

Imagerie à travers les murs : Etude d'incertitude sur les caractéristiques du mur et du radar

Yanisse BOUDROUZ¹ Israel HINOSTROZA¹ Mohammed SERHIR¹ Christelle EYRAUD²

¹Paris-Saclay Univ., CentraleSupélec, SONDRRA, Gif-sur-Yvette, France

²Aix-Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France

Résumé – L'imagerie radar à travers les murs est une technique utilisant les ondes radio pour détecter et identifier des objets cachés derrière un mur. C'est un domaine de recherche prometteur dans la communauté du radar. Elle s'est avérée être une solution très efficace dans de nombreuses applications civiles et militaires, telles que le sauvetage, la surveillance et l'identification. L'étude présentée vise à établir les conséquences d'une mauvaise évaluation des caractéristiques du mur et du radar sur les résultats de l'imagerie radar.

Abstract – Through-the-wall radar imaging (TTWRI) is a technique that utilizes radar to detect and identify objects hidden behind a wall or other barrier. TTWRI is a promising area of research in the radar community. It has proven a highly effective solution in many civilian and military applications, such as search and rescue, surveillance, and target identification. The presented study aims to establish the consequences of the miss-evaluation of the wall and radar characteristics over the radar imaging results.

1 Introduction

Les techniques de radar à travers les murs impliquent l'utilisation d'ondes électromagnétiques (EM). Elles permettent de détecter, caractériser et imager des cibles situées derrière des obstacles tels que des murs. En analysant les ondes diffractées par un objet, il est possible de déduire diverses propriétés de ce même objet, telles que sa permittivité, sa taille ou encore sa position. Ces informations peuvent être utilisées pour créer une image détaillée de l'objet et de son environnement, ce qui permet à l'opérateur d'identifier et de suivre des cibles même lorsqu'elles sont cachées.

Le radar à synthèse d'ouverture (RSO) est un type de système spécifique pour l'imagerie radar à travers les murs. En prenant en considération les caractéristiques du mur (comme sa permittivité et son épaisseur) et les caractéristiques du système radar (comme les positions des antennes émettrices/réceptrices), nous pouvons déterminer la position d'une cible cachée par un mur. Les lois de Snell-Descartes, qui décrivent le comportement des ondes électromagnétiques lorsqu'elles traversent différents milieux, sont souvent utilisées pour identifier la trajectoire d'onde la plus courte [1] entre les antennes et la cible (c'est-à-dire le trajet aller-retour de l'onde). L'algorithme d'imagerie par rétro-propagation (RP) [2] peut alors être utilisé pour compenser ce retard afin de localiser la cible.

Cependant, il faut une connaissance parfaite du mur et des positions des antennes afin d'imager précisément la cible. Pour ce faire, il faut soit utiliser des techniques pour déterminer les caractéristiques du mur [3], soit utiliser d'autres algorithmes comme ceux d'*autofocusing* [4] afin de déterminer l'imagerie et les paramètres de la scène qui correspondent au mieux à la réalité. Néanmoins dans tous ces cas, la connaissance précise de la scène n'est pas toujours évidente et engendre des erreurs sur l'imagerie. Ces erreurs ont un impact non-négligeable sur la qualité de l'imagerie (décalage de la position réelle de la cible, lobes secondaires élevés, etc.).

Pour résoudre ces problèmes, l'impact d'une mauvaise évaluation des caractéristiques de la scène doit être déterminé en quantifiant la qualité d'une image radar et les incertitudes qui en résultent. Des études antérieures ont examiné les imprécisions en tenant compte uniquement des caractéristiques du mur [4]. En réalité, la position des antennes émettrices/réceptrices n'est pas toujours connue précisément, comme dans le cadre d'une scène avec un drone ou un mur avec des défauts. Cette étude vise à ajouter l'effet des erreurs associées aux caractéristiques du système radar.

Dans la deuxième partie de cet article, la physique du problème, la technique d'imagerie utilisée et le traitement des signaux reçus sont présentés. Afin de fournir un contexte pour la troisième partie, une discussion complète sur le mur et le système radar est introduite. La troisième partie montre les conséquences d'une mauvaise évaluation des caractéristiques du mur et du radar en menant une étude d'incertitude.

