

SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

EVOLUTION DU TRAITEMENT SPATIAL

H. M E R M O Z

Attaché au Service Technique de l'Armement - DTCN - DCAN de TOULON

RESUME

Parti du diagramme de directivité classique, puis transitant aujourd'hui par les nombreuses variantes d'antenne adaptative, le Traitement Spatial d'Antenne évolue, en fait, vers une limitation progressive de toute schématisation, implicite ou non, du milieu de propagation ou des fronts d'onde qui y circulent. Les simplifications excessives, ne conviennent pas, en effet, aux milieux compliqués et changeants tels que le milieu marin. Elles sont d'ailleurs en contradiction avec l'expérience. Mais, d'autre part, l'antenne n'a qu'un pouvoir résolvant limité, et la résolution de la distribution des sources impose, à titre complémentaire, un minimum de modélisation a priori du milieu. Le Traitement Spatial évoluera sans doute vers la recherche de cet équilibre où la complexité du milieu est prise en charge, pour une part, par la capacité de description détenue par l'antenne et, d'autre part, par l'a priori d'une modélisation minimale. Deux approches différentes sont ici suggérées.

SUMMARY

Spatial processing started with the classical directivity pattern of an array. Since then, it has been refined through the many possible implementations of adaptive arrays. In fact, the evolution consists in dropping progressively any underlying assumption about the propagation medium, or equivalently, about the structure of the traveling wavefronts. Indeed, any oversimplification fails to fit with complex mediums such as the ocean, as experience happens to illustrate.

On the other hand, an array has only a limited discrimination capability which requests a complementary amount of medium modeling (or a priori information) for a complete solution of sources distributions.

Spatial processing will probably evaluate toward such a critical balance where the duty of coping with medium complexity is shared between the discrimination capability of the array itself and the proper design of the lightest possible a priori model of the medium. Two different approaches are suggested.



EVOLUTION DU TRAITEMENT SPATIAL
SEPTIEME COLLOQUE GRETSI DU TRAITEMENT DU SIGNAL

1. - ANTENNE CLASSIQUE ET HYPOTHESES SOUS-JACENTES

Dans la quasi totalité des systèmes de détection électromagnétiques et acoustiques, la façon d'explorer une portion déterminée de l'espace, consiste à mettre en oeuvre une antenne dotée d'un diagramme de directivité aussi performant que la dimension de l'antenne le permet. Un tel diagramme possède deux caractéristiques essentielles :

- a) un axe de référence dirigé dans la direction à explorer,
- b) des lobes secondaires tous aussi bas que possible par rapport au lobe principal.

Ces deux caractéristiques reflètent deux conceptions plus ou moins implicites.

L'existence d'un axe de référence implique que le signal utile est porté par une onde plane venant de la direction correspondante. La recherche de lobes secondaires minimisés ou presque dans toutes les autres directions, implique que les bruits parasites sont également répartis dans tout l'espace.

C'est d'ailleurs sous ces deux hypothèses qu'on donne au facteur de directivité classique le sens d'un rapport signal à bruit, et les antennes ainsi construites sont, en effet, presque optimales dans le bruit omnidirectionnel idéal.

2. - L'ANTENNE ADAPTATIVE ET SON HYPOTHESE RESIDUELLE

Historiquement c'est la seconde hypothèse qui a été mise en cause d'abord. Dans beaucoup de cas réels (bruit de trafic) les sources de bruit parasite ne sont pas équiparties et on a vite le sentiment que le diagramme "s'épuise" en vain dans des directions silencieuses au lieu de concentrer son pouvoir de rejection là où il est le plus utile, en se modelant sur la répartition des sources.

Naturellement une telle adaptation est difficile pour des antennes constituées de systèmes physiques concentrateurs d'énergie tels que miroirs ou lentilles. Mais elle est possible pour des antennes formées par combinaison de capteurs élémentaires séparément accessibles. On peut agir sur la combinaison de capteurs c'est-à-dire sur le filtrage préalable de la sortie de chaque capteur avant sommation. Dès lors, pour une géométrie donnée de capteurs et pour une direction donnée de signal, il existe une combinaison optimale, toute entière déductible de la matrice de corrélation des bruits aux sorties des capteurs.

Mais la distribution des bruits, reflétée dans la structure de la matrice, n'est ni permanente ni aisément prévisible. D'où le concept d'antenne adaptative qui consiste à déduire en temps réel la combinaison optimale de la matrice expérimentale, mesurée en permanence, et à bâtir cette combinaison évolutive. Par conséquent, une antenne adaptative :

α) est construite pour une direction de signal donnée (quitte à affecter une autre combinaison évolutive à une autre direction),

β) est conçue pour que les bruits eux-mêmes pilotent en permanence la combinaison optimale de capteurs qui convient à leur structure spatiale momentanée.

