

Localisation par antenne acoustique avec peu de capteurs : goniométrie et formation de voies

Torea BLANCHARD¹, Jean-Hugh THOMAS^{1,2}, Kosai RAOOF^{1,2}, Alexis CHALOPIN², Maximilien VIDAL²

¹Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine
Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 09, France

²École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans
1 Rue Aristote, 72000 Le Mans, France

torea.blanchard@univ-lemans.fr, jean-hugh.thomas@univ-lemans.fr
kosai.raoof@univ-lemans.fr

Résumé – L'étude des techniques de localisation acoustique reste encore un axe majeur de recherche pour des applications telles que la surveillance des drones et la robotique. Il existe à ce jour deux méthodes principales de localisation, la formation de voies et la goniométrie. Ces méthodes sont largement étudiées dans la littérature. Elles se basent sur l'analyse des signaux enregistrés à partir d'un ensemble de récepteurs formant une antenne acoustique. L'une consiste en un filtrage spatial de l'espace préalablement délimité tandis que l'autre se base sur l'estimation de l'ensemble des différences de temps de propagation entre deux récepteurs existant dans l'antenne acoustique. Dans ce cas de figure, le problème de localisation se traduit par la résolution d'un problème mal-posé utilisant le calcul d'une pseudo-inverse. En présence d'un bruit de type drone l'objectif de ce papier est de comparer les performances de ces deux méthodes de localisation pour deux configurations d'antenne, l'une constituée de 4 microphones et l'autre de 10 microphones et de proposer une approche combinant les informations obtenues par les deux méthodes. Les performances des deux méthodes sont comparées au travers de simulations numériques. Des résultats de mesure sont présentés pour une configuration d'antenne.

Abstract – The study of acoustic localization techniques is still a major research area for applications such as monitoring, with the emergence of drones, or robotics. There are currently two main methods of localization, beamforming and goniometry, widely studied in the literature, based on the analysis of the signals recorded from a set of receptors forming an acoustic antenna. One consists of spatially filtering the previously delimited space while the other is based on the estimation of the set of differences of propagation time between two receivers existing in the acoustic antenna. In this case, the problem of localization results in the resolution of an ill-posed problem using the computation of the pseudo-inverse. In the presence of a sound source which can be a drone, the objective of this paper is to compare the performance of these two localization methods for two antenna configurations, one consisting of 4 microphones and the other of 10 microphones and to propose an approach combining the information obtained by the two methods. The performance of the two methods are compared through numerical simulations. Measurements have been made for an antenna configuration.

1 Introduction

Les méthodes de localisation acoustique sont un enjeu majeur dans la recherche tant pour des applications en défense, avec l'émergence des drones, ou en robotique, mais également pour leur coût de mise en place faible. Il existe principalement deux méthodes de localisation qui ont largement été étudiées dans la littérature et qui restent encore un axe de recherche en acoustique : la formation de voies ("Beamforming" dans la littérature anglo-saxonne) [1] et la goniométrie [2]. Ce papier propose de comparer ces deux méthodes, d'une part, par des simulations numériques pour deux antennes différentes, et d'autre part, à l'aide de mesures réalisées sur un drone quadrimoteurs dans la salle sourde du laboratoire. Il est à noter que l'une des antennes, de petite dimension, n'est pas adaptée théoriquement aux longueurs d'onde considérées pour la formation de voies mais a l'avantage d'utiliser peu de capteurs. Cette

étude montre que la localisation d'une source pourrait gagner en précision si les informations apportées par les deux méthodes sont combinées. Le document est organisé de la manière suivante : les spécificités de chacune des méthodes sont d'abord décrites, puis quelques adaptations sont proposées pour améliorer la localisation fournie par goniométrie. La mesure des différences de temps de propagation entre deux récepteurs est notamment discutée. Enfin, des résultats de simulations numériques et d'expérimentations sont présentés. Dans l'étude, la propagation dans l'air est considérée en champ libre et lointain. La célérité des ondes est fixée à 343 m.s^{-1} .

2 Méthodes de localisation acoustique

Les deux méthodes exploitent le même principe physique lié aux différences de temps de captation d'un front d'onde de

célérité c par les capteurs d'une antenne de M microphones.

