

ANTENNES, LA TRILOGIE : ADAPTIVE – PARAMÉTRIQUE- SYNTHÉTIQUE

- Laurent KOPP -

iXWaves

laurent.kopp@ixwaves.com

RÉSUMÉ

Au delà de la « limite de diffraction », héritage de l'optique que l'on décrit aujourd'hui sous le nom de "Théorème de WOODWARD", trois types d'antenne ont démontré que cette loi divine peut être contournée. Ils ont ouvert aux antennes des champs nouveaux.

L'antenne adaptative critique la pertinence de cette limite comme mesure de la résolution spatiale de l'antenne. Cette « révolution culturelle » a renouvelé le paysage du traitement d'antenne, son vocabulaire (variété d'antenne, filtrage spatial, « matched field », cohérence spatiale, etc.), ses traitements (OLS, MUSIC, ESPRIT, etc.) et ses applications dans tous les domaines (Télécom, Sonar, Radar, Echographie).

L'antenne paramétrique, bien que spécifique du monde acoustique, permet de réaliser des antennes d'émission très large bande et très directives à basse fréquence. Elle est l'aboutissement des recherches sur les modélisations en acoustique non linéaire et trouve ses applications dans le monde sous-marin (communications acoustiques, sondeurs, etc.) ou aérien (projecteur de sons).

L'antenne synthétique exploite le mouvement propre de l'antenne physique pour engendrer une ouverture de grande taille en réalisant la combinaison cohérente de réceptions successives. Ses applications sont multiples en cartographie radar ou sonar, en échographie, en sismologie, et même en radioastronomie.

1. INTRODUCTION

Il y a 25 ans, à un étudiant qui abordait le domaine des antennes, la tradition faisait surtout sentir le poids des difficultés pour aller au-delà de la sélectivité spatiale classique, à savoir qu'une antenne de diamètre D possédait une ambiguïté angulaire de largeur de l'ordre de λ / D et une profondeur de champ de largeur de l'ordre de λ / D^2 , où λ désigne la longueur des ondes utilisées. Ces

limitations étaient profondément ancrées dans l'enseignement, très fortement influencé sans doute par les résultats de l'optique. A ce sujet on parlait d'ailleurs davantage de "figure de diffraction" que de "fonction d'ambiguïté spatiale". N'oublions pas l'importance de l'optique dans les fondements des antennes en général, et tout particulièrement des antennes réseaux (considérez, par exemple, les réseaux de diffraction ou les lentilles de FRESNEL).



Figure 1 : Figure de diffraction d'une lentille optique

Aujourd'hui, sans remettre en cause cette limitation, nombreuses sont les circonstances où elle n'en est pas vraiment une. Le but de cet exposé est de discuter de trois exemples dans lesquels cette " limite de diffraction " a été apparemment dépassée. Cette discussion permettra d'éclaircir les mécanismes ayant permis de surmonter la difficulté initiale. Par ailleurs, chacun de ces exemples s'inscrit en fait dans un domaine plus large dont le développement se poursuit aujourd'hui.

Le premier exemple concerne le traitement des antennes réseaux en réception. Ce domaine s'est particulièrement développé dans les 25 dernières années, contribuant à " l'ère digitale " tout en en profitant. L'approche utilisée pour dépasser la limite de diffraction est une approche critique dans laquelle ce n'est pas l'existence de la largeur de l'ambiguïté qui est contestée, mais sa pertinence.

Le second exemple est relatif aux antennes en émission. Cet exemple est assez particulier car il est limité aux ondes acoustiques (aériennes ou aquatiques), encore que l'on

puisse y voir une certaine analogie avec l'optique cohérente (laser). L'originalité de la démarche est de dissocier l'antenne physique de celle qui rayonne l'onde utile. Oui, c'est magique !

Le troisième exemple concerne toutes les antennes, mais plus particulièrement les couples émission-réception. Ils exploitent une propriété de "cohérence temporelle" qui permet d'exploiter le temps (quand cela est possible) lorsqu'une autre ressource n'est pas disponible, en particulier l'espace. L'exemple fondateur est celui du SAR (radar à ouverture synthétique) qui exploite le déplacement du porteur pour fabriquer une antenne de grande taille.

Ces trois exemples n'épuisent pas les progrès réalisés dans le domaine des antennes au cours du dernier quart de siècle. Néanmoins ces thèmes ne sont pas anecdotiques, et leurs développements sont fort bien représentés dans les actes de ce séminaire.

