

REGROUPEMENT OPTIMAL DE CAPTEURS EN TRAITEMENT DU SIGNAL RADAR

P.DUVAUT (1),L.HAYOUN (1,2) ET J.P GUYVARCH (2)

(1) Equipe de Traitement des Images et du Signal,ETIS,ENSEA,les Chênes pourpres 95000,Cergy-Pontoise
 (2) THOMSON CSF,23-27 rue Pierre Valette,92240 Malakoff

Résumé

Afin de réduire la complexité d'une chaîne de réception RADAR à formation de faisceau par le calcul, on s'intéresse à la notion de regroupement de capteurs. Après avoir apporté un formalisme adéquat, on se penche sur l'existence d'une loi de fusion optimale. Le problème du choix du critère d'optimalité se pose tout naturellement. On présente d'abord des résultats relatifs à des critères d'ordre énergétique, classiques en traitement d'antenne: le rapport signal sur bruit et le taux de réjection des brouilleurs. Dans un deuxième temps, un critère d'ordre géométrique est décrit, quelques simulations en montrent le bien-fondé.

1. Introduction

Les techniques de traitement d'antenne sont aujourd'hui bien connues et malgré les grosses puissances de calcul qu'elles impliquent souvent, elles commencent à être mises en pratique, grâce notamment aux progrès faits dans le domaine des microcomposants rapides et à la découverte d'algorithmes performants.

Cependant, dans certaines applications, on est contraint, pour des raisons d'ordre matériel (nombre de voies de réception) ou de coût en calcul (puissance, taille du calculateur) de réduire la taille du vecteur observation, en associant à plusieurs capteurs une seule grandeur scalaire: c'est le concept de fusion de capteurs. Bien entendu, la réduction du nombre de degrés de liberté de l'antenne s'accompagne d'une dégradation des performances. Etant donné que pour une antenne réseau bidimensionnelle donnée, il existe un très grand nombre de façons d'opérer la fusion, le problème du choix d'une loi de fusion optimale se pose naturellement. Par voie de conséquence, se pose aussi le problème crucial du choix du critère d'optimalité.

L'article permet, dans un premier temps, de préciser le concept de fusion et d'y apporter un formalisme adéquat. Ensuite, on étudie l'évolution avec la fusion de deux critères d'ordre énergétique, souvent utilisés pour caractériser la qualité d'un filtrage spatial linéaire: le rapport signal sur bruit en sortie de filtrage et le taux de réjection des brouilleurs; les résultats obtenus, qui apparaissent sous la forme de quotient de Rayleigh, montrent, en particulier, qu'il est théoriquement possible d'atteindre l'optimalité. Enfin, un critère plus original, d'ordre géométrique, tendant à favoriser un comportement isotrope de l'antenne est présenté. Sa pertinence est attestée par des simulations.

2. Présentation de la fusion-Formalisation

Dans tout l'article, on se place dans le cas d'une antenne plane. La fusion a pour but de réduire la taille du vecteur observation, et donc le coût en calcul, tout en gardant une même surface d'antenne et donc une même puissance émise et reçue. L'idée consiste à associer à un groupe de n capteurs élémentaires une seule grandeur scalaire, combinaison linéaire des niveaux reçus sur chacun d'eux; on fabrique ainsi un nouveau capteur appelé sous-réseau. Dans la pratique, cette opération peut être réalisée sur le matériel, en établissant des connexions adéquates entre les capteurs d'un sous-

