

HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

371



NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

APPLICATION DES PROPRIETES SPATIALES DES ANTENNES
AUX TECHNIQUES D'OPPOSITION DES LOBES SECONDAIRES

S. DRABOWITCH , C. AUBRY , J. ROGER

THOMSON-CSF , 1 rue des Mathurins 92223 BAGNEUX

RESUME

Les systèmes autoadaptifs du type OLS utilisent des antennes auxiliaires fournissant des répliques indépendantes des signaux de brouillage captés par l'antenne principale et destinées, après pondération adéquate, à occulter ces signaux. L'objet de l'exposé est de souligner l'influence du choix des antennes auxiliaires sur les performances du procédé. Ces antennes sont souvent choisies peu directives. Ce choix se traduit par un certain nombre d'inconvénients qui sont passés en revue. En particulier, on montre sur un exemple simple (OLS bi-brouilleur) qu'il existe toujours des combinaisons de directions de brouilleurs pour lesquelles le système est totalement inefficace. Afin de remédier à ces inconvénients, il est possible, avant toute opération d'optimisation par circuits actifs bouclés, de tirer parti des propriétés de filtrage spatial de l'antenne principale en utilisant des diagrammes auxiliaires directifs. En particulier, le découplage obtenu entre les voies auxiliaires offre la possibilité d'accélérer la convergence du processus autoadaptif en comprimant l'étalement du spectre de la matrice de covariance des signaux sur les voies auxiliaires.

SUMMARY

Sidelobe cancellation systems use auxiliary antennas which provide independent replicas of jamming signals in the main pattern for cancellation. The goal of this paper is to emphasize the part taken by the auxiliary patterns in the system performance. Usually antennas with low directivity are used, involving some inherent drawbacks. As an example, the case of two jammers and two auxiliaries is dealt with, showing very poor performance for some arrangements of the directions of arrival of the jamming signals. In contrast, use of auxiliaries with high directivity, providing some spatial filtering before adaptation, may be very attractive. Among the advantages provided by this spatial filtering, one of peculiar interest is the decoupling of the correlation loops which suggests techniques for accelerating convergence by compressing the spread in eigenvalues of the interfering source covariance matrix defined at the auxiliaries output ports.



APPLICATION DES PROPRIETES SPATIALES DES ANTENNES
AUX TECHNIQUES D'OPPOSITION DES LOBES SECONDAIRES

S. DRABOWITCH , C. AUBRY , J. ROGER

I - INTRODUCTION

Les antennes microondes, en particulier dans leurs applications aux Radars et aux Télécommunications, sont souvent soumises à des signaux parasites extérieurs, naturels ou artificiels, qui s'ajoutent et se combinent aux bruits internes des récepteurs associés.

Afin de diminuer les brouillages ainsi produits sur les signaux utiles, on a développé des procédés connus sous le nom d'"antennes autoadaptives" ou d'"opposition des lobes secondaires"* qui consistent à s'efforcer d'adapter les caractéristiques de rayonnement d'une antenne de réception au milieu environnant de façon à maximiser le rapport : signal utile sur bruit total (interne et externe).

Dans le cas du système O.L.S. cette adaptation s'obtient en utilisant des antennes auxiliaires et en combinant leur diagrammes avec celui de l'antenne "principale" de façon à obtenir un diagramme global possédant des zéros ou, tout au moins, des minimas, dans les directions des brouilleurs externes tout en évitant de trop amplifier les bruits internes des récepteurs nécessairement associés aux antennes auxiliaires.

La figure 1 rappelle le schéma classique d'un système O.L.S. multibrouilleur comportant un certain nombre de "boucles de décorrélation" : chaque signal d'antenne auxiliaire est retranché au signal principal avec un coefficient de pondération w asservi à une corrélation minimale entre le signal auxiliaire et le signal résultant.

Ce procédé est en principe équivalent à celui qui consiste à déterminer les coefficients de pondération à partir de la matrice de covariance des signaux reçus par les antennes auxiliaires (1).

