



HAL
open science

Placement des récepteurs pour la localisation de drones dans une zone de surveillance

Pierre Leba, Stéphane Méric, Jean-Yves Baudais, Matthieu Crussière,
Pierre-Yves Jézéquel

► To cite this version:

Pierre Leba, Stéphane Méric, Jean-Yves Baudais, Matthieu Crussière, Pierre-Yves Jézéquel. Placement des récepteurs pour la localisation de drones dans une zone de surveillance. Journées nationales microondes, Jun 2022, Limoges, France. hal-03664096

HAL Id: hal-03664096

<https://hal.science/hal-03664096>

Submitted on 10 May 2022

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.

Placement des récepteurs pour la localisation de drones dans une zone de surveillance

Pierre Leba^{#*}, Stéphane Méric[#], Jean-Yves Baudais[#], Matthieu Crussière[#], Pierre-Yves Jézéquel^{*}

[#]Univ. Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR-UMR 6164, 35000 Rennes.

^{*}TDF, La Haute Galesnais, 35340 Liffré

pierre.leba@insa-rennes.fr

Résumé — La sécurité des zones sensibles contre les menaces de drones est devenue un enjeu majeur. Dans ce contexte, les radars multistatiques présentent des avantages significatifs par rapport aux radars monostatiques en raison de l'exploitation de la diversité spatiale et d'une meilleure détectabilité des cibles. Ainsi, le placement des capteurs a un impact important sur la détection de la cible et l'estimation de ses paramètres (position, vitesse). Dans cet article, nous proposons une méthode empirique pour placer les récepteurs dans un réseau radar multistatique afin de couvrir une zone d'intérêt représentant un site sensible. La performance est mesurée avec l'erreur d'estimation des paramètres de la cible pour différents nombres de récepteurs et différentes positions de la cible.

1. Introduction

Ces dernières années, les drones sont devenus très populaires. Leur prolifération conduit cependant à l'émergence de nouvelles menaces. En raison de leur petite taille et de leur capacité de voler à faible vitesse, la détection et la localisation des drones sont très difficiles pour les systèmes radar [1]. Par conséquent, assurer la sécurité des zones sensibles contre les menaces des drones est devenu un enjeu majeur. Le radar multistatique se révèle être un choix de premier plan dans la détection et la localisation des drones [2, 3, 4].

Un des problèmes du radar multistatique est le placement des capteurs. Ce placement a un impact sur la performance de détection de la cible et sur la précision de la localisation de la cible. L'amélioration de cette précision par le placement des capteurs peut être abordée en considérant le rapport signal sur bruit (SNR) [5], l'angle d'arrivée [6], la localisation hyperbolique par des mesures de différence de temps d'arrivée [7], la localisation elliptique par des mesures de temps d'arrivée [8], ou encore la minimisation de la variance des estimations de distance et de décalage Doppler [9]. Le placement de plusieurs récepteurs est optimisé en fonction de la position et de la vitesse de la cible [9], ou en fonction de la trajectoire de la cible [10]. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'aborde le problème du placement dans le cas d'une zone entière à couvrir.

La contribution de cet article consiste à placer les récepteurs pour couvrir une zone de surveillance donnée.

Nous proposons une méthode pour définir combien de récepteurs sont nécessaires et où les déployer dans un réseau radar multistatique afin de répondre à l'exigence de performance de localisation. Cette méthode est basée sur la borne de Cramér-Rao (CRLB) de l'estimateur de la position et de la vitesse de la cible. Cet article est organisé comme suit. Le paragraphe 2. fournit la description du modèle et les outils théoriques sur lesquels la méthode est basée. Ensuite, la méthode de déploiement des récepteurs est décrite dans le paragraphe 3. Les simulations et les résultats sont présentés dans le paragraphe 4. Enfin, le paragraphe 5. conclut cet article.