2 Formulation du problème

2.1 Position du problème

Dans le cadre de cette étude, un système monostatique mobile est utilisé. Le procédé d'imagerie se fait en plusieurs étapes. La première consiste à émettre un signal et à récupérer le retour pour chaque position de l'antenne. Ces réponses sont constituées de la réponse de la scène complète (c'est-à-dire avec la cible, le mur, les échos, etc.). La deuxième est d'utiliser des techniques de traitement du signal afin de différencier la réponse des objets constituant la scène et les réponses associées au mur et à ses effets. La décomposition en valeur singulière (SVD) est une technique rapide et efficace utilisée dans cet article. Enfin la dernière étape consiste à utiliser un algorithme de RP afin de focaliser les différentes réponses sur le point de localisation de la cible.

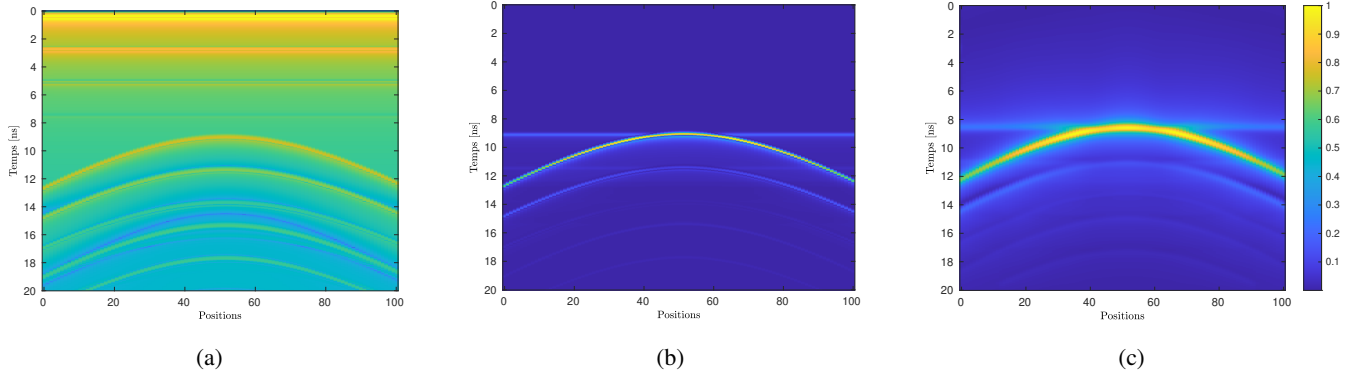


FIGURE 1 : Pour chaque position d'antenne (a) champ total, (b) champ obtenu après SVD et (c) champ obtenu après filtrage adapté.

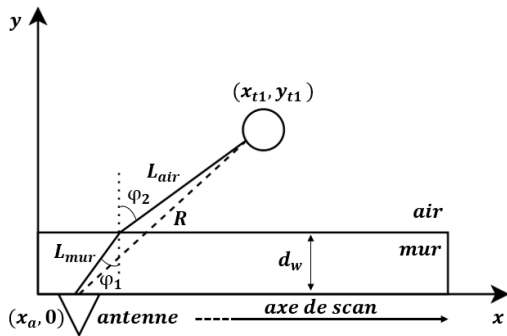


FIGURE 2 : Schéma 2D de la scène.

2.2 Traitement des signaux

Pour chaque position d'antenne, un pulse est émit et la réponse de la scène complète est récupérée (voir Fig. 1a). Cependant, la réponse de la scène contient à la fois celle de la cible et celle du mur et ses effets associés. Dans un premier temps, le but est d'obtenir exclusivement la réponse de l'objet à imager. Une technique de suppression du mur consiste à décomposer en valeurs singulières notre matrice des données et d'éliminer les premières valeurs singulières. Ce sont celles associées à la réponse du mur [5] (voir Fig. 1b). Une fois cette matrice obtenue, l'intercorrélacion entre chaque signal reçu pour chaque position d'antenne avec le pulse émit $s(t)$ permet d'effectuer la compression du signal en range (voir Fig. 1c). Une fois la compression effectuée, l'imagerie est obtenue en utilisant l'algorithme RP.