L'objet du présent exposé est de montrer que, quel que soit l'algorithme utilisé, le choix des antennes auxiliaires n'est pas indifférent au facteur d'amélioration du rapport signal/brouilleur, à la sélectivité du système, à sa vulnérabilité aux brouilleurs additionnels et à la rapidité de convergence du processus. Les meilleurs diagrammes auxiliaires semblent être les diagrammes d'échantillonnage de l'antenne, considérée comme un filtre passe-bas des fréquences spatiales : de tels diagrammes directifs opèrent en effet un pré-filtrage spatial qui améliore l'efficacité de l'antibrouillage.

II - INCONVENIENTS DES ANTENNES AUXILIAIRES NON DIRECTIVES

Il arrive fréquemment que les antennes auxiliaires O.L.S. soient peu directives et placées sur le pourtour de l'antenne principale.

Cette disposition semble justifiée par le fait qu'il n'est pas toujours facile de les mettre ailleurs, et qu'un diagramme très ouvert permet de traiter un signal brouilleur quelle que soit sa direction.

Elle présente cependant de nombreux inconvénients :

- 1/ Le gain de telles antennes étant nécessairement faible, leur coefficient de pondération associé devra être corrélativement élevé, ce qui ramènera dans la voie principale une fraction d'autant plus importante du bruit thermique du récepteur associé et diminuera le facteur d'amélioration final du système.
- 2/ Un diagramme auxiliaire très ouvert recueille des échos parasites (clutter) ce qui diminue l'efficacité du système.
- 3/ Le diagramme global résultant de celui de l'antenne principale combiné avec ceux -peu directifs- des antennes auxiliaires, ceux-ci entraînent une perturbation du diagramme initial et la présence de lobes latéraux dans toutes les directions de l'espace. Par suite, des brouilleurs qui ne gênaient pas l'antenne seule peuvent être captés et devenir gênants.
- 4/ Un diagramme auxiliaire large englobera généralement plusieurs brouilleurs à la fois : ce qui ne semble pas favorable à l'efficacité et à la rapidité de convergence du processus.
- 5/ Lorsqu'une antenne auxiliaire est placée à la périphérie de l'antenne principale, leurs centres de phase sont relativement éloignés : la phase du coefficient de pondération est alors très sensible à la fréquence et le système n'est efficace que dans une bande de fréquences assez étroite.
- 6/ Enfin on peut montrer -et ce sera l'objet du paragraphe suivant- qu'il existe des combinaisons entre directions des brouilleurs et antennes auxiliaires non directives, qui n'apportent aucune amélioration au rapport signal/brouilleur.

* Connus sous le nom d'O.L.S. ou C.S.L.S. (Coherent side lobe cancellation).

APPLICATION DES PROPRIETES SPATIALES DES ANTENNES
AUX TECHNIQUES D'OPPOSITION DES LOBES SECONDAIRES

S. DRABOWITCH , C. AUBRY , J. ROGER

III - EXEMPLE DE DISPOSITIF D'ANTENNES AUXILIAIRES POUVANT CONDUIRE A UN ANTIBROUILLAGE INEFFICACE

Les hypothèses sont les suivantes :

- 1/ Les deux brouilleurs ont même puissance moyenne. On désigne par P la puissance moyenne que recevrait une antenne isotrope de chacun de ces brouilleurs. La puissance de bruit thermique commune à chacune des voies de réception (principale et auxiliaires) est prise comme unité.
- 2/ Les deux signaux de brouillage sont reçus par le diagramme principal avec le même gain en amplitude et phase, cette phase commune étant prise comme référence :

$$f_0(u_1) = f_0(u_2) = \sqrt{G}$$

u_1 et u_2 définissent les directions des deux brouilleurs. $f_0(u)$ représente, normé par rapport à l'isotrope, le diagramme de réception de l'antenne principale. G est le gain, exprimé en puissance, de l'antenne principale dans les deux directions u_1 et u_2 .

