

# Radar around-the-corner : Détection et localisation d'une cible en non ligne de vue

Khac-Phuc-Hung THAI<sup>1</sup>, Olivier RABASTE<sup>1</sup>, Jonathan BOSSE<sup>1</sup>, Dominique POUILLIN<sup>1</sup>, Israel HINOSTROZA<sup>2</sup>, Thierry LETERTRE<sup>2</sup>, Thierry CHONAVEL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ONERA, Chemin de la Hunière, 91123 Palaiseau, France

<sup>2</sup>SONDRA, CentraleSupélec, 3 Rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

<sup>3</sup>Télécom Bretagne, 655 Avenue du Technopôle, 29200 Plouzané, France

kphung.thai@onera.fr

**Résumé** – Cet article examine le problème de la détection et de la localisation d'une cible NLOS dans un milieu urbain en exploitant les multitrajets. Nous proposons un algorithme de détection-localisation basé sur un filtre adapté sous-espace qui fonctionne directement dans l'espace d'état de la cible. Une expérimentation a été réalisée pour montrer qu'un petit radar portable peut fournir des images des multitrajets. Ces dernières peuvent être clairement interprétées grâce à un modèle simple de tracé de rayon. L'application de l'algorithme de détection-localisation sur ces mesures expérimentales montre que la cible peut être détectée et localisée. De fortes ambiguïtés inhérentes au problème de détection-localisation multitrajets sont toutefois visibles et devront être traitées dans les travaux futurs.

**Abstract** – This paper examines the problem of detecting and locating an NLOS target in an urban environment by exploiting multipath radar returns. We propose a detection-localization algorithm based on a matched subspace filter approach that works in the target state space directly. A real experimentation was carried out to show that a portable radar can provide images of multipath returns in NLOS cases that can be clearly interpreted thanks to a simple ray tracing model. The application of the detection-localization algorithm on experimental radar measurements shows that the target can be detected and located but that the mitigation of strong ambiguities inherent to the multipath detection-localization problem remains a challenging problem for the application at hand.

## 1 Introduction

Dans les applications radar classiques, les cibles sont en ligne de vue directe (LOS) du radar. Au contraire, dans les applications émergentes de radar en milieu urbain, la présence des bâtiments dans la scène génère d'une part des zones d'ombre à l'intérieur desquelles une cible n'est pas en visibilité directe, et d'autre part de nombreux multitrajets produits par les possibles réflexions et diffractions sur les surfaces environnantes. Or ces multitrajets peuvent être exploités à l'avantage du radar afin de détecter et localiser des cibles situées dans les zones d'ombre. Il devient alors possible de regarder derrière les coins de murs au moyen d'un simple radar portable : on parle de radar « around-the-corner » (RAC) [1].

Récemment, certains articles liés au sujet ont étudié les aspects théoriques et expérimentaux du problème RAC. Des travaux théoriques dans le but d'exploiter l'information sur les trajets multiples sont présentés dans [2] en utilisant les radars aéroportés et dans [3] en utilisant la technologie SAR. Des travaux expérimentaux ont également été menés pour tester la faisabilité de la détection et de la localisation en l'absence de LOS (NLOS) avec des mesures réelles [1][4].

Quelques études très récentes traitent le problème à la fois expérimental et théorique. Dans [5], les auteurs ont proposé un algorithme de pistage multitrajets prenant en compte seulement un trajet de réflexion, un trajet de diffraction et leurs combinaisons. Dans [6], les auteurs ont effectué plusieurs mesures dans des scénarios NLOS avec des multitrajets, mais se sont concentrés uniquement sur la signature micro-Doppler. Dans [7], la détection des mouvements dans une scène réaliste a été étudiée.