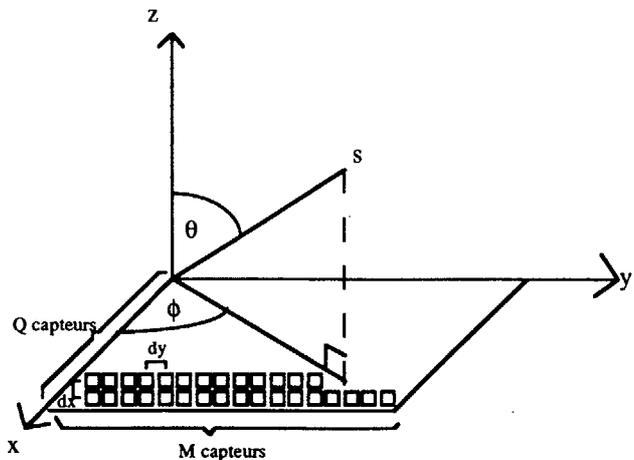
Abstract

So as to reduce the complexity of a RADAR reception chain with digital beamforming, we study the notion of sensor fusion. Once we have translated that notion into proper mathematical language, we must wonder about the existence of an optimal way of gathering the sensors. We are of course faced with the problem of the optimality criterion. At first, some results having to do with criteria about energy, well-known in array processing, are presented: the signal to noise ratio and the interference to noise ratio. In a second time, some criterion about geometry is adopted, after a few simulations have proven its relevance.

réseau. Ce procédé peut impliquer des contraintes sur la loi de fusion, comme par exemple, l'adjacence entre capteurs élémentaires d'un même sous réseau.

Notations et formalisation de la fusion

Considérons une antenne rectangulaire, située dans le plan xOy , contenant QM capteurs supposés parfaits (omnidirectionnels, découplés, gains identiques, sans distorsion de phase), répartis en Q colonnes selon l'axe ox et M lignes suivant Oy ; deux colonnes sont distantes de dx , deux lignes de dy . La position d'une source est repérée dans le système de coordonnées sphériques (θ, ϕ) , θ désignant la colatitude et ϕ la longitude, voir figure 1. Un capteur quelconque est repéré par les deux lettres q et m , avec q compris entre 1 et Q et m compris entre 1 et M .



La fusion d'une antenne initiale à QM capteurs en une antenne à $Q'M'$ capteurs ($Q'M' < QM$) est complètement déterminée par la donnée d'une matrice F , appelée matrice de fusion. Cette matrice contient $Q'M'$ colonnes et QM lignes, chaque colonne correspond à un sous-réseau et contient des "1" et des "0": un "1" indique que le capteur est effectivement regroupé, un "0" indique que tel n'est pas le cas. La présence de "1" et de "0" indique que la combinaison linéaire effectuée est une simple sommation. En toute généralité, il faudrait définir la matrice F avec des "0" et des nombres complexes



quelconques, ce qui correspondrait à une combinaison linéaire quelconque, et ce qui physiquement pourrait être obtenu en utilisant des déphaseurs et des atténuateurs situés en aval des capteurs.

Remarquons que, par construction (et si l'on se fixe comme contrainte, par exemple pour des raisons de simplicité de la réalisation matérielle, qu'un capteur ne peut appartenir qu'à un seul sous-réseau), les colonnes de la matrice de fusion sont orthogonales. Il peut donc être intéressant de normaliser les colonnes de la matrice de fusion (ce qui physiquement revient à donner la même puissance à chaque sous-réseau), ce qui confère à

F la propriété $F^T F = I_{Q \times M}$, propriété qui peut s'avérer utile comme

on le verra.

En toute cohérence avec ce qui précède, si $\underline{r}(t)$ est le vecteur des signaux reçus sur l'ensemble des QM capteurs de l'antenne initiale à l'instant t, alors le vecteur de réception de l'antenne fusionnée est $\underline{r}'(t) = F^T \underline{r}(t)$ (†:transposé conjugué), c'est à dire que le vecteur de réception après fusion s'obtient par la transformation linéaire de matrice F du vecteur reçu avant fusion.

Cette modélisation simple étant faite, on va étudier le comportement de l'antenne après regroupement.

3. Critères de fusion optimale liés aux performances d'estimation angulaire d'une source en présence de brouilleurs

3.1 Rappels sur le filtrage adapté spatial

L'article se place dans le cas où le traitement d'antenne effectué a pour but d'estimer la position angulaire d'une source en présence de K signaux brouilleurs gaussiens, spatialement localisés.