- 3/ Les deux antennes auxiliaires sont disposées symétriquement de part et d'autre du centre de phase 0 de l'antenne principale (figure 2). Elles ont le même gain g dans la zone angulaire considérée et pour diagrammes de réception, normé par rapport à l'isotrope :

$$f_1(u) = \sqrt{g} e^{iu} \qquad f_2(u) = \sqrt{g} e^{-iu}$$

Rappelons que les pondérations optimales* W_1 et W_2 des voies auxiliaires sont données par

$$W = R^{-1} \Lambda$$

W est la matrice colonne des pondérations optimales : $W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix}$

R est la matrice de covariance des bruits sur les voies auxiliaires :

$$R = \begin{bmatrix} \frac{|b_1|^2}{b_2^* b_1} & \frac{b_1^* b_2}{|b_2|^2} \\ \frac{b_1^* b_2}{|b_2|^2} & \frac{|b_2|^2}{b_1^* b_1} \end{bmatrix}$$

est la matrice colonne des corrélations entre la voie principale et les voies auxiliaires :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \frac{b_0 b_1^*}{b_0 b_2^*} \\ \frac{b_0 b_2^*}{b_0 b_1^*} \end{bmatrix}$$

b_n représente le bruit (interne + brouillage) sur la voie principale ($n=0$) ou les voies auxiliaires ($n=1$ et 2).

Le facteur d'amélioration théorique du procédé, soit η , est défini, indépendamment de toute considération de rapidité de convergence**, par le rapport entre la puissance de bruit (interne + brouillage) en sortie du système avant et après traitement.

Dans le cas présent, en faisant l'hypothèse supplémentaire $2PG \gg 1$, ce qui exprime simplement que le brouillage est gênant, on trouve :

$$\eta(\varphi) = \frac{1 + 2Pg(1+\cos\varphi)}{1 + \frac{g}{G}(1+\cos\varphi)}$$

où $\varphi = u_2 - u_1 = \frac{a}{\lambda}(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)$, phase relative des diagrammes auxiliaires dans les directions des deux brouilleurs.

L'amélioration moyenne est donnée par :

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \eta(\varphi) d\varphi = 2PG + \frac{1-2PG}{\sqrt{1+2g/G}} \# 2PG \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+2g/G}} \right]$$

* minimisant la puissance de sortie (voie principale + voies auxiliaires pondérées) de bruit (interne + brouillage)

** la rapidité de convergence est liée à l'étalement du spectre de la matrice de covariance.



APPLICATION DES PROPRIETES SPATIALES DES ANTENNES
AUX TECHNIQUES D'OPPOSITION DES LOBES SECONDAIRES
S. DRABOWITCH , C. AUBRY , J. ROGER

En ce qui concerne les valeurs propres de la matrice de covariance, le calcul donne :

$$s(\varphi) = 1 + 2 P_g (1 \pm \cos \varphi)$$

L'amélioration est maximale pour $\varphi = 2 k \pi$. Tout ce passe, dans ce cas, comme si il y avait un seul brouilleur de puissance $2P$ et une seule antenne auxiliaire de gain $2g$. L'amélioration est nulle pour $\varphi = (2k+1)\pi$. Ce résultat navrant est dû au fait que le vecteur de corrélation Λ , et par suite les pondérations optimales, sont nuls dans ce cas particulier.

La figure (3) représente les variations de η en fonction de φ dans le cas particulier suivant :

$$\begin{aligned} P &= 40 && (+16 \text{ dB/ISO}) \\ g &= 4 && (+ 6 \text{ dB/ISO}) \\ G &= 1 && (\text{ISOTROPE}) \end{aligned}$$

A titre indicatif, on a également représenté le rapport S_{\max} / S_{\min}

IV - ANTENNES A FAISCEAUX AUXILIAIRES DIRECTIFS INTEGRES

Examinons maintenant les avantages de l'emploi de faisceaux auxiliaires directifs :

IV.1 - Les diagrammes d'échantillonnage, diagrammes auxiliaires optimaux ?

