



## Localisation simultanée de sources par retournement temporel

N. Aloui<sup>a</sup>, K. Raouf<sup>b</sup> et A. Bouallegue<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Gipsa-lab, Grenoble & Sys'Com, Tunis, 11 Rue des Mathématiques, 38400, Saint-Martin-d'Hères, France, 38400 Grenoble, France

<sup>b</sup>LAUM Laboratory, LAUM Laboratory UMR CNRS 6613, University of Maine, 72085 Le Mans, France

<sup>c</sup>ENIT, Rue Béchir Salem Belkhiria Campus universitaire, BP 37, Le Bélvédère, 1002 Tunis, France  
nadia.aloui@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Dans ce papier, nous présentons un système de localisation sonore destiné aux environnements indoor et qui emploie la technique de retournement temporel. Le système utilise la méthode d'accès multiple à répartition par code (ou encore CDMA pour Code Division Multiple Access) afin de localiser simultanément plusieurs sources. Chaque source émet un code CDMA unique modulée à trois fréquences. L'utilisation de plusieurs fréquences permet au système de localiser les sources avec différentes échelles : échelle grossière, échelle moyenne et échelle fine. L'objectif étant d'atteindre une bonne précision de localisation. Les performances de ce système seront données en termes de la fonction de distribution cumulative de l'erreur de localisation.

## 1 Introduction

Pour longtemps, la localisation a été utilisée pour des applications militaires dans les milieux externes dans le but de repérer avec précision la position des combattants sur le terrain. Aujourd'hui, ce domaine connaît un réel essor et offre ses services à divers consommateurs non seulement dans les environnements externes mais également dans les environnements internes.

La localisation en extérieur a été dominée par le système GPS grâce à la couverture maximale qu'il offre et la bonne précision qu'il atteint. Cependant, l'utilisation d'un tel système dans les environnements intérieurs montre une précision de localisation médiocre en raison de l'absence de la visibilité directe entre le récepteur et les satellites GPS. Dès lors, il s'avère être nécessaire de développer d'autres systèmes de localisation destinés aux environnements internes.

Dans ces dernières années, un intérêt considérable a été porté à la conception de ces systèmes, et ce en raison des applications intéressantes qu'ils offrent aussi bien dans le domaine grand public que dans le domaine de la sécurité publique. Parmi ces applications, nous citons à titre d'exemples la détection de l'emplacement d'une personne perdue et la localisation des produits stockés dans un entrepôt. Par ailleurs, la localisation permet de surveiller les équipements coûteux présents dans les hôpitaux et dans les grandes compagnies.

Les techniques de localisation proposées dans la littérature peuvent être principalement classées en deux catégories à savoir la latération et la méthode des signatures.

La latération estime la position de l'objet à localiser à partir de la mesure des distances qui séparent l'objet des éléments de mesure. Cette méthode requiert la connaissance des positions d'au moins trois éléments de mesure pour estimer la position de l'objet en deux dimensions et requiert la présence d'une ligne de vue directe entre l'objet et les éléments de mesure.

La méthode des empreintes ne fait aucune supposition sur l'existence du trajet direct entre l'objet à localiser et les éléments de mesure. Cette méthode compare les données de localisation obtenues pour l'objet d'intérêt à un ensemble de données de localisation préalablement mesurées à des emplacements représentatifs pour les positions possibles de l'objet. La méthode comporte alors deux phases : une phase hors ligne (appelée aussi phase de calibrage ou apprentissage) et une phase en ligne (appelée aussi phase de positionnement ou localisation).

Durant la première phase, un maillage de la zone d'intérêt est effectué : le dispositif de positionnement est mis à des emplacements représentatifs pour les positions possibles de l'objet à localiser. A chaque emplacement, des paramètres du signal permettant d'identifier cette position sont extraits. Ces paramètres, appelés signatures ou

empreintes, sont stockées dans une base de données avec les positions qui y correspondent.

