



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 1^{er} au 5 juin 1971

ANTENNES OPTIMALES et ADAPTATIVES.

H. MERMOZ

Ingénieur en Chef des Télécommunications. (1)

(1) - Attaché aux Services Techniques de l'Armée.

RESUME

- Par opposition à la rigidité de la notion classique de "diagramme de directivité", il est possible de construire des antennes "intelligentes", qui adaptent leur propre structure à une distribution spatiale variable des sources parasites.
- Dans la plupart des cas pratiques, une telle antenne peut rester à la fois optimale (par rapport à cette distribution) et adaptative.
- L'élimination des brouilleurs mobiles (parfois recherchée pour elle-même) se présente comme un cas particulier et un sous produit gratuit du traitement optimal adaptatif.

SUMMARY

- As opposed to the rigidity of the classical notion of "directivity diagram", it is possible to design "intelligent" antennas able to adapt their own structure to a time-varying spatial distribution of unwanted noise sources.
- In the most useful cases, such an antenna may remain simultaneously optimal (with regard to this distribution) and adaptive.
- The full elimination of moving jammers - sometimes a specific purpose in itself - here occurs as a mere particular case and as a free by-product of the adaptive optimal processing.



1. Directivité et antenne optimale.

Supposons qu'une antenne de réception soit composée de plusieurs capteurs dont la disposition géométrique est donnée et dont les sorties sont séparément accessibles. Former l'antenne, pour une source-signal donnée, c'est combiner les sorties des capteurs en une seule, de façon à affaiblir les sources de bruit parasite au profit de la source-signal. Celle-ci spatialement définie : en général, c'est une source très éloignée dans une direction donnée, mais on peut généraliser à une source à distance finie. Plus généralement encore, le signal est spatialement défini par le jeu des fonctions de transfert entre la source-signal et les sorties des capteurs. Ces fonctions sont une donnée du problème.

Pour former l'antenne, le procédé classique consiste à pondérer en phase et amplitude (bande étroite) ou, plus généralement, à filtrer (bande large) chaque sortie de capteur de façon à obtenir un diagramme de directivité dont la qualité est fixée par des critères a priori : niveaux relatifs des lobes secondaires, largeur du lobe principal, etc...

Or, au prix d'une complexité plus grande, il est possible d'obtenir des performances toujours supérieures - et parfois de très loin - à la meilleure qu'on puisse espérer des procédés classiques. Il faut, pour cela, oublier la notion de directivité et tenir compte, pour combiner les sorties des capteurs, de la vraie distribution spatiale des sources parasites, telle qu'elle est décrite par les capteurs eux-mêmes. Il existe de nombreuses façons sub-optimales de tenir compte de cette "structure spatiale" des parasites. Toutes sont des compromis entre le degré de complexité tolérable et le gain obtenu par rapport aux procédés classiques. Des exemples en seront montrés dans une autre conférence. Mais il n'existe qu'une seule façon qui soit optimale. On peut montrer que c'est celle qui rend maximale à toute fréquence, sur la sortie de l'antenne, le rapport de la densité spectrale du signal à celle du bruit. Cette propriété est tellement satisfaisante physiquement qu'on pourrait presque la prendre comme une définition d'optimalité, si on ne la retrouvait pas à partir de considérations plus générales.

Bien entendu la raison d'être de la combinaison optimale est de



rendre maximal, sur la sortie, le contraste entre présence et absence du signal, pour une structure spatiale de bruits donnée.

2. Elimination des brouilleurs.

Or, certaines structures spatiales de bruit sont, par essence, éliminables. Cela signifie que la combinaison optimale évoquée plus haut "délivre" alors, sur la sortie d'antenne, une densité spectrale du bruit nulle. Ceci se produit en particulier lorsqu'on a affaire à un petit nombre de "brouilleurs" c'est-à-dire de sources parasites discrètes ponctuelles, à des distances quelconques, et indépendantes entre elles. Un exemple simple évident est celui de l'élimination d'un seul brouilleur avec deux capteurs.

Il est donc remarquable que l'élimination de plusieurs brouilleurs simultanés se présente comme un sous-produit gratuit du traitement optimal d'antenne.

Pour ce traitement optimal, il ne s'agit en effet que d'un cas singulier d'efficacité "infinie". Il paraît très probable, réciproquement, que si on recherche pour elle-même une solution spécifique à l'élimination de plusieurs brouilleurs, le degré de complexité minimal correspond à un traitement optimal d'antenne. Bien que ceci ne soit pas absolument démontré, on pressent un lien quasi biunivoque entre ce problème et cette solution.

3. Forme du traitement optimal.

Sous sa forme la plus générale, cette combinaison optimale se présente comme un ensemble de N filtres (figure) qui dépendent à la fois du signal et du bruit.



Ils dépendent du signal de deux façons :

- a - d'abord de la définition spatiale de la source-signal, posée comme une donnée du problème (l'ensemble des fonctions de transfert entre la source-signal et la sortie des capteurs). Ce type de dépendance généralise ce qu'on appellerait, en directivité classique, l'orientation du lobe principal.
- b - ensuite, de la forme temporelle ou spectrale normée du signal, supposée également connue, comme dans la théorie du Filtre Adapté, pour des signaux déterministes ou aléatoires.

La combinaison optimale ne dépend donc pas de l'amplitude (ou de la valeur efficace) du signal éventuel, qui est, elle, inconnue. C'est dans ce sens qu'on peut dire qu'elle n'a pas à être adaptative au signal.

Mais les filtres de cette combinaison optimale dépendent aussi des bruits - Plus précisément ils sont fonctions des intercorrélations des bruits parasites entre tous les capteurs pris deux à deux. On peut exprimer cette dépendance dans le domaine temporel ou le domaine spectral. Dans ce dernier cas, disons que les gains complexes

$$G_i(\nu)$$

des filtres de la combinaison optimale dépendent des densités spectrales croisées

$$\gamma_{ik}(\nu)$$

des bruits aux sorties des capteurs. Ce sont ces dernières fonctions qui représentent la vraie structure spatiale des parasites, telle que l'antenne peut la voir. Mais il faut bien souligner qu'il s'agit de quantités relatives aux bruits seuls (par opposition au mélange de signal et de bruits).



4. Adaptativité et brouilleurs mobiles.

Si la structure des parasites a un caractère permanent, et si on dispose d'un temps très long pendant lequel on est sûr qu'il n'y a pas de signal, on peut alors mesurer les $\gamma_{jk}(\nu)$, en déduire une fois pour toutes les $G_{jk}(\nu)$ et, par conséquent, le traitement optimal. Mais si les $\gamma_{jk}(\nu)$ dérivent lentement au cours du temps (les sources parasites se déplacent ou se modifient) il faut réajuster de temps en temps les gains des filtres. Si ce processus est automatique et continu, le traitement est dit adaptatif. Tel est le sens que nous voulons donner à ce mot. Ce sont les possibilités et les limites d'un traitement à la fois optimal et adaptatif que nous allons discuter à présent.

Un tel procédé est basé sur la mesure permanente d'une estimation des intercorrélations. Mais, lorsqu'on procède ainsi, on ignore évidemment si on mesure les intercorrélations en présence ou en l'absence de signal - Or nous avons besoin des $\gamma_{jk}(\nu)$ des bruits seuls - En présence de signal, le résultat des mesures est "altéré" par rapport à ce qu'on cherche. Par conséquent les valeurs des gains des filtres sont elles aussi altérées. C'est dire que, dans le cas le plus général, il n'est pas possible que le traitement reste à la fois strictement optimal et strictement adaptatif puisque les filtres sont alors affectés par la présence même du signal, et ceci à l'insu de l'observateur.

Cette conclusion pessimiste pourrait terminer le débat - Fort heureusement, elle ne reste que provisoire si on regarde de près comment les filtres dépendent des intercorrélations. On s'aperçoit que dans la plupart des cas pratiques, l'adaptativité et l'optimalité peuvent coexister - Il existe en effet, dans les cas précisés ci-après, une simplification possible et légitime de la relation entre les filtres et les intercorrélations - Au terme de cette simplification, et bien que les valeurs mesurées des intercorrélations restent altérables par la présence du signal, les valeurs des gains des filtres restent, elles, inchangées. Même si cette présence est de longue durée, les valeurs des gains ne s'ajustent, pendant ce temps, que sur les bruits seuls. On peut dire alors que la combinaison optimale toute entière est un "paramètre bruit seul" du système.



Cette coexistence de l'adaptatif et de l'optimal se présente :

- a - dans tous les cas de détection de signaux à bande étroite brefs ou longs : c'est le cas du Radar, du Sonar actif, et de la plupart des signaux hertziens de Télécommunications.
- b - dans tous les cas où on a affaire, a priori, à une structure spatiale de bruits éliminables, du type brouilleurs, et ceci même à bande large. C'est dire en particulier que des brouilleurs mobiles restent automatiquement éliminables par le traitement optimal adaptatif d'antenne, au cours de leurs mouvements.

Le cas "difficile" écarté de la liste précédente, est la détection optimale des signaux à large bande (Sonar passif). Dans ce cas on ne peut trouver que des compromis plus ou moins acceptables entre optimalité et adaptativité. Certains de ces compromis sont fondés sur une hypothèse de signaux exclusivement faibles, et par conséquent d'influence négligeable sur les gains des filtres de la combinaison optimale.

5. Référence bruit seul.

Lorsqu'on a réalisé un système optimal-adaptatif, il subsiste encore, pour l'utiliser un problème de principe. On sait alors que les filtres n'obéiront qu'aux bruits seuls, et qu'ils donneront toujours un maximum de contraste entre présence et absence de signal ; mais comme la puissance du bruit de sortie peut elle-même dériver avec la structure spatiale des sources parasites, rien ne dit qu'une augmentation de cette puissance soit une de ces variations plutôt que l'indice de l'apparition de signal. Pour trancher, il faudrait une "référence bruit seul" de la sortie observée.

Ce problème se pose déjà aux procédés classiques car il correspond aux situations réelles. Quand on utilise un système classique de voies



préformées, on admet généralement que le bruit de sortie est sensiblement le même sur des voies adjacentes. De sorte que chaque voie peut servir de "référence bruit seul" à ses voisines. Cette solution n'est évidemment qu'approchée car on pourrait facilement trouver des systèmes de sources parasites donnant des bruits très différents sur deux voies voisines, mais nécessairement formées de façon légèrement différente. En fait, cette approximation repose sur une hypothèse, parfois implicite, bien que très forte, sur la structure spatiale du bruit : en général, c'est une hypothèse d'omnidirectionnalité, ou même d'indépendance statistique sur les sorties des capteurs. Ce genre d'hypothèse ne laisse subsister que peu de chose de la notion d'adaptativité.

Cependant, l'idée demeure d'utiliser une combinaison auxiliaire comme "référence bruit seul" de la combinaison optimale. Une telle combinaison doit donc :

- "rejeter" le signal
- délivrer une puissance de bruit (qui ne peut être que du "bruit seul") égale à la "puissance de bruit seul" de la combinaison optimale (la plus sensible au signal par vocation).

Il n'est pas très difficile de trouver des combinaisons qui rejettent le signal (des "paramètres bruit seul" du système). Mais, en toute rigueur, on n'en trouve aucune qui remplisse exactement la seconde condition - Deux idées, d'ailleurs très voisines l'une de l'autre, se dégagent cependant de l'examen de cette question :

- à défaut de valeur exacte, l'approximation de "référence bruit seul" que l'on peut atteindre est d'autant plus exacte que le nombre de capteurs est plus grand (que l'antenne est plus puissante).
- il suffit d'une seule hypothèse a priori sur les intercorrélations des bruits - par exemple, une seule relation permanente entre les $\gamma_{jk}(v)$ - pour pouvoir évaluer une référence bruit seul exacte. Naturellement cette relation constitue, par elle -



même, une concession par rapport à l'adaptabilité stricte. Mais cette concession paraît d'autant plus faible que le nombre de capteurs est plus grand.

Enfin, si le problème de la référence bruit seul n'est pas exactement soluble, il faut remarquer que, précisément, sa solution n'est pas nécessaire dans les cas pratiques déjà mentionnés, où le traitement optimal peut être adaptatif.

En effet :

- a - dans le cas du Radar ou du Sonar actif où les signaux sont brefs (et peuvent être rendus encore plus brefs par compression d'impulsion), on utilise le "contraste temporel". Les fluctuations du bruit seul sur la sortie sont alors "lentes". Elle peuvent être "épongées" par un contrôle automatique de gain qui norme la valeur du bruit, tout en préservant le contraste entre présence et absence de signal, tel que l'optimise le traitement précédent.
- b - dans le cas des signaux de Télécommunications à bande étroite, mais longs, l'exploitation de tels signaux n'est en général concevable que dans des conditions de fort rapport signal/bruit à la sortie, donc dans des conditions très voisines du "bruit éliminable". Il n'est donc pas nécessaire de "lisser" ce bruit. Il est plus intéressant, dans ce cas, de maintenir constant le gain d'antenne (cf. § 6).
- c - dans le cas de "brouilleurs" à bande large la remarque précédente est encore plus vraie, puisque le parasite, est, a priori, du type éliminable.

En définitive, c'est encore le cas de la détection optimale des signaux faibles à large bande (contre des bruits non-éliminables a priori) qui donne lieu à des difficultés c'est-à-dire à la recherche d'un compromis.



6. Norme adaptative du gain d'antenne.

Nous avons dit au § 4. que le traitement optimal d'antenne, dont le cas le plus général, n'est pas adaptatif car il est sensible à la présence du signal, à travers les valeurs des

$$Y_{jk}(\nu).$$

D'autre part le gain de l'antenne pour le signal, $A(\nu)$, est, lui aussi, une fonction des

$$Y_{jk}(\nu),$$

également sensible à la présence du signal (et de la plus désastreuse façon car, il diminue en présence du signal).

Mais il se trouve que les filtres de gain

$$G_i(\nu) / A(\nu)$$

sont, eux, des "paramètres bruit seul" du système. Donc, on peut normer le gain d'antenne à toute fréquence, de façon adaptative et ceci dans tous les cas, comme on cherche à le faire en directivité classique. Mais il est clair que les filtres

$$G_i(\nu) / A(\nu)$$

ne sont pas les filtres optimaux, pour ce qui concerne le contraste entre présence et absence de signal. La norme du gain d'antenne ne s'obtient donc qu'aux dépens de l'optimalité.

Au contraire, dans les cas particuliers cités au § 4. où le traitement optimal peut être adaptatif, le gain d'antenne devient comme les

$$G_i(\nu)$$



eux-mêmes, un "paramètre bruit seul". Il est alors possible de normer le gain d'antenne sans sacrifier l'optimalité - Il est même souhaitable de la faire dans le cas des signaux de Télécommunications et dans le cas des "brouilleurs a priori" (cf. § 5) ; on peut retrouver ainsi, à la sortie l'information signal non -altérée dans son spectre donc dans sa forme.

7. Conclusion.

- a - Il est possible, en Radar, en Sonar actif et en Télécommunications de construire des antennes "intelligentes" qui, en adaptant leur propre structure à la distribution des sources parasites :
 - délivrent toujours le meilleur rapport signal /bruit possible
 - éliminent les brouilleurs discrets fixes ou mobiles
 - se prêtent à une norme adaptative du gain d'antenne lorsqu'elle est jugée utile (Télécommunications).

- b - Il est possible de protéger complètement et adaptativement une réception à large bande contre des brouilleurs discrets mobiles et /ou à spectres d'émission évolutifs. Le procédé se prête à la norme adaptative du gain d'antenne.

- c - Les cas précédents sont des cas de coexistence de l'optimal et de l'adaptatif. La détection des signaux à large bande dans des structures de bruit évolutives (mais non fatalement éliminables) ne relève pas, en principe, de ces possibilités. Toutefois une seule hypothèse a priori sur la forme de cette évolution, rend possible à la fois la coexistence de l'optimal et du quasi - adaptatif, ainsi que la recherche d'une référence bruit seul indispensable pour l'exploitation.



Bibliographie.

Ce texte est essentiellement le commentaire élargi d'un article publié par l'auteur dans les Annales des Télécommunications de juillet-août 1970, 24. No 7 - 8, pp. 269 - 280.

Essai de Synthèse sur les Antennes de Détection Optimales et Adaptatives.

Cet article contient une large bibliographie.

Par ailleurs, le CNET a rassemblé dans un même opuscule avec le concours de la DRME, tous les articles de l'auteur sur ce même sujet depuis 1963. Cet opuscule a pour titre

Antennes de Détection Optimales et Adaptatives.
Théorie et application.

Collection Technique et Scientifique du CNET.