Considérons pour fixer les idées (fig.4) un réseau linéaire de longueur L , repéré par une abscisse x , siège d'une illumination définie par la fonction scalaire $f(x)$ de support $(-L/2, +L/2)$. Ce réseau rayonne dans une direction θ -repérée par rapport à la normale- un diagramme $F(\tau)$, bien représenté par la transformée de Fourier de $f(x)$:

$$F(\tau) = \int_{-L/2}^{+L/2} f(x) e^{i2\pi x \tau} dx$$

$$\text{avec } \tau = \frac{\sin \theta}{\lambda}, \quad (\lambda: \text{longueur d'onde})$$

Par suite des tolérances de fabrication, l'illumination $f(x)$ est toujours plus ou moins perturbée de façon erratique, il en résulte dans le diagramme $F(\tau)$ la présence de lobes latéraux diffus, même pour les directions θ éloignées de l'axe.

Cependant ce diagramme possède un spectre de "fréquences spatiales" à support borné : la loi d'illumination elle-même. Il en résulte, d'après le théorème de l'échantillonnage, qu'il peut être représenté (fig.5) comme une combinaison linéaire de diagrammes d'échantillonnage sous la forme :

$$F(\tau) = \sum_k a_k \frac{\sin(\pi L \tau - k\pi)}{\pi L \tau - k\pi}$$

En pratique le diagramme $F(\tau)$ dépend surtout des diagrammes d'échantillonnage -en nombre fini N - dont les lobes principaux sont situés dans le domaine "réel" (2) : $|\tau \lambda| \leq 1$, -ou même dans un domaine plus restreint-. Dans ces conditions on peut définir une structure d'antenne dont chaque diagramme d'échantillonnage fait l'objet d'un accès séparé (cas d'un réseau excité par l'intermédiaire d'une matrice de BUTTLER ou de toute autre matrice équivalente) on voit qu'on peut contrôler les coefficients a_k de façon à annuler le diagramme résultant dans les direction de N brouilleurs et ceci quelle que soit leur répartition angulaire. Une telle antenne est en effet totalement adaptive puisque ses N "degrés de liberté" sont utilisés. Le fait de contrôler le diagramme par l'intermédiaire des diagrammes d'échantillonnage présente des avantages que nous allons examiner dans le paragraphe suivant. A propos de la sélectivité en fréquence on notera que le cas d'un système bi-fréquence est équivalent à un système mono fréquence où chaque brouilleur est remplacé par une paire de brouilleurs équivalents : en effet, le paramètre $\tau = \sin \theta / \lambda$ tient compte à la fois des directions brouillées θ et des fréquences brouillées .

IV.2 - Diagrammes auxiliaires directifs intégrés

Il sera souvent difficile de concrétiser exactement les diagrammes d'échantillonnage définis ci-dessus mais on pourra s'en approcher en utilisant des faisceaux auxiliaires directifs intégrés à l'antenne principale (ou des combinaisons de faisceaux directifs). De tels faisceaux présentent en effet plusieurs avantages potentiels qui répondent exactement aux inconvénients des antennes auxiliaires non directives :

1/ Leur grande directivité leur permettra de ne capter en général avec un niveau élevé qu'un seul brouilleur. Si deux brouilleurs sont angulairement suffisamment proches pour être captés par le même faisceau, il seront captés par le même lobe latéral de l'antenne principale et le système fonctionnera pratiquement comme pour un brouilleur unique : c'est une fonction de "filtrage spatial" qui est ainsi assurée et dont les conséquences favorables sont examinées au paragraphe suivant.

