

DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 20 au 24 MAI 1985

ELIMINATION AUTO-ADAPTATIVE DE BROUILLEURS
PAR UNE METHODE DE GRADIENT APPLIQUEE A UN RESEAU LACUNAIRE

F. CHRISTOPHE, C. MORISSEAU

OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES - B.P. 72 -
92322 - CHATILLON -

RESUME

Dans un réseau lacunaire constitué d'un petit nombre de capteurs dans une pupille de grande dimension, des lobes latéraux importants sont le prix de la résolution élevée.

L'élimination des signaux forts qui perturbent la détection des signaux utiles est donc nécessaire dans la plupart des utilisations de tels réseaux phasés.

La méthode présentée est la combinaison d'une formation de voies fixes et d'une minimisation sous contrainte par la technique du gradient avec des conditions initiales appropriées, et permet une mise en oeuvre sans charge de calcul superflue.

Des résultats de simulation sont exposés.

SUMMARY

In a sparse array built of few radiating elements within a large antenna, high level sidelobes compensate for the improved resolution.

The elimination of strong signals disturbing the detection of desired signals is thus necessary for most applications of such phased arrays.

The presented method is a combination of fixed weights beamforming with a gradient-like minimization under appropriate initial conditions, and allows for an implementation without undue calculations.

Some simulation results are shown.



ELIMINATION AUTO-ADAPTATIVE DE BROUILLEURS
PAR UNE METHODE DE GRADIENT APPLIQUEE A UN RESEAU LACUNAIRE

INTRODUCTION

Un réseau lacunaire est constitué par une répartition non périodique de capteurs, en nombre sensiblement inférieur à celui qui serait nécessaire pour former une pupille pleine.

Une telle antenne, dont les premières utilisations en radioastronomie sont déjà anciennes, permet, par formation de voies classique et affinage monopulse, la localisation d'une source unique avec une précision angulaire améliorée par rapport à la pupille pleine constituée des mêmes éléments.

Dans une première partie, nous rappellerons les propriétés du diagramme de rayonnement d'une antenne lacunaire, dont nous présenterons un exemple pour une et deux dimensions.

En présence de plusieurs sources, l'existence de lobes latéraux élevés, non maîtrisables par une technique d'apodisation par fenêtre, limite les possibilités de ce traitement classique. Celui-ci devient inopérant en présence de signaux de brouillage de niveau très supérieur à celui de la ou des sources à localiser.

Cette situation, que l'on peut rencontrer dans les domaines radar et sonar, nous conduit dans une seconde partie à appliquer aux exemples d'antenne lacunaire précédents un traitement auto-adaptatif d'élimination des signaux forts.

Nous montrerons ensuite comment l'algorithme retenu peut être séparé en deux étapes successives qui permettent une minimisation de la charge de calcul lorsqu'on forme toutes les voies angulaires.

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT D'UN RESEAU LACUNAIRE

Il est usuel de définir un réseau lacunaire par son nombre d'éléments N et son taux de remplissage α , évalué en attribuant à chaque capteur, supposé omnidirectionnel, une longueur $\lambda/2$ (λ : longueur d'onde) dans le cas d'un réseau à une dimension, ou une surface $\frac{\sqrt{3}}{8}\lambda^2$ dans le cas d'un réseau à deux dimensions (c'est la surface d'une maille hexagonale au centre de laquelle chaque capteur est distant de $\lambda/2$ de ses six voisins).

Le réseau lacunaire et le réseau plein de même nombre d'éléments ont alors des dimensions (longueurs ou surfaces) dans le rapport $1/\alpha$, et donc des largeurs de lobe principal (angle ou angle solide) dans le rapport α , corrigé d'un élargissement de lobe éventuel par apodisation du réseau plein.

Les lobes latéraux d'un réseau lacunaire ont un niveau moyen proche de $N^{-1/2}$ et se distribuent autour de cette valeur avec une dispersion d'autant plus grande que α est petit. Une caractérisation statistique de leur niveau peut notamment être trouvée dans (1) pour des réseaux aléatoires.