2. Description du modèle

2.a. Configuration géométrique

Le réseau radar multistatique étudié est un réseau actif, constitué d'un émetteur et de N récepteurs omnidirectionnels. Les récepteurs sont supposés être tous à une même distance fixe R_r du centre du site sous surveillance, comme illustré sur la figure 1. Le lieu possible des récepteurs est alors un cercle. La position du récepteur n est définie par l'angle ϕ_n par rapport à l'abscisse et au centre du site, avec les indices n ordonnés tels que $\phi_1 \leq \phi_2 \leq \dots \leq \phi_N$. La zone de surveillance est modélisée comme un disque centré au centre du site, avec un rayon fixe R_a tel que $R_a < R_r$. La position de la cible est un point quelconque de ce disque. Soit θ le vecteur des paramètres de la cible défini par $\theta = (p_x p_y v_x v_y)^T$, où p_x et p_y sont les coordonnées cartésiennes de la position, v_x et v_y sont les coordonnées de la vitesse dans le plan 2D.

2.b. Modèle de signal

Dans le scénario étudié, on suppose l'absence de trajets multiples. Chaque récepteur du réseau reçoit un signal réfléchi qui est une version retardée, décalée en Doppler, atténuée et bruitée du signal transmis, d'enveloppe complexe $u(t)$. Le signal réfléchi au récepteur n est exprimé en bande de base par :

$$s_n(t) = Au(t - \tau_n)e^{2\pi i f_n t} + w_n(t) \quad (1)$$

où A est l'atténuation du canal incluant la section efficace radar (SER) de la cible, τ_n et f_n respectivement son retard et son décalage Doppler, et $w_n(t)$ le bruit blanc, gaussien

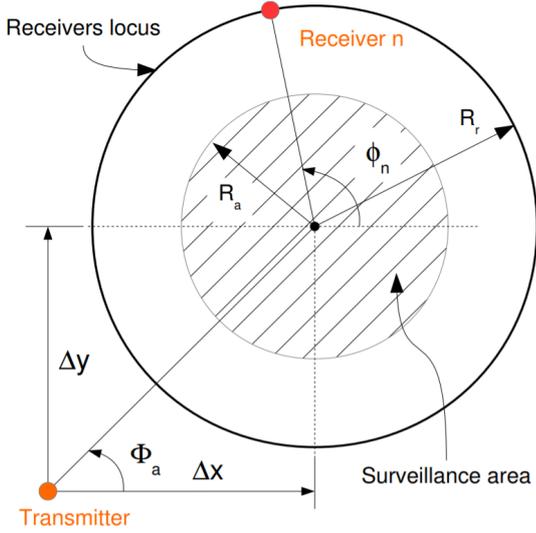


FIGURE 1. Configuration multistatique.

additif, complexe et de moyenne nulle. Dans notre étude, la SER de la cible est supposée isotrope.

La forme d'onde utilisée dans cet article est la modulation de fréquence linéaire (LFM). Cette forme d'onde est caractérisée, entre autres, par quatre paramètres : T la longueur d'impulsion, T_{PRI} l'intervalle de répétition des impulsions, M le nombre d'impulsions et B la largeur de bande.

2.c. Estimation Retard-Doppler

La fonction d'ambiguïté de la LFM $u(t)$ est utilisée pour estimer le retard (distance r) et le Doppler f (vitesse) qui caractérisent la cible. Avec un récepteur n identifié par sa position ϕ_n , les estimations sans biais à variance minimale de r_n et f_n sont données par la CRLB de l'estimation conjointe [9, 11] :

$$\sigma_r^2 = \frac{c^2}{d} (T^2 + T_{\text{PRI}}^2 (M^2 - 1)), \quad \sigma_f^2 = \frac{B^2}{d}, \quad \sigma_{rf} = \frac{cBT}{d} \quad (2)$$

