

Localisation directe de cibles multiples par un réseau de capteurs distribués en environnement multi-trajet

Nil GARCIA^{1,2}, Martial COULON², Alexander M. HAIMOVICH¹, Jason A. DABIN³, Marco LOPS⁴

¹CWCSRP, New Jersey Institute of Technology, USA

²INP-ENSEEIH/IRIT, Université de Toulouse, France

³SPAWAR Systems Center Pacific, San Diego (CA), USA

⁴DAEIMI, Università degli Studi di Cassino, Italie

nil.garcia@njit.edu, haimovich@njit.edu, martial.coulon@enseeiht.fr, lops@unicas.it

Résumé – Nous considérons le problème de localisation de sources pour des canaux sélectifs en fréquence. Contrairement aux méthodes indirectes utilisant la multilatération, nous proposons une approche directe basée sur une représentation parcimonieuse du problème, qui exploite les propriétés différentes des trajets directs et indirects. Cette méthode présente des performances supérieures à celles des méthodes indirectes, et se révèle robuste au blocage des trajets directs.

Abstract – We address the problem of localizing sources in frequency-selective channels. Contrary to indirect methods using multilateration, we propose a direct localization method, based on a sparse problem modelling, that exploits the differences in the properties of the line of sight versus multipath components. This method exhibits performances better than those obtained with indirect techniques, and is robust to sensors with blocked direct path.

1 Introduction

La localisation de cibles par détection des temps d'arrivée (time-of-arrival - TOA) s'effectue généralement en 2 étapes : les TOA sont d'abord estimés à partir des signaux reçus sur chaque capteur, puis ces mesures de TOA permettent d'estimer la position des différents émetteurs par une technique de multilatération [8]. En environnement multi-trajet, chaque capteur reçoit, outre le signal en vue directe (*line-of-sight*, LOS), de multiple répliques dues aux trajets indirects (*non-line-of-sight*, NLOS). Ces trajets indirects rendent plus difficiles l'estimation des TOA des composantes LOS sur chaque capteur. Le filtrage adapté, qui est la technique la plus simple et la plus connue d'estimation du TOA, voit ainsi ses performances fortement dégradées par l'existence des composantes NLOS. D'autre part, en cas de blocage du trajet direct, le TOA de la première composante captée ne correspond pas à une composante LOS, ce qui détériore la localisation. Diverses techniques ont été proposées pour de telles situations (e.g. [2]) dans le but d'atténuer les effets des composantes NLOS sur la précision de la localisation [3]. Le problème de localisation en présence de multi-trajets a ainsi été amplement abordé, mais la plupart des techniques proposées, que nous qualifierons de localisation indirecte, consistent également à estimer au préalable les TOA afin d'estimer les positions des émetteurs.

Une autre approche consiste à estimer ces positions directement à partir des signaux captés, sans avoir à estimer les TOA. Ce concept de localisation directe a été initialement introduit dans [11], mais n'a été repris que relativement récemment

dans [12], où est présentée la technique dite *Direct Position Determination* (DPD). La technique DPD a été développée pour des environnements sans multi-trajet, pour lesquelles elle présente des performances bien meilleures que les techniques indirectes, car elle prend en compte le fait que les signaux captés proviennent tous d'une même source. Cet écart de performances est surtout notable pour de faibles rapports signal-sur-bruit (SNR), alors que pour de forts SNR les techniques DPD et indirectes sont sensiblement équivalentes.

Les approches par localisation directe en environnement multi-trajet sont encore peu nombreuses. Dans [10], une estimation par maximum de vraisemblance a été proposée pour la localisation d'un unique émetteur, en supposant connu le nombre de multi-trajets. Dans [1], une technique dite *Direct Positioning Estimation* (DPE) est étudiée dans le cas d'un environnement multi-trajet dense, mais elle nécessite la connaissance du profil de puissance du canal (*power delay profile*), et est limitée au cas d'un émetteur unique.

Nous étudions dans cet article une technique de localisation directe en environnement multi-trajet (*direct localization in multipath*, DLM) pour estimer la position de différents émetteurs transmettant des formes d'onde connues par les capteurs. Aucune information a priori n'est supposée sur les composantes NLOS. Ainsi, ces composantes n'apportent pas d'information, et les performances optimales sont alors obtenues en n'utilisant que les composantes LOS [6]. La technique DLM proposée, présentée dans le cadre d'un problème parcimonieux, estime les positions des émetteurs en considérant les compo-

santes NLOS comme des interférences. Les simulations numériques prennent en compte le fait que les composantes LOS pour un émetteur donné proviennent de la même source. La technique présentée ici, qui prend en considération cet état de fait, est constituée de 2 étapes : dans la première, les composantes NLOS sont atténuées, en exploitant le fait que ces composantes arrivent après les composantes LOS. Les positions des émetteurs sont ensuite directement obtenues à partir des signaux résultants par résolution d'un problème d'optimisation, en utilisant le fait que ces composantes LOS proviennent de la même source.

Le modèle de signal est présenté dans la section 2, puis la technique DLM est décrite en section 3. Les performances de cette méthode sont comparées à celles d'autres méthodes dans la section 4.

2 Modèle de signal

On considère un réseau de Q émetteurs et de L capteurs, tous situés dans un même plan. On note \mathbf{p}_q les coordonnées du $q^{\text{ème}}$ émetteur, et $\{s_q(t)\}$ le signal qu'il transmet. Ces Q signaux sont supposés connus par le récepteur. Tous les émetteurs partagent la même largeur de bande B . On considère de plus que la durée d'observation T est inférieure au temps de cohérence du canal, et donc que celui-ci est constant pendant l'observation. On note $\tau_l(\mathbf{p})$ le délai de transmission d'un signal émis d'une position \mathbf{p} et capté par le $l^{\text{ème}}$ capteur. On a donc

$$\tau_l(\mathbf{p}) = \|\mathbf{p} - \mathbf{p}'_l\| / c. \quad (1)$$

où \mathbf{p}'_l est la position du $l^{\text{ème}}$ capteur, c est la vitesse de la lumière, et $\|\cdot\|$ est la norme euclidienne standard. Soit \mathbf{r}_l le signal reçu sur le $l^{\text{ème}}$ capteur, échantillonné sur N points à une fréquence $f_s \geq B$. \mathbf{r}_l peut s'écrire sous la forme [5]

$$\mathbf{r}_l = \sum_{q=1}^Q \left(\tilde{a}_{lq} \mathbf{s}_q(\tau_l(\mathbf{p}_q)) + \sum_{m=1}^{M_{lq}} \tilde{a}_{lq}^{(m)} \mathbf{s}_q(\tau_{lq}^{(m)}) \right) + \mathbf{n}_l, \quad (2)$$

où M_{lq} est le nombre (inconnu) de chemins NLOS entre le $q^{\text{ème}}$ émetteur et le $l^{\text{ème}}$ capteur, $\tau_{lq}^{(m)}$ est le retard de la $m^{\text{ème}}$ composante NLOS, $\mathbf{s}_q(\tau)$ est un vecteur normalisé de N points obtenu par échantillonnage du signal $s_q(t)$ retardé d'un délai τ , et \mathbf{n}_l représente le bruit blanc gaussien. Dans (2), le premier terme correspond aux trajets directs, alors que la seconde somme correspond aux trajets indirects (NLOS).

3 Technique de localisation directe

Les temps de propagation des trajets indirects dans (2) sont considérés comme aléatoires, sans connaissance a priori de leur loi de probabilité. Ainsi, l'information transmise par les émetteurs est seulement contenue dans la composante LOS, comme cela a été analysé dans [6], qui montre que la borne de Cramér-Rao augmente en présence des composantes NLOS. La stratégie optimale consiste donc à réduire autant que possible les composantes NLOS, pour ne baser l'estimation des positions que sur les composantes LOS. Dans le cas des techniques indirectes, les TOA des composantes LOS sont estimées, puis utilisées pour localiser les émetteurs par multilatération. Cependant, ces techniques indirectes sont sous-optimales car elles estiment indépendamment les TOA d'un capteur à l'autre, sans

prendre en compte le fait que les composantes LOS pour un émetteur donné proviennent de la même source. La technique présentée ici, qui prend en considération cet état de fait, est constituée de 2 étapes : dans la première, les composantes NLOS sont atténuées, en exploitant le fait que ces composantes arrivent après les composantes LOS. Les positions des émetteurs sont ensuite directement obtenues à partir des signaux résultants par résolution d'un problème d'optimisation, en utilisant le fait que ces composantes LOS proviennent de la même source.

3.1 Atténuation de l'interférence NLOS

On cherche dans un premier temps à estimer les TOA des composantes NLOS, non pas pour estimer les positions recherchées, mais pour éliminer, ou en tout cas réduire ces composantes NLOS. Supposons que P_{lq} arrivées sont détectées sur le capteur l pour le signal q . On note $\{\hat{\tau}_{lq}^1, \dots, \hat{\tau}_{lq}^{P_{lq}}\}$ les mesures de TOA correspondantes. Les amplitudes associées à ces arrivées peuvent être estimées en résolvant les problème [4]

$$\arg \min_{\{a_{lq}^p\}} \left\| \mathbf{r}_l - \sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^{P_{lq}} a_{lq}^p \mathbf{s}_q(\hat{\tau}_{lq}^p) \right\|^2. \quad (3)$$

On réduit alors les interférences dues aux composantes NLOS du signal \mathbf{r}_l en définissant le signal

$$\hat{\mathbf{r}}_l = \mathbf{r}_l - \sum_{q=1}^Q \sum_{p=2}^{P_{lq}} \hat{a}_{lq}^p \mathbf{s}_q(\hat{\tau}_{lq}^p), \quad (4)$$

où \hat{a}_{lq}^p sont les amplitudes estimées. Si toutes les composantes NLOS étaient effectivement éliminées, on pourrait utiliser une technique directe de localisation en absence de multi-trajet telle que la technique DPD. Evidemment, ce n'est pas le cas : en effet, d'une part, la composante LOS n'est pas toujours présente, et donc la première composante NLOS est dans ce cas conservée, et d'autre part certaines composantes NLOS peuvent ne pas être détectées, ou les amplitudes correspondantes mal estimées.

3.2 Localisation directe basée sur la parcimonie

Nous exprimons dans ce paragraphe le signal \mathbf{r}_l dans une représentation parcimonieuse, ce qui permet d'appliquer une variation de la technique du Groupe Lasso proposée dans [9] pour résoudre le problème (3). Pour cela, notons τ_{\max} le temps de propagation maximal supposé. On discrétise alors l'intervalle des TOA $[0, \tau_{\max}]$ en un ensemble fini $\mathcal{D} = \{0, \tau_{\text{res}}, \dots, (D-1)\tau_{\text{res}}\}$, avec $D = \lfloor \tau_{\max} / \tau_{\text{res}} \rfloor$, où τ_{res} spécifie la résolution de cette discrétisation. La réduction d'interférence (4) n'étant pas parfaite, la forme générale (2) pour \mathbf{r}_l , peut être réutilisée pour $\hat{\mathbf{r}}_l$, qui peut alors s'écrire sous la forme

$$\hat{\mathbf{r}}_l \approx \sum_{q=1}^Q \mathbf{A}_q \mathbf{x}_{lq} + \mathbf{n}_l, \quad (5)$$

où \mathbf{A}_q est la matrice définie par $\mathbf{A}_q = [\mathbf{s}_q(0) \ \cdots \ \mathbf{s}_q((D-1)\tau_{\text{res}})]$ norme ℓ_2/ℓ_1 , qui permet d'aboutir à une parcimonie par ligne de la matrice \mathbf{Y}_q , et donc une parcimonie conjointe des vecteurs la constituant, à une minimisation en norme ℓ_1 , qui permet d'obtenir la parcimonie des vecteurs $(\mathbf{z}_{lq})_{l=1,\dots,L}$ individuellement. Le problème (9) fait partie de la classe des problèmes dits *second-order cone programming* (SOCP) [7], formant eux-mêmes une sous-famille de problèmes convexes, pour laquelle des méthodes spécifiques ont été proposées, plus efficaces que les techniques de résolution de problèmes convexes génériques. La résolution de ce problème permet d'aboutir aux estimations $\{\hat{\mathbf{Y}}_q\}_{q=1}^Q$, dont les lignes non-nulles fournissent les estimations des positions recherchées. Le choix des pondérations $\{w_q\}_{q=1}^Q$ et du seuil ϵ ne peut être discuté ici pour manque de place, mais le lecteur intéressé pourra se reporter à [5], où est également détaillé l'algorithme DLM d'estimation des positions, basé sur le problème d'optimisation précédent.

$$\{\mathbf{x}_{lq}\}_d = \begin{cases} \tilde{a}_{lq} & \text{si } (d-1)\tau_{\text{res}} \approx \tau_l(\mathbf{p}_q) \\ \tilde{a}_{lq}^{(m)} & \text{si } (d-1)\tau_{\text{res}} \approx \tau_{lq}^{(m)} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (6)$$

Le vecteur \mathbf{x}_{lq} peut être considéré comme parcimonieux lorsque la résolution est suffisamment fine pour supposer que $D \gg M_{lq}$, $\forall l, q$. Dans la méthode d'estimation directe que nous proposons ici, nous cherchons à obtenir une expression parcimonieuse des vecteurs \mathbf{x}_{lq} en fonction des positions des émetteurs. A cet effet, on discrétise la zone où sont censés se trouver les émetteurs en G cellules carrées de centre $\{\boldsymbol{\theta}_1, \dots, \boldsymbol{\theta}_G\}$. On peut alors écrire

$$\{\mathbf{x}_{lq}\}_d = \sum_{\substack{g \text{ tel que} \\ \tilde{\tau}_l(\boldsymbol{\theta}_g) = (d-1)\tau_{\text{res}}}} \{\mathbf{y}_{lq}\}_g + \{\mathbf{z}_{lq}\}_d, \quad (7)$$

où $\mathbf{y}_{lq} \in \mathbb{C}^G$ et $\mathbf{z}_{lq} \in \mathbb{C}^D$ sont respectivement des représentations parcimonieuses des composantes LOS et NLOS entre l'émetteur q et le capteur l , définies par

$$\{\mathbf{y}_{lq}\}_g = \begin{cases} \tilde{a}_{lq} & \text{si } \boldsymbol{\theta}_g \approx \mathbf{p}_q \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (8a)$$

$$\{\mathbf{z}_{lq}\}_d = \begin{cases} \tilde{a}_{lq}^{(m)} & \text{si } (d-1)\tau_{\text{res}} \approx \tau_{lq}^{(m)} \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad (8b)$$

avec $\tilde{\tau}_l(\boldsymbol{\theta}) = \arg \min_{\tau \in \mathcal{D}} |\tau_l(\boldsymbol{\theta}) - \tau|$. Ainsi, les composantes LOS s'expriment en fonction des positions des émetteurs, qui sont les paramètres d'intérêt, alors que les composantes NLOS, qui sont les paramètres de nuisance, s'expriment toujours en fonction des TOA. Pour distinguer les composantes LOS et NLOS, on utilise le fait que les composantes LOS sont issues de la même position. Ainsi, pour un émetteur q donné, les vecteurs $(\mathbf{y}_{lq})_{l=1,\dots,L}$ possèdent chacun au plus une composante non nulle associée à la position \mathbf{p}_q : ils sont donc conjointement parcimonieux. Nous devons donc avoir recours à une technique de reconstruction qui permette d'assurer cette parcimonie conjointe entre les vecteurs $(\mathbf{y}_{lq})_{l=1,\dots,L}$, alors que les vecteurs $(\mathbf{z}_{lq})_{l=1,\dots,L}$ sont également parcimonieux, mais pas conjointement. Selon [9], ces deux différents types de parcimonie peuvent être considérés globalement par le problème d'optimisation convexe suivant :

$$\min_{\{\mathbf{y}_{lq}\}, \{\mathbf{z}_{lq}\}} \sum_{q=1}^Q w_q \|\mathbf{Y}_q\|_{2,1} + \sum_{q=1}^Q \sum_{l=1}^L \|\mathbf{z}_{lq}\|_1 \quad (9a)$$

$$\text{avec } \sum_{l=1}^L \left\| \mathbf{r}_l - \sum_{q=1}^Q \mathbf{A}_q \mathbf{x}_{lq} \right\|_2 \leq \epsilon \quad (9b)$$

$$\{\mathbf{x}_{lq}\}_d = \sum_{\substack{g \text{ tel que} \\ \tilde{\tau}_l(\boldsymbol{\theta}_g) = (d-1)\tau_{\text{res}}}} \{\mathbf{y}_{lq}\}_g + \{\mathbf{z}_{lq}\}_d \quad \forall l, q \quad (9c)$$

où $\mathbf{Y}_q = [\mathbf{y}_{1q} \ \cdots \ \mathbf{y}_{Lq}]$, $\{w_q\}_{q=1}^Q$ sont des pondérations, $\|\cdot\|_{2,1}$ et $\|\cdot\|_1$ sont respectivement les normes ℓ_2/ℓ_1 et ℓ_1 classiques, et ϵ permet de borner les erreurs d'estimation. Le principe du problème (9) est de combiner une minimisation en

4 Résultats de simulation

Pour toutes les simulations, les émetteurs et capteurs sont positionnés dans un carré 2x2km, divisé en une grille de 40000 cellules de 10x10m. Les signaux émis ont une largeur de bande de $B = 1\text{MHz}$ et une durée de $50\mu\text{s}$: avec une fréquence d'échantillonnage de 2MHz, chaque capteur collecte $N = 100$ échantillons. Pour chaque émetteur, le SNR est défini par $\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{N \sum_{l=1}^L P_l}{\sigma_n^2} \right)$, où P_l est la puissance de la composante LOS

entre l'émetteur et le capteur l , et σ_n^2 est la variance du bruit après échantillonnage. Les puissances des composantes LOS et NLOS suivent une loi log-normale d'écart-type 5dB. Les figures présentées ici comparent toute la technique DPD, qui suppose l'absence de composante NLOS, avec la technique proposée DLM. Sont également représentées, à titre de référence, les performances de 2 techniques indirectes : la première (notée TI-FA) estime les TOA par simple filtrage adapté, la seconde (notée TI-SR) par une méthode de super-résolution [4], spécialement conçue pour les environnements multi-trajet. Ces 2 techniques utilisent également la méthode de multilatération proposée dans [2], qui permet d'atténuer le problème du blocage éventuel des trajets directs. La résolution de la localisation, donnée par la formule $r = \frac{c}{B}$, est égale à 300m. La probabilité de bonne localisation d'un émetteur est ici définie par $P_c = \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z \mathbb{1}(|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}^{(z)}| < \frac{r}{3})$,

où \mathbf{p} est la position réelle de l'émetteur, Z est le nombre de réalisations ($Z = 1000$ ici), $\hat{\mathbf{p}}^{(z)}$ est la position estimée de l'émetteur à la $z^{\text{ème}}$ réalisation, et $\mathbb{1}(\cdot)$ est la fonction indicatrice. D'autre part, on définit l'erreur quadratique moyenne normalisée (EQM)

par $\text{EQM} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z (\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}^{(z)})^2}$.

Tout d'abord, 4 capteurs sont positionnés aux coordonnées (500m,500m), (500m,-500m), (-500m,500m) et (-500m,-500m), et 1 seul émetteur est positionné au point (0,0). Tous les trajets ont la même puissance. Tous les capteurs reçoivent une composante LOS, sauf le capteur 4 pour lequel cette composante est bloquée. Les capteurs 3 et 4 reçoivent chacun une composante NLOS, de longueur de chemin en excès [5] res-

pectivement de 200m et de 400m. La fig. 1 montre la probabilité de bonne localisation en fonction du SNR. La technique DLM présente des performances supérieures aux autres, avec notamment une amélioration de 2dB à SNR = 20dB par rapport à la méthode TI-SR. La fig. 2 montre l'EQM en fonction du SNR. On constate que pour un SNR entre 20 et 30dB, l'erreur de la méthode DLM est un peu plus importante qu'avec la technique TI-SR. Ceci est dû au fait qu'en présence de multi-trajet, la méthode DLM peut localiser les émetteurs avec une forte probabilité, mais lorsqu'elle n'y parvient pas, les erreurs d'estimation peuvent être importantes, à cause de l'approche parcimonieuse employée.

Nous positionnons ensuite 5 capteurs aux coordonnées (500m, 500m), (500m, -500m), (-500m, 500m), (-500m, -500m) et (0,0), et un seul émetteur au point (160m, 130m). Tous les capteurs, sauf celui en (0,0), reçoivent une composante LOS. De plus, ils reçoivent tous des composantes NLOS dont les instants d'arrivée suivent un processus de Poisson, avec une moyenne de 1 μ s entre 2 arrivées successives. Le profil de puissance considéré est de type exponentiel [5]. La fig. 3 montre que les performances de toutes les méthodes se dégradent lorsque l'écart-type de l'étalement temporel (*RMS delay spread*) augmente. La méthode DLM se montre de nouveau plus performante que les autres. Pour de faibles valeurs de *RMS delay spread*, les composantes NLOS sont quasiment inexistantes, et les méthodes DPD et DLM sont équivalentes. Quand le *RMS delay spread* augmente, la méthode DLM devient bien plus performante que la méthode DPD, ce qui montre l'intérêt d'avoir conçu une méthode spécifiquement adaptée aux multi-trajets.

5 Conclusion

Cet article a présenté une nouvelle technique de localisation directe d'émetteurs multiples, adaptée aux environnements multi-trajet. Cette méthode, basée sur une modélisation parcimonieuse du problème, est robuste à l'absence éventuelle de trajet direct, et ne nécessite aucune connaissance a priori sur le canal. Elle présente des performances en termes de probabilités de bonne localisation supérieures à celles des techniques indirectes, où la localisation s'effectue à partir des estimations de temps d'arrivée.

Références

- [1] O. Bialer, D. Raphaeli and A. J. Weiss, "Maximum-likelihood direct position estimation in dense multipath," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 62, pp. 2069–2079, Juin 2013.
- [2] P. C. Chen, "A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation," *1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 1, pp. 316–320, Sept. 1999.
- [3] C. M. De Dominicis et al., "Timestamping of IEEE 802.15.4a CSS Signals for wireless ranging and time synchronization," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, pp. 2286–2296, 2013.
- [4] J. J. Fuchs, "Multipath time-delay detection and estimation," *IEEE Trans. on Sig. Proc.*, vol. 47, pp. 237–243, Jan. 1999.
- [5] N. Garcia, M. Lops, M. Coulon, A.M. Haimovich, J.A. Dabin, "Direct Localization of Emitters Using Widely Spaced Sensors

- in Multipath Environments," *Proc. of 48th Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computer*, Asilomar, Nov. 2014.
- [6] S. Gezici, Z. Tian, G.B. Biannakis, H. Kobayashi, A.F. Molisch, H.V. Poor, Z. Sahinoglu, "Localization via ultrawideband radios," *IEEE Sig. Proc. Mag.*, pp. 70–84, Juillet 2005.
- [7] F. Alizadeh and D. Goldfarb, *Second-Order Cone Programming*, Mathematical Programming, pp. 3–51, 2003.
- [8] I. Güvenc and C. C. Chong, "A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, pp. 107–124, 2009.
- [9] G. Obozinski, L. Jacob and J. P. Vert, "Group Lasso with Overlaps : the Latent Group Lasso approach," *preprint arXiv : 1110.0413*, Oct. 2011.
- [10] K. Papakonstantinou and D. Slock, "Direct location estimation using single-bounce NLOS time-varying channel models," *IEEE 68th Vehicular Tech. Conf.*, pp. 1–5, Sept. 2008.
- [11] M. Wax and T. Kailath, "Optimum localization of multiple sources by passive arrays," *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 31, pp. 1210–1217, Oct. 1983.
- [12] A. J. Weiss and A. Amar, "Direct position determination of multiple radio signals," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2005, pp. 37–49, Jan. 2005.

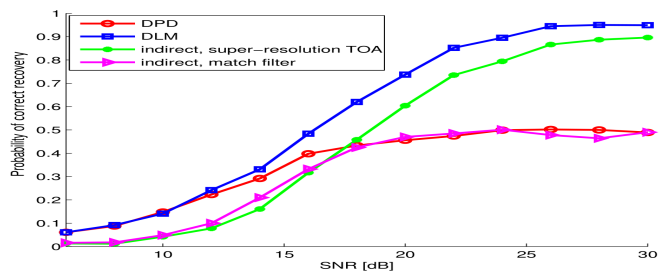


FIGURE 1 – Probabilité de bonne localisation vs. SNR.

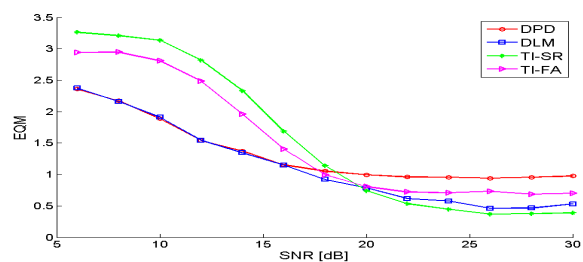


FIGURE 2 – Erreur quadratique moyenne vs. SNR.

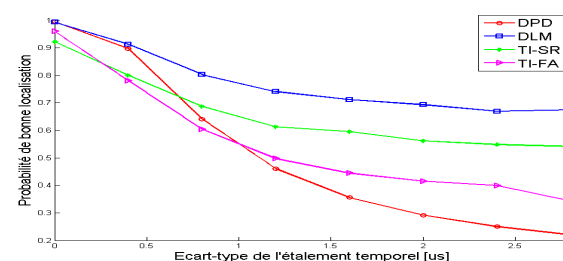


FIGURE 3 – Probabilité de bonne localisation vs. étalement temporel.