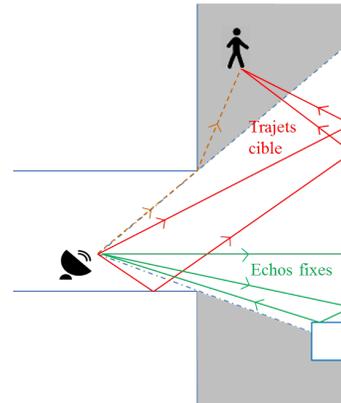


FIGURE 1 – Radar urbain exploite les réflexions pour détecter des cibles en NLOS

Dans cette étude, les auteurs ont appliqué un seuil adaptatif à la réponse impulsionnelle mesurée afin de trouver des points excédant le seuil, qui ont été considérés comme une détection. La méthode est relativement simple et facile à mettre en œuvre, mais les informations des différents trajets ont été traitées séparément.

Dans cet article, nous considérons le problème de la détection-localisation d'une cible en NLOS avec un radar portable situé dans une rue adjacente, comme illustré dans Figure 1. Le problème du RAC ne semble pas avoir été traité avec une approche de filtrage adapté multitrajets dédiée dans la littérature. Pour combler cette lacune, nous proposons donc un filtre adapté basé sur la propagation multitrajets dérivée d'un modèle simple. Ainsi, l'algorithme de détection-localisation développé gère simulta-

nément les informations fournies par les différents trajets multiples pour détecter et estimer la position de la cible en NLOS.

## 2 Formulation du problème

### 2.1 Modèle du signal

Dans cet article, nous supposons que toutes les réflexions sont spéculaires pour la bande de fréquence considérée (ici 24 GHz), que la diffraction peut être négligée, qu'une connaissance approximative de la géométrie de la scène est disponible, et que la position GPS du radar est connue. Le problème de la détection-localisation d'une seule cible dans l'espace 2D est considéré. Le signal  $y(t)$  reçu par le radar est donc :

$$y(t) = \sum_{k=1}^{M(x,y)} \alpha_k s(t - \tau_k(x,y)) e^{j2\pi v_k t} + n(t), \quad (1)$$

où  $s(t)$  est le signal transmis par le radar,  $M(x,y)$  est le nombre de trajets multiples pour une cible située à  $(x,y)$ ,  $\tau_k(x,y)$  et  $\alpha_k$  sont respectivement le retard et l'amplitude du trajet  $k$  et  $v_k$  est la vitesse Doppler de la cible pour le trajet  $k$ . Prenant  $N$  échantillons, nous définissons :

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(t - \tau_i) &= [s(t_1 - \tau_i) \quad s(t_2 - \tau_i) \quad \dots \quad s(t_N - \tau_i)]^T, \\ \mathbf{n} &= [n(t_1) \quad n(t_2) \quad \dots \quad n(t_N)]^T, \\ \mathbf{y} &= [y(t_1) \quad y(t_2) \quad \dots \quad y(t_N)]^T, \\ \boldsymbol{\alpha} &= [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_{M(x,y)}]^T, \end{aligned}$$

$$\mathbf{S}(x,y) = [\mathbf{s}(t - \tau_1(x,y)) \quad \mathbf{s}(t - \tau_2(x,y)) \dots \mathbf{s}(t - \tau_{M(x,y)}(x,y))].$$

Dans un souci de simplicité et pour des contraintes liées au matériel employé dans la partie expérimentation, dans le présent article, nous ne prendrons pas en compte le décalage Doppler des différents trajets, bien que de telles informations puissent être intéressantes pour améliorer la localisation de l'algorithme proposé. Ainsi, l'équation (1) peut être écrite comme :

$$\mathbf{y} = \mathbf{S}(x,y)\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

où le bruit  $\mathbf{n}$  est supposé blanc gaussien complexe avec matrice de covariance  $\sigma^2 \mathbf{I}$ .

Nous supposons également ici que des échos fixes produits par les bâtiments et objets environnants ont déjà été rejetés, par exemple en appliquant une réjection du Doppler nul, de sorte que les échos reçus sont ceux réfléchis par des cibles mobiles.