A un instant donné, le signal reçu sur l'antenne (avant fusion) est:

$$\underline{r} = \alpha \underline{e} + \underline{b} \text{ avec } \underline{b} = \sum_{k=1}^K \beta_k \underline{j}_k + \underline{n}$$

avec \underline{e} : vecteur de direction de la source utile

$$\underline{e} = \left[\exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (\text{qdx} \cos(\theta_c) + \text{mdy} \sin(\theta_c)) \right] \right]_{1 \leq q \leq Q, 1 \leq m \leq M}$$

α : amplitude complexe inconnue de la source utile, supposée

gaussienne, $E[|\alpha|^2] = \pi s$, puissance du signal utile.

\underline{b} : terme parasite global

\underline{j}_k : vecteur de direction du kième brouilleur

β_k : amplitude complexe du kième brouilleur (gaussienne).

$$E[\beta_k \beta_{k'}] = \pi k \delta(k-k') \quad (\pi k \text{ puissance du brouilleur } k).$$

\underline{n} : bruit thermique, gaussien complexe, temporellement et spatialement blanc, de puissance σ^2 .

La matrice de covariance des signaux parasites est:

$$B = E[\underline{b} \underline{b}^T] = \sigma^2 I + \sum_{k=1}^K \pi_k \underline{j}_k \underline{j}_k^T$$

L'estimation au sens du maximum de vraisemblance des angles θ_c, ϕ_c de la source utile revient à appliquer au vecteur reçu un filtrage transverse de réponse impulsionnelle [1],[2]:

$$\underline{w}(\theta, \phi) = \frac{B^{-1} \underline{e}(\theta, \phi)}{\sqrt{\underline{e}(\theta, \phi)^T B^{-1} \underline{e}(\theta, \phi)}}$$

$$\text{avec } \underline{e}(\theta, \phi) = \left[\exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (\text{qdx} \cos(\theta) + \text{mdy} \sin(\theta)) \right] \right]_{1 \leq q \leq Q, 1 \leq m \leq M}$$

Le filtre $\underline{w}(\theta, \phi)$ est celui qui maximise le rapport signal à bruit en

sortie de filtrage, défini par:

$$[\text{SNR}]_{(\theta, \phi)} = \frac{E[|\underline{w}(\theta, \phi)^T \alpha \underline{e} + \underline{b}|^2]}{E[|\underline{w}(\theta, \phi)^T \underline{b}|^2]} = \pi s \frac{|\underline{w}(\theta, \phi)^T \underline{e}|^2}{\underline{w}(\theta, \phi)^T \cdot B \cdot \underline{w}(\theta, \phi)}$$

Une autre grandeur intéressante est le taux de réjection des brouilleurs, défini pour le brouilleur k par:

$$[\text{INR}]_k = \frac{\text{puissance du brouilleur après filtrage}}{\text{puissance du bruit blanc après filtrage}} = \frac{E[|\underline{w}^T \beta_k \underline{j}_k|^2]}{E[|\underline{w}^T \underline{n}|^2]}$$

Nous allons étudier l'évolution de ces grandeurs avec la fusion.

3.2 Filtrage adapté spatial sur l'antenne fusionnée et évolution des performances

$$\text{Après fusion, le signal reçu est } \underline{r}' = F^T \underline{r} = \alpha F^T \underline{e} + \sum_{k=1}^K \beta_k F^T \underline{j}_k + F^T \underline{n}$$

$\underline{e}' = F^T \underline{e}$ et $\underline{j}_k' = F^T \underline{j}_k$ représentent les vecteurs de direction après

fusion. Remarquons que le bruit thermique reste spatialement blanc après fusion: $E[\underline{n}' \underline{n}'^T] = F^T E[\underline{n} \underline{n}^T] F = F^T \sigma^2 I F = \sigma^2 I$.