Quels que soient les compromis technologiques qui conduisent à se contenter éventuellement de systèmes suboptimaux, telle est bien la finalité de l'antenne adaptative.

Par conséquent le concept de l'antenne adaptative est en fait l'abandon de toute hypothèse sur la répartition spatiale des bruits parasites. En ce sens, ce concept constitue un pas important, dans la mesure où cette répartition est compliquée, mouvante, et imprévisible.

Mais l'antenne adaptative reste soumise à la première contrainte de l'antenne classique. On admet toujours en effet, que le signal est porté par une onde plane venant d'une direction de référence, ou, plus généralement, que le front d'onde du signal abordant l'antenne est parfaitement connu.

3. - LIMITATIONS DE L'ANTENNE ADAPTATIVE

Il y a de nombreuses façons de faire une antenne adaptative et il en a souvent été question au GRETSI. Lorsqu'on expérimente de telles antennes dans le milieu marin on s'aperçoit que leur limitation n'est pas dans le procédé de mise en oeuvre mais dans le comportement même du milieu physique.

Plus précisément il est relativement aisé d'obtenir - toutes choses égales d'ailleurs - moins de bruit sur l'antenne adaptative que sur l'antenne classique ; la réduction est même sensiblement celle qui est déductible des mesures de corrélation entre capteurs. Par contre le signal qui devrait être strictement le même, est plus facilement altéré sur l'antenne adaptative ; celle-ci peut alors perdre sur le signal une partie de ce qu'elle a gagné sur le bruit.

Ceci s'explique. Une antenne adaptative utilise en fait la combinaison de l'antenne classique, mais, en plus, d'autres combinaisons de capteurs qui sont spatialement orthogonales au signal et qui, par conséquent, le réjectent (références bruits seuls). Ce sont donc là plusieurs combinaisons, toutes



fondées sur la définition a priori du front d'onde du signal, soit qu'elles l'admettent soit qu'elles le rejettent. Cette définition, utilisée plusieurs fois, est donc plus critique, et une altération, même légère, du front d'onde réel par rapport à sa définition a priori, peut réagir sur la performance. Ceci n'empêche nullement l'antenne adaptative d'être utilisable et utilisée, mais il est intéressant de noter que sa limitation ultime paraît bien liée à la seule contrainte qu'elle n'a pu s'empêcher d'hériter de l'antenne classique.

4. - CONTRAINTES EXCESSIVE ET CONTRAINTES NECESSAIRES

Car les déformations du front d'onde signal existent, bien entendu, en milieu réel. On sait bien que des trajets multiples peuvent interférer - en particulier dans le plan vertical - en transformant des fronts d'ondes plans ou sphériques en distributions compliquées et peu prévisibles. On se demande même pourquoi on tient tant à l'hypothèse de l'onde plane ou sphérique qui ne correspond qu'à l'idéalisation extrême d'un milieu isotrope et non limité.

Même l'hypothèse du "front d'onde-signal parfaitement connu" n'est pas réaliste en pratique et il faudrait pouvoir l'abandonner. Mais si on l'abandonne complètement en refusant toute information a priori, on supprime tout contraste spatial exploitable entre source de signal et source de bruit. La discrimination des sources entre elles se ramène alors à une opération globale très parente de l'imagerie.

Dès lors la question se pose ainsi : peut-on, en utilisant seulement une antenne, déterminer la densité spectrale et la position de plusieurs sources en nombre inconnu, sans rien savoir a priori sur leurs fronts d'ondes respectifs? La réponse est non, sauf à la limite quand la dimension et le nombre de capteurs de l'antenne tendent vers l'infini (pupille optique). Si on exploite de la façon la plus complète la matrice de corrélation expérimentale [1], le seul paramètre explicite est le nombre de sources indépendantes (supposé ici nettement inférieur au nombre de capteurs). Ce nombre est en effet le rang de

[1] C'est-à-dire la statistique du second ordre uniquement.

la matrice. Quant aux autres quantités recherchées (paramètres des fronts d'ondes et densités spectrales) la matrice fournit, entre elles, de nombreuses relations mais pas assez pour les calculer. L'absence de relations supplémentaires (fournies jusqu'ici par des contraintes a priori) empêche donc d'aboutir.

5. - CONTRAINTES LIMITEES - PREMIERE POSSIBILITE

On se trouve donc dans la situation suivante. On dispose d'une matrice expérimentale qui donne le nombre de sources et à qui il ne manque que quelques relations supplémentaires pour déterminer les fronts d'onde et les densités spectrales. Mais d'autre part si on impose à ces fronts d'onde d'être plans, on imposerait, par là même, une structure de matrice de corrélation, généralement incompatible avec la matrice expérimentale. C'est d'ailleurs la meilleure façon de vérifier que l'hypothèse de l'onde plane est irrecevable ; mais on esquivait en général cette vérification en ne mesurant pas et en n'étudiant pas cette matrice, ce qui permet de s'accrocher aux hypothèses traditionnelles.

Pour une approche plus scientifique - et plus difficile - nous avons besoin d'un minimum de connaissances a priori pour résoudre notre problème, mais sans dépasser le seuil du conflit avec les données expérimentales. A partir de là deux attitudes sont possibles.

La première, déjà évoquée au sixième Colloque GRETSI, consiste à modéliser le milieu de propagation avec des paramètres "libres" dont la valeur numérique est généralement inaccessible à une mesure rapide et continue. On bâtit ainsi un modèle où les inconnues sont, outre les coordonnées et la densité spectrale de chaque source, quelques paramètres "libres" de description du milieu (par exemple les angles caractéristiques des trajets multiples ou les impédances de frontières). L'ensemble du modèle permet d'exprimer une matrice de corrélation paramétrée qui pourra être identifiée à la matrice expérimentale. On obtient ainsi de nombreuses relations scalaires d'identification. Si le nombre de paramètres libres a été correctement choisi, l'identification se fait avec autant de relations que d'inconnues ce qui permet de déterminer à la fois les paramètres des sources et ceux du milieu.

Plus le nombre de paramètres libres est grand plus le modèle est flou - c'est-à-dire moins contraignant - et mieux il peut représenter la situation réelle. Mais on est limité par le nombre de relations utilisables c'est-à-dire par l'ordre de la matrice qui n'est autre que le nombre de capteurs. C'est donc, en dernier ressort, la capacité de résolution de l'antenne qui, bien naturellement, limite les performances.



EVOLUTION DU TRAITEMENT SPATIAL
SEPTIEME COLLOQUE GRETSI DU TRAITEMENT DU SIGNAL

6. - CONTRAINTES LIMITEES - SECONDE POSSIBILITE

La seconde attitude consiste, sans se préoccuper de description du milieu, à poser en principe que si une source n'envoie pas une onde plane sur l'antenne, son front d'onde peut être considéré comme une somme d'ondes planes en nombre limité, d'amplitudes et de directions inconnues. Les paramètres libres alors introduits sont précisément ces amplitudes et angles de direction. La limitation du nombre d'ondes planes par source représente le degré de complexité accordé au milieu. C'est la seule information a priori introduite.

Si cette complexité est bien choisie on aboutit encore à une identification de matrice qui détermine, pour chaque source, quelles ondes planes ont une amplitude significative dans la décomposition de son front d'onde.

L'interprétation de ce groupe d'ondes planes en termes de position de la source fait alors l'objet d'une représentation ultérieure séparée. C'est une opération de localisation, distincte de la détection proprement dite. Cette approche a l'avantage de tout ramener à des ondes planes élémentaires pour lesquelles la réponse de l'antenne est généralement bien connue.

7. - CONCLUSION

L'avenir dira ce qui peut être retenu de ces méthodes qui toutes exigent des calculs considérables.

Mais de toute façon le Traitement Spatial évolue et évoluera encore, pour des milieux compliqués comme le milieu marin, vers le plus grand allègement possible de l'information a priori sur la structure du milieu. Le concept des antennes adaptatives était un premier pas vers cet abandon de toute schématisation excessive. Le renoncement à l'hypothèse de l'onde plane, ou du moins du front d'onde de forme imposée constituera sans doute un autre pas (ou plusieurs). Il est bien clair que cette voie n'est libre qu'autant que le nombre de capteurs de l'antenne est compatible avec la complexité réelle du milieu. On parle donc ici d'antenne "riches". De ce fait les identifications matricielles envisagées seront nécessairement laborieuses ; elles promettent des jours prospères à l'informatique du calcul scientifique (particulièrement en temps réel).

Mais il paraît difficile d'échapper à une approche de ce type, dans la mesure où l'excès de simplification actuel se révèle parfois incompatible avec les données expérimentales..., lorsqu'on se donne la peine de le vérifier.