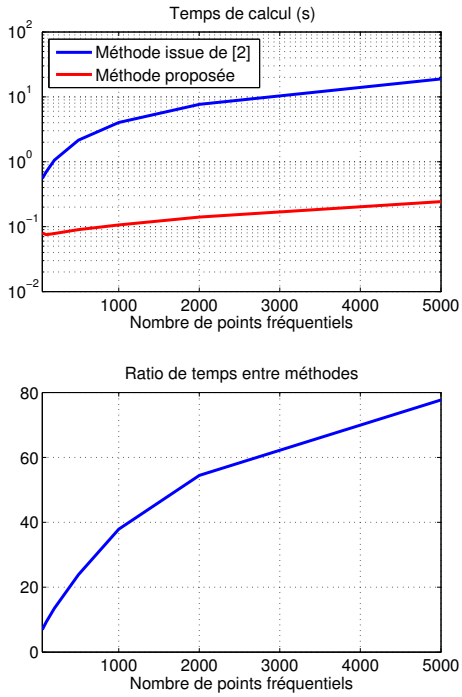


Figure 4. Haut : Temps de calcul des images radar pour chaque méthode en fonction du nombre de points fréquentiels. Bas : Ratio entre les temps de calcul.

Enfin, l'erreur quadratique moyenne entre l'image correspondante à l'algorithme issu de [2] et celle de la méthode proposée est calculée en fonction du nombre de points fréquentiels.

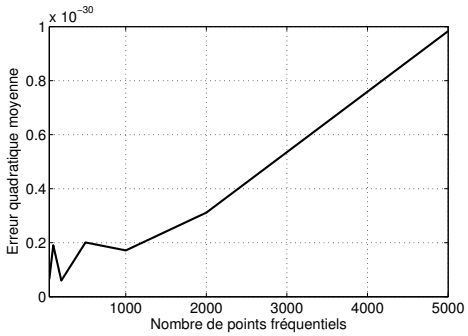


Figure 5. Erreur quadratique moyenne entre l'image calculée à partir de [2] et la méthode proposée.

L'ordre de grandeur de 10^{-30} de l'erreur quadratique moyenne permet de conclure que les résultats issus de ces deux méthodes sont équivalents.

4. Conclusion

Un algorithme permettant de calculer rapidement la projection 2D d'images 3D mesurées par un radar MIMO ULB a été présenté. Le gain de temps calculé croit avec le nombre de points de fréquence, permettant d'envisager l'application de cet algorithme au développement de systèmes d'imagerie compressifs fonctionnant en temps réel.

Références

[1] D.W. Bliss et K.W. Forsythe, "*Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging : degrees of freedom and resolution*" Sig, Sys and Comp, Conf. on. Vol. 1. IEEE, 2003.

[2] X. Zhuge et A.G. Yarovoy, "*Three-Dimensional Near-Field MIMO Array Imaging Using Range Migration Techniques*", Image Processing, IEEE Transactions on, vol.21, no.6, pp. 3026-3033, 2012.

[3] D. Carsenat et C. Decroze, *UWB Antennas beamforming using passive time reversal device*, IEEE Ant. Wire. Prop. Lett., vol.11, pp.779-782, 2012.

[4] J. Hunt,T. Driscoll, A. Mrozack, G. Lipworth, M. Reynolds, D. Brady et D.R. Smith, "*Metamaterial apertures for computational imaging*", Science, vol 339, pp. 310-313, 2013.

[5] G. Lipworth, A. Mrozack, J. Hunt, D. L. Marks, T. Driscoll, D. Brady, and D.R. Smith, "Metamaterial apertures for coherent computational imaging on the physical layer". *JOSA A*, vol 30, no 8, pp.1603-1612, 2013.

[6] T. Fromenteze, C. Decroze, and D. Carsenat, "Waveform coding for passive multiplexing : Application to microwave imaging", *IEEE Trans. Ant. Prop.*, vol. 63, no. 2, 2014.

[7] T. Fromenteze, C. Decroze et D. Carsenat, "*Passive UWB multiplexing device for a single-port MIMO RADAR*", Microwave Symposium (IMS), 2014 IEEE MTT-S International, 1-6 June 2014.