Nous traiterons dans ce qui suit deux exemples :

- une répartition linéique de 51 capteurs sur un segment de longueur 25λ - donc de taux de remplissage 0,1 - obtenue par programmation dynamique (fig. 1) afin de minimiser le maximum des lobes latéraux (fig. 2) ; cette valeur est ici de -12,2dB,

- une répartition régulière de 25 capteurs sur une circonférence de diamètre 26λ et donc de taux de remplissage 0,01. Son diagramme de rayonnement peut s'exprimer en somme d'une série rapidement décroissante de fonctions de Bessel, dont la première, d'ordre 0, traduit le diagramme d'une circonférence continue. Le plus fort lobe latéral vaut - 8 dB ; la figure 3 représente une coupe de ce diagramme dans le plan du réseau.

ELIMINATION ADAPTATIVE DE BROUILLEURS

Différentes méthodes d'adaptation des poids complexes W_i conduisent à une réduction des signaux perturbateurs dans la voie $S = \sum_{i=1}^N W_i X_i$ formée à partir des signaux X_i reçus par les capteurs i . Nous

retiendrons celle qui classiquement consiste à minimiser la puissance moyenne dans la voie formée sous une contrainte portant sur la norme des poids appliqués :

$$\sum_{i=1}^N |W_i|^2 = 1$$

Cette minimisation peut être approchée par un algorithme du gradient selon la formule itérative donnée par Compton (2) :

$$W_i(n+1) = W_i(n) - K \times S(n) \times [X_i^*(n) - W_i(n) S^*(n)]$$

(* indique la conjugaison complexe, n est l'ordre de l'itération)

Le gain K doit être suffisamment grand pour une convergence rapide, sans conduire toutefois à un régime oscillant, ou à l'élimination des signaux utiles ; ceux-ci devront en tout état de cause être de niveau très inférieur aux signaux perturbateurs voire au bruit propre de chaque capteur. La référence (3) notamment discute cet aspect.

Dans cette hypothèse, les valeurs initiales des poids à l'instant d'application de l'algorithme conditionneront la forme du diagramme de rayonnement après convergence, qui différera du diagramme initial essentiellement au voisinage des sources les plus fortes : le pointage initial dans une direction donnée sera conservé lorsque s'y trouvera une source utile de niveau suffisamment faible.

Nous avons vérifié ce comportement de l'algorithme sur les réseaux lacunaires précédents, en simulant une source utile et trois brouilleurs à fréquence pure, non corrélés, en présence d'un bruit blanc gaussien indépendant sur chaque capteur.

Les diagrammes initiaux sont ceux des figures 2 et 3, et la source utile -qui crée un niveau sur chaque capteur 20 dB au-dessus du bruit propre- est située dans leur lobe principal, tandis que les brouilleurs, dont la position a été indiquée, créent chacun un signal supérieur au bruit de 50 dB. Les figures 4 et 5 montrent les diagrammes obtenus après environ 700 itérations, valeur pour laquelle un état stable semble pratiquement atteint. On vérifie sur ces diagrammes la formation de trous dans la direction des brouilleurs, et l'absence d'autres déformations importantes, dans le lobe principal en particulier.

FORMATION SIMULTANEE DE PLUSIEURS VOIES ADAPTATIVES

Lorsqu'on veut former, selon le principe exposé ci-dessus, toutes les voies possibles (en nombre de l'ordre de N/α), la charge de calcul devient très élevée et correspond à des opérations superflues, puisque le nombre de signaux indépendants n'est que de N .

Une méthode plus économique peut être obtenue en deux étapes : on forme tout d'abord N voies adaptatives (en vérifiant qu'elles restent indépendantes), que l'on peut ensuite combiner pour former toutes les voies recherchées.

Un ensemble particulièrement simple de ces N voies adaptatives δ_{ij} provient du choix suivant pour les poids initiaux :

$$W_{ij}(0) = \delta_{ij} \quad (\delta_{ii} = 1, \delta_{ij} = 0 \quad \forall i \neq j)$$

chaque voie initiale étant alors réduite à un capteur différent.