2.3 Formation d'images

Pour l'imagerie radar à travers les murs, l'algorithme RP est utilisé [2]. En premier lieu, il faut exprimer le temps de propagation de l'onde entre l'antenne émettrice, le point cible et l'antenne réceptrice. Les lois de Snell-Descartes permettent d'estimer la trajectoire exacte de l'onde et ainsi de calculer la distance parcourue par l'onde (voir Fig. 2).

Le temps de propagation entre l'antenne émettrice m et le point d'intérêt, appelé m , est obtenu en divisant la distance parcourue par la vitesse de propagation de l'onde :

$$m = \frac{1}{v} \frac{d_w}{\cos(\theta_1)} + \frac{1}{c} \frac{d_w}{\cos(\theta_1)} \cos(\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{c} (R^2 - \frac{d_w^2}{\cos(\theta_1)^2} \sin(\theta_1 - \theta_2)^2) \quad (1)$$

avec R la distance entre l'antenne et le point à imager, d_w l'épaisseur du mur, θ_1 et θ_2 les angles de refraction dû à la différence d'indice entre le mur et l'air, c la vitesse de l'onde dans le vide et v la vitesse de l'onde dans le mur.

Pour obtenir le temps aller-retour de l'onde il suffit de prendre en considération la position de l'antenne réceptrice n et d'utiliser la même formule. Le temps aller-retour de l'onde s'écrit alors m_{mn} . Dans ce cas d'étude, le système est considéré monostatique donc le temps de propagation m_{mn} est égal à deux fois le temps de propagation m .

Enfin, pour imager la scène, la Fonction Image (FI), notée $I(x_p, y_p)$, est définie. Elle correspond à l'intensité associée à chaque pixel de la scène et elle est calculée en utilisant la *Point Spread Function (PSF)* [1] :

$$I(x_p, y_p) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S_{mn}(t + \hat{m}_{mn}(x_p, y_p)) h(t)]_{t=0} \quad (2)$$

où x_p, y_p sont les coordonnées des pixels, M le nombre total d'émetteurs, N le nombre total de récepteurs, S_{mn} le point de retour de la cible pour chaque récepteur et émetteur, \hat{m}_{mn} le délai de propagation du signal entre le m^{ieme} récepteur et le point d'imagerie, puis le retour au n^{ieme} récepteur et $h(t) = s(t - t)$.

Enfin, en utilisant la transformée d'Hilbert sur la matrice résultante, les oscillations de l'autocorrélacion de S sont supprimées et ainsi l'image de la cible étudiée est obtenue Fig. 3.

2.4 Scène étudiée

La suite de cette étude est menée avec une scène composée d'un mur homogène qui mesure $2,5 m$ par $0,2 m$. Le radar est composé d'un émetteur qui émet des impulsions $g(t) = 2(t - t_0)e^{-(t - t_0)^2}$ ($t_0 = 2 \cdot 10^{-9} s$, $\sigma = \frac{1}{f}$ et t le temps) avec une fréquence centrale de $2 GHz$ et d'un récepteur localisé au même endroit. Le radar se déplace le long des $2,5 m$ du

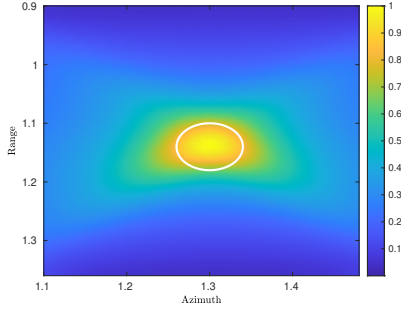


FIGURE 3 : Imagerie par rétro-propagation de la scène étudiée.

mur avec un pas de 0.025 m . La cible est un cylindre infini métallique d'un diamètre de 0.04 m , situé à $x_t = 1.2 \text{ m}$ et $y_t = 1.8 \text{ m}$. Les données sont générées à l'aide du solveur FDTD gprMax [6].