Dans [1], nous avons présenté un système de localisation en intérieur qui déploie la méthode des empreintes et qui utilise le temps d'arrivée des signaux aux niveaux des récepteurs comme empreinte. Ce système a été évalué par expérimentations dans deux configurations à savoir une configuration de localisation d'une source sonore avec la méthode d'accès multiple à répartition dans le temps (ou TDMA pour Time division multiple access) et une configuration de localisation d'un récepteur sonore avec la méthode d'accès multiple à répartition par code (ou CDMA). Le système permet une erreur de 8.5 cm pour 87% des mesures et une erreur de 2.3 cm pour 93% des mesures respectivement pour le cas de localisation du récepteur et le cas de localisation de la source. Par ailleurs, nous avons mené une comparaison des performances de notre système [1] avec celles du système présenté dans [2] et qui est basé sur la méthode de latération. Cette comparaison a montré que notre système permet des performances meilleures et a mis en évidence l'effet de la réverbération acoustique sur les approches de la localisation acoustique comme le temps d'arrivée.

Outre la méthode des empreintes, la technique de retournement temporel présente une technique de focalisation très puissante dans les milieux complexes [3]. Cette méthode repose sur l'invariance de l'équation de propagation d'onde acoustique par renversement de temps. Dans les milieux non dissipatifs, les équations gouvernant les ondes garantissent que pour toute onde divergente de la source, il existe une onde qui converge vers la source initiale. Ceci reste vrai si le milieu de propagation est sujet à des réflexions, des réfractions et des diffusions. La technique de retournement temporel tire ses bénéfices des trajets multiples. En effet, elle réduit le canal multi-trajets à sa fonction d'auto-corrélation qui ressemble à une fonction de Dirac. Dès lors, il s'avère être intéressant de déployer cette technique pour la localisation dans les environnements faisant l'objet des réflexions, des réfractions et des diffusions tels que les environnements intérieurs.

Récemment, la méthode de retournement temporel a été déployée afin de localiser une seule source avec différentes précisions [4]. Le principe de ce système consiste à envoyer simultanément des signaux modulés à deux fréquences. En fonction de la précision souhaitée, le récepteur choisit une fréquence particulière et se déplace, dans la zone d'intérêt à la recherche de la position qui maximise l'énergie du signal reçu. Les performances du système ont été évaluées par simulations. Les résultats obtenus ont été validés expérimentalement. Dans ce papier, nous étendons ce travail au cas de plusieurs sources.

Le système de localisation que nous proposons permet à un récepteur d'atteindre sa destination souhaitée (par exemple, un livre dans une librairie) parmi plusieurs destinations possibles. Le système peut également être

appliqué pour trouver une source qui souhaite se localiser. Dans les deux cas, le récepteur se déplace, dans la zone d'intérêt à la recherche de la position qui maximise l'énergie du signal reçu.

Dans une première partie de ce papier, nous présentons le formalisme de la technique du retournement temporel de point de vue du traitement de signal. Nous décrivons, ensuite, le scénario de notre système de localisation. Dans une troisième partie, nous présentons les performances du système évaluées par simulations.

## 2 Retournement temporel de point de vue de traitement de signal

Dans le cas des systèmes linéaires et invariants dans le temps, pour tout signal  $S(t)$ , émis par une source placée en  $s$ , le signal reçu à un point  $r_i$  s'écrit sous la forme d'une convolution entre le signal  $S(t)$  et la réponse impulsionnelle du canal,  $h_i(s, r_i, t)$ , entre les deux points  $s$  et  $r_i$  :

$$r(t) = S(t) \otimes h_i(s, r_i, t) \quad (1)$$

Chaque transducteur  $i$  du miroir à retournement temporel réémet le signal qu'il a reçu dans une chronologie inverse :

$$r(-t) = S(-t) \otimes h_i(s, r_i, -t) \quad (2)$$

Le signal reçu à une position quelconque  $x$  s'écrit alors :

$$y(x, t) = \sum_i S(-t) \otimes h_i(s, r_i, -t) \otimes h'_i(r_i, x, t) \quad (3)$$

où  $h'_i(r_i, x, t)$  la réponse impulsionnelle entre  $r_i$  et  $x$ .