où σ_r^2 est la variance minimale de r_n , σ_r^2 celle de f_n et σ_{rf} la variance minimale jointe, avec c la vitesse de la lumière et $d = \frac{1}{3}\pi^2 B^2 T_{\text{PRI}}^2 (M^2 - 1)$. En supposant une erreur gaussienne, le modèle de mesure correspondant, obtenu par le MLE en régime de fort SNR, est [9] :

$$\hat{r}_n = r_n(\theta) + e_{r_n} \text{ et } \hat{f}_n = f_n(\theta) + e_{f_n} \quad (3)$$

où la matrice de covariance de l'erreur est :

$$E [(e_{r_n} e_{f_n})^T (e_{r_n} e_{f_n})] = \frac{1}{\text{SNR}_n} \begin{pmatrix} \sigma_r^2 & \sigma_{rf} \\ \sigma_{rf} & \sigma_f^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

et SNR_n est le SNR au niveau du récepteur n .

Avec un seul récepteur, la CRLB dépend de θ , ϕ_n et des paramètres LFM. Elle dépend également de la géométrie de la configuration par le biais de la distance bistatique et du décalage Doppler [12]. Avec N récepteurs, le modèle de mesure combine N estimations de retard et de Doppler.

La CRLB est alors dérivée du cas gaussien général [13] et dépend des N positions du récepteur (ϕ_1, \dots, ϕ_N) . Cette CRLB dépend des positions données de l'émetteur, de la cible et des récepteurs.

Dans cette étude, la trace de la CRLB est adoptée comme critère pour définir le placement des récepteurs lorsqu'une seule configuration de cible est considérée, c'est-à-dire pour une position et une vitesse données de la cible. La trace de la CRLB, en fonction des positions des récepteurs, est alors minimisée, conduisant aux positions optimales des récepteurs, selon le critère utilisé. Cependant, ces positions optimales dépendent du paramètre de la cible θ et ne garantissent pas la meilleure solution pour l'ensemble du site sous surveillance. Au lieu du problème complexe d'optimisation à N dimensions, l'algorithme proposé résout le placement de N récepteurs. Cet algorithme est présenté dans le paragraphe suivant.

3. Méthode de placement des récepteurs

La méthode présentée vise à placer N récepteurs afin de couvrir toute la zone de surveillance. La procédure de placement des récepteurs est décrite synthétiquement dans l'algorithme 1 et est organisée en 3 parties :

1. lignes 1 à 6, la distribution des positions optimales de $N = 2$ récepteurs est d'abord évaluée pour chacune des K positions et vitesses aléatoires de cible ;
2. lignes 7 à 11, la régression quantile est appliquée sur la densité de répartition des positions optimales des récepteurs calculées précédemment et pour définir les positions finales des $N \geq 2$ récepteurs ;
3. lignes 12 à 17, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) du MLE asymptotique de θ est calculée pour évaluer les performances de l'algorithme proposé.

Algorithm 1 Algorithme de placement des récepteurs et de validation des performances.

- 1: Fixer $N = 2, K \in \mathbb{N}$
 - 2: **for** $j = 1$ **to** K **do**
 - 3: Générer le paramètre $(\theta)_j$ de la cible
 - 4: $\{(\phi_1)_j, (\phi_2)_j\} \leftarrow \arg \min \text{trace}(\text{CRLB}(\theta)_j)$
 - 5: **end for**
 - 6: Calculer PDF $_i$ et CDF $_i$ de $\phi_i, i \in \{1, 2\}$
 - 7: Fixer $N \in 2\mathbb{N}$
 - 8: **for** $i = 1$ **to** $N/2$ **do**
 - 9: $\phi_i \leftarrow \text{CDF}_1^{-1} \left(\frac{i}{N/2+1} \right)$
 - 10: $\phi_{i+N/2} \leftarrow \text{CDF}_2^{-1} \left(\frac{i}{N/2+1} \right)$
 - 11: **end for**
 - 12: **for** $j = 1$ **to** K **do**
 - 13: Générer le paramètre $(\theta)_j$ de la cible
 - 14: $(\hat{\theta})_j \leftarrow \text{MLE}((\phi_1)_j, \dots, (\phi_N)_j)$
 - 15: $\varepsilon_j^2 \leftarrow \|(\theta)_j - (\hat{\theta})_j\|^2$
 - 16: **end for**
 - 17: Donner l'erreur et le RMSE
-