L'acoustique a joué un grand rôle dans la mise au point de ces méthodes. D'une part les besoins sont importants (: les ouvertures sont dramatiquement pauvres en longueurs d'onde), mais d'autre part, heureusement, les solutions existent (: les fréquences sont basses et les signaux accessibles à la manipulation digitale, c'est-à-dire à la programmation). Il n'est donc pas étonnant de trouver pléthore d'exemples dans le domaine acoustique (Sonars, Echographie, Séismique,...)

2. LIMITE DE WOODWARD SUR LE VOLUME D'AMBIGUÏTÉ

Le théorème de WOODWARD limite le volume d'ambiguïté et décourage la recherche de méthodes permettant d'obtenir un lobe d'ambiguïté infiniment étroit. La démonstration, élémentaire, de ce théorème va nous permettre d'introduire les notations utilisées par la suite et de rappeler l'origine du blocage.

Considérons donc une antenne constituée d'un réseau de K capteurs alimentant K filtres linéaires invariants, dont les fonctions de transfert constituent les composantes d'un vecteur \underline{H} dénommé « filtre spatial ».

La fonction d'ambiguïté permet de quantifier l'effet du filtre spatial sur le signal. Le gain énergétique est donné par le produit scalaire:

$$D(\theta) = \left| \underline{H}^T \underline{D}_\theta \right|^2$$

Dans cette formule, le vecteur « source » \underline{D}_θ décrit la fonction de transfert du milieu pour une source de position θ . Quand la position de la source parcourt l'espace, le vecteur source décrit la « variété d'antenne ».

Le filtre spatial étant fixé, cette fonction permet de mesurer l'énergie du signal de sortie en fonction de la position de la source dans l'espace. Le support de cette fonction scalaire peut être à une, deux ou trois dimensions selon la nature du problème traité, bien qu'en toute rigueur, dans l'espace réel, avec une "vraie" antenne, il soit nécessairement à 3 dimensions (site, gisement, distance).

A titre d'exemple, la figure 2 représente la fonction d'ambiguïté d'un filtre spatial "classique" dont l'expression est donnée par:

$$\underline{H} = \frac{\underline{D}^*}{(\underline{D}^+ \underline{D})}$$

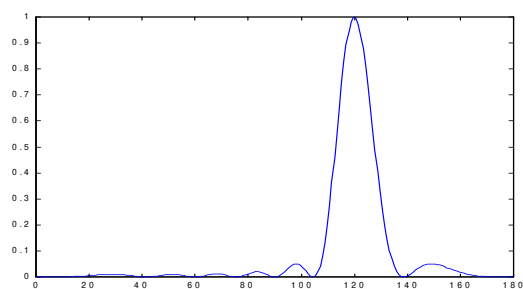


Figure 2 : Fonction d'ambiguïté du traitement classique en représentation cartésienne

La fonction d'ambiguïté correspondante est en fait le produit scalaire normalisé des deux vecteurs \underline{D}_θ et \underline{D} . Le traitement classique reçoit donc une interprétation algébrique très simple: pour pointer une antenne dans une direction, il suffit d'aligner le filtre spatial et le vecteur source correspondant de la variété. C'est ce traitement qui est utilisé dans les systèmes « naturels ».

Les "lobes" qui apparaissent sur la figure 2 sont présents sur les fonctions d'ambiguïté de tous les filtres spatiaux, d'une façon ou d'une autre. On distingue un lobe "principal" de largeur finie (caractérisé par sa largeur à mi-hauteur souvent notée $2\Theta_3$) et des lobes secondaires qui rappellent les figures d'interférence des lentilles optiques.

On définira le volume d'ambiguïté par l'intégrale suivante (Ω désigne l'espace de toutes les positions):

$$\begin{aligned} V(\underline{H}) &= \int_{\Omega} D(\omega) d\omega = \int_{\Omega} \left| \underline{H}^T \underline{D}_\omega \right|^2 d\omega \\ &= \underline{H}^T \left(\int_{\Omega} \underline{D}_\omega \underline{D}_\omega^+ d\omega \right) \underline{H} \end{aligned}$$