### 2.2 Algorithme de détection-localisation

Une idée naturelle en détection/localisation par radar consiste à appliquer une stratégie de filtre adapté, qui correspond à un détecteur GLRT monotrajet. Toutefois ce type de stratégie, qui ne prend pas en compte la présence de multitrajets, mais uniquement l'information d'un seul trajet, est insuffisante pour localiser la cible dans le milieu urbain, en raison d'ambiguïtés spatiales fortes. La prise en compte des multitrajets devrait permettre d'extraire plus d'informations de retards et de réduire ainsi les ambiguïtés de localisation et d'améliorer les performances de détection.

En considérant directement l'état de la cible à la position  $(x,y)$ , le test d'hypothèses est le suivant :

$$\begin{cases} H_0 : \mathbf{y} = \mathbf{n}, & \text{bruit seul} \\ H_1 : \mathbf{y} = \mathbf{S}(x,y)\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n}, & \text{cible + bruit} \end{cases}$$

En considérant que les amplitudes  $\alpha_k$  sont inconnues et déterministes, l'estimation au sens du maximum de vraisemblance (ML) du vecteur  $\boldsymbol{\alpha}$  est calculée par :

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = (\mathbf{S}^H(x,y)\mathbf{S}(x,y))^{-1}\mathbf{S}^H(x,y)\mathbf{y}.$$

L'injection de cette expression dans le rapport de vraisemblance correspondant au test d'hypothèses ci-dessus fournit alors le test GLRT suivant :

$$T(x,y) = \|\mathbf{P}(x,y)\mathbf{y}\|_{H_0}^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \lambda, \quad (3)$$

$$\text{où } \mathbf{P}(x,y) = \mathbf{S}(x,y)(\mathbf{S}^H(x,y)\mathbf{S}(x,y))^{-1}\mathbf{S}^H(x,y).$$

Pour une position fixe  $(x,y)$ , cette solution GLRT est connue sous le nom de détecteur adapté sous-espace [8]. Le seuil  $\lambda$  est calculé en fonction de  $M(x,y)$ ,  $\sigma^2$ , et la probabilité de fausse alarme  $P_{FA}$  :

$$\lambda = 2\sigma^2\gamma^{-1}(M(x,y), \Gamma(M(x,y))(1 - P_{FA})), \quad (4)$$

Comme la statistique de détection  $T(x,y)$  dépend de la position de la cible, il est nécessaire de la calculer sur une grille de points échantillonnant la zone considérée, ce qui fournit naturellement une estimation de la localisation de la cible. La position avec le plus fort niveau  $T$  est la plus susceptible de correspondre à la position de la cible.

## 3 Expérimentation

### 3.1 Description du radar

Pour les expérimentations, nous avons utilisé un petit radar commercial émettant à 24GHz. Le signal transmis consistait en un train cohérent d'impulsions LFM. La bande passante était de 800MHz, ce qui correspond à une résolution de distance 0,1875m. Une largeur de bande assez importante a été nécessaire pour pouvoir résoudre les multitrajets proches. La durée de chaque impulsion était de 8ms, et la période de répétition d'impulsion (PRI) était de 60ms. Cette très longue PRI, en raison de la configuration matérielle spécifique du radar (non dédiée à notre application particulière), fournit une très petite ambiguïté Doppler (0,1m/s). Le radar a été placé à 1,2m du sol, l'ouverture du radar était de 60°.

### 3.2 Description du scénario

Une jonction représentative d'une intersection urbaine a été sélectionnée pour la campagne de mesure réelle (Figure 2). Le radar est placé aux coordonnées (6, 8; 0), et une cible piétonne marche de D(15, 5; 12, 75) à C(15, 5; 24, 75). Un exemple de la propagation multitrajets simulée pour cette configuration est illustré en Figure 3. Au début de sa trajectoire, la cible piétonne est en NLOS. De la position  $y_c = 19, 1$  jusqu'à C, la cible est en LOS, mais des multitrajets sont toujours présents.