2.1 Formation de voies

La méthode de formation de voies, dans sa version temporelle, va reconstruire le signal de pression acoustique $p(t, \Theta)$ dans une direction de focalisation Θ à partir des signaux $p_n(t)$ ($n = 1, M$) acquis par les microphones de l'antenne et en utilisant les positions supposées connues des capteurs selon

$$p(t, \Theta) = \frac{1}{M} \left(p_{ref}(t) + \sum_{n=1}^{M-1} a_n p_n(t + \tilde{\tau}_n(\Theta)) \right), \quad (1)$$

où a_n est un coefficient de pondération. $\tilde{\tau}_n(\Theta)$ exprime le retard théorique entre les signaux $p_n(t)$ et $p_{ref}(t)$ issus respectivement du microphone n et de celui de référence, choisi arbitrairement parmi les microphones de l'antenne (ici $p_{ref}(t) = p_0(t)$). Lorsque les retards compensés appliqués en amont coïncident avec les retards réels, l'ensemble des signaux avancés est en phase et l'énergie $|p|^2$ de l'antenne est maximale. La formation de voies solutionne théoriquement un problème d'optimisation en minimisant l'écart entre l'amplitude de la source émise et sa reconstruction. D'autres méthodes pourraient donc être employées telles que Capon qui minimise la puissance en sortie de formation de voies ou Music [3]. La géométrie de l'antenne affecte clairement les résultats de formation de voies puisque les retards sont calculés en fonction des positions des microphones. Un algorithme adapté, génétique par exemple [4], peut être envisagé pour la recherche de la meilleure géométrie d'antenne en matière de précision de localisation des sources.

2.2 Goniométrie

2.2.1 Principe

À la différence de la technique de formation de voies, la goniométrie utilise directement les différences de temps de captation, ou d'arrivée, mesurées par des paires de microphones. Lorsque l'onde incidente est plane, le temps de propagation entre deux microphones n et m de l'antenne vaut [2]

$$\tau_{nm} = c^{-1}(\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_n)^T \mathbf{n}_s, \quad (2)$$

avec \mathbf{x}_n et \mathbf{x}_m les vecteurs de position des microphones n et m et \mathbf{n}_s le vecteur unitaire dirigé vers la source (figure 1). T dénote l'opérateur transposé. Sans nuire à la généralité du principe, le microphone $n = 0$ est positionné en $\mathbf{x}_0 = \mathbf{0}$. En remarquant que la différence de temps d'arrivée d'une onde entre deux microphones vérifie la relation de Chasles ($\tau_{mn} = \tau_{mk} + \tau_{kn}$) il apparaît que parmi les $M(M-1)/2$ paires de microphones possibles, $M-1$ paires sont linéairement indépendantes [5]. Autrement dit, chaque différence de temps d'arrivée peut s'exprimer à partir de $M-1$ termes indépendants. En écrivant ces relations dans le formalisme matriciel et en notant $\tau_n = \tau_{n0}$, le problème de localisation se traduit par la résolution du système suivant :

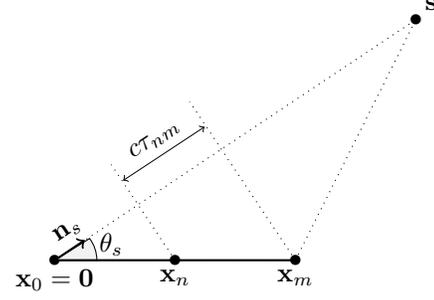


FIGURE 1 – Mesure de la différence de temps d'arrivée τ_{nm} entre deux microphones n et m pour une onde plane émise en s .

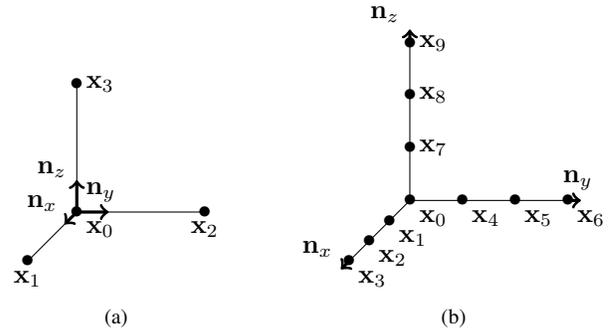


FIGURE 2 – Schéma des antennes acoustiques constituées de 4 (a) et 10 (b) microphones.

