

ICASENSE : une application de l'Analyse en Composantes Indépendantes à l'IRM parallèle

G. LE BEC^{1,2}, K. RAOOF¹, J.-P. YONNET²

¹Laboratoire des Images et Signaux, BP 46, 38402 St Martin d'Hères Cedex, France

²Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, BP46, 38402 St Martin d'Hères Cedex, France

Gael.Le-Bec@lis.inpg.fr, Kosai.Raoof@lis.inpg.fr, Jean-Paul.Yonnet@leg.ensieg.inpg.fr

Résumé – Les récentes méthodes d'imagerie IRM parallèle (SENSE et SMASH) nécessitent une bonne connaissance de la sensibilité des antennes. Celle ci est généralement mesurée lors d'une phase de calibration, ou estimée par filtrage adaptatif spatio-temporel si l'on dispose d'une série d'acquisitions (TSENSE). Nous proposons une formulation du problème en termes de séparation aveugle de sources : une analyse en composantes indépendantes (ICA) permet alors d'extraire les informations de sensibilité des antennes à partir d'une seule acquisition. Des résultats de simulations sont présentés, démontrant l'intérêt de cette nouvelle méthode que nous nommerons ICASENSE.

Abstract – Advanced Parallel Magnetic Resonance Imaging methods need coil sensitivity maps for image reconstruction. Sensitivities are commonly measured during a calibration step or estimated using spatio-temporal adaptive filtering. A Blind Source Separation formulation of the problem permit the estimation of coil's sensitivities using only one acquisition. Simulation results are presented, showing the interest of this method named ICASENSE.

1. Introduction

En IRM conventionnelle, un système de gradients de champs magnétiques permet de coder les informations spatiales des signaux : à chaque point de l'espace correspond une fréquence et une phase ; la reconstruction est ensuite réalisée par une transformée de Fourier. La réduction du temps d'acquisition a été étudiée dans de très nombreux travaux : citons les progrès sur les systèmes de gradients et les séquences d'acquisition ainsi que les méthodes d'échantillonnages partiels basés sur des propriétés de la transformée de Fourier. L'introduction de réseaux d'antennes en 1991 [1] à débouché sur l'imagerie IRM parallèle (SMASH en 1997 [2] et SENSE en 1999 [3]) : la sensibilité des capteurs n'est pas homogène dans l'espace, ce qui permet un codage supplémentaire et une diminution du temps d'acquisition. Le signal de chaque antenne est sous échantillonné et l'image (reconstruite par FFT des signaux IRM) est repliée. Dans le cas d'un système de deux antennes et avec un temps d'acquisition divisé par deux (une ligne sur deux est échantillonnée) nous avons en tout point :

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}_1(x, y) \\ \tilde{f}_2(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(x, y) & s_1(x, y \pm N/2) \\ s_2(x, y) & s_2(x, y \pm N/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(x, y) \\ f(x, y \pm N/2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

où $f(x, y)$ est l'image initiale, $\tilde{f}_1(x, y)$ et $\tilde{f}_2(x, y)$ sont les images repliées reconstruites avec les signaux reçus par les deux antennes, $s_1(x, y)$ et $s_2(x, y)$ les sensibilités des antennes et N le nombre de lignes de l'image. Les méthodes SENSE et SMASH supposent que les sensibilités sont connues. Dans de nombreuses applications où les antennes n'ont pas de position déterminée et sont susceptibles de bouger les une par rapport aux autres, l'estimation de $s_1(x, y)$ et $s_2(x, y)$ est délicate. Des algorithmes d'autocalibration basés sur l'introduction de

lignes supplémentaires (AUTO-SMASH [4]) ou l'utilisation d'un filtre adaptatif (TSENSE [5]) en IRM dynamique apportent une solution dans certains cas.

La nouvelle méthode que nous proposons, ICASENSE, est basée sur l'hypothèse qu'une région de l'image est statistiquement indépendante d'une autre région. Les outils de l'analyse en composantes indépendantes (ICA) [6] peuvent alors être utilisés pour séparer les signaux repliés et estimer les coefficients du mélange (donc les sensibilités à un facteur de normalisation près).

2. Méthode ICASENSE

2.1 Théorie

La sensibilité d'une antenne varie lentement : nous la supposons constante au voisinage d'un point (x, y) .

Formons un vecteur colonne $\tilde{\mathbf{f}}_1$ (resp. $\tilde{\mathbf{f}}_2$) en balayant M points proches de (x, y) dans l'image $\tilde{f}_1(x, y)$ (resp. $\tilde{f}_2(x, y)$) : voir la figure 1 pour plus de détails. Posons $\tilde{\mathbf{f}} = (\tilde{\mathbf{f}}_1, \tilde{\mathbf{f}}_2)^T$.

De même formons \mathbf{f}_1 (resp. \mathbf{f}_2) en balayant M points proches de (x, y) (resp. $(x, y \pm N/2)$) dans l'image initiale $f(x, y)$ et posons $\mathbf{f} = (\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2)^T$. Le problème consiste à estimer la matrice \mathbf{S} du mélange telle que

$$\tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{S} \mathbf{f} \quad (2)$$

\mathbf{S} contenant les sensibilités des antennes autour des points (x, y) et $(x, y \pm N/2)$. En écrivant l'équation (1) pour un ensemble de points, il apparaît que l'estimation de \mathbf{S} est un problème classique de séparation de sources. L'optimisation d'un critère d'indépendance statistique entre

\mathbf{f}_1 et \mathbf{f}_2 permet alors d'estimer \mathbf{S} , à une permutation et un facteur près.

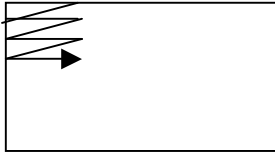


FIG. 1 : création des vecteurs $\tilde{\mathbf{f}}_1$ et $\tilde{\mathbf{f}}_2$ par balayage d'une région de l'image.

Il est temps d'introduire certaines propriétés physiques des antennes IRM. La sensibilité en un point (x, y) donné est calculée par le théorème de réciprocité [7] :

$$s(x, y) = B_u(x, y) \quad (3)$$

$B_u(x, y)$ étant le champ magnétique créé par l'antenne excitée par un courant unitaire. La sensibilité va donc décroître avec la distance :

$$\begin{aligned} s_1(x, y) &> s_1(x, y + N/2) \\ s_2(x, y) &< s_2(x, y + N/2) \end{aligned} \quad (4)$$

Les colonnes de la matrice \mathbf{S} estimée par l'algorithme d'ICA sont alors permutées pour satisfaire les inéquations (4) : les sensibilités $s_1(x, y)$ et $s_2(x, y)$ peuvent être identifiées. Ce traitement est repris en d'autres points pour que toute l'image soit balayée. Après d'éventuelles opérations d'interpolation et de filtrage les matrices s_1 et s_2 sont utilisées pour reconstruire l'image par la méthode SENSE.

2.2 Résultats de simulations

Les simulations ont été faites sous Matlab, à partir d'une image IRM modulée par des antennes de sensibilités connues (Fig. 2). Les images ont été repliées par sous-échantillonnage de leur transformée de Fourier (Fig. 3). L'algorithme de séparation de sources utilisé est le package FastICA [8] qui permet de séparer des mélanges linéaires en minimisant l'information mutuelle des composantes. La figure 4 nous montre l'estimation de la sensibilité d'une antenne, puis la reconstruction de l'image initiale par la méthode SENSE.

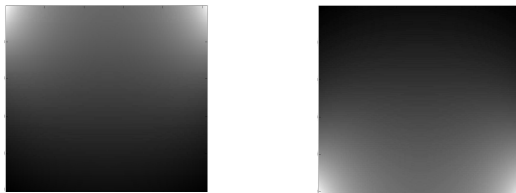


FIG. 2 : sensibilité des antennes. Sur la figure de gauche, l'antenne est en haut (et inversement pour la figure de droite). Les inéquations (4) sont vérifiées. Ces cartes de sensibilités sont calculées en intégrant l'équation de Biot et Savart (d'après l'équation (3)).



FIG. 3 : images « repliées ». Simulations des images reconstruites à partir de signaux IRM sous-échantillonnés spatialement, captés par des antennes de sensibilités données sur la figure 2.

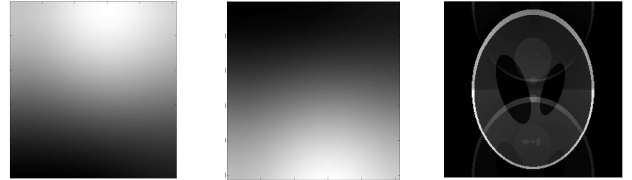


FIG. 4 : à gauche, les sensibilités estimées par la méthode ICASENSE puis lissées et interpolées, à partir des acquisitions de la figure 3. À droite, l'image reconstruite à partir de ces données et des images figure 3, en inversant l'équation (1).

3. Conclusion

Les résultats de simulations nous montrent que les sensibilités des antennes d'IRM parallèles peuvent être estimées à partir d'une seule acquisition : à la différence des méthodes adaptatives classiques, il n'est plus nécessaire de disposer d'une série d'images. Pour clarifier l'exposé nous sommes limités ici à un système de deux antennes mais il semble évident que pour un même taux d'accélération (ou de sous échantillonnage) l'ajout d'antennes supplémentaires permet d'améliorer la reconstruction de l'image.

Références

- [1] Roemer, Edelstein, Hayes, Souza, Mueller, The NMR phased array, Magn Reson Med, 1990, Vol 16, 192-225.
- [2] Sodickson, Manning, Simultaneous acquisition of spatial harmonics (SMASH): ultra-fast imaging with radiofrequency coil arrays, Magn Reson Med, 1997, Vol 38, 591-603.
- [3] Pruessman, Weiger, Scheidegger, Boesiger, SENSE : Sensitivity Encoding for Fast MRI, Magn Reson Med, 1999, Vol42, 952-962.
- [4] Jakob, Griswold, Edelman, Sodickson, AUTO-SMASH: a self-calibrating technique for SMASH imaging, MAGMA 1998, Vol 7, 4254.
- [5] Kellman, Epstein, McVeigh, Adaptive sensitivity encoding incorporating spatial filtering (TSENSE), Magn Reson Med, 2001, Vol 45, 846-852.
- [6] Jutten, Calcul neuromimétique et traitement du signal. Analyse en composantes indépendantes. Thèse d'Etat, INPG-USMG, Grenoble, 1987.
- [7] Hoult, Bhakar, NMR Signal Reception : Virtual Photons and Coherent Spontaneous Emission, Concepts Magn Reson, 1996, Vol 9, 277-297.
- [8] Hyvärinen, Oja, A fast fixed-point algorithm for Independent Component Analysis, Neural Computation, 1997, Vol 9, 1483-1492.