A la position de la source, on obtient :

$$y(s, t) = \sum_i S(-t) \otimes h_i(s, r_i, -t) \otimes h'_i(r_i, s, t) \quad (4)$$

Le retournement temporel est alors, un filtre adapté au sens du traitement de signal. Durant la première phase, le signal initialement émis est filtré par le canal de propagation. Chaque trajet a une amplitude et un retard particuliers. Le retournement temporel renvoie dans le canal les différentes répliques du signal en compensant leurs retards : Les signaux les plus lents, arrivés en dernier au niveau des transducteurs, sont réémis en premier et les signaux les plus rapides sont réémis en dernier. De ce fait, les signaux arrivent tous en même temps au point de la source et se somment alors de façon cohérente.

En utilisant les enveloppes complexes  $S_e(t)$ ,  $h_e(s, r_i, t)$  et  $h'_e(r_i, x, t)$  du signal  $S(t)$  et des canaux  $h_i(s, r_i, t)$  et  $h'_i(r_i, x, t)$ , nous pouvons écrire  $y_e(x, t)$ , l'enveloppe complexe de  $y(x, t)$ , comme suit :

$$y_e(x, t) = \sum_i S_e(-t) \otimes h_e(s, r_i, -t) \otimes h'_e(r_i, x, t) \quad (5)$$

Etant donné que  $h_e(s, r_i, t) = \sum_k \alpha_{ik} \times e^{-j\omega \tau_{ik}} \delta(t - \tau_{ik})$  et

$h'_e(r_i, x, t) = \sum_l \beta_{il} \times e^{-j\omega \theta_{il}} \delta(t - \theta_{il})$ , où  $\omega = 2\pi \times f$ ,  $f$  étant la fréquence de la porteuse.  $\alpha_{ik}$  et  $\tau_{ik}$  correspondent respectivement à l'atténuation et au retard du trajet  $k$  entre la source et le transducteur  $i$ .  $\beta_{il}$  et  $\theta_{il}$  représentent respectivement l'atténuation et le retard du trajet  $l$  entre le transducteur  $i$  et le récepteur placé à la position  $x$ , nous obtenons alors :

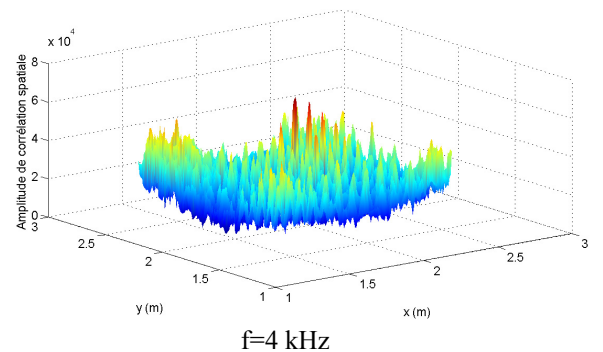
$$y_e(x, t) = \sum_i \sum_{l,k} \alpha_{ik} \beta_{il} e^{j\omega(\tau_{ik} - \theta_{il})} S_e(-t - \tau_{ik} - \theta_{il}) \quad (6)$$

Le diagramme de corrélation spatiale (ou diagramme de directivité par analogie avec la physique) est obtenu à partir de la courbe  $c(x) = \max_t (|y_e(x, t)|)$ ,  $S(t)$  étant un signal impulsionnel. En observant l'expression de  $y_e(x, t)$ , nous constatons que ce diagramme dépend de la fréquence  $f$ .

Sur la figure (1), nous représentons les diagrammes de corrélation spatiale d'une source placée à la position (1.96m, 2.08m, 1.5m) pour différentes valeurs de la fréquence  $f$ . Ce diagramme est calculé aux points situés dans une zone carrée de largeur 1.2 m centrée à la position de la source.

Comme attendu, l'allure du diagramme varie en fonction de  $f$ : le terme  $e^{j\omega(\tau_{ik} - \theta_{il})}$  de l'équation (6) contrôle cette allure. En effet, pour une valeur basse de la fréquence  $f$ , ce terme varie lentement en fonction de la position du récepteur (qui se traduit par le terme  $\theta_{il}$ ) donnant ainsi un diagramme plat. L'augmentation de la valeur de la fréquence générera des pics prématurés dans la zone d'intérêt et réduira la largeur du pic autour de la source. Pour une valeur assez élevée de  $f$ , ce terme varie rapidement générant ainsi un pic aigu à la position de la source et des pics prématurés dans la zone d'intérêt.