APPLICATION DES PROPRIETES SPATIALES DES ANTENNES
AUX TECHNIQUES D'OPPOSITION DES LOBES SECONDAIRES

S. DRABOWITCH , C. AUBRY , J. ROGER

- 2/ Le brouilleur étant capté avec un gain important il en résultera un faible coefficient de pondération -de l'ordre de grandeur du niveau relatif du lobe latéral concerné- et par suite une faible contribution du bruit du récepteur auxiliaire au bruit total final. D'où un bon facteur d'amélioration.
- 3/ Un zéro dans la direction de rayonnement maximum de l'antenne principale. Ceci permet d'éviter de capter du "clutter" dans la voie auxiliaire de perturber le diagramme principal, et permet de renforcer le gain dans les autres directions utiles.
- 4/ Un centre de phase qui coïncide avec celui de l'antenne principale ce qui est favorable à la largeur de bande.
- 5/ Un gain minimum dans les zones où le niveau des latéraux de l'antenne principale seule est suffisamment bas pour ne pas risquer d'y capter des brouilleurs : d'où un minimum de perturbation du diagramme initial.

V - INFLUENCE DU PRE-FILTRAGE SPATIAL SUR LA RAPIDITE DE CONVERGENCE DU PROCESSUS

Un avantage offert par l'utilisation de diagrammes auxiliaires directifs est la possibilité d'exploiter le découplage des boucles de corrélation qu'elle procure afin d'accélérer la convergence du processus auto-adaptif. Pour le voir, rappelons tout d'abord que l'évolution temporelle des pondérations dans un système OLS du type analogique est régie par les N constantes de temps τ_n , liées aux N valeurs propres S_n de la matrice de covariance par :

$$\tau_n = \frac{\tau_0}{1 + \gamma S_n} \quad , \quad 1 \leq n \leq N$$

τ_0 = constante de temps en boucle ouverte

γ = gain en boucle ouverte X constante de conversion du mélangeur de corrélation

N = nombre de voies auxiliaires = ordre de la matrice de covariance

Par ailleurs la convergence vers la solution optimale implique $1 + \gamma S_n \gg 1$, si bien que

$$\tau_n \approx \frac{\tau_0}{\gamma S_n}$$

Des considérations de stabilité (boucles non bruitées) imposent une limite à la constante de temps la plus petite, liée à la valeur propre la plus grande S_{max} , en relation avec la bande passante ΔF des récepteurs :

$$\frac{\tau_0}{\gamma S_{max}} = \frac{\Delta F}{K} \quad (K \text{ de l'ordre de } 3 \text{ par exemple})$$

La plus grande des constantes de temps, correspondant à la valeur propre la plus petite S_{min} , constante de temps qui définit approximativement le temps d'adaptation du processus, est alors donnée par :

$$\tau_{max} = \frac{K}{\Delta F} \frac{S_{max}}{S_{min}}$$

Il en résulte que toute technique tendant à réduire l'étalement du spectre de la matrice de covariance va dans le sens d'une accélération de la convergence du processus.

Cela dit, le découplage, au moins partiel, des boucles de corrélation dû à l'utilisation de diagrammes auxiliaires directifs se traduit par une structure quasi diagonale de la matrice de covariance (chaque voie ne capte en général qu'un seul brouilleur). On peut alors envisager des procédés (limitation, contrôle automatique de gain...) permettant, sinon de "blanchir" totalement le spectre de cette matrice, du moins de réduire de façon significative son étalement et, par suite, de diminuer le temps d'adaptation.

VI - CONCLUSION

Il résulte de cet exposé que l'emploi dans la technique O.L.S. de faisceaux auxiliaires directifs, voisins des diagrammes d'échantillonnage associés à la largeur de bande de fréquence spatiale de l'antenne, présente des avantages certains.

Il reste à étudier plus en détail les possibilités qui s'offrent ainsi de réduire l'étalement du spectre de la matrice de covariance et par suite d'accélérer la convergence du processus.

L'élaboration concrète des faisceaux auxiliaires directifs est un problème qui reste à examiner et dont la solution dépend du type d'antenne considéré : antenne-réseau à balayage dans un plan ou en volume, système focalisant, combinaison réseau + focalisateur etc...

Dans chaque cas opérationnel un compromis devra être établi entre la configuration des brouilleurs possibles, le nombre de faisceaux auxiliaires avec leurs circuits de réception associés, le domaine angulaire à surveiller, et la complexité du système, c'est à dire son coût.