3 Analyse d'incertitude

3.1 Incertitudes liées à la Fonction Image

Les expressions du temps de propagation et de la *PSF* dans les paragraphes précédents sont absolues et ne dépendent ni des incertitudes associées aux murs ni aux positions des antennes radar.

En développant l'expression de la FI à l'aide de la même technique de linéarisation que celle utilisée dans l'article [4] (c'est-à-dire champ lointain, petites erreurs, 1^{er} ordre) et en tenant compte des paramètres de position des antennes radar (c'est-à-dire leurs positions le long de l'axe x et y), une nouvelle forme de la FI est obtenue :

$$\begin{aligned}
 I(x_q; y_q) &= I(x_q; y_q) + \sum_{l=1}^N \left(\left(\frac{2d_w}{c} \frac{x_l}{c} + \frac{y_l}{c} \right) \frac{\partial S}{\partial t} \right) \\
 &+ d \sum_{l=1}^N \left(\frac{2 \left(\frac{\rho_w}{w} - 1 \right)}{c} \frac{\partial S}{\partial t} \right) + x_{tm} \sum_{l=1}^N \left(\frac{\rho_w}{c} \frac{\partial S}{\partial t} \right) \\
 &+ x_{rn} \sum_{l=1}^N \left(\frac{\rho_w}{c} \frac{\partial S}{\partial t} \right) + y_{tm} \sum_{l=1}^N \left(\frac{w}{c} \frac{\partial S}{\partial t} \right) \\
 &+ y_{rn} \sum_{l=1}^N \left(\frac{w}{c} \frac{\partial S}{\partial t} \right)
 \end{aligned} \quad (3)$$

avec w la permittivité du mur, q l'angle d'incidence par rapport à la normale de la surface du mur, S le signal émis, x_l et y_l la position des antennes d'émission et de transmission situées à la l^{th} position le long de la paroi, $(x_{tm}; y_{tm})$ et $(x_{rn}; y_{rn})$ les positions des antennes d'émission et de réception.

La FI avec incertitudes s'écrit comme la somme de la FI sans incertitude et de différents termes d'incertitudes associés aux paramètres de la scène (la permittivité relative du mur, l'épaisseur du mur et les positions des antennes émettrices/réceptrices suivant les axes range et azimuth). Sachant que chaque perturbation dépend plus ou moins des mêmes paramètres à savoir ceux du mur et ceux du système radar, un classement peut alors