En introduisant la matrice $\underline{Q} = \int_{\Omega} \underline{D}_\omega \underline{D}_\omega^+ d\omega$, $V(\underline{H})$ est la forme quadratique $\underline{H}^T \underline{Q} \underline{H}^*$ (la matrice \underline{Q} est non

singulière, même si elle peut être assez mal conditionnée). Si l'on considère un filtre spatial \underline{H} de gain unité ($\underline{H}^T \underline{D} = 1$) pour une source de vecteur source \underline{D} , on peut appliquer le théorème de CAUCHY-SCHWARZ et obtenir l'inégalité suivante :

$$(\underline{D}^+ \underline{Q}^{-1} \underline{D})^{-1} \leq V(\underline{H})$$

Ce qui démontre que le volume d'ambiguïté est borné inférieurement et qu'il ne peut être annulé (Théorème de WOODWARD). On ne pourra donc affiner le lobe principal sans augmenter les lobes secondaires.

Cette limitation a longtemps été confondue avec le pouvoir séparateur de l'antenne, c'est-à-dire sa capacité à séparer deux objets.

3. ANTENNE ADAPTATIVE

L'antenne adaptative a été introduite il y a environ 40 ans par B. WIDROW [1], comme cas particulier de son travail sur le filtrage adaptatif et de son célèbre et universel algorithme LMS.

Le filtre spatial qui minimise le volume d'ambiguïté est donné par :

$$\underline{H} = \frac{(\underline{Q}^{-1} \underline{D})^*}{\underline{D}^+ \underline{Q}^{-1} \underline{D}}$$

La principale critique que l'on peut faire à ce résultat c'est que le filtre spatial obtenu est totalement indépendant du contexte, en particulier de la distribution spatiale des bruits. Il souffrira donc facilement des interférences.

En reprenant le problème de la détermination d'un filtre spatial optimal au sens de la théorie statistique de la décision dans un contexte gaussien, on trouve que le filtre ci-dessus est optimal pour détecter une source de vecteur source \underline{D} dans du bruit de cohérence spatiale \underline{Q} . C'est ce qu'on appelle le « filtre adapté spatial ».

On peut aussi montrer que l'on peut remplacer \underline{Q} par la matrice interspectrale $\underline{\Gamma}$ des signaux reçus par l'antenne. L'antenne adaptative est obtenue en remplaçant la matrice interspectrale inconnue par une estimation $\hat{\underline{\Gamma}}$ sur une durée finie. Pour cela, on utilise la méthode du maximum de vraisemblance :

$$\underline{H}_A = \frac{(\hat{\underline{\Gamma}}^{-1} \underline{D})^*}{\underline{D}^+ \hat{\underline{\Gamma}}^{-1} \underline{D}}$$

En bref, l'antenne adaptative et le filtre adapté spatial c'est, idéalement et asymptotiquement, la même chose.

Sur la figure 3 est présenté un exemple de réponse d'une antenne adaptative à un champ composé d'une source dans du bruit incohérent. En comparant les réponses des traitements classique et adaptatif, on constatera un gain en résolution spatiale du traitement adaptatif. Cette figure pourrait faire croire à tort à la violation du théorème de WOODWARD. Il n'y a en réalité aucune contradiction, car cette figure est une réponse d'antenne et non pas une fonction d'ambiguïté.

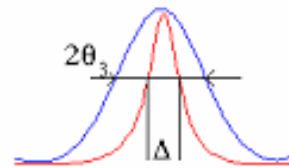


Figure 3 : Antenne adaptative pour une source seule

On peut, par ailleurs, tracer la fonction d'ambiguïté d'un filtre adaptatif en fixant le filtre calculé dans une situation donnée. Un exemple de résultat est présenté sur la figure 4

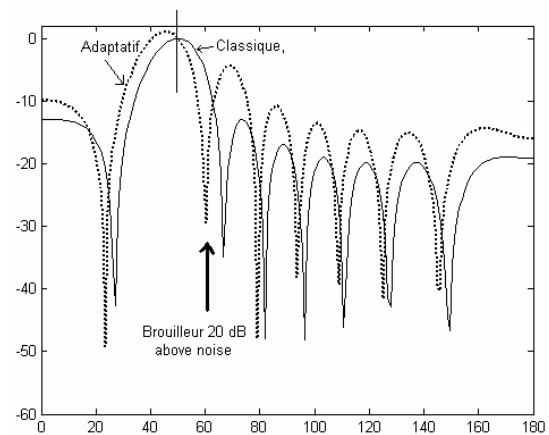


Figure 4 : Comparaison des fonctions d'ambiguïté du filtre classique et du filtre adaptatif.