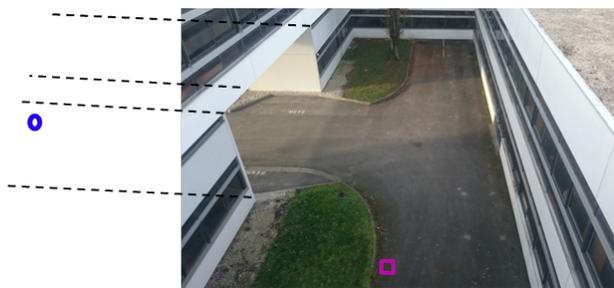


FIGURE 2 – Photo du scénario : le radar a été placé à l'extrémité du tunnel (cercle bleu). La cible piétonne marchait dans la section droite de la jonction (rectangle rose).

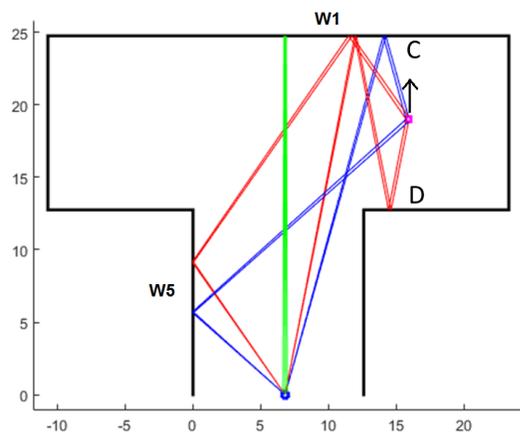


FIGURE 3 – Schéma représentatif du scénario : les segments verts correspondent à des échos fixes, les segments bleus et rouges représentent respectivement des trajectoires radar-cible avec des réflexions à un et deux rebonds.

## 4 Résultats

### 4.1 Résultats des mesures

Dans le scénario décrit ci-dessus, le piéton a marché de D à C pendant 15s. À cause de l'ambiguïté Doppler très petite, tous les échos Doppler non nuls sont donc répartis sur tout le domaine Doppler. Le traitement Doppler a consisté ici à appliquer une réjection au Doppler nul pour éliminer les échos fixes de fortes énergies, puis à intégrer de façon incohérente l'énergie de toutes les cases Doppler non nuls pour chaque case distance. Les profils distance obtenus en sorte de ce traitement sont présentés dans Figure 4.

Afin d'interpréter la mesure, une simulation a été réalisée avec un modèle géométrique approximatif de la scène réelle (en particulier les portes, fenêtres et autres éléments présents dans la scène n'ont pas été modélisés) et un simple simulateur de tracé de rayons (voir Figure 5).

En comparant le résultat de la simulation en Figure 5 et de la mesure en Figure 4, nous observons un très bon accord entre les échos générés par la simulation et les échos observés sur la mesure réelle. Dans la phase NLOS (les 8, 2 premières secondes), les trois premiers échos les plus forts indiqués par 1, 2 et 3 sont bien simulés par le tracé de rayons. La différence d'éner-