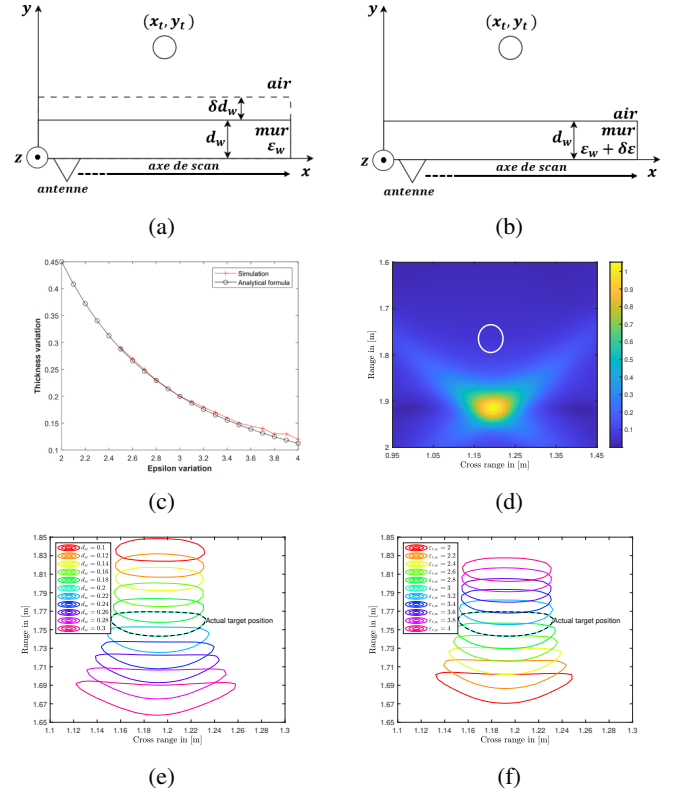


FIGURE 4 : Etude d'incertitude sur les paramètres du mur. Schéma 2D d'une incertitude sur (a) l'épaisseur du mur, (b) la permittivité du mur, (c) paires de paramètres d_w et w qui conduisent à une bonne imagerie, (d) imagerie par rétro-propagation de la scène étudiée, (e) contour des formes à -3 dB avec une erreur sur l'épaisseur du mur variant de 10 cm à 30 cm et (f) contour des formes à -3 dB avec une erreur sur la permittivité du mur variant de 2 à 4 .

voir le jour. Pour les erreurs sur les positions des antennes, les perturbations associées à l'axe range évolue en w^2/q tandis que ceux de l'axe azimuth évolue en $\rho_w/w q$. Ce qui laisse penser qu'une erreur suivant la range aura un plus grand impact qu'une erreur suivant l'azimuth. Pour vérifier cela, une étude d'incertitude est présentée.

3.2 Caractéristiques du mur

Les impacts du mur et du radar sont étudiés séparément. Dans chaque étude d'incertitude, pour différentes erreurs, un schéma de la scène avec les paramètres est d'abord présenté puis les résultats de l'imagerie et enfin les formes à -3 dB . La forme de l'imagerie à -3 dB définit une zone qui contient la majeure partie de l'énergie renvoyée par la cible. Cela signifie que c'est l'endroit où la cible est le plus probablement située.

Dans le cas du mur, l'épaisseur et la permittivité relative (c'est-à-dire son indice) du mur sont modifiées. Comme le montre la Fig. 4d, les changements d'épaisseur et de permittivité entraînent un déplacement de la position de la cible et un étalement de la forme à -3 dB .

Toutefois, lors de la propagation de l'onde dans le mur, l'épaisseur et la permittivité sont liées par la relation $d_w = \frac{ct}{\rho_w}$, où t est le temps de propagation à l'intérieur du milieu dans le cadre d'une incidence normale. Il existe certaines combinaisons de paramètres où les erreurs dans les paramètres

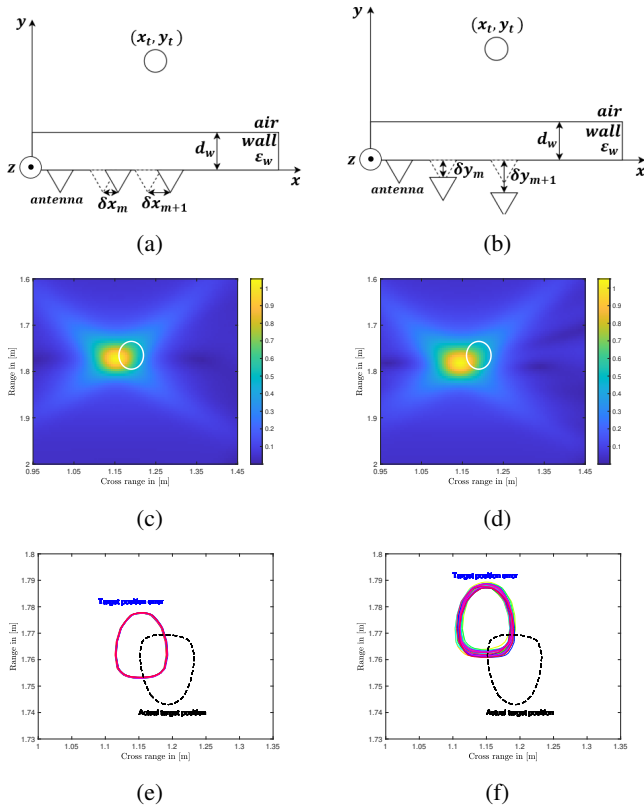


FIGURE 5 : Etude d'incertitude sur les positions du radar. Schéma 2D d'une incertitude sur la position suivant (a) l'axe x , (b) l'axe y , (c) imagerie par rétro-propagation de la scène étudiée avec des erreurs sur x , (d) imagerie par rétro-propagation de la scène étudiée avec des erreurs sur y , (e) contour des formes à -3 dB avec des erreurs sur x et (f) contour des formes à -3 dB avec des erreurs sur y .