La matrice de covariance des signaux parasites devient: $B' = F^T B F$. Les données restant gaussiennes après fusion (transformation linéaire), le traitement spatio-temporel garde la même structure, et en particulier le traitement spatial reste linéaire. Le filtrage adapté spatial consiste alors à appliquer à \underline{r}' le filtre

$$\underline{w}'(\theta, \phi) = \frac{B'^{-1} \underline{e}'(\theta, \phi)}{\sqrt{\underline{e}'(\theta, \phi)^T B'^{-1} \underline{e}'(\theta, \phi)}} \text{ avec } \underline{e}'(\theta, \phi) = F^T \underline{e}(\theta, \phi)$$

Un premier critère d'optimisation de F, robuste, est le rapport signal à bruit maximal atteignable en sortie de filtrage; celui-ci est atteint lorsque le filtre appliqué correspond à la direction de la source utile. L'autre critère considéré est le taux de réjection du brouilleur k, défini plus haut.

$$\text{Avant fusion on a: } [\text{SNR}]_{\text{max}} = \pi s \underline{e}^T B^{-1} \underline{e}$$

$$[\text{INR}]_k(\theta, \phi) = \frac{\pi k |\underline{e}^T \cdot B^{-1} \underline{j}_k|^2}{\sigma^2 \underline{e}^T \cdot B^{-2} \underline{e}}$$

Après fusion, on a les mêmes relations, en remplaçant toutes les grandeurs par les mêmes grandeurs primées. On montre que [4]:

$$[\text{SNR}]'_{\text{max}} = \frac{(C^{-1} \underline{e})^T P_M (C^{-1} \underline{e})}{(C^{-1} \underline{e})^T (C^{-1} \underline{e})} \quad (1)$$

$$\text{et } \frac{[\text{INR}]_k(\theta, \phi)}{[\text{INR}]'_k(\theta, \phi)} = \frac{|P_M \underline{u}|^2}{|P_k P_M \underline{u}|^2} \cdot \frac{|\underline{u}|^2}{|\underline{u}|^2} \quad (2)$$

$$\text{avec } [\text{INR}]'_k(\theta, \phi) = QM \frac{\pi k |P_k P_M \underline{u}|^2}{\sigma^2 |P_M \underline{u}|^2} \quad (3)$$

ou C est la matrice telle que $B = C^2$
M est une matrice déduite de C et F par $M = CF$,

P_M est le projecteur orthogonale sur {M}, l'espace colonne de la matrice M ($P_M = M(M^T M)^{-1} M^T$),

$$\underline{u} = B^{-1} \underline{e}(\theta, \phi)$$

et $P_k = \frac{\underline{j}_k \underline{j}_k^T}{|\underline{j}_k|^2}$ est le projecteur orthogonal sur { \underline{j}_k }.

La formule (1) exprime que le quotient des rapports signal à bruit maximaux après et avant fusion est le quotient de Rayleigh du vecteur $C^{-1} \underline{e}$ relativement à l'opérateur P_M . On sait que cette

quantité est bornée par la plus petite et la plus grande valeur propre de P_M , or P_M étant un projecteur, ses seules valeurs propres sont 1

et 0. Ceci implique que le rapport signal à bruit maximal en sortie de filtrage est toujours dégradé par la fusion. Néanmoins, il est facile de voir que si l'on choisit la matrice F de telle sorte que la matrice $M=CF$ contienne le vecteur $C^{-1} \underline{e}_c$, alors on aura

$$[SNR']_{\max} = [SNR]_{\max}. \text{ Cette contrainte sur } M \text{ est équivalente à la}$$

contrainte sur $F : B^{-1} \underline{e}_c \in \{F\}$.

Finalement, l'optimalité au sens du rapport signal à bruit maximal peut être atteinte, à condition que la contrainte géométrique

$$B^{-1} \underline{e}_c \in \{F\} \text{ soit respectée.}$$

En ce qui concerne l'autre critère, la formule (2) montre que la fusion ne dégrade pas forcément le taux de réjection des brouilleurs (le quotient (2) peut prendre des valeurs supérieures ou inférieures à 1); par contre, la formule (3) montre qu'il est possible d'optimiser $[INR]_k(\theta, \phi)$ (c.à.d de le minimiser), et ce indépendamment de (θ, ϕ) , en imposant la condition $\underline{j}_k \perp \{M\}$, ce qui se traduit par la contrainte sur $F : C \underline{j}_k \perp \{F\}$ (on a alors $[INR]_k(\theta, \phi) = 0$).