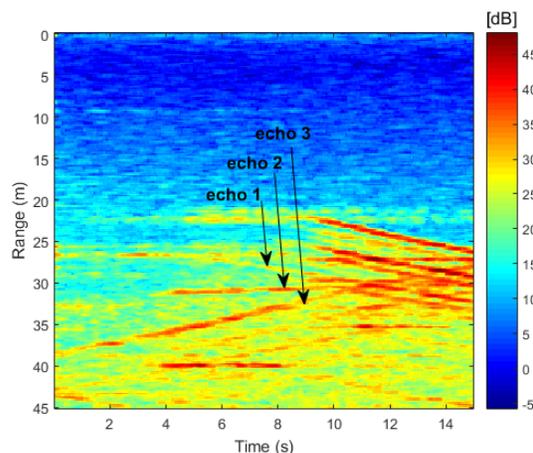


FIGURE 4 – Profils distance après filtrage zéro-Doppler

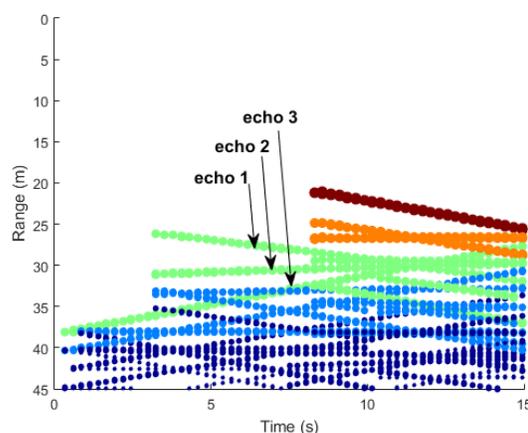


FIGURE 5 – Profils distance simulés. Écho rouge, orange, vert, bleu ciel et bleu marine : trajets avec zéro, une, deux, trois et quatre réflexions sur les murs respectivement.

gie observée en Figure 4 peut s'expliquer par les coefficients de réflexion des différents murs, la perte due aux différents angles d'arrivée et la perte en dehors du lobe principal du radar.

Dans la phase LOS (après 8, 2s), le trajet direct est clairement observé, ce qui est cohérent avec l'écho rouge de la simulation. Cependant, certains échos peuvent être observés en Figure 4, qui ne sont pas expliqués par le résultat de la Figure 5. Ces échos sont moins énergétiques et parallèles au premier écho dans la phase LOS. L'explication la plus probable est la simplicité de la géométrie approximative utilisée dans la simulation. En réalité, il y avait aussi un poteau fixe présent dans la scène qui n'était pas modélisé dans la géométrie. Lorsque la cible était en LOS, la combinaison entre le trajet direct et un trajet réfléchi par le poteau apparaît dans les profils distance.

### 4.2 Résultats de la détection-localisation

L'algorithme décrit dans la section 2 a été appliqué aux données expérimentales. Nous présentons en Figure 6 le résultat de l'algorithme de détection-localisation lorsque la cible piétonne était située aux coordonnées (15, 5; 16, 2). L'algorithme a été

appliqué dans une zone spécifique discrétisée avec un certain nombre de cases. Pour chaque coordonnée  $(x, y)$  de la grille, la matrice  $\mathbf{S}(x, y)$  avec  $M(x, y)$  colonnes est formée en stockant dans la colonne  $k$  le signal correspondant au retard  $\tau_k$ . Comme la géométrie approximative de la scène est connue, les retards des trajets  $\tau_k$  ( $k = 1, \dots, M(x, y)$ ) pour une cible située dans la case  $(x, y)$  sont obtenus par un simple tracé de rayons. Ici nous ne considérons que les trajets au plus 3 réflexions. Le niveau  $T(x, y)$  est ensuite calculé et présenté en Figure 6. Il semble que le maximum de la sortie du test corresponde bien à la position réelle de la cible. Cela signifie que le test proposé peut en effet fournir certaines informations sur la position de la cible en exploitant les multitrajets. Néanmoins, la présence de la cible dans la scène a également créé des ambiguïtés spatiales. Ceci est dû au fait que selon la géométrie de la scène, il peut y avoir plusieurs cases dont la réponse de retard des multitrajets est similaire à celle de la position réelle de la cible. Ces ambiguïtés spatiales peuvent être problématiques pour le test de détection lui-même.

Le test de détection-localisation proposé a été appliqué à une autre position de la cible (Figure 7). Nous pouvons observer ici des ambiguïtés aussi fortes. Cependant, en regardant la figure d'ambiguïté, il apparaît qu'elle consiste principalement en trois arcs circulaires qui se croisent à la position réelle de la cible.