du mur s'annulent, ce qui permet de former des images précises (voir Fig. 4c). C'est en faisant varier successivement l'épaisseur du mur et la permittivité relative du mur que l'on constate un déplacement unidirectionnel de la position de la cible suivant l'axe range et une dégradation de la résolution (voir Fig. 4e et Fig. 4f).

3.3 Caractéristiques du système radar

Dans le cas du radar, les erreurs de position de l'antenne sur les axes range et azimuth se traduisent par un décalage de la position de la cible (voir Fig. 5d). Pour les simulations, un tirage aléatoire est effectué suivant une loi uniforme pour chaque position d'antenne pour l'axe range et l'axe azimuth séparément.

Les erreurs dans la position des antennes radar entraînent inévitablement un déplacement de la position de la cible, non seulement en range comme dans le cas des paramètres du mur, mais aussi en azimuth. Ce n'est pas le cas lorsque seuls les paramètres du mur sont erronés. De plus, l'erreur en range évolue en fonction de d_w alors que l'erreur en azimuth évolue en fonction de d_w^{-1} , ce qui implique qu'elle a un impact plus important. Comme le montre les figures Fig. 5e et Fig. 5f, la répartition des positions des formes à -3 dB résultant d'une erreur sur la range est plus étendue que celle résultant d'une erreur sur l'azimuth.

4 Conclusion

Dans le contexte de l'imagerie radar à travers les murs, le RSO répond à la problématique de la résolution. Cependant, pour chaque position d'antenne la réponse de la scène complète est récupérée. Les signaux associés aux murs et ceux associés à la réponse des cibles sont traités et séparés. Il est probable que des informations concernant les cibles soient récupérables dans les signaux associés aux murs, mais dans cette étude, seules les réponses directes des cibles sont étudiées.

Des erreurs dans les paramètres du mur et du système radar peuvent entraîner des déplacements de la position réelle de la cible et des distorsions dans l'imagerie. Les erreurs associées aux paramètres du mur ont été étudiées. Cependant, cet article montre qu'une erreur sur les positions des antennes affecte l'imagerie non seulement en décalant la position réelle de la cible par rapport à l'axe range mais également en azimuth. De plus, ces erreurs ont un impact sur la forme de l'image de la cible.

Une quantification des impacts des différentes erreurs faites a permis de constater qu'une erreur sur l'épaisseur du mur a un impact plus important qu'une erreur sur sa permittivité, et qu'une erreur sur la distance du système radar par rapport au mur a un impact plus important qu'une erreur sur sa position le long du mur.

Pour prolonger l'étude, une analyse de sensibilité avec les indices de Sobol peut être faite. La formulation analytique de la FI avec ses incertitudes permet d'identifier les différentes perturbations et ainsi classifier plus précisément les erreurs en fonction de leurs impacts sur l'imagerie.

Références

- [1] M. G. Amin. *Through-the-Wall Radar Imaging*. CRC Press, 2017.
- [2] M. Soumekh. *Synthetic Aperture Radar Signal Processing*. New-York : Wiley, 1999.
- [3] T. Jina, B. Chen, and Z. Zhou. Image-domain estimation of wall parameters for autofocus of through-the-wall sar imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012.
- [4] F. Ahmad, M. G. Amin, and G. Mandapati. Autofocusing of through-the-wall radar imagery under unknown wall characteristics. *IEEE Transactions on Imaging Processing*, 2007.
- [5] F. H. C. Tivive, A. Bouzerdoum, and A. G. Moeness. An svd-based approach for mitigating wall reflections in through-the-wall radar imaging. *IEEE RadarConf (RADAR)*, 2011.
- [6] C. Warren A. Giannopoulos and I. Giannakis. gprmax : Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar. *Computer Physics Communications*, 2016.