$$\boldsymbol{\tau} = c^{-1} \mathbf{D} \mathbf{n}_s, \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau} = [\dots \tau_n \dots]^T, \quad \mathbf{D} = [\mathbf{x}_0 \dots \mathbf{x}_n \dots \mathbf{x}_{M-1}]^T.$$

2.2.2 Résolution du problème inverse

L'inversion du problème (3) dépend uniquement de la géométrie de l'antenne. En effet, la matrice \mathbf{D} est construite à partir des informations sur la position des microphones et de leur nombre. Lorsque celle-ci est sous-dimensionnée (*i.e.* lorsque $M < 4$ pour une résolution dans \mathbb{R}^3) le système ne possède pas de solution unique. Il y a alors ambiguïté parmi différentes solutions possibles. Une inversion directe est réalisable dès lors que la dimension de la matrice et son rang sont égales à la dimension de l'espace d'étude et la solution est unique. Dans le dernier cas de figure ($\text{rang}(\mathbf{D}) > 3$), la résolution du problème se fait en calculant la pseudo-inverse de la matrice,

$$\mathbf{n}_s = c \mathbf{D} \boldsymbol{\tau}, \quad \mathbf{D} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T. \quad (4)$$

2.2.3 Mesure des différences de temps d'arrivée

Une étape importante dans le processus de localisation par la méthode de goniométrie est l'estimation des différences de temps d'arrivée. En effet, l'accès à ces données est nécessaire

pour déterminer la position de la source cible. Une méthode consiste à rechercher le maximum de la fonction d'intercorrélation entre deux signaux. Lorsque deux signaux contenant la même information sont déphasés d'un temps T , un pic de maximum apparaît dans la fonction de corrélation à cette valeur. Toutefois, l'estimation de ce maximum peut être biaisée par la présence de bruit parasite. Une méthode alternative a été développée en proposant une généralisation de la fonction d'intercorrélation (ICG) dans le domaine fréquentiel [6] afin d'améliorer les caractéristiques de cette dernière (réduction des lobes secondaires et de la largeur du lobe principal). La fonction d'intercorrélation généralisée entre deux signaux s'écrit

$$R_{nm}^{GCC}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(f) P_{nm}(f) e^{2j\pi f\tau} df, \quad (5)$$

avec $P_{nm}(f)$ l'interspectre des deux signaux. Plusieurs choix du facteur de pondération Φ sont proposés dans la littérature [7]. Finalement, le déphasage est donné par

$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau} \{R_{nm}^{GCC}(\tau)\}. \quad (6)$$

En pratique, l'estimation des différences de temps d'arrivée est biaisée à la fois par la présence de bruit dans les mesures et par la discrétisation des signaux mesurés.

2.3 Simulations numériques

Cette section se propose de comparer les performances des deux méthodes de localisation pour deux géométries d'antenne différentes à l'aide de simulations numériques. Les antennes étudiées sont schématisées figure 2. L'envergure de chaque bras est de $L = 1$ m. Dans la configuration (b), les microphones sont distants de $d = L/3$. Une source virtuelle est modélisée par un monopôle de fréquence $f_s = 400$ Hz de sorte à respecter la bande passante [243, 514] Hz de l'antenne de 10 microphones pour la formation de voies. Elle est fixée à une distance $r_s = 5$ m de l'origine afin de respecter l'hypothèse d'onde plane donnée par la distance de Fresnel ($D_F = f_s L^2 / 2c < r_s$). Enfin, les résultats de formation de voies sont donnés avec $a_n = 1$, $n = 1$, $M - 1$ et une fonction de pondération unitaire ($\Phi(f) = 1$) est utilisée pour le calcul des fonctions d'intercorrélation. Les traitements mis en place avec les simulations numériques permettent : (i) de cartographier l'énergie en sortie de formation de voies en fonction de la direction de focalisation pour une direction de source donnée, (ii) de calculer les différences de temps d'arrivée à partir de la fonction d'intercorrélation pour différentes pondérations $\Phi(f)$ et ainsi calculer la direction de la source par goniométrie, enfin (iii) de comparer les erreurs de localisation commises en azimuth et en élévation par formation de voies et goniométrie en fonction de la direction de la source avec ou sans bruit de mesure. Le bruit de mesure est supposé blanc, de moyenne nulle et de variance σ^2 . Un exemple de localisation par formation de voies et goniométrie est montré figure 3 pour une source placée dans la direction $(\theta_s, \phi_s) = (46^\circ, 13^\circ)$. Dans cette direction, l'erreur