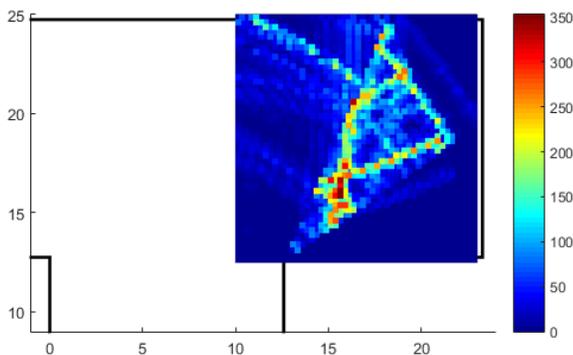


FIGURE 6 – Résultat de localisation : sortie du test proposé pour toutes les cases lorsque la cible est située à la position  $(15,5 ; 16,2)$ . L'échelle de couleurs représente le niveau  $T(x, y)$ .

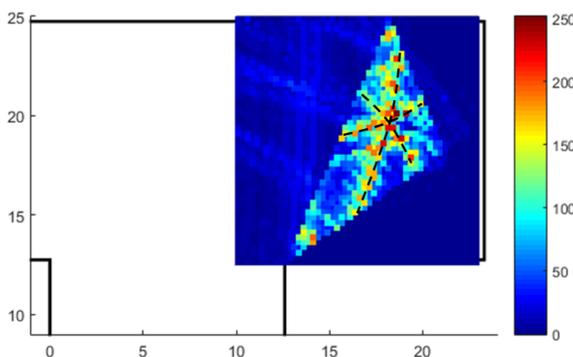


FIGURE 7 – Résultat de localisation lorsque la cible est située à la position  $(18 ; 19,5)$ .

## 5 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une solution originale au problème de détection et de localisation d'une cible NLOS en milieu urbain. La solution proposée considère directement la position de la cible dans son espace d'état et exploite une connaissance approximative de la géométrie de la scène et de la propagation multitrajets par un simple tracé de rayons. La solution proposée a été appliquée aux mesures réelles effectuées dans une configuration urbaine existante. Les résultats obtenus permettent de valider notre modèle de propagation multitrajets en milieu urbain et notamment de montrer qu'il est possible de retrouver la position de la cible même avec une connaissance approximative de la géométrie de la scène (portes, fenêtres et autres éléments ne sont pas modélisés) à partir de la seule information portée par les retards des multitrajets. Cependant, il apparaît que le problème de détection-localisation conduit intrinsèquement à de fortes ambiguïtés spatiales. Ces ambiguïtés sont observées avec la solution proposée mais seraient certainement présentes d'une manière ou d'une autre avec d'autres solutions. Ainsi, ils représentent un défi qui reste à résoudre dans le problème de détection et de localisation. Une première solution possible peut être l'utilisation d'informations de propagation supplémentaires telles qu'une meilleure connaissance de la perte de réflexion (si possible) ou du nombre de réflexions pris en compte pour chaque trajet. Une autre possibilité serait d'exploiter le mouvement de la cible au fil du temps avec un algorithme de pistage pour lever les ambiguïtés spatiales.

## Références

- [1] A. Sume et al. Radar Detection of Moving Targets Behing Corners. *IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing*, 49 :2259–2267, 2011.
- [2] R. Linnehan et al. Multistatic scattering from moving targets in multipath environments. In *Proceedings of the IEEE International Radar Conference*, pages 1–6, 2009.
- [3] P. Setlur et al. Multipath exploitation in non-LOS urban synthetic aperture radar. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 8(1) :137–152, 2014.
- [4] O. Rabaste et al. Around-the-Corner Radar : Detection of a Human Being in Non Line of Sight. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 9(6) :660–668, 2015.
- [5] R. Zetik et al. Looking behind a corner using multipath-exploiting UWB radar. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 51(3) :1916–1926, 2015.
- [6] M. Gustafsson et al. Extraction of Human Micro-Doppler Signature in an Urban Environment Using a "Sensing-Behind-the-Corner" Radar. *IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing*, 13 :187–191, 2016.
- [7] T. Johansson et al. Radar measurements of moving objects around corners in a realistic scene. In *Proceedings of SPIE, Radar Sensor Technology*, volume 9077, 2014.
- [8] L. Scharf et al. Matched Subspace Detectors. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(8) :2146–2157, 1994.