Après n itérations de l'algorithme du gradient appliqué à chacune de ces voies, on observe des poids que l'on peut écrire sous la forme :

$$W_{ij}(n) = \delta_{ij} + \epsilon_{ij}(n)$$

traduisant une étape intermédiaire entre l'état initial et un état final où le diagramme résultant



ELIMINATION AUTO-ADAPTATIVE DE BROUILLEURS
PAR UNE METHODE DE GRADIENT APPLIQUEE A UN RESEAU LACUNAIRE

présente des trous dans les directions de toutes les sources, lorsqu'elles sont en nombre inférieur à celui des capteurs ; ici également, un choix judicieux du gain K assure la non élimination des sources faibles.

La proximité de $W_{ij}(n)$ et de $W_{ij}(0)$ se traduit par la constatation que $|\varepsilon_{ij}(n)| \ll 1$, que l'on met en évidence en traçant le diagramme angulaire des voies $s_j(n)$: les figures 6 et 7 obtenues pour des données numériques identiques à celles des exemples précédents- montrent la formation de trous importants dans les directions des sources fortes (les brouilleurs) et des déformations ailleurs, par rapport aux diagrammes omnidirectionnels initiaux, qui restent limitées et non corrélées (Cf. tracé de la moyenne des N diagrammes). La formation des voies directives à partir de ces N voies adaptatives intermédiaires peut alors se faire par application de pondérations fixes qui sont les déphasages purs :

$$W_{ki} = e^{-j\pi \bar{a}_i \cdot \bar{u}_k}$$

(\bar{u}_k : vecteur unitaire dans la direction k
 \bar{a}_i : position du capteur i)

Les voies de sortie S_k et les signaux d'entrée X_i sont maintenant reliés par une matrice de Butler $(W_{ki})(W_{ij}(n))$ qui se décompose en la somme matricielle du terme $(W_{ki})(\delta_{ij}) = (W_{ki})$ correspondant à une formation de voies directives non adaptées et du terme perturbateur $(W_{ki})(\varepsilon_{ij}(n))$ traduisant l'effet de l'adaptation.

Le diagramme angulaire de l'une de ces voies de sortie est représenté fig. 8 et fig. 9, sur lesquelles on note l'atténuation prévue dans la direction des brouilleurs, peu de déformation du lobe principal et une légère remontée du niveau crête

des lobes latéraux ; l'analogie avec les résultats obtenus figures 4 et 5 par adaptation directe est manifeste.

DISCUSSION

Il convient de souligner le caractère partiel des résultats présentés. Nous pouvons cependant justifier certaines des hypothèses faites, afin d'en diminuer l'aspect restrictif : il est prévisible que les systèmes radar futurs disposent d'un processeur numérique de traitement d'antenne, de compression distance et de filtrage Doppler -c'est d'ailleurs ce traitement multidimensionnel qui légitime la formation de voies angulaires en nombre supérieur à celui des capteurs dans un réseau lacunaire. L'élimination par traitement spatial adaptatif des signaux parasites les plus élevés comme première étape permet alors une réduction de la dynamique des calculs, et nous venons de montrer qu'il est suffisant de former seulement quelques voies angulaires à haute dynamique.

Enfin, pour une telle architecture du réseau de capteurs et du processeur de traitement, les dernières étapes de compression en distance et en vitesse doivent permettre la réjection des brouilleurs de niveau plus faible, et l'émergence des signaux utiles au-dessus du bruit.

REMERCIEMENTS

La Direction des Recherches, Etudes et Techniques a financé les travaux dont cette présentation est issue.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Y.T. LO - 1964 - A mathematical theory of antenna arrays with randomly spaced elements - IEEE-TAP Vol 14 n°1
- (2) R.T. COMPTON - 1980 - Power optimization in adaptive arrays : a technique for interference protection - IEEE-T-A-P Vol 28 n°1
- (3) H.H. ALKHATIB et R.T. COMPTON - 1978 - A gain optimizing algorithm for adaptive arrays - IEEE-T-A-P Vol 26 n°2

51 CAPTEURS PARMIS 512 POSITIONS - LOBES LATÉRAUX -12,2 DB



RESEAU LINEAIRE OPTIMISE

Figure 1

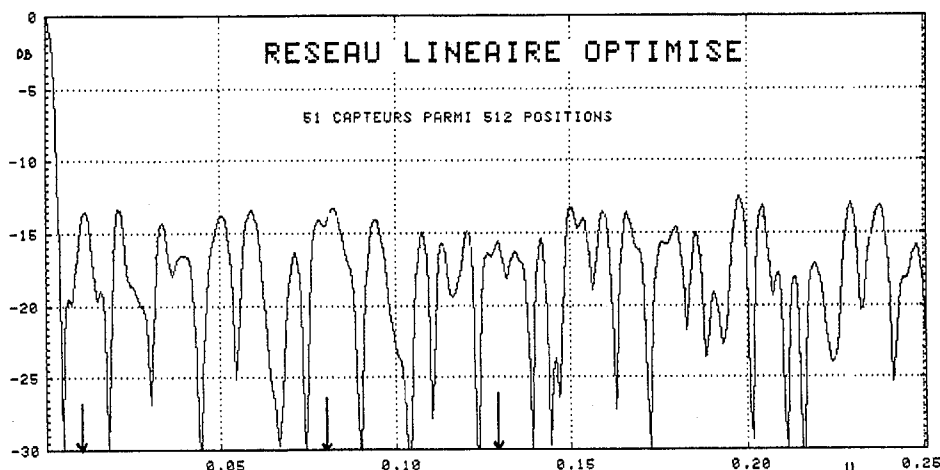


Figure 2



ELIMINATION AUTO-ADAPTATIVE DE BROUILLEURS
PAR UNE METHODE DE GRADIENT APPLIQUEE A UN RESEAU LACUNAIRE

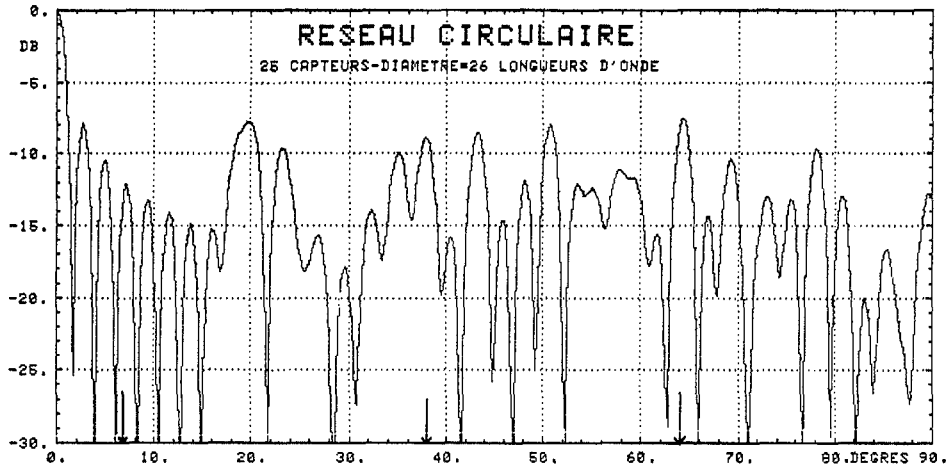


Figure 3

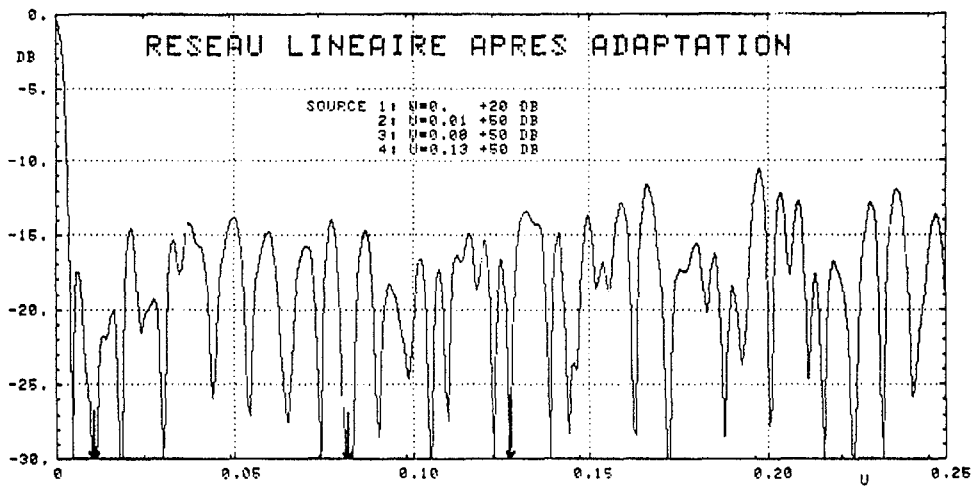


Figure 4

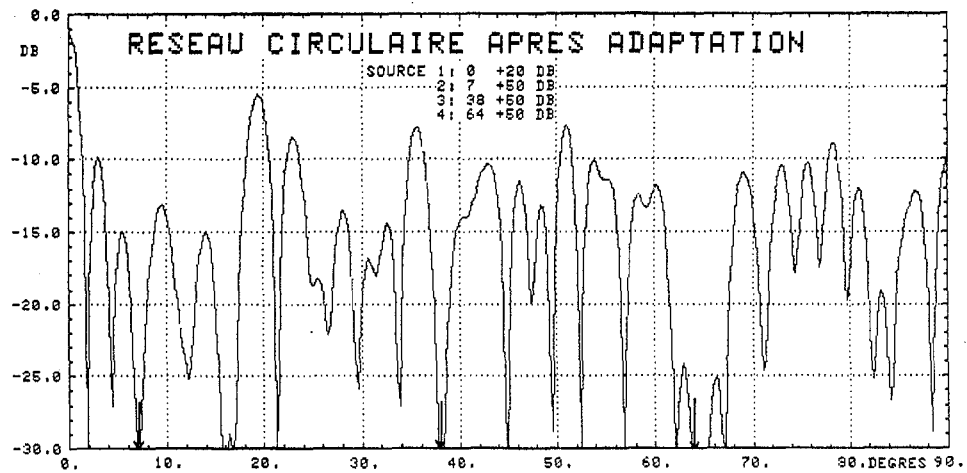


Figure 5

ELIMINATION AUTO-ADAPTATIVE DE BROUILLEURS
 PAR UNE METHODE DE GRADIENT APPLIQUEE A UN RESEAU LACUNAIRE

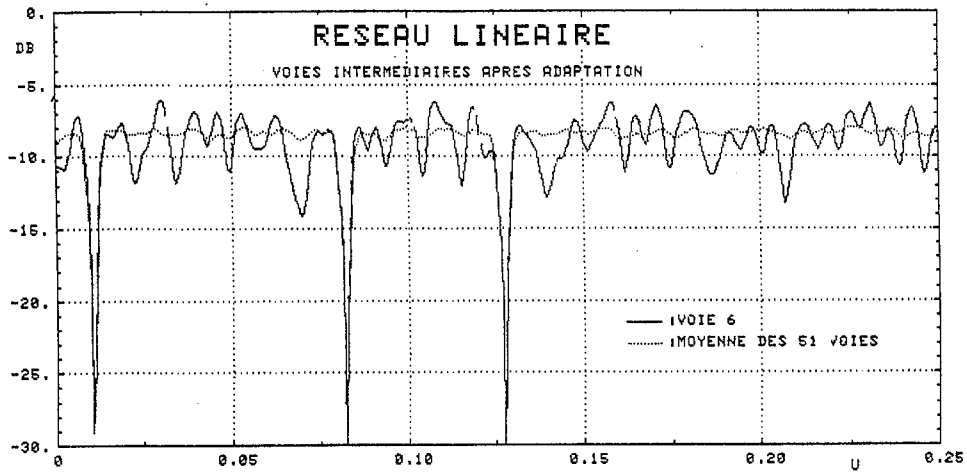


Figure 6

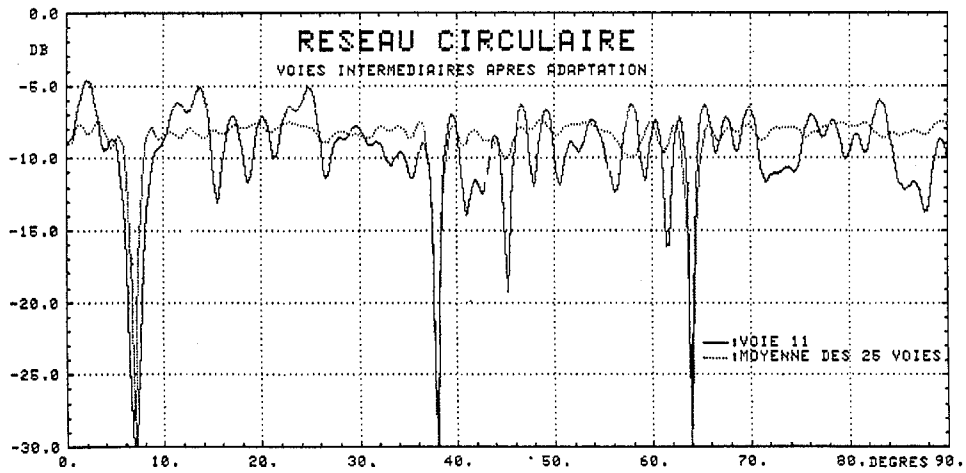


Figure 7

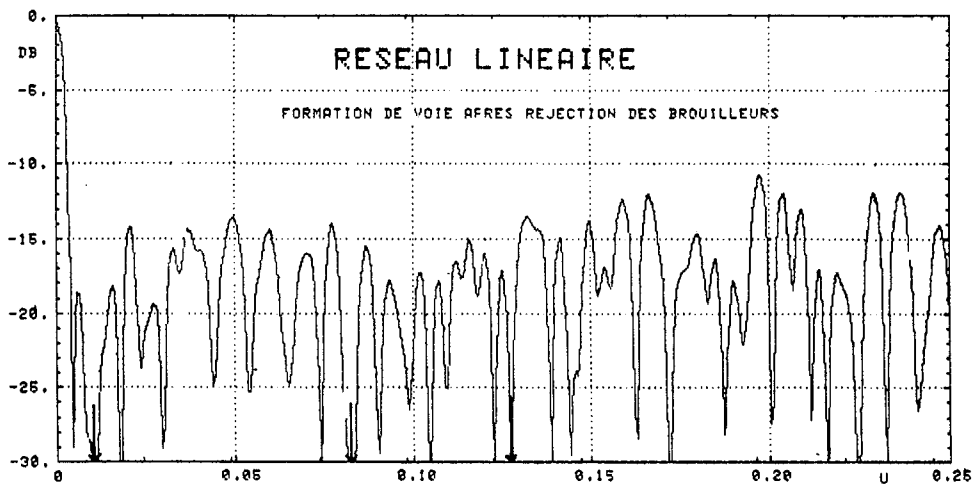


Figure 8



ELIMINATION AUTO-ADAPTATIVE DE BROUILLEURS
PAR UNE METHODE DE GRADIENT APPLIQUEE A UN RESEAU LACUNAIRE

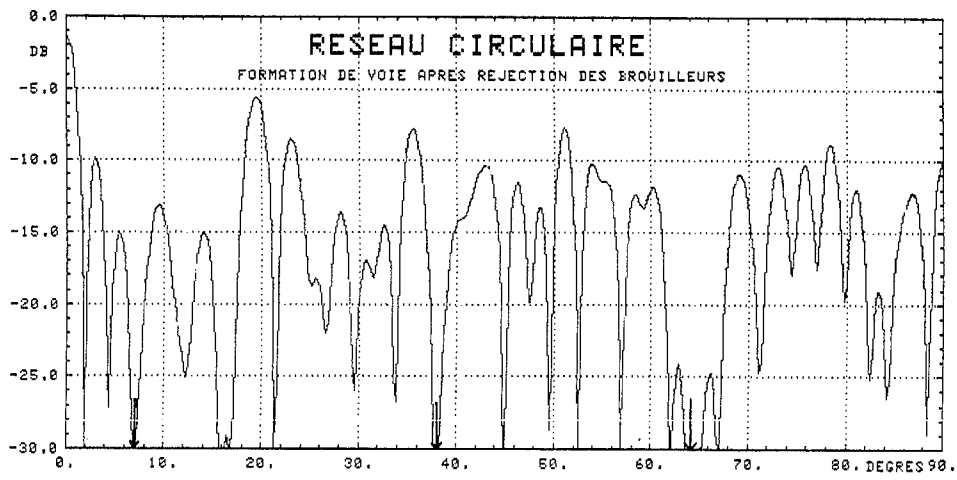


Figure 9