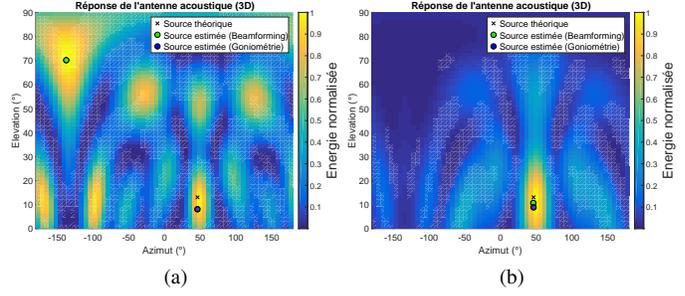


FIGURE 3 – Comparaison d'une localisation par formation de voies et goniométrie sans bruit avec 4 microphones (a) et 10 microphones (b).

commise pour une mesure par formation de voies et goniométrie est faible (voir figure 4 pour la formation de voies). Il apparaît que l'estimation de la direction de la source par formation de voies est nettement biaisée avec l'antenne à 4 microphones du fait d'une énergie en sortie d'antenne plus élevée dans une autre direction. Ceci s'explique par l'envergure et le pas intercepteur de l'antenne. Cette ambiguïté peut logiquement être levée par l'utilisation de microphones supplémentaires comme le montre la figure 3 (b) avec 10 microphones. Au contraire, la localisation par goniométrie présente environ la même précision pour la position testée avec les deux antennes (écart inférieur à 1°).

Les performances de localisation par formation de voies avec l'antenne à 10 microphones sont montrées figure 4. Ces cartographies montrent les erreurs moyennes en azimuth et en élévation sur 10 réalisations en fonction de la direction de la source. Pour chaque réalisation, le rapport signal à bruit (RSB) a été fixé à 20 dB. Lorsque l'élévation de la source est inférieure à 70° environ, les erreurs en azimuth sont inférieures à 15° . Celles en élévation sont quant à elles plus fluctuantes mais inférieures à 10° . Une symétrie est observée autour de 45° en azimuth. Ceci est dû à la symétrie de l'antenne par rapport au plan vertical orienté en cet angle. Ces résultats sont détériorés dans le cas de l'antenne à 4 microphones. Les résultats obtenus par goniométrie (non présentés ici) montrent que des écarts d'erreurs en azimuth et en élévation assez importants peuvent apparaître en fonction des erreurs commises sur l'estimation des différences de temps d'arrivée par la recherche du maximum dans la fonction d'intercorrélation. Néanmoins, lorsque la localisation par goniométrie est satisfaisante, la méthode reste stable en fonction du RSB.

2.4 Expérimentations

Des mesures sur un drone quadri-moteurs ont été réalisées en cinq positions à l'aide de l'antenne à 4 microphones dans la salle anéchoïque du laboratoire. Deux des mesures sont présentées figure 5. Les résultats montrent qu'il peut y avoir une ambiguïté dans l'estimation de la position de la source par la méthode de formation de voies, due à la présence d'un pic d'énergie plus élevé dans une autre direction. L'envergure et

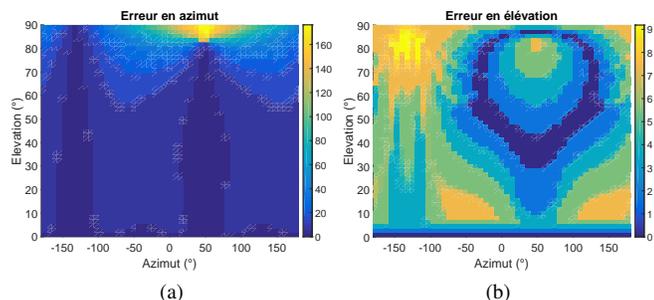


FIGURE 4 – Cartographies des erreurs moyennes en azimuth (a) et en élévation (b) obtenues par formation de voies avec l’antenne à 10 microphones en fonction de la direction de la source (RSB = 20 dB).

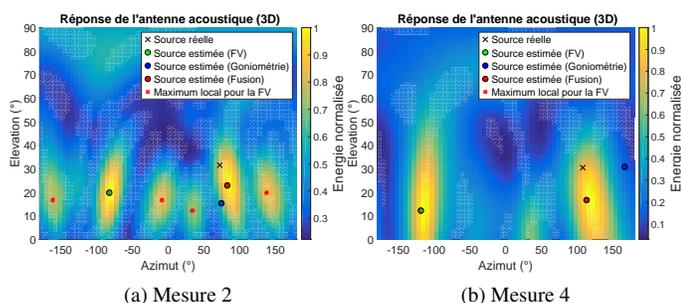


FIGURE 5 – Résultats des méthodes de localisation par formation de voie et goniométrie pour deux mesures en salle anéchoïque avec une antenne à 4 microphones.

le pas inter-capteur de l’antenne, pour la fréquence considérée, est certainement à l’origine de ces erreurs. Le calcul par goniométrie fournit toutefois une estimation aux alentours du lobe principal où se trouve la position réelle de la source. Les informations fournies par les deux méthodes peuvent permettre d’améliorer les résultats en considérant que le calcul par goniométrie estime le plus souvent la zone où la source se trouve. En effet, une estimation cohérente des différences de temps d’arrivée induit nécessairement une localisation proche de la position réelle de la source. La position de la source recherchée correspond alors au maximum local dans l’énergie de la réponse de l’antenne, obtenue par formation de voies, le plus proche de l’estimation mesurée par goniométrie. Les résultats en figure 6 montrent que la localisation gagne en précision sur l’estimation de l’azimut pour 4 mesures et pour 3 en élévation lorsque les informations fournies par les deux méthodes sont exploitées.

2.5 Conclusion

Il a été montré dans cette communication les principales caractéristiques des méthodes de formation de voies et de goniométrie étudiées pour deux configurations d’antenne avec peu de capteurs. Les résultats montrent que diminuer le nombre de microphones de l’antenne peut s’avérer désavantageux pour la précision de localisation de la source. Toutefois un algorithme

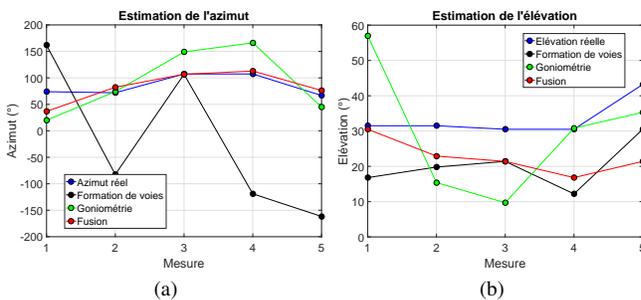


FIGURE 6 – Comparaison des résultats expérimentaux obtenus par formation de voies, goniométrie et par la fusion des deux méthodes.

fusionnant les informations fournies par les deux méthodes permet d’améliorer la précision en localisation. Une étude des signaux émis par un drone est prévue avec une optimisation du choix du facteur de pondération dans le calcul de la fonction d’intercorrélacion pour ces signatures. Enfin, des mesures avec une antenne à 10 microphones sont en cours pour valider les résultats numériques.

Remerciements

Ces travaux sont financés par une bourse de thèse DGA.

Références

- [1] B. D. Van Veen and K. M. Buckley. *Beamforming : A Versatile approach to spatial filtering*. IEEE ASSP Magazine, 5 :4-24, 1988.
- [2] E. Van Lancker. *Acoustic Goniometry : A Spatio-Temporal Approach*. Thèse de l’École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001.
- [3] H. Ma. *Localisation de Sources par Méthodes à Haute Résolution et par Analyse Parcimonieuse*. Thèse de l’Université de Franche-Comté, 2011.
- [4] F. Le Courtois. *Caractérisation des Sources Acoustiques sur le Matériel Ferroviaire par Méthode d’Antennerie*. Thèse de l’Université du Maine, 2012.
- [5] X. Alameda-Pineda and R. Horaud. *A Geometric Approach to Sound Source Localization from Time-Delay Estimates*. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2014, 22 (6), pp. 1082-1095.
- [6] C. H. Knapp and G. Clifford Carter. *The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay*. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 24-4, 1976.
- [7] J. L. Lacoume. *Delay Measurement. From Submarine Acoustics to Oceanic Acoustic Tomography*. Traitement du Signal, 2007.