APPLICATION DES PROPRIETES SPATIALES DES ANTENNES
AUX TECHNIQUES D'OPPOSITION DES LOBES SECONDAIRES

S. DRABOWITCH , C. AUBRY , J. ROGER

VII - BIBLIOGRAPHIE

- 1 IEEE Trans. A.P. (Vol AP 24, n° 5) Septembre 76.
- 2 S. DRABOWITCH : "ANTENNES" Tome II pp 114-115 - MASSON 1978.
C. ANCONA

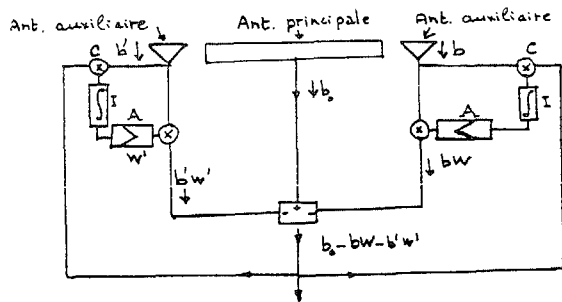


Fig. 1 : Systeme O.L.S.

C : correlateur
I : integrateur
A : amplificateur

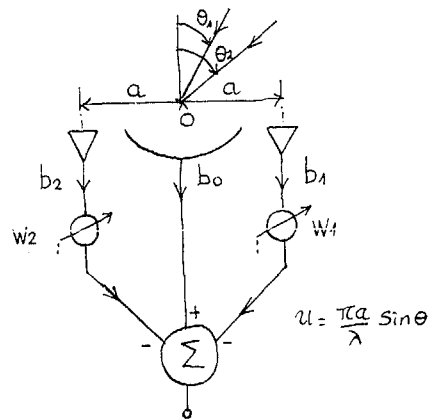


FIGURE 2 - OLS BI-BROUILLEUR

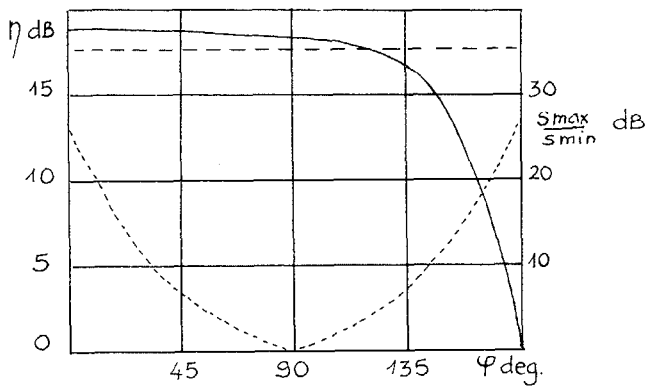
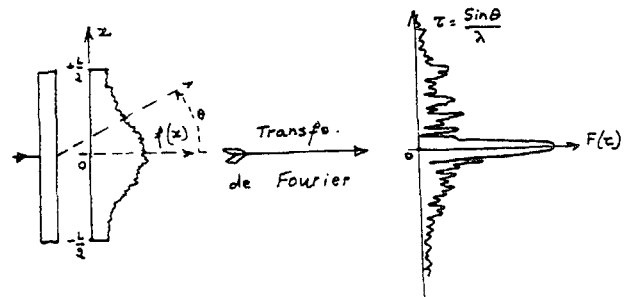
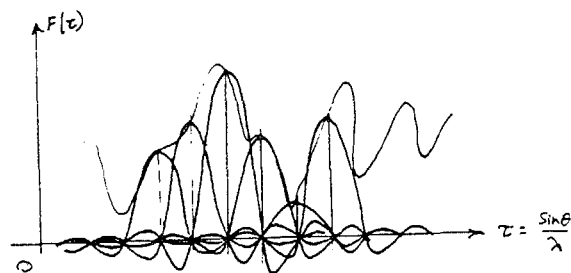


FIGURE 3 - APPLICATION NUMERIQUE



Illumination et diagramme typiques
Fig 4



Echantillonnage du diagramme

Fig. 5