Le volume d'ambiguïté du traitement adaptatif de la figure 4 est visiblement plus important que celui du traitement classique. Par ailleurs on constatera sur cette même figure que l'ambiguïté du filtre adaptatif passe par l'unité dans la direction pointée, mais que cela n'est pas sa valeur maximale.

La figure 5 démontre également l'amélioration du pouvoir séparateur de l'antenne adaptative.

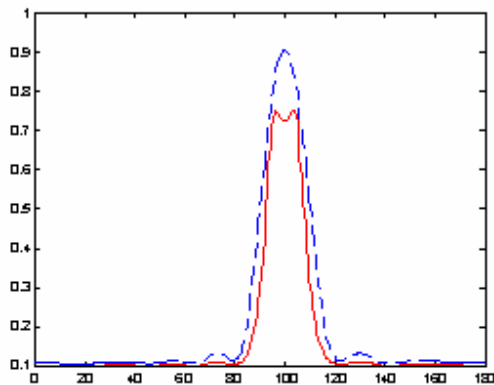


Figure 5 : Réponses des antennes classique (- -) et adaptative pour séparer deux sources voisines.

On peut conclure de tout cela que l'antenne adaptative possède une ambiguïté dont le volume respecte le théorème de WOODWARD. Il n'y a pas de relation directe entre largeur d'ambiguïté et pouvoir séparateur. Pour le traitement adaptatif, le pouvoir séparateur augmente avec le rapport signal sur bruit des sources, alors que pour le traitement classique, il ne dépend que de la géométrie. On peut préciser la largeur de la réponse à une source :

$$\left(\frac{\Delta}{2\theta_3} \right) \cong \left(\frac{Ks}{2} \right)^{-1/2}$$

Par ailleurs une expression approchée de son pouvoir séparateur R_A a été proposée [2]:

$$\left(\frac{R_A}{2\theta_3} \right) \cong \left(\frac{Ks}{2} \right)^{-1/4}$$

Dans ces expressions, K désigne le nombre de capteurs et s le rapport signal sur bruit des sources (de mêmes niveaux quand elles sont 2).

On constatera que la limite de diffraction peut être dépassée et qu'il faut clairement distinguer largeur d'ambiguïté et résolution.

Le filtrage adaptatif s'est considérablement développé depuis son apparition, en poursuivant la même méthode: modélisation déterministe et probabiliste des observations et mise en œuvre d'un critère décisionnel. Cette approche culmine aujourd'hui dans les techniques de séparations en sous-espaces (MUSIC, ESPRIT, etc.).

Les progrès accomplis peuvent se mesurer par l'évaluation de la résolution spatiale de ces méthodes. Les méthodes de détection par les valeurs propres ont une résolution R_V

$$\left(\frac{R_V}{2\theta_3} \right) \propto (KNs^2)^{-1/4}$$

où N désigne la taille de l'observation (produit BT). La présence de ce facteur légitime le caractère « Haute Résolution » (HR) de ces méthodes nouvelles. Pour ce qui concerne l'estimation par projection (dans le cas de MUSIC, il s'agit de la projection de la variété d'antenne sur l'espace bruit), la résolution R_E est donnée par :

$$\left(\frac{R_E}{2\theta_3} \right) \propto (Ns)^{-1/4}$$

La forme de la dépendance en K dans ces deux dernières formules manifeste la sous-optimalité de ces techniques de séparation robuste.

Si l'on se pose la question de la définition d'une borne sur le pouvoir séparateur d'une antenne, on peut le proposer comme un problème de détection clairvoyante (y-a-t'il une ou deux sources ?), et calculer les performances de ce récepteur simple. On trouvera [3] un pouvoir séparateur R_B donné par :

$$\left(\frac{R_B}{2\theta_3} \right) \propto N^{-1/4} (Ks)^{-1/2}$$

Une telle formule satisfait l'intuition : la dépendance en Ks correspond au gain spatial cohérent, et la dépendance en N dénote le caractère HR. Ces deux propriétés sont attendues d'une méthode optimale.

4. ANTENNE PARAMÉTRIQUE

Les milieux mécaniques sont fortement non linéaires; ils ne peuvent être soumis à des contraintes trop fortes sans le manifester (ruptures). Dans le cas des milieux fluides, ces comportements sont encore plus flagrants (cavitation) bien qu'ils se manifestent seulement à proximité des sources sonores.