Dans un diagramme plat (fréquence basse), la position de la source n'est plus distinguée par rapport à ses proches voisins. Dans un diagramme présentant des pics prématurés (fréquences relativement élevée), le récepteur pourra croire trouver la source en tombant sur l'un de ces pics. Il est alors difficile d'estimer la position de la source en considérant une seule fréquence porteuse. Cependant, il serait possible de varier la fréquence et tirer profit des allures respectives des diagrammes obtenus pour aboutir à une bonne précision de localisation. C'est cette idée-là qui représente la base de notre système de localisation.



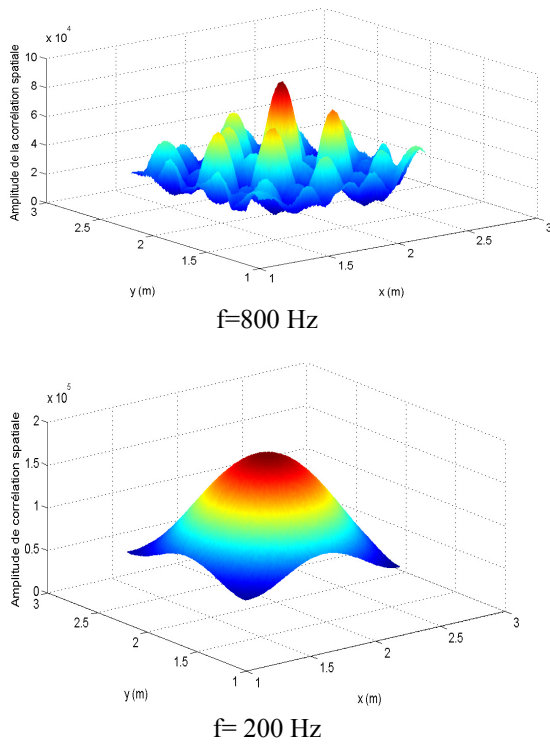


Figure 1: Diagrammes de corrélation spatiale d'une source placée à la position (1.96m, 2.08m, 1.5 m),  $f \in \{200 \text{ Hz}, 800 \text{ Hz}, 4 \text{ kHz}\}$ .

### 3 Système de localisation

Nous bénéficions de la dépendance de l'allure du diagramme de corrélation spatiale vis-à-vis de la fréquence afin de permettre à un récepteur sonore d'atteindre sa destination ou de localiser une source avec différentes précisions.

Un cas plus réaliste serait de considérer plusieurs destinations possibles pour le récepteur. Ce dernier choisit en fonction de ses besoins, la destination qu'il souhaite atteindre. Les destinations, étant équipées chacune d'une source sonore, émettent successivement ou simultanément différents signaux. Au niveau des transducteurs, les signaux reçus sont sommés, enregistrés puis retournés temporellement. Les signaux ainsi obtenus sont réémis simultanément par les transducteurs.

Afin de pouvoir séparer entre les différentes destinations, nous avons recours à la technique d'étalement par séquences directes. Nous assignons alors à chaque source une séquence de Gold unique. Le récepteur qui souhaite atteindre la destination  $j$ , identifiée par le code de Gold noté  $G_j$ , démodule le signal reçu en utilisant la plus basse fréquence et le corrèle avec le code de la source  $j$ . Il se déplace, par la suite, dans la zone d'intérêt jusqu'à atteindre le maximum de diagramme de corrélation spatiale. Une fois le pic de ce diagramme est atteint, le récepteur augmente la fréquence et se met à la recherche de la source dans une zone de dimensions plus réduites et avec une échelle plus fine.

Dans ce qui suit, nous évaluons les performances de notre système de localisation en termes de précision en fonction de l'erreur de localisation.

On appelle «Erreur de localisation» la distance entre la position réelle de l'objet à localiser et sa position estimée. On appelle Précision la fonction de distribution cumulative,

qui à chaque valeur de l'erreur de localisation ( $e$ ), associe le pourcentage des mesures ayant au moins  $e$  pour erreur.

## 4 Résultats

Nous évaluons, par simulations, les performances de notre système en faisant varier le nombre de sources,  $N$ . Nous supposons que les sources sont séparées par une distance  $D$  et disposées dans une zone de dimensions  $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$ .

Pour modéliser les réflexions acoustiques dans la chambre, nous avons adopté le modèle d'Allen Berkeley [5]. Ce dernier modélise les réflexions acoustiques à l'intérieur d'une chambre vide à l'aide de la méthode des images. Le principe de cette méthode se présente comme suit : si le champ sonore émis par une source est réfléchi par une surface rigide, ce champ réfléchi est égal au champ produit par l'image de la source par rapport à cette surface. Le champ total correspond alors à la somme des champs en provenance de la source originale et de ses images. Les images de la source modélisent les réflexions d'ordre 1 alors que les images des images de la source modélisent les réflexions d'ordre supérieur.

La réponse impulsionnelle pour une source, située à une position  $r_s=(x_s, y_s, z_s)$ , et un microphone, placé à  $r=(x, y, z)$ , est alors donnée par :

$$h_i(r_s, r, t) = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \beta_{x_1}^{\lfloor m_x - q \rfloor} \beta_{x_2}^{\lfloor m_x \rfloor} \beta_{y_1}^{\lfloor m_y - j \rfloor} \beta_{y_2}^{\lfloor m_y \rfloor} \beta_{z_1}^{\lfloor m_z - k \rfloor} \beta_{z_2}^{\lfloor m_z \rfloor} \frac{\delta(t - \tau)}{4\pi d} \quad (7)$$

où  $\beta_{x_1}$ ,  $\beta_{x_2}$ ,  $\beta_{y_1}$ ,  $\beta_{y_2}$ ,  $\beta_{z_1}$  et  $\beta_{z_2}$  représentent les coefficients de réflexion des quatre murs, du sol et du plafond.  $\tau$  et  $d$  sont respectivement le retard et la distance du trajet entre la source et le récepteur.  $M = \{(m_x, m_y, m_z)\}$  un vecteur d'entiers et  $P = \{(q, j, k) : q, j, k \in \{0, 1\}\}$ .

Nous avons placé quatre transducteurs aux positions (0.2 m, 2 m, 2 m), (2 m, 0.2 m, 2 m), (2 m, 3.8 m, 2 m) et (3.8 m, 2 m, 2 m) dans une chambre de dimensions  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ . La longueur de la séquence de Gold,  $(g_j(t))_{(j=1, \dots, N)}$ , émise par chacune des  $N$  sources est égale à 127 chips et les fréquences de porteuse sont fixées à 200 Hz, 800 Hz et 4 kHz.

Pour évaluer les performances du système de localisation proposé, nous avons considéré deux valeurs différentes de  $N$  et  $D$ . Premièrement, nous avons placé aléatoirement 4 sources séparées d'une distance  $D=40$  cm dans la chambre comme montré dans la figure (2). Puis, à ces sources, nous avons ajouté 5 autres sources de telle manière à obtenir 9 sources distantes de  $D=20$  cm.

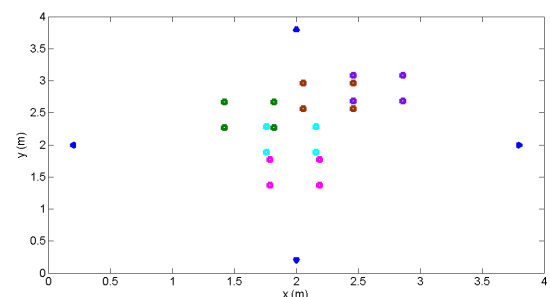


Figure 2: Disposition des sources,  $N=4$ .

Les dimensions de la zone de recherche de la source pour une échelle donnée sont déterminées en fonction de la précision de localisation obtenue avec l'échelle qui lui est inférieure. Les pas de déplacement pour  $f=200$  Hz et  $f=800$  Hz sont respectivement fixés à 6 cm et 4 cm. A la fréquence de 4 kHz, le récepteur se déplace régulièrement avec un pas de 2 cm.

Nous reportons sur les figures (3) et (4) la précision de localisation obtenue avec les trois échelles : 200 Hz, 800 Hz et 4 kHz dans le cas de  $N \in \{4, 9\}$ .

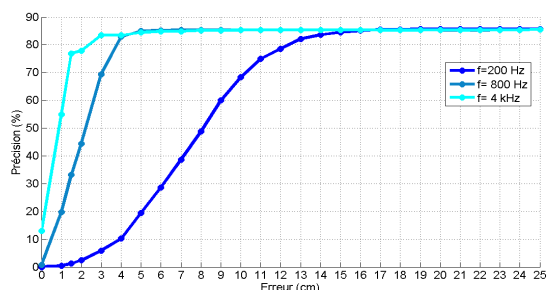


Figure (3) : Précision en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec  $N=4$ .

Pour  $N=4$ , le système permet une erreur de 13 cm avec une précision de 82.18 % pour une fréquence  $f=200$  Hz. A une échelle plus fine (i.e.  $f=800$  Hz), une erreur de 4 cm est obtenue avec environ 82.95 % de réalisations. Le système de localisation ainsi présenté permet une erreur de localisation de 1.5 cm pour 76.89 % des réalisations et une erreur inférieure à 2.3 cm avec une précision de 83.41 %.

Pour  $N=9$ , nous obtenons une erreur de 13 cm avec une précision de 80.95% et ce pour  $f=200$  Hz. A une échelle plus fine (i.e.  $f=800$  Hz), nous atteignons une erreur de 4 cm avec environ 81.12% de réalisations. Avec ces trois échelles, le système de localisation permet une erreur de localisation de 1.5 cm pour 79.50 % des réalisations et une erreur inférieure à 2.3 cm avec une précision de 84.71%.

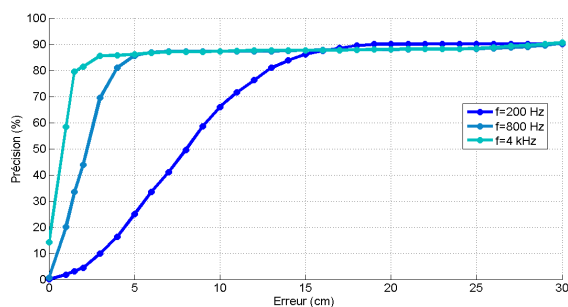


Figure (4) : Précision en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec  $N=9$ .

Les sources présentées dans la figure (2) sont localisées avec une erreur de 1.5 cm pour 71.81% des réalisations dans le cas de  $N=9$ . Une dégradation de précision moyenne de 5% est alors observée. Cette dégradation est due à l'interférence entre les sources.

## 5 Conclusion

Dans ce papier, nous avons présenté un système de localisation basé sur la technique de retournement temporel et la méthode d'accès multiple à répartition par code. Ce

système permet une localisation simultanée de plusieurs sources et avec différentes échelles. Nous avons considéré 3 échelles différentes et deux valeurs pour le nombre de sources,  $N$ , à savoir 4 et 9 sources. Les résultats de simulations ont montré que le système permet une bonne précision de localisation pour les deux valeurs de  $N$  et qu'une légère dégradation de la précision moyenne de l'ordre de 5% a été observée pour  $N=9$  comparé au cas de  $N=4$ .

Enfin, nous envisageons à valider ces résultats de simulations par des mesures et à élargir la zone de recherche de la position de la source.

## Références

- [1] Nadia Aloui, Kosai Raouf, Ammar Bouallegue, Stephane Letourneur and Sonia Zaibi, Performance evaluation of an acoustic indoor localization system based on a fingerprinting technique, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2014, (30 January 2014)
- [2] Cem Sertatila, Mustafa A. Altinkayaa, Kosai Raouf, A Novel Acoustic Indoor Localization System Employing CDMA, Digital Signal Processing, vol.22, no.3, (2012), pp.506-517.
- [3] M.Fink, G.Montaldo, M. Tanter, Time Reversal Acoustics, 2004 IEEE Ultrasonics Symposium, pp.850-859.
- [4] Nadia Aloui, Kosai Raouf, Ammar Bouallegue, Stephane Letourneur and Sonia Zaibi, Multi-resolution Localization Algorithm Based On Time Reversal And Simulated Annealing Algorithm, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation 28-31 Oct 2013 Montbeliard (France)
- [5] J.B. Allen and D.A Berkley, Image method for efficiently simulating small-room acoustics. J. Acoust. Soc. Am. 65(4), Apr. 1979.