La première partie de la procédure fournit la fonction de densité de probabilité (PDF) et la fonction distributive cumulative (CDF) empiriques des positions optimales de $N = 2$ récepteurs, pour un ensemble de K positions et vitesses de cibles présentes dans la zone de surveillance. L'algorithme commence par déterminer les emplacements optimaux de $N = 2$ récepteurs pour chaque position et vitesse de cible située dans la zone de surveillance. La position optimale est comprise comme la minimisation de la trace de CRLB, comme décrit dans le paragraphe 2.c.. La détermination du placement des 2 récepteurs est répétée pour les K positions et vitesses de cible uniformément réparties dans la zone de surveillance. Ainsi, chaque position et vitesse traitée produit des paires de positions de récepteurs ϕ_1 et ϕ_2 qui sont rassemblées pour produire la PDF et la CDF de chacune des positions de récepteurs, désignées par PDF_i et CDF_i pour le récepteur i , $i \in \{1, 2\}$. Notons qu'en raison de la symétrie de la configuration géométrique par rapport à l'axe du site émetteur, les distributions PDF_1 et PDF_2 sont disposées symétriquement par rapport à l'angle Φ_a défini par l'axe du site émetteur.

Dans la deuxième partie de l'algorithme, le placement de $N \geq 2$ récepteurs est basé sur le PDF et le CDF obtenus avec $N = 2$. Cependant, en raison de la symétrie PDF_1 et PDF_2 , le cas du placement de N récepteurs n'est considéré que pour N pair. Dans chacune des deux distributions PDF_i , $N/2$ positions angulaires sont sélectionnées. La sélection des positions angulaires des $N/2$ récepteurs dans chaque distribution CDF_i s'effectue selon le critère des $(N/2 + 1)$ -quantiles. Pour $N = 4$, ce sont les 3-quantiles (ou terciles) qui sont considérés pour déterminer le placement des 2 récepteurs dans chaque distribution PDF, PDF_1 et PDF_2 . L'ensemble des N positions optimales des récepteurs est ainsi défini. Notons que la position optimale des récepteurs appliquée à une zone couverte est définie ici au sens de la régression quantile et ne doit pas être confondue avec la solution optimale telle que définie dans le paragraphe 2.c..

Enfin, dans la troisième partie de l'algorithme, les performances des N positions des récepteurs obtenues dans la deuxième partie de l'algorithme sont évaluées avec l'erreur et le RMSE des paramètres estimés $\hat{\theta}$. Pour cela, la zone de surveillance est décrite comme dans la première partie par un ensemble de K cibles uniformément réparties dans cette zone. Le MLE asymptotique est calculé pour chaque configuration de cibles. Cet estimateur est basé sur l'estimation des paramètres asymptotiques donnés par (2) pour chaque récepteur.

4. Résultats

Afin de matérialiser les paramètres de la cible dans la zone de surveillance, des simulations Monte Carlo sont effectuées avec *i*) des positions de cibles uniformément distribuées dans la zone, *ii*) des vitesses uniformément distribuées entre 0 et une vitesse maximale fixée à 5,6 m/s et avec une distribution uniforme de la direction de 0 à 2π . La puissance de l'émetteur est réglée de telle sorte que le rapport signal sur bruit, en tant que valeur de référence, est

TABLEAU 1. Paramètres du modèle.