Ce phénomène est très facile à mettre en évidence. On en présente un exemple sur la figure 6 ci-dessous : impulsion rayonnée par une sonde médicale à 5 MHz. Le signal émis par le transducteur utilisé pour cette figure est une sinusoïde .

Ces propriétés non linéaires du milieu fluide sont exploitées pour engendrer des basses fréquences à partir d'une porteuse primaire haute fréquence.

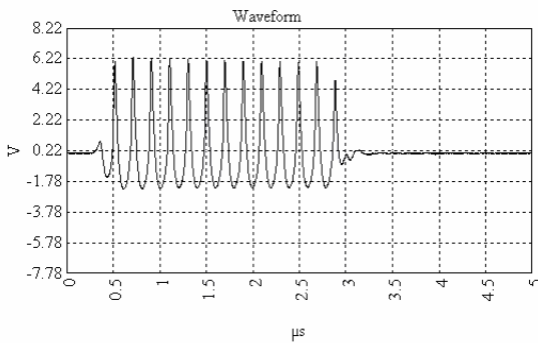


Figure 6 : Mesure en cuve d'un pulse ultrasonore à proximité du transducteur d'émission

Une antenne paramétrique constituée d'un transducteur en forme de disque est montrée sur la figure 7. Un signal « primaire » composé de deux fréquences f_1 et f_2 alimente le transducteur de diamètre d ; ce transducteur est adapté à la fréquence moyenne $f_p = (f_1 + f_2) / 2$ et n'a pas besoin d'être très large bande.

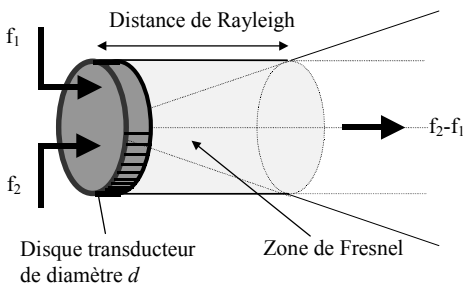


Figure 7: Vue symbolique de la transduction paramétrique

Ce transducteur rayonne une onde qui est un mélange de ces deux signaux. La non-linéarité du fluide va provoquer l'apparition de nouvelles composantes spectrales à $2f_1$, $2f_2$, $f_1 \pm f_2$ etc.

Parmi ces nouvelles composantes spectrales, seule nous intéresse ici la fréquence différence $f_s = f_1 - f_2$ car les autres composantes seront rapidement absorbées par le milieu.

La conversion non linéaire est réalisée dans le volume situé devant le transducteur physique. L'efficacité de la conversion est en proportion du niveau du signal primaire; elle sera donc significative dans un volume de forme complexe défini par la distance de FRESNEL (zone cylindrique où le signal reste collimaté), la distance d'absorption et la distance de choc. Ces 3 distances étant elles-mêmes définies par le diamètre de l'antenne physique, la fréquence primaire et le niveau d'émission.

En bref, une antenne paramétrique est une antenne virtuelle rayonnant en mode axial (ENDFIRE). On peut la considérer comme constituée d'un continuum d'émetteurs fabriqués dans le milieu par les non linéarités de l'eau ou de l'air, et synchronisées par l'onde primaire. L'antenne physique travaille en haute fréquence (100 KHz typiquement en ASM) ; sa bande relative est « normale » (20%) et sa taille modeste (par exemple 30 cm de diamètre). L'antenne rayonnante, elle, travaille à une fréquence basse (5-10 KHz), sa taille peut être importante (volume de self démodulation du signal primaire dans l'eau), mais ne suppose aucun investissement matériel ; enfin, sa bande relative est très importante à la fréquence secondaire (100%). La sélectivité spatiale de l'antenne paramétrique peut être aussi bonne que celle de l'antenne primaire.

La limite de diffraction est donc apparemment dépassée puisqu'on a :

$$\frac{\lambda_s}{d} = \left(\frac{f_p}{f_s} \right) \frac{\lambda_p}{d}$$

Le rapport entre la fréquence primaire et la fréquence secondaire est typiquement de l'ordre de la dizaine. Une antenne paramétrique peut être 10 fois plus sélective qu'un transducteur classique de même diamètre.

