

Traitement de Signal Multifréquentiel Appliqué à l'Estimation Angulaire de Sources Corrélées

Serge Paré, étudiant 2^e cycle

Dr Dominic Grenier, directeur de recherche

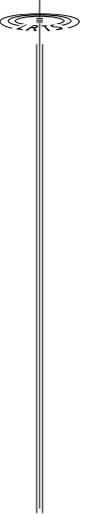
Abstract: Second-order methods used in array signal processing for high resolution directions-of-arrival estimation (DOA) are limited by the correlation between emitting sources. DEESE and spatial smoothing are algorithms which use space diversity to decorrelate and to identify sources locations without losing their high-resolution effectiveness. The decorrelation given by DEESE and spatial smoothing depends on phase relation between sources. Because phase and frequency are closely related, decorrelation can be improved by the use of multiple frequency.

Résumé: Les méthodes du deuxième ordre basées sur les notions de sous-espaces source et bruit utilisées en traitement de signal pour l'estimation de la direction des sources (DOA) à l'aide d'un réseau de capteurs sont inefficaces lorsque la corrélation entre les sources rayonnantes est élevée. Les algorithmes basés sur la diversité d'espace tels le lissage spatial et DEESE offrent une décorrélation élevée dans certaines situations et faible dans d'autres. On démontre que le facteur de corrélation effectif après traitement par diversité d'espace dépend de la relation de phase entre les sources laquelle varie selon la fréquence. La décorrélation peut donc être améliorée en opérant à fréquence multiple.

Les techniques de traitement de signal superrésolutives (MUSIC, ESPRIT, etc...) basées sur la matrice d'autocorrélation spatiale \mathbf{R}_{xx} et sur l'identification des sous-espaces source et bruit permettent la localisation des sources rayonnantes avec un pouvoir résolvant dépassant le critère de Rayleigh.

Ces algorithmes sont assez performants du point de vue de l'identification des sources. Une prémisses fondamentale pour le bon fonctionnement de ces algorithmes est que la corrélation entre les sources rayonnantes ne soit pas trop élevée (<70%). Pour des situations réelles comme l'écoute active en détection radar (propagation multitrajet et brouilleur radar), la corrélation entre les sources rayonnantes est souvent élevée et les performances de ces algorithmes sont grandement dégradées.

Les algorithmes de décorrélation tels DEESE (DÉcomposition de l'Espace Source Estimé)[1] et le lissage spatial (spatial smoothing) permettent de composer avec un environnement



fortement corrélé (spatialement non stationnaire). Ces algorithmes basés sur la diversité d'espace agissent comme prétraitement sur la matrice d'autocorrélation spatiale \mathbf{R}_{xx} .

Ces algorithmes fonctionnent bien dans certaines situations et moins bien dans d'autres. Une étude plus approfondie a permis de comprendre que le facteur de corrélation effectif après traitement par diversité d'espace était fonction à la fois du déphasage spatial entre les sources φ_{ij} (direction des sources) et du déphasage entre les fronts d'ondes incidents sur le réseau τ_{ij} . Il est démontré que le facteur de corrélation effectif après traitement $\delta_{ij(r)}$ est égal à [2]:

$$\delta_{ij(r)} = \frac{\delta_{ij}}{r} \cdot \frac{\sin(r\varphi_{ij}/2)}{\sin(\varphi_{ij}/2)} \cdot \cos(\tau_{ij}) \quad (1)$$

$$\varphi_{ij} = \frac{2\pi}{v} fd(\sin\theta_i - \sin\theta_j) \quad \tau_{ij} = \frac{2\pi}{v} f\Delta d$$

où r est le nombre de sous-réseaux, d est la distance entre les capteurs, θ_i est la position spatiale de la source i , f est la fréquence d'opération, Δd est le déphasage entre les fronts d'ondes incidents sur le réseau de capteurs converti en distance, δ_{ij} est le facteur de corrélation effectif entre les sources i et j avant traitement par diversité d'espace et v est la vitesse de propagation de l'onde qui dépend du milieu physique de propagation (aérien, sous-marin, etc...) et du type d'onde utilisé (acoustique, électromagnétique, etc...). Comme φ_{ij} et τ_{ij} dépendent de la fréquence d'opération, il est possible d'améliorer la décorrélation en jumelant la diversité en fréquences à la diversité d'espace.

L'algorithme utilisant la diversité en fréquences doit permettre la récupération d'une matrice d'autocorrélation spatiale se rapprochant le plus de la forme Toeplitz c'est-à-dire de la stationnarité spatiale. Deux solutions sont possibles:

La première solution consiste à rechercher la fréquence optimale f_{opt} ou la bande de fréquences permettant une forte décorrélation entre toutes les sources à partir d'un grand éventail de fréquences. Les algorithmes de décorrélation sont appliqués sur chacune des matrices d'autocorrélation $\mathbf{R}_{xx}(f_i)$. L'analyse des valeurs propres permet l'identification des matrices susceptibles de donner la meilleure décorrélation possible sur la bande des fréquences émises.

La deuxième solution consiste en l'utilisation des matrices focalisantes [3]. Le but des matrices focalisantes est de transposer chacune des matrices d'autocorrélation spatiale provenant de chacune des fréquences $\mathbf{R}_{xx}(f_i)$, à la fréquence de focalisation f_o . Les algorithmes de décorrélation peuvent par la suite être utilisés sur la somme des matrices focalisées. Le principal désavantage de cette méthode est qu'elle requiert un estimé préalable de l'emplacement spatial des sources et force donc le processus à être adaptatif. Dans le cas d'une focalisation parfaite et après décorrélation par diversité d'espace, le facteur de corrélation effectif total devient:

$$\delta_{ij(r)} = \frac{\delta_{ij}}{J \cdot r} \cdot \frac{\sin(r\varphi_{ij}/2)}{\sin(\varphi_{ij}/2)} \cdot \frac{\sin(J \cdot \pi\Delta d\Delta f/v)}{\sin(\pi\Delta d\Delta f/v)} \cdot \cos(\pi\Delta d/v(f_I + f_J)) \quad (2)$$

où J est le nombre de fréquences utilisées pour la focalisation, Δf est la valeur de l'incrément entre les fréquences émises, f_I et f_J sont les fréquences délimitant le spectre reçu.

Les graphiques qui suivent sont le résultat d'une simulation dans la bande X. 33 fréquences discrètes linéairement espacées ont été utilisées pour l'identification de 4 sources entièrement corrélées (30° , 70° , -30° , -70°) avec un réseau linéaire de 11 capteurs omnidirectionnels.

Les graphiques a) et b) représentent respectivement les valeurs propres après traitement avec DEESE et le maximum de corrélation pour chaque ensemble de deux sources après traitement avec DEESE. La bande de fréquences s'étalant de 8 à 9.5 GHz permet une décorrélation de toutes les sources d'au moins 70% avec un minimum de 10% à 8.5 GHz, fréquence pour laquelle la quatrième valeur propre est pratiquement à son plus haut niveau. Pour les fréquences plus élevées, la quatrième valeur propre chute car il existe deux sources fortement corrélées malgré le traitement par diversité d'espace. Les graphiques c) et d) illustrent le spectre obtenu par focalisation des 33 matrices d'autocorrélation spatiale avec et sans focalisation.

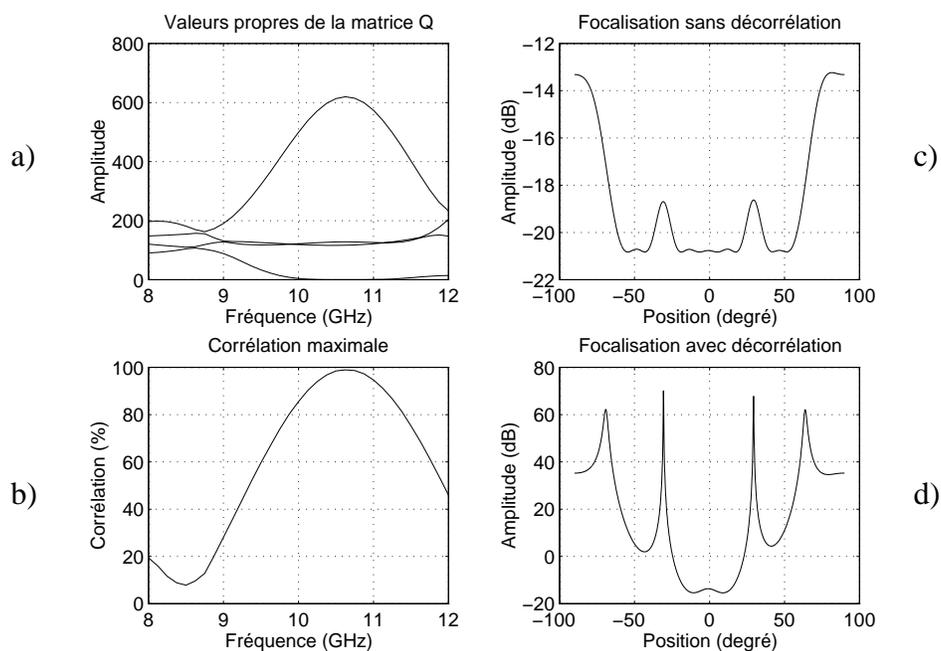


Figure 1 a) et b) Analyse par les valeurs propres; c) et d) Focalisation

[1] D. Grenier, *Application du traitement du signal à l'analyse de sources corrélées à bande étroite*, Thèse de Ph. D., Université Laval, Québec (Canada), fév. 1989, chap. 5.

[2] D. Grenier, *Effective Correlation Factor After Translationnal and Rotationnal Invariances Processing: Spatial Smoothing and DEESE Methods*, in Proc. of 7th SSAP Workshop, Québec (CANADA), Juin 1994, pp. 121-125.

[3] H. Hung and M. Kaveh, *Focusing Matrices for Coherent Signal-Subspace Processing*, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Proc., pp. 1272-1281, Août 1988

Traitement de Signal Multifréquentiel Appliqué à l'Estimation Angulaire de Sources Corrélées

Serge Paré, étudiant 2^e cycle

Dr Dominic Grenier, directeur de recherche

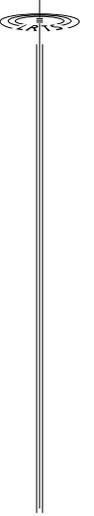
Abstract: Second-order methods used in array signal processing for high resolution directions-of-arrival estimation (DOA) are limited by the correlation between emitting sources. DEESE and spatial smoothing are algorithms which use space diversity to decorrelate and to identify sources locations without losing their high-resolution effectiveness. The decorrelation given by DEESE and spatial smoothing depends on phase relation between sources. Because phase and frequency are closely related, decorrelation can be improved by the use of multiple frequency.

Résumé: Les méthodes du deuxième ordre basées sur les notions de sous-espaces source et bruit utilisées en traitement de signal pour l'estimation de la direction des sources (DOA) à l'aide d'un réseau de capteurs sont inefficaces lorsque la corrélation entre les sources rayonnantes est élevée. Les algorithmes basés sur la diversité d'espace tels le lissage spatial et DEESE offrent une décorrélation élevée dans certaines situations et faible dans d'autres. On démontre que le facteur de corrélation effectif après traitement par diversité d'espace dépend de la relation de phase entre les sources laquelle varie selon la fréquence. La décorrélation peut donc être améliorée en opérant à fréquence multiple.

Les techniques de traitement de signal superrésolutives (MUSIC, ESPRIT, etc...) basées sur la matrice d'autocorrélation spatiale \mathbf{R}_{xx} et sur l'identification des sous-espaces source et bruit permettent la localisation des sources rayonnantes avec un pouvoir résolvant dépassant le critère de Rayleigh.

Ces algorithmes sont assez performants du point de vue de l'identification des sources. Une prémisses fondamentale pour le bon fonctionnement de ces algorithmes est que la corrélation entre les sources rayonnantes ne soit pas trop élevée (<70%). Pour des situations réelles comme l'écoute active en détection radar (propagation multitrajet et brouilleur radar), la corrélation entre les sources rayonnantes est souvent élevée et les performances de ces algorithmes sont grandement dégradées.

Les algorithmes de décorrélation tels DEESE (DÉcomposition de l'Espace Source Estimé)[1] et le lissage spatial (spatial smoothing) permettent de composer avec un environnement



fortement corrélé (spatialement non stationnaire). Ces algorithmes basés sur la diversité d'espace agissent comme prétraitement sur la matrice d'autocorrélation spatiale \mathbf{R}_{xx} .

Ces algorithmes fonctionnent bien dans certaines situations et moins bien dans d'autres. Une étude plus approfondie a permis de comprendre que le facteur de corrélation effectif après traitement par diversité d'espace était fonction à la fois du déphasage spatial entre les sources φ_{ij} (direction des sources) et du déphasage entre les fronts d'ondes incidents sur le réseau τ_{ij} . Il est démontré que le facteur de corrélation effectif après traitement $\delta_{ij(r)}$ est égal à [2]:

$$\delta_{ij(r)} = \frac{\delta_{ij}}{r} \cdot \frac{\sin(r\varphi_{ij}/2)}{\sin(\varphi_{ij}/2)} \cdot \cos(\tau_{ij}) \quad (1)$$

$$\varphi_{ij} = \frac{2\pi}{v} fd(\sin\theta_i - \sin\theta_j) \quad \tau_{ij} = \frac{2\pi}{v} f\Delta d$$

où r est le nombre de sous-réseaux, d est la distance entre les capteurs, θ_i est la position spatiale de la source i , f est la fréquence d'opération, Δd est le déphasage entre les fronts d'ondes incidents sur le réseau de capteurs converti en distance, δ_{ij} est le facteur de corrélation effectif entre les sources i et j avant traitement par diversité d'espace et v est la vitesse de propagation de l'onde qui dépend du milieu physique de propagation (aérien, sous-marin, etc...) et du type d'onde utilisé (acoustique, électromagnétique, etc...). Comme φ_{ij} et τ_{ij} dépendent de la fréquence d'opération, il est possible d'améliorer la décorrélation en jumelant la diversité en fréquences à la diversité d'espace.

L'algorithme utilisant la diversité en fréquences doit permettre la récupération d'une matrice d'autocorrélation spatiale se rapprochant le plus de la forme Toeplitz c'est-à-dire de la stationnarité spatiale. Deux solutions sont possibles:

La première solution consiste à rechercher la fréquence optimale f_{opt} ou la bande de fréquences permettant une forte décorrélation entre toutes les sources à partir d'un grand éventail de fréquences. Les algorithmes de décorrélation sont appliqués sur chacune des matrices d'autocorrélation $\mathbf{R}_{xx}(f_i)$. L'analyse des valeurs propres permet l'identification des matrices susceptibles de donner la meilleure décorrélation possible sur la bande des fréquences émises.

La deuxième solution consiste en l'utilisation des matrices focalisantes [3]. Le but des matrices focalisantes est de transposer chacune des matrices d'autocorrélation spatiale provenant de chacune des fréquences $\mathbf{R}_{xx}(f_i)$, à la fréquence de focalisation f_o . Les algorithmes de décorrélation peuvent par la suite être utilisés sur la somme des matrices focalisées. Le principal désavantage de cette méthode est qu'elle requiert un estimé préalable de l'emplacement spatial des sources et force donc le processus à être adaptatif. Dans le cas d'une focalisation parfaite et après décorrélation par diversité d'espace, le facteur de corrélation effectif total devient:

$$\delta_{ij(r)} = \frac{\delta_{ij}}{J \cdot r} \cdot \frac{\sin(r\varphi_{ij}/2)}{\sin(\varphi_{ij}/2)} \cdot \frac{\sin(J \cdot \pi\Delta d\Delta f/v)}{\sin(\pi\Delta d\Delta f/v)} \cdot \cos(\pi\Delta d/v(f_I + f_J)) \quad (2)$$

où J est le nombre de fréquences utilisées pour la focalisation, Δf est la valeur de l'incrément entre les fréquences émises, f_I et f_J sont les fréquences délimitant le spectre reçu.

Les graphiques qui suivent sont le résultat d'une simulation dans la bande X. 33 fréquences discrètes linéairement espacées ont été utilisées pour l'identification de 4 sources entièrement corrélées (30° , 70° , -30° , -70°) avec un réseau linéaire de 11 capteurs omnidirectionnels.

Les graphiques a) et b) représentent respectivement les valeurs propres après traitement avec DEESE et le maximum de corrélation pour chaque ensemble de deux sources après traitement avec DEESE. La bande de fréquences s'étalant de 8 à 9.5 GHz permet une décorrélation de toutes les sources d'au moins 70% avec un minimum de 10% à 8.5 GHz, fréquence pour laquelle la quatrième valeur propre est pratiquement à son plus haut niveau. Pour les fréquences plus élevées, la quatrième valeur propre chute car il existe deux sources fortement corrélées malgré le traitement par diversité d'espace. Les graphiques c) et d) illustrent le spectre obtenu par focalisation des 33 matrices d'autocorrélation spatiale avec et sans focalisation.

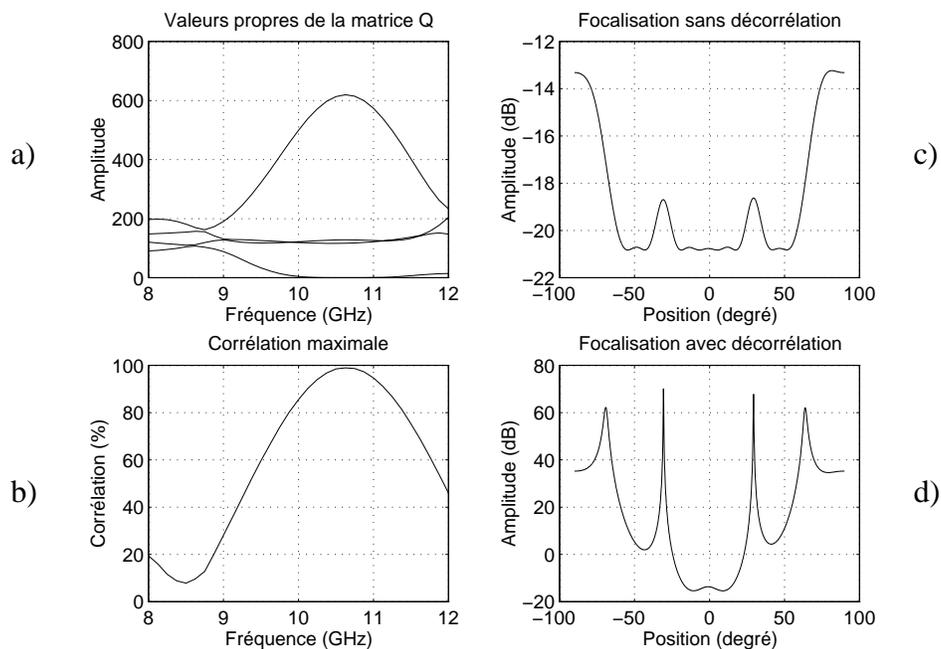


Figure 1 a) et b) Analyse par les valeurs propres; c) et d) Focalisation

[1] D. Grenier, *Application du traitement du signal à l'analyse de sources corrélées à bande étroite*, Thèse de Ph. D., Université Laval, Québec (Canada), fév. 1989, chap. 5.

[2] D. Grenier, *Effective Correlation Factor After Translationnal and Rotationnal Invariances Processing: Spatial Smoothing and DEESE Methods*, in Proc. of 7th SSAP Workshop, Québec (CANADA), Juin 1994, pp. 121-125.

[3] H. Hung and M. Kaveh, *Focusing Matrices for Coherent Signal-Subspace Processing*, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Proc., pp. 1272-1281, Août 1988