Malheureusement, chacune des deux conditions d'optimalité trouvées dépend du scénario et ne peut donc être directement exploitée, ce qui motive le paragraphe suivant.

3.3 Stratégie de décision. Approche robuste.

Soient F_1, F_2, \dots, F_n n lois de fusion candidates. Il s'agit de trouver la meilleure au sens du critère du $[SNR]_{\max}$, c'est à dire de trouver la matrice F qui satisfait "au mieux" la condition

$B^{-1} \underline{e}_c \in \{F\}$, ou encore qui minimise la distance du vecteur $B^{-1} \underline{e}_c$ à l'espace $\{F\}$. Introduisant P_F , le projecteur orthogonal sur l'espace $\{F\}$ ($P_F = F(F^\dagger F)^{-1} F^\dagger = FF^\dagger$), cela revient à minimiser la norme du vecteur $(I - P_F) B^{-1} \underline{e}_c$ et la "meilleure" loi est donnée par:

$$F_{\text{opt}} = \text{ARG} \left\{ \text{Min}_F \left\| (I - P_F) B^{-1} \underline{e}_c \right\| \right\} \quad (4)$$

le vecteur $B^{-1} \underline{e}_c$ dépend du scénario:

$B^{-1} \underline{e}_c = B^{-1} \underline{e}_c(p)$, p étant le vecteur de paramètres dont dépend $B^{-1} \underline{e}_c$, $p = (\sigma, \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k, \theta_c, \phi_c, \theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2, \dots, \theta_k, \phi_k)$. L'expression (4) donne donc la loi de fusion optimale valable uniquement pour le scénario de paramètre p . Adoptant une approche robuste de type MinMax, on obtient:

$$F_{\text{opt}} = \text{ARG} \left\{ \text{Min}_F \left\{ \text{Max}_p \left\| (I - P_F) B^{-1} \underline{e}_c \right\| \right\} \right\} \quad (5)$$

autrement dit, on choisit la loi dont le comportement dans le contexte le plus défavorable, est le moins mauvais.

Le dernier résultat est satisfaisant mais sa mise en oeuvre n'est pas immédiate. Certains résultats de théorie des jeux (VERDÚ et POOR, 1983) peuvent peut-être la simplifier (si la fonction de coût est convexe par rapport à l'ensemble des paramètres, alors on peut inverser les opérateurs Min et Max sans changer le couple (F, p) solution du problème). De plus, dans la mesure où la formule (5) ne permet pas d'obtenir une forme explicite de la matrice de fusion optimale, il est nécessaire de sélectionner au préalable une série de lois candidates. Le paragraphe suivant, qui décrit cette fois une approche heuristique, permet de franchir cette étape.

4. Critère de fusion optimale lié à un comportement isotrope de l'antenne

L'approche adoptée ici, consiste simplement à rechercher un comportement isotrope de l'antenne (équiprobabilité des divers scénarios). Pour cela, on s'intéresse aux performances, après un

regroupement donné, de l'antenne, dans les plans $\phi = \text{constante}$.

Le comportement de l'antenne dans le plan $\phi = \phi_c$, c'est à dire son aptitude à localiser une source, à $(\theta, \phi) = (\theta_c, \phi_c)$, située dans ce plan, est caractérisée par son diagramme dans ce plan.

La qualité de ces diagrammes peut être qualifiée par des critères tels que la largeur du lobe principal à 3db et le niveau relatif des lobes secondaires.

La première étape dans l'élaboration du critère consiste à remarquer que, dans le plan $\phi = \phi_c$, l'antenne non fusionnée est équivalente à l'antenne monodimensionnelle, obtenue en projetant sur la droite d'intersection du plan de l'antenne et du plan d'analyse $\phi = \phi_c$ (droite: $z=0, \phi = \phi_c$), les barycentres des capteurs élémentaires (supposés omnidirectionnels).

Considérant à présent l'antenne fusionnée, on peut dire de la même façon que ses performances dans le plan $\phi = \phi_c$ sont identiques à celles de l'antenne linéaire obtenue en projetant les centres de phase de chacun des sous-réseaux sur la droite ($z=0, \phi = \phi_c$). Ce résultat n'est, cette fois, qu'une approximation car il faudrait tenir compte des diagrammes propres de chacun des sous-réseaux, qui ne sont ni omnidirectionnels, ni identiques les uns aux autres (on va voir plus loin comment se départir convenablement de ce problème).

En toute cohérence avec ce qui vient d'être dit, si l'on choisit comme critère le niveau des lobes secondaires, le diagramme obtenu dans le plan $\phi = \phi_c$ sera d'autant plus satisfaisant (indépendamment de toute pondération d'amplitude pouvant être appliquée par ailleurs) que la répartition des centres de phase après fusion, projetés sur la droite ($z=0, \phi = \phi_c$) sera régulière (en évitant le plus possible les "accidents" de type "trou" ou "point d'accumulation"). Comme il faut satisfaire à ces règles pour l'ensemble des plans d'observation $\phi = \phi_c$ (antenne isotrope), il faut que la loi de fusion induise une répartition des centres de phase aussi uniforme que possible sur l'antenne, sans directions privilégiées (alignements). Le critère découle naturellement de ce qui précède. Il consiste à comparer, au moyen d'un coût quadratique, la répartition des centres de phase projetés sur la droite $D\phi_c$ ($z=0, \phi = \phi_c$) avec une répartition théorique "idéale", obtenue en projetant sur $D\phi_c$ une distribution uniforme de points. Pour chaque direction ϕ_c , on fait glisser une fenêtre (de largeur 0.6λ par pas de 0.1λ , par exemple), on enregistre le nombre de points contenus dans chacune des positions de la fenêtre; on obtient ainsi un histogramme empirique que l'on compare, de façon quadratique, à l'histogramme théorique.

Le coût étant calculé pour chaque direction ϕ_c , on remarque d'emblée que le critère permet non seulement de discriminer éventuellement deux lois de fusion, mais aussi de connaître a priori le comportement d'une loi de fusion donnée dans chacun des plans $\phi = \text{constante}$.

Le nombre de lois de fusion se trouve, en premier lieu, limité par des contraintes matérielles et de coût telles que:

- nombre de sous-réseaux fixé.
 - adjacence des capteurs élémentaires au sein d'un même sous-réseau.
- Bien entendu, malgré ces contraintes, il reste encore un grand nombre de lois de fusion possibles; on peut alors introduire des contraintes heuristiques supplémentaires:

- choisir des sous-réseaux non symétriques favorisant naturellement un pavage "aléatoire" de l'antenne (sans symétries, périodicités ou alignements).

- éviter d'utiliser des sous-réseaux dont le diagramme est trop irrégulier, de façon à éviter une lacunarité de l'antenne pour certaines directions.

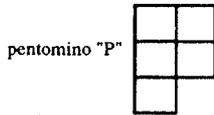
- se limiter à des sous-réseaux comprenant de préférence, le même nombre de capteurs (chaque sous-réseau doit être aussi peu directif que possible, ce qui appliqué à l'ensemble de l'antenne, conduit à l'égalité du nombre de capteurs par sous-réseau).

Ces quelques règles heuristiques et la fonction de coût décrite sont mises en pratiques sur les exemples suivants.

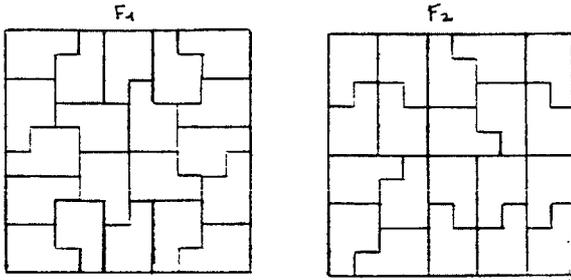


Simulations

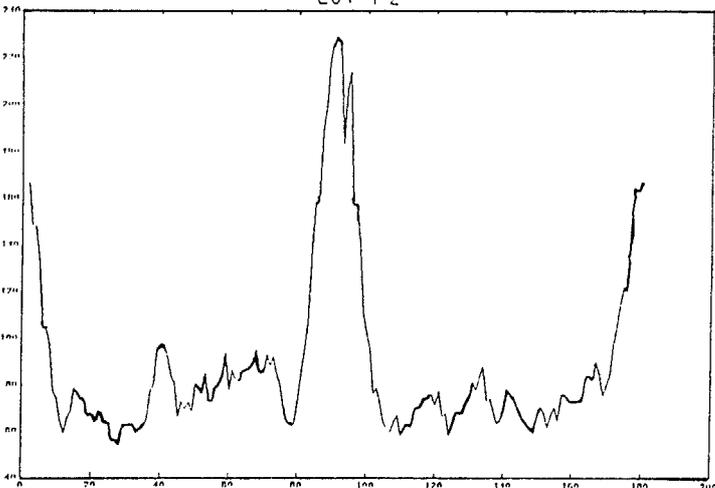
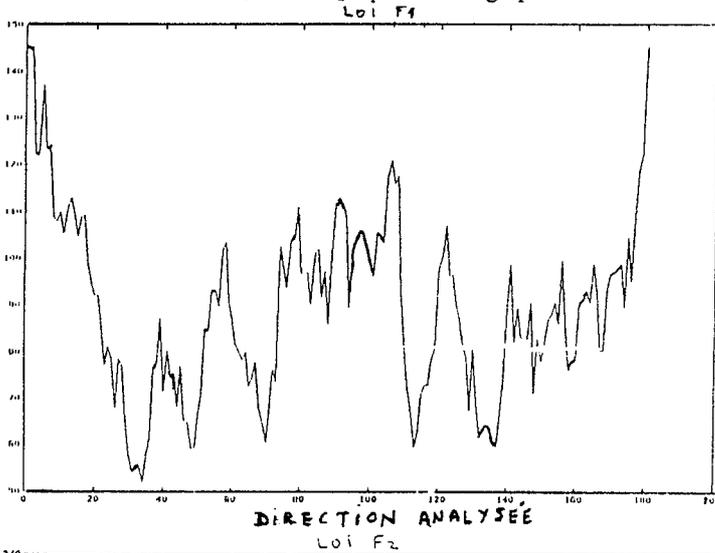
L'antenne utilisée pour les simulations est de forme carrée et comprend 100 capteurs équiésespacés d'une demi longueur d'onde. Le nombre de sous-réseaux est de l'ordre de 20 (compromis nombre de degrés de liberté/coût), ce qui suggère une fusion en "pentominos", sous-réseaux à 5 capteurs. L'ensemble des contraintes citées plus haut conduit au choix du pentomino "P" et de ses transformés par rotation.



Considérons les 2 lois de fusion suivantes, notées F1, F2:



L'application du coût géométrique fournit les graphes suivants:



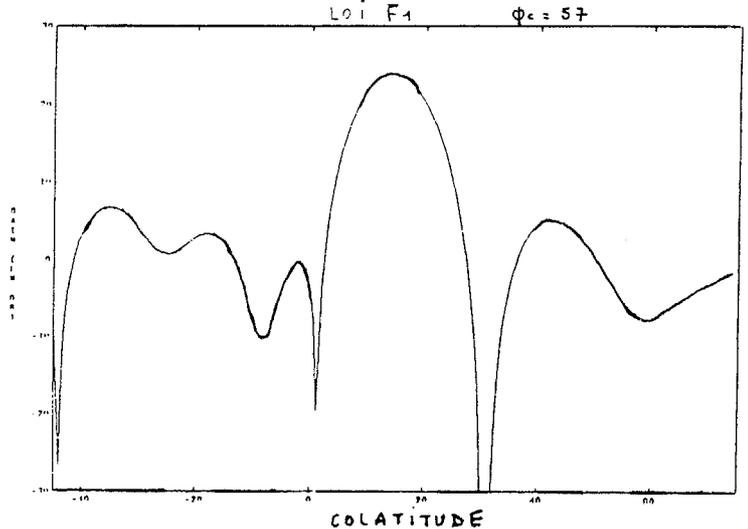
On note, tout d'abord, une différence entre les dynamiques des coûts respectifs ce qui suggère des comportements différents. L'écart-type de chacun des coûts est évidemment révélateur du caractère isotrope de chacune de ces lois. A cet égard, la loi F1 ($\sigma=19,2$) est meilleure que la loi F2 ($\sigma=59,9$). Les valeurs moyennes du coût sont, quant à elles, assez proches. On remarque, par ailleurs, que pour chacune des lois, les directions $\phi=0$ et $\phi=90$

degrés (plan site et plan gisement) sont de mauvaises directions (coût élevé), ce qui n'est pas surprenant car elles le sont déjà avant fusion.

On a calculé quelques diagrammes après fusion pour vérifier la pertinence du critère; ils correspondent à une source de colatitude $\theta_c=15$ degrés. Les résultats obtenus sont résumés ci-après:

loi F2: D'après le graphe de coût, $\phi=0$ et $\phi=90$ sont des "mauvaises" directions. On note, en effet, des remontées de lobes secondaires à 7.2db et 8db (lobes de réseau), respectivement, alors que le niveau relatif est de 13 db avant fusion. La dissymétrie site/gisement s'explique par la présence de 16 pentominos verticaux pour seulement 4 pentominos horizontaux. A $\phi=10$ degrés ("bonne" direction), il n'y a pas de remontée et le niveau relatif est de 12db (14 db avant fusion).

loi F1: Pour $\phi=0$ et $\phi=90$, on n'observe pas de remontée et le niveau relatif est de 10db. Le comportement général est meilleur que pour l'autre loi, ce qui s'explique par une meilleure répartition des différents pentominos (10 pentominos verticaux et 10 horizontaux). Il n'y a en particulier pas de dissymétrie site/gisement. Pour $\phi=57$ ("mauvaise" direction), on note effectivement une remontée spectaculaire de lobes secondaires.



Conclusion

L'article introduit une formalisation de la fusion, qui permet d'exploiter quelques critères d'optimalité. Cependant, le choix de ces critères reste délicat et il faudrait se donner non pas un seul mais plusieurs critères, dont il serait d'ailleurs intéressant d'étudier la corrélation. La complexité du problème est accrue par la nécessité de satisfaire des contraintes, faisant de la fusion optimale, un problème d'optimisation multi-critères et multi-contraintes. L'approche robuste adoptée, concernant les critères énergétiques, mérite d'être approfondie et sanctionnée par des simulations. Concernant l'approche heuristique, l'exemple traité montre son intérêt et il serait intéressant d'apporter une généralisation: taille, forme et maillage de l'antenne quelconques, sous-réseaux de taille quelconque ...

Enfin, remarquons que l'une des difficultés du problème de la fusion optimale réside dans le fait que, pour certains critères, l'optimalité dépend du scénario alors que la loi de regroupement reste figée (fusion "matérielle"). Envisageant la possibilité d'une fusion "numérique", un regroupement adaptatif deviendrait concevable...

Cette étude a été réalisée avec le soutien de la DGA STET.

REFERENCES

- [1] U. NICKEL, "Angle estimation with adaptive arrays and its relation to super-resolution", IEE Proceeding, Février 1987.
- [2] MONZINGO ET MILLER, "Introduction to adaptive arrays", Wiley and Sons, 1980.
- [3] LE CHEVALIER, "Principes de traitement du signal RADAR et SONAR", 1989.
- [4] L. HAYOUN et P. DUVAUT, Rapport d'activités THOMSON CSF, 1991.