Ici, la limite de diffraction a été contournée de façon astucieuse puisqu'en fait l'antenne utilisée est virtuelle : la limite est bien présente mais s'applique à une autre fréquence et à une autre antenne.

Les antennes paramétriques ont été utilisées en acoustique sous-marine pour la transmission de données [8], et pour le sondage sédimentaire. Elles ont aussi été utilisées dans des applications de projecteur sonore (*Holosonics*).

5. ANTENNE SYNTHÉTIQUE

L'antenne synthétique, à l'origine [9-10] appliquée à la cartographie radar (Synthetic Aperture Radar = SAR), exploite le mouvement propre du véhicule portant l'antenne physique. Elle fabrique de manière artificielle une antenne de grande taille dont la géométrie correspond à l'espace couvert par l'antenne lors de son déplacement.

De la même manière, le principe a été utilisé, mais de façon plus tardive, pour la cartographie des fonds marins. Le problème du SAS (Sonar à Antenne Synthétique) est compliqué par le contrôle de la navigation de la plateforme porteuse [11-12].

Plus généralement on parlera d'« Antenne Synthétique » lorsqu'une ressource déficiente (manque d'espace, manque

de ressources ou contrainte de fonctionnement) est remplacée par du temps. Ceci suppose une « stabilité spatiale » de la scène considérée en un sens assez large : il peut s'agir d'une cohérence parfaite (SAR, SAS, Séismique ou Echographie), ou seulement d'une stationnarité spatiale au second ordre (synthèse d'ouverture en radioastronomie). Cette exigence de stabilité spatiale limite l'application des techniques synthétiques à la cartographie, au sondage ou à l'échographie (pas le temps de bouger).

5.1. Systèmes actifs

Il s'agira du SAR, du SAS, du Séismique et de l'Echographie.

5.1.1. SAR et SAS

Dans les systèmes utilisant un émetteur, le signal émis est bien maîtrisé. Si la scène est fixe, on peut considérer que tout se passe comme si on disposait d'une antenne d'émission dont la géométrie correspond à l'ensemble des positions occupées par l'émetteur. On reconstitue le diagramme d'émission a posteriori par sommation des signaux reçus aux différentes récurrences, en tenant compte du mouvement de l'émetteur.

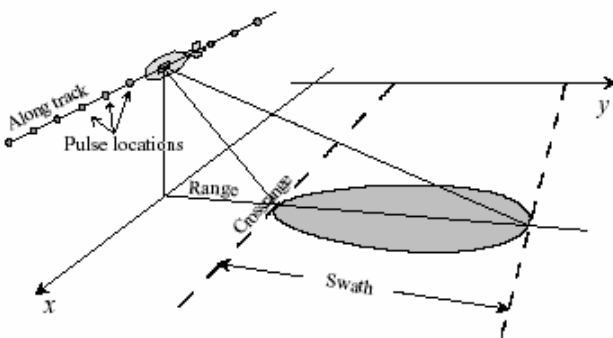


Figure 8: Sonar à Antenne Synthétique (SAS), à partir d'un sonar latéral porté par un AUV.

Il est conceptuellement plus facile d'envisager une antenne synthétique en commençant par considérer un scénario dans lequel soit l'émetteur, soit le récepteur est fixe et où l'autre élément occupe des positions fixes successives ; la scène observée étant fixe.

Considérons pour cela un capteur de réception fixe et la suite $\{r_n(t)\}_{n=1,N}$ des signaux reçus sur ce capteur lors des émissions successives, pendant lesquelles l'émetteur occupe des positions variables. Si l'on fait simplement la somme des signaux en question, cela est équivalent à fabriquer le signal qui serait effectivement reçu par ce même capteur lors d'une émission unique par une antenne

de N capteurs sur laquelle le signal serait appliqué simultanément à tous les émetteurs. Si par exemple, les positions des capteurs sont distribués sur une droite, l'opération précédente correspond à pointer l'antenne d'émission à l'infini. On peut aussi, bien entendu, appliquer une suite de décalages $\{\tau_n\}_{n=1,N}$ aux signaux précédents, ces retards pouvant être calculés de manière à focaliser l'antenne virtuelle d'émission dans une position souhaitée quelconque. Cette possibilité de focaliser l'antenne a posteriori en une position quelconque constitue l'intérêt principal de l'antenne synthétique. Il y a quand même une différence entre ce procédé et une vraie antenne : le bruit électronique pour chaque mesure est augmenté par rapport à ce qu'il serait si l'on disposait effectivement de l'antenne d'émission complète. En détection on perd en \sqrt{N} .