Paramètre	Valeur
Position centre de la zone, (Δ_x, Δ_y)	(2000 m, 3000 m)
Angle émetteur-zone, (Φ_a)	236°
Rayon zone de surveillance, R_a	150 m
Vitesse maximale de la cible	5.6 m/s
Distance récepteur-zone, R_r	1000 m
Largeur de bande, B	1 MHz
Intervalle de répétition des impulsions, T_{PRI}	100 μs
Nombre d'impulsions, M	16
Durée de l'impulsion, T	50 μs
Longueur d'onde, λ	0,21 m

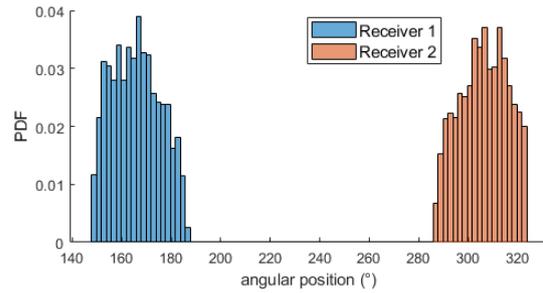


FIGURE 2. PDF_1 et PDF_2 des positions de 2 récepteurs.

fixé à 20 dB à une distance de 1000 m d'une cible placée au centre du site de surveillance. Pour tout les autres placements de cible, le SNR est évalué en fonction de cette référence, de la position de la cible et de la position du récepteur. Le tableau 1 fournit les valeurs numériques de la configuration du réseau multistatique. La méthode du simplexe de Nelder-Mead est utilisée à la fois pour la minimisation de la trace de la CRLB et pour le MLE asymptotique.

La figure 2 présente les PDF_1 et PDF_2 empiriques obtenues à partir des positions optimales des $(\phi_1)_j$ et $(\phi_2)_j$, $j \in [1, K]$, obtenues avec chacune des $K = 1575$ configurations aléatoires de la cible. Les positions optimales des récepteurs ne sont pas dispersées partout entre 0 et 2π , mais ont un support de distribution plus réduit. Comme prévu, PDF_1 et PDF_2 sont disposés symétriquement par rapport à $\Phi_a = 236^\circ$.

Le tableau 2 présente les positions de récepteurs obtenues par régression quantile sur CDF_1 et CDF_2 . Ce tableau montre que le RMSE diminue avec l'augmentation du nombre de récepteurs utilisés pour couvrir la zone de

TABLEAU 2. Positions angulaires optimales et RMSE des N récepteurs.

N	Positions des récepteurs						RMSE	
	1	2	3	4	5	6	$\ p\ $ (m)	$\ v\ $ (m/s)
2	166°	306°					12,2	5,4
4	160°	170°	302°	312°			8,8	3,8
6	158°	166°	173°	299°	306°	314°	7,0	3,0

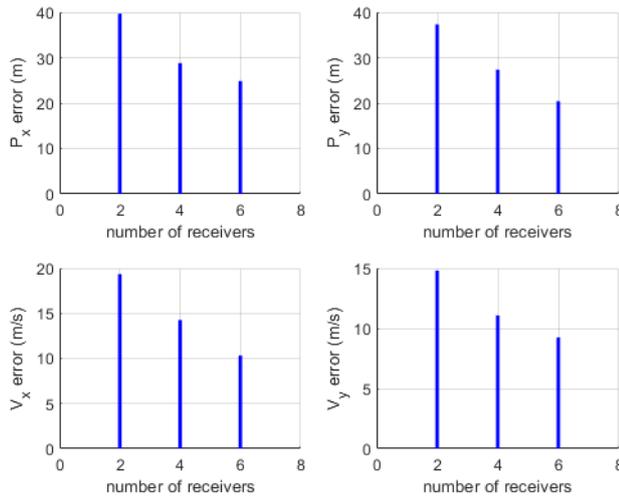


FIGURE 3. Erreur d'estimation des paramètres de la cible.

surveillance, ce qui traduit une amélioration de la précision de l'estimation des paramètres de la cible. La figure 3 représente l'ensemble de l'erreur ε_j de chaque paramètre de la cible, pour chaque ensemble de positions de récepteurs $N \in \{2, 4, 6\}$. Elle montre que la précision des estimations de la position et de la vitesse augmentent également avec le nombre de récepteurs. La valeur maximale des erreurs de position peut être comparée à la résolution en distance du LFM, qui est $\frac{c}{2B} = 150$ m : la résolution en distance est alors augmentée pour toutes les positions de la cible dans la zone de surveillance.

La méthode peut être appliquée pour un nombre plus grand de récepteurs. En fonction de la précision d'estimation minimale fixée par une valeur de RMSE acceptable pour les paramètres de la cible, N peut être déduit, fixant ainsi les N positions de récepteurs. La question du nombre de récepteurs à déployer et de l'endroit où les déployer est ainsi traitée.

5. Conclusion

Dans cet article, nous proposons d'étudier un système radar multistatique dans le but de détecter des drones à l'intérieur d'une zone sensible. La question du placement des récepteurs est abordée par une méthode empirique considérant un émetteur fixe et plusieurs récepteurs autour de la zone à couvrir. Nous présentons une méthode permettant de sélectionner le nombre de récepteurs et de les placer en fonction du RMSE maximal admissible sur l'estimation des paramètres de la cible. Cette méthode exploite la CRLB de l'estimation de la position et de la vitesse de la cible, et définit la position optimale des récepteurs selon une régression quantile.

6. Remerciements

Les auteurs remercient la DGA (Direction générale de l'armement) pour le financement de cette étude dans le cadre du projet AMBRA (*Active Multistatic Broadcast Radar*), et plus particulièrement P. Pouliguen et H. Rug-

giero (agence DGA-AID). Les auteurs remercient P. Kasser (agence TDF innovation) pour son assistance.

Références

- [1] P. Wellig *et al.*, "Radar systems and challenges for C-UAV," in *International Radar Symposium*, Bonn, Germany, Jun. 2018, pp. 1–8.
- [2] E. Fishler *et al.*, "Spatial diversity in radars—models and detection performance," *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 54, no. 3, pp. 823–838, 2006.
- [3] N. Lehmann *et al.*, "MIMO-radar application to moving target detection in homogenous clutter," in *Proc. Adaptive Sensor Array Processing Workshop*, Lexington, USA, 2006.
- [4] N. H. Lehmann *et al.*, "High resolution capabilities of MIMO radar," in *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. IEEE, 2006, pp. 25–30.
- [5] M. M. Chitgarha *et al.*, "The detector's output SNR as a criterion for receiver placement in MIMO DVB-T based passive coherent location," in *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*. IEEE, 2012, pp. 431–435.
- [6] K. Doğançay and H. Hmam, "Optimal angular sensor separation for AOA localization," *Signal Processing*, vol. 88, no. 5, pp. 1248–1260, 2008.
- [7] K. W. Lui and H.-C. So, "A study of two-dimensional sensor placement using time-difference-of-arrival measurements," *Digital Signal Processing*, vol. 19, no. 4, pp. 650–659, 2009.
- [8] L. Rui and K. Ho, "Elliptic localization : Performance study and optimum receiver placement," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 18, pp. 4673–4688, 2014.
- [9] B. Griffin *et al.*, "Optimal receiver placement in staring cooperative radar networks for detection of drones," in *Radar Conference*, 2020, pp. 1–6.
- [10] F. Gumiero *et al.*, "Using real data for the implementation of multistatic passive radar geometry optimization procedure," in *European Radar Conference*. IEEE, 2011, pp. 93–96.
- [11] A. Dogandzic and A. Nehorai, "Cramer-rao bounds for estimating range, velocity, and direction with an active array," *IEEE transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 6, pp. 1122–1137, 2001.
- [12] M. Skolnik, Ed., *Radar Handbook*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2008.
- [13] S. M. Kay, *Fundamentals of statistical signal processing*. Prentice Hall PTR, 1993.