

Exploitation des multitrajets pour la localisation de sources d'émission

Romain GIACOMETTI^{1,2}, Alexandre BAUSSARD², Daniel JAHAN¹, Ali KHENCHAF², Cédric CORNU¹, Jean-Michel QUELLEC¹

¹Thales Systèmes Aéroportés, 10 avenue de la 1ère DFL - CS 93801, 29238 Brest Cedex 3, France

²ENSTA Bretagne / Lab-STICC (UMR CNRS 6285), 2 rue François Verny, 29806 Brest Cedex 9, France

romain.giacometti@fr.thalesgroup.com

Résumé – Cet article propose une nouvelle méthode de localisation de sources d'émission utilisant les multitrajets. Elle emploie un unique récepteur exploitant les signaux des chemins directs et indirects, et mesurant les angles d'arrivée (AOA pour *Angle Of Arrival*) et les différences de temps d'arrivée (TDOA pour *Time Difference Of Arrival*). Cette méthode n'exploite aucune connaissance *a priori* sur le nombre et la nature des émetteurs présents, ou sur l'environnement (et donc sur la position des points de réflexion). Un problème d'affectation est aussi résolu, il consiste en l'association de paires de mesures d'AOA et de TDOA à un réflecteur donné. Des simulations numériques sont proposées pour valider l'approche proposée et évaluer ses performances.

Abstract – In this paper a new location method of emitting sources using multipaths is proposed. It is based on single receiver working on the signals coming from the direct and indirect paths. The angle of arrival (AOA) and the time difference of arrival (TDOA) are used in the location method. No *a priori* information about the number and the kind of emitting sources, or about the environment (the location of the scatterers) is used. Then an assignment algorithms must be used to associated the correct couple of AOA and TOA to a given scatterer. Numerical results are proposed to validate the method and to evaluate its performances.

1 Introduction

La localisation de sources d'émission acoustique ou électromagnétique est un problème posé dans de nombreuses applications civiles ou militaires. Elle est basée sur des systèmes comprenant un ou plusieurs récepteurs. Le principe de triangulation avec un réseau de récepteurs est la méthode la plus connue. Elle utilise les mesures d'angle d'arrivée (AOA) issues d'une même source. Cette dernière est localisée par le point de concours des différentes directions [1]. Une autre méthode exploite les différences des temps d'arrivée (TDOA) entre deux stations percevant la même émission [2]. Chacune de ces mesures, calculée à partir d'une paire de récepteurs, permet de localiser l'émetteur sur un hyperboloïde. Avec au minimum trois récepteurs, l'intersection de ces lieux géométriques indique la position de la cible.

Ces différents principes de localisation passifs ont l'inconvénient d'exiger des liens de communication entre récepteurs. A l'inverse, d'autres méthodes consistent à n'employer qu'un seul récepteur exploitant les chemins directs et indirects issus des réflexions sur des objets présents. La plupart de ces méthodes de localisation proposées dans la littérature s'inscrivent dans un contexte urbain et exploitent les mesures de temps d'arrivée de chaque trajet [3]. Il existe également d'autres méthodes exploitant, par exemple, les différences de fréquence Doppler pour des émetteurs mobiles [4]. Dans [5], il est démontré avec des émetteurs à balayage circulaire que le triangle émetteur-récepteur-réflexeur peut être parfaitement résolu en utilisant les mesures d'AOA, de TDOA et de DTPLA (Différence de Temps de Pas-

sage de Lobe d'Antenne).

Dans cet article, la solution de localisation, que nous proposons, utilise les mesures d'AOA et de TDOA dans un contexte maritime où les acteurs sont généralement considérés faiblement mobiles. Les sources d'émission sont des radars dont on ne connaît aucun paramètre *a priori*. De plus, contrairement à certaines approches, nous ne connaissons pas non plus la position des éventuels réflecteurs. L'absence d'information *a priori* sur l'environnement et les sources observées fait de la localisation un problème complexe à résoudre.

D'autre part, un problème d'affectation doit aussi être résolu avant de procéder à la localisation des émetteurs et des réflecteurs. Il consiste à affecter chaque paire de mesures TDOA/AOA à un réflecteur donné, en supposant que l'affectation de cette paire à un émetteur a été effectuée par ailleurs. Des algorithmes d'affectation ont déjà été proposés pour différentes applications. Dans [6], une méthode pour un système comprenant plusieurs récepteurs goniométriques est proposée. Dans [7], elle est adaptée pour le cas d'un radar passif exploitant des mesures de TDOA. Néanmoins, ces différents procédés ne peuvent être appliqués directement à notre cas. Nous proposons donc ici un nouvel algorithme d'affectation.

La suite de cet article est organisée en plusieurs parties. Tout d'abord, dans la section 2, nous présentons le problème considéré. Puis dans la section 3, nous décrivons le principe de localisation que nous avons développé. La partie 4 est consacrée au problème d'affectation. Les résultats numériques sont présentés dans la section 5. Enfin, dans la section 6, un bilan de ce travail est proposé.

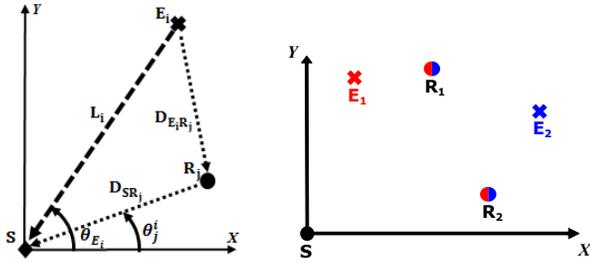


FIGURE 1 – (A : à gauche) Grandeurs géométriques considérées. (B : à droite) Configuration élémentaire.

2 Formulation du problème

Nous nous plaçons ici dans le cas d'un récepteur de signaux radar réalisant des mesures de TDOA/AOA des trajets directs et indirects dans un contexte maritime. Nous souhaitons localiser les émetteurs et éventuellement les réflecteurs (la méthode à mettre en œuvre étant la même) à partir de ces mesures. Nous nous limitons ici à la résolution d'un problème à deux dimensions (2D) mais cette étude pourrait être généralisée aux cas tridimensionnels.

La figure 1.A illustre les trajets direct (en trait discontinu) et indirect (traits en pointillé) pour un émetteur E_i , un réflecteur R_j et un récepteur S donnés. On notera D_{SE_i} la distance émetteur-récepteur. $D_{E_iR_j}$ représente la distance entre l'émetteur et le réflecteur et D_{SR_j} la distance réflecteur-récepteur.

Supposons qu'il existe un nombre N_E de sources E_i ($i = 1, \dots, N_E$) et un nombre N_R de réflecteurs R_j ($j = 1, \dots, N_R$). Considérons un repère cartésien centré sur le récepteur S . Soit le vecteur \mathbf{s} d'état regroupant les coordonnées des émetteurs et des réflecteurs :

$$\mathbf{s} = [x_{E_1}, y_{E_1}, \dots, x_{E_{N_E}}, y_{E_{N_E}}, x_{R_1}, y_{R_1}, \dots, x_{R_{N_R}}, y_{R_{N_R}}]^T. \quad (1)$$

Chaque signal émis par l'émetteur E_i et réfléchi par le réflecteur R_j est détecté par le récepteur avec la probabilité de détection $P_{d_{R_j/E_i}}$.

Nous supposons que le récepteur a la capacité de différencier les signaux associés aux trajets directs des signaux associés aux chemins indirects et de classer ces derniers suivant l'émetteur d'origine. Ainsi, le récepteur fournit pour chaque réflexion une mesure de TDOA et d'AOA selon les probabilités de détection $P_{d_{R_j/E_i}}$. Les AOA des émetteurs sont également mesurés.

L'ensemble des mesures est rassemblé dans un même vecteur \mathbf{z} :

$$\mathbf{z} = [\mathbf{z}_E, \mathbf{z}_{R_1}, \dots, \mathbf{z}_{R_{N_R}}]^T, \quad (2)$$

où $\mathbf{z}_E = [\theta_{E_1}, \dots, \theta_{E_{N_E}}]^T$ avec θ_{E_i} la mesure d'AOA associée à l'émetteur E_i . $\mathbf{z}_{R_j} = [\tau_{R_j}^1, \theta_{R_j}^1, \dots, \tau_{R_j}^{N_E}, \theta_{R_j}^{N_E}]^T$ avec $\theta_{R_j}^i$ la mesure d'AOA associée au réflecteur R_j illuminé par E_i . $\tau_{R_j}^i$ est le TDOA associé à l'émetteur E_i et au réflecteur R_j .

À partir de ces mesures, qui sont entachées d'erreur, l'objectif est de localiser les émetteurs et les réflecteurs, c'est-à-dire estimer le vecteur d'état \mathbf{s} . Cependant, en pratique, un problème d'affectation de données doit être résolu avant l'étape de locali-

sation dans certaines configurations. En effet, le récepteur fournit N_E mesures d'AOA des émetteurs et N_E listes de mesures, notées \mathcal{L}_i , $i = 1, \dots, N_E$. Chaque liste est constituée de n_i paires de mesures $(\tau_{m_i}^i, \theta_{m_i}^i)$ avec $m_i = [1, \dots, n_i]$ selon les probabilités de détection associées à chaque réflecteur illuminé par un émetteur donné. Le problème d'affectation (voir section 4) consiste alors, quand cela est nécessaire, à associer ces paires de mesures aux réflecteurs appropriés.

3 Localisation de sources

Dans cette section, le problème de localisation des sources d'émission ainsi que les solutions apportées sont décrits. Nous supposons que le problème d'affectation, traité dans la suite, a été résolu avec succès.

3.1 Principe

On peut démontrer que le scénario élémentaire permettant de localiser des émetteurs grâce à des mesures d'AOA et de TDOA doit comporter au minimum deux émetteurs et deux réflecteurs [8]. La figure 1.B illustre un exemple de situation élémentaire ($N_E = 2$ et $N_R = 2$). La position du récepteur (S) est indiquée par un disque noir. Les croix colorées (rouges ou bleues) représentent les positions des émetteurs E_i . Quant aux réflecteurs R_j , leur positions sont précisées par des disques colorés. Un disque indique que la réflexion de l'émetteur ayant la même couleur a été détectée par le récepteur S . Un disque peut comporter plusieurs couleurs : plusieurs réflexions provenant d'émetteurs différents ont alors été détectées.

Le problème de localisation 2D se réduit à l'estimation des distances entre le récepteur et les émetteurs D_{SE_i} et entre le récepteur et les réflecteurs D_{SR_j} sachant que les angles des entités sont issus des mesures d'AOA. À partir de la description géométrique du problème, une solution analytique des positions des émetteurs peut être obtenue en résolvant un système de deux équations à deux inconnues :

$$\begin{cases} a_{11} + a_{12}D_{SE_1} + a_{13}D_{SE_2} + a_{14}D_{SE_1}D_{SE_2} = 0 \\ a_{21} + a_{22}D_{SE_1} + a_{23}D_{SE_2} + a_{24}D_{SE_1}D_{SE_2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Les inconnues sont les distances D_{SE_1} et D_{SE_2} entre le récepteur et les deux sources d'émission. Les expressions des coefficients a_{ij} (non détaillées ici) dépendent des mesures d'AOA et de TDOA.

Il faut noter pour la suite que chaque équation du système (3) peut être représentée par une courbe \mathcal{C} dans un repère défini par les variables (D_{SE_1}, D_{SE_2}) . Le point d'intersection I des courbes \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 définit la solution de ce système. Soit α l'angle d'intersection des tangentes de ces courbes au point I . Nous exploiterons cet angle dans la suite.

Notons enfin que dans le cas général avec $N_E \geq 2$ et $N_R \geq 2$, la première étape de la méthode consiste à choisir un couple d'émetteurs et leurs réflexions associées. La raison de cette étape est fondée sur la plus forte probabilité qu'un réflecteur donné rediffuse les signaux de deux émetteurs que de trois ou plus. Par

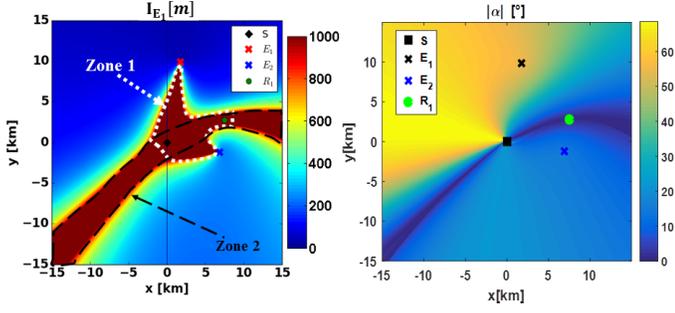


FIGURE 2 – (A : à gauche) Carte issue de l'indicateur de performance I_{E_i} . (B : à droite) Angle d'intersection.

la suite, un émetteur localisé peut être utilisé pour localiser un autre émetteur inconnu. Le critère permettant de sélectionner les deux émetteurs parmi N_E n'est pas étudié en détail dans cet article. Cependant, le couple d'émetteurs ayant le plus grand nombre de réflecteurs pourrait être choisi. Par la suite, le cas $N_E = 2$ et $N_R \geq 2$ sera étudié car c'est dans ce cas que peut apparaître le problème d'affectation.

3.2 Caractérisation des zones aveugles

Dans un précédent travail [8], nous étudions les performances de la méthode de localisation expliquée dans la section 3.1. Nous utilisons alors un unique indicateur de performance noté I_{E_i} , relatif à l'émetteur E_i , et exprimé en mètres. I_{E_i} est la racine carrée de la somme des bornes de Cramer-Rao ($\tilde{\sigma}_{x_{E_i}}, \tilde{\sigma}_{y_{E_i}}$) sur les paramètres (x_{E_i}, y_{E_i}) à estimer. Nous avons, par exemple, $I_{E_1} = \sqrt{\tilde{\sigma}_{x_{E_1}}^2 + \tilde{\sigma}_{y_{E_1}}^2}$.

La carte de précision de localisation de l'émetteur E_1 est obtenue en calculant I_{E_1} pour une grille de positions de R_2 alors que les entités E_1, E_2 et R_1 sont fixes. Nous supposons que les écarts type des mesures d'AOA et de TDOA sont respectivement de $0,5^\circ$ et de 25ns (valeurs qu'on retrouve dans un cadre opérationnel). Pour un souci de lisibilité, le résultat obtenu présenté à la figure 2.A est borné à une erreur de localisation de 1km. Ainsi, la précision de localisation est mauvaise dans la zone en rouge. La zone 1 correspond aux situations où le réflecteur R_2 se situe entre le récepteur S et une autre entité (E_1, E_2 ou R_1). La zone 2, comme illustré en figure 2.B, coïncide avec les cas où l'angle d'intersection α est faible ($\alpha < 5^\circ$).

Nous allons exploiter cette information dans la méthode d'affectation afin de valider ou non certains résultats.

4 Problème d'affectation

4.1 Description du problème

Le problème d'affectation équivaut à définir un graphe d'affectation noté \mathcal{H} faisant correspondre chaque réflexion de \mathcal{L}_1 à au plus une autre réflexion de \mathcal{L}_2 . \mathcal{H} est un graphe biparti constitué d'un ensemble d'arrêtes. Chaque arrête relie deux noeuds. Ici, un noeud est un élément de \mathcal{L}_1 ou de \mathcal{L}_2 . \mathcal{H} peut être décrit

par une matrice des affectations noté X de taille $[n_1, n_2]$.

Dans notre problème, les valeurs de chaque coefficient $x_{i_1 i_2}$ de cette matrice ne peuvent prendre que la valeur 0 ou 1. $x_{i_1 i_2} = 1$ correspond à une affectation si la réflexion caractérisée par $(\tau_{i_1}^1, \theta_{i_1}^1)$ de \mathcal{L}_1 et la réflexion caractérisée par $(\tau_{i_2}^2, \theta_{i_2}^2)$ de \mathcal{L}_2 sont toutes les deux associées ensemble, autrement $x_{i_1 i_2} = 0$.

Une réflexion ne peut correspondre qu'à un unique couple émetteur/réflecteur. Ainsi, une réflexion de chaque liste ne peut être associée au maximum qu'une seule fois. Nous pouvons alors écrire les équations suivantes pour exprimer les contraintes d'affectation sur la matrice des affectations X :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_1} x_{ij} \leq 1 \text{ pour tout } j = 1, \dots, n_2 \\ \sum_{j=1}^{n_2} x_{ij} \leq 1 \text{ pour tout } i = 1, \dots, n_1 \end{cases} \quad (4)$$

4.2 Algorithme d'affectation

La première étape (appelée algorithme d'affectation par AOA) recherche les similitudes des AOA des réflexions provenant d'un même réflecteur. Il s'agit de calculer $|\theta_{i_1}^1 - \theta_{i_2}^2|$ pour $i_1 = [1, \dots, n_1]$ et $i_2 = [1, \dots, n_2]$. Si cette valeur est inférieure à un seuil ε alors $x_{i_1 i_2} = 1$. Soit N_a le nombre d'affectations trouvées. Si les contraintes sur X sont respectées alors le problème d'affectation est résolu.

Cependant, si au moins deux réflecteurs sont dans la même zone angulaire cette méthode ne fournit pas de solution satisfaisante. D'autres étapes sont alors nécessaires afin de déterminer les N_{dR} véritables réflecteurs communs parmi ces N_a affectations.

Nous proposons de calculer toutes les paires possibles de solutions $(\hat{D}_{SE_1}, \hat{D}_{SE_2})$ correspondant aux différentes configurations élémentaires ($N_E = 2$ et $N_R = 2$). Les paires dont au moins une des solutions est négative sont ignorées. Il en est de même si l'angle d'intersection α est trop faible ($< 5^\circ$). Nous estimons ensuite la fonction de densité \hat{f} des paires $(\hat{D}_{SE_1}, \hat{D}_{SE_2})$ restantes [9]. La valeur maximale atteinte permet de calculer les coordonnées de E_1 et de E_2 .

Soit $\{\hat{\mathbf{d}}_{SE_1}, \hat{\mathbf{d}}_{SE_2}\}$ l'ensemble des paires $(\hat{D}_{SE_1}, \hat{D}_{SE_2})$ autour de $\max(f)$. On itère alors un processus tant que la matrice X qui respecte les contraintes d'affectation n'est pas trouvée ou qu'il reste des valeurs dans l'ensemble $\{\hat{\mathbf{d}}_{SE_1}, \hat{\mathbf{d}}_{SE_2}\}$. D'abord X est initialisée à 0 puis les coefficients x_{ij} associés aux paires $\{\hat{\mathbf{d}}_{SE_1}, \hat{\mathbf{d}}_{SE_2}\}$ sont affectés à 1. La paire $(\hat{D}_{SE_1}^{\min}, \hat{D}_{SE_2}^{\min})$ correspondant à la valeur minimale $\min(f\{\hat{\mathbf{d}}_{SE_1}, \hat{\mathbf{d}}_{SE_2}\})$ est retirée de l'ensemble $\{\hat{\mathbf{d}}_{SE_1}, \hat{\mathbf{d}}_{SE_2}\}$.

Si une solution est trouvée, les coordonnées de E_1 et E_2 sont validées. Il est alors aussi possible de calculer les positions des N_{dR} réflecteurs communs ainsi que de construire le vecteur d'état s .

5 Résultats numériques

Considérons la configuration avec $N_R = 4$ réflecteurs dont les positions sont indiquées en la figure 3. S, R_1 et R_2 sont alignés, de même pour S, R_3 et R_4 . Dans ce cas, l'affectation par

Algorithme 1 : Algorithme d'affectation TDOA/AOA

Entrées : Listes de mesures \mathcal{L}_1 et \mathcal{L}_2
 $X \leftarrow$ Algorithme d'affectation par AOA.
Calculer les $\binom{N_a}{2}$ paires de distances $(\hat{D}_{SE_1}, \hat{D}_{SE_2})$.
Supprimer les paires ayant des valeurs négatives ou si $|\alpha| < 5^\circ$.
Estimer \hat{f} la fonction de densité des paires $(\hat{D}_{SE_1}, \hat{D}_{SE_2})$.
A partir de $\max(f)$, calculer $(\hat{x}_{E_1}, \hat{y}_{E_1}, \hat{x}_{E_2}, \hat{y}_{E_2})$.
 $\{\hat{\mathbf{d}}_{SE_1}, \hat{\mathbf{d}}_{SE_2}\} \leftarrow$ paires $(\hat{D}_{SE_1}, \hat{D}_{SE_2})$ autour de $\max(\hat{f})$.
while les contraintes (4) sur X ne sont pas respectées **do**
 $X \leftarrow 0$.
 $\{x_{ij} \text{ associés à } \{\hat{\mathbf{d}}_{SE_1}, \hat{\mathbf{d}}_{SE_2}\}\} \leftarrow 1$.
 $\{\hat{\mathbf{d}}_{SE_1}, \hat{\mathbf{d}}_{SE_2}\} \leftarrow \{\hat{\mathbf{d}}_{SE_1}, \hat{\mathbf{d}}_{SE_2}\} - (\hat{D}_{SE_1}^{\min}, \hat{D}_{SE_2}^{\min})$.
end while
A partir de X , calculer $(\hat{x}_{R_i}, \hat{y}_{R_i})$ pour $i = 1, \dots, N_{dR}$.
Sorties : Matrice d'affectation X et vecteur d'état s

AOA ne peut pas fournir une matrice respectant les contraintes. Nous étudierons quatre scénarios distincts. Pour chaque scénario j ($j = 1, \dots, 4$), les probabilités de détections des réflexions vaudront 1 sauf pour les deux réflexions du réflecteur j pour lesquels $P_{d_{R_j/E_1}} = P_{d_{R_j/E_2}} = 0,5$. Ce dernier réflecteur sera différent suivant les scénarios.

A partir des positions des différents éléments et des probabilités de détections des réflecteurs, nous pouvons calculer les différents angles et retards. Un terme de bruit blanc gaussien est alors ajouté. Il est ici fixé à $\sigma_{AOA} = 0,5^\circ$ pour les mesures d'angles et nous proposons de faire varier σ_{TDOA} des mesures de TDOA. La figure 4 présente les résultats obtenus en moyennant sur 100 tirages. Un premier graphique nous donne le nombre N_S de fois où l'algorithme converge vers un résultat. Un deuxième graphique fourni le nombre d'affectations réussies parmi les N_S cas de convergence. Nous calculons aussi l'erreur quadratique moyenne (RMS) sur l'estimation des distances D_{SE_1} et D_{SE_2} pour l'ensemble des affectations réussies. On remarque alors que pour cette configuration, bien que le nombre de convergences (*i.e.* une solution est trouvée) soit relativement faible (entre 30 et 40 %), le nombre d'affectations correctes est presque toujours égal à 100 %.

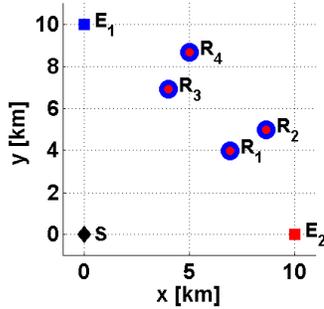


FIGURE 3 – Configuration étudiée.

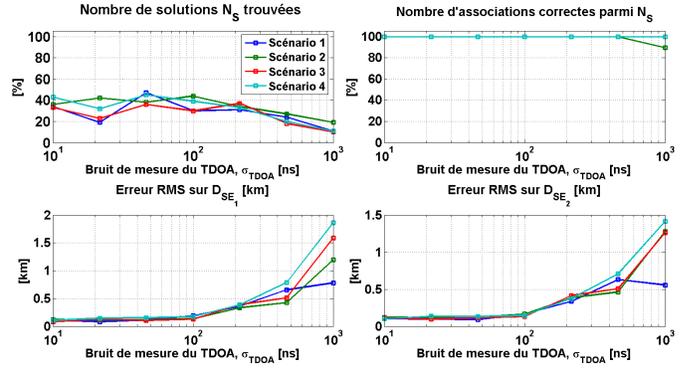


FIGURE 4 – Performances de l'algorithme d'affectation.

6 Conclusion

Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode de localisation de sources d'émission qui tire profit des multitrajets. En effet, elle ne prend en compte aucune connaissance *a priori* sur le nombre et le type de sources et la position des réflecteurs. Elle prend aussi en considération les éventuels problèmes d'affectation qui apparaissent dans certaines configurations. Les résultats numériques proposés montrent le potentiel de cette méthode. Cependant, les résultats obtenus doivent encore être confortés par d'autres simulations numériques. Cette méthode doit aussi montrer son caractère opérationnel à partir de données réelles.

Références

- [1] M. Gavish and A. Weiss, "Performance analysis of bearing-only target location algorithms," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 28 (3), pp. 817–828, 1992.
- [2] M. Malanowski and K. Kulpa, "Two methods for target localization in multistatic passive radar," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 1, pp. 572–580, 2012.
- [3] A. O'Connor, P. Setlur, and N. Devroye, "Single-sensor RF emitter localization based on multipath exploitation," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51 (3), pp. 1635–1651, 2015.
- [4] S. Coutts, "Passive localization of moving emitters using out-of-plane multipath," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36 (2), pp. 584–595, 2000.
- [5] L. Hammerquist, "Passive monopulse ranging to a non-cooperative emitter and non-emitting object," jan 1994, US Patent 5,280,294.
- [6] S. Deb, M. Yeddanapudi, K. Pattipati, and Y. Bar-Shalom, "A generalized S-D assignment algorithm for multisensor-multitarget state estimation," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33 (2), pp. 523–538, 1997.
- [7] M. Radmard, S. Karbasi, and M. Nayebi, "Mimo localization by illuminators of opportunity," in *IEEE Radar Conference*, 2011.
- [8] R. Giacometti, A. Baussard, C. Cornu, A. Khenchaf, J.-M. Quellec, and D. Jahan, "Accuracy studies for TDOA-AOA localization of emitters with a single sensor," in *IEEE Radar Conference*, 2016.
- [9] Z. I. Botev, J. F. Grotowski, D. P. Kroese *et al.*, "Kernel density estimation via diffusion," *The Annals of Statistics*, vol. 38 (5), pp. 2916–2957, 2010.