On obtiendrait un résultat similaire si l'émetteur était fixe et le récepteur mobile. Dans les deux cas, l'ambiguïté résultante résulte du produit émission-réception, et correspond à la directivité d'une antenne à N capteurs selon la géométrie définie par le déplacement.

Dans la pratique, pour le SAR ou le SAS, aucun des deux éléments émetteur et récepteur n'est fixe ; ils sont généralement solidaires.

Si l'antenne d'émission est de diamètre D , que la portée est R , que la vitesse est v et que l'antenne de réception est constituée d'un réseau de capteurs de largeur D , on montre que la résolution orthoradiale est $0.5D$, indépendamment de la distance, et que la vitesse est limitée par la condition que le déplacement de l'antenne entre deux tirs ne doit pas excéder sa demie-longueur.

$$v \cdot \frac{2R}{c} \leq \frac{D}{2}$$

Cette condition est très contraignante pour le SAS et pour le SAR spatial.

Par ailleurs, pour mettre en œuvre un tel traitement, il est nécessaire de connaître la géométrie de l'antenne à mieux que $\lambda/8$, ce qui est presque impossible dans le cas du SAS avec un système de navigation à inertie classique. Des techniques dites « d'autofocalisation » [13] ont été développées pour assurer le contrôle de la forme de l'antenne synthétique avec une précision suffisante.

En bref, ici encore, dans un contexte très spécifique, la limite de diffraction a été dépassée largement si l'on considère l'ouverture physique disponible.

5.1.2. Echographie et Prospection Sismique

En Echographie et en Séismique, le principe de l'antenne synthétique est également utilisé, mais pour des raisons différentes.

En Echographie [14-16], il s'agit de pallier à une insuffisance de ressources (circuits analogiques et numériques). Supposons par exemple que l'on dispose d'une antenne de 128 éléments, mais que l'on ne dispose que de 64 canaux de traitements. Il est possible de réaliser un traitement cohérent de l'antenne complète en combinant plusieurs tirs qui n'utilisent chacun que 64 éléments, soit en émission, soit en réception, et ceci en allouant les canaux disponibles aux différentes parties de l'antenne complète.

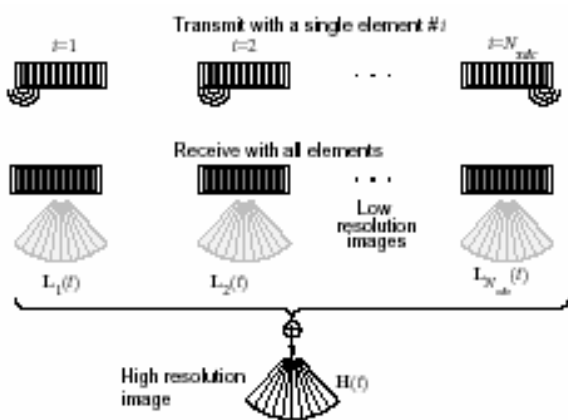


Figure 9: L'utilisation de l'antenne synthétique permet d'obtenir la focalisation dynamique à l'émission.

Les échographes fonctionnent en général dans le champ proche de leur sonde, et ont besoin d'être focalisés pour optimiser leurs performances. Comme il s'agit d'un système actif, la focalisation à l'émission est généralement fixe, tandis que la focalisation à la réception est dynamique. Le principe de l'antenne synthétique permet de réaliser la focalisation dynamique a posteriori en émettant successivement sur chaque transducteur et en enregistrant les signaux reçus sur tous les capteurs.

Pour appliquer le principe de l'antenne synthétique à l'échographie, il pourrait sembler utopique de considérer le milieu comme stationnaire. Il est clair en effet, qu'un patient en vie n'est pas totalement immobile. Cependant, la cadence de tir est si élevée (quelques KHz), que l'on peut en général négliger les mouvements du patient et de l'opérateur. Une exception notable cependant : l'échographie cardiaque.

En prospection sismique [17], le milieu est hautement anisotrope, et la vitesse de propagation n'est pas connue a

priori, puisqu'elle dépend de la nature des sédiments et de leur géométrie. L'antenne d'émission est réalisée en déplaçant la source sismique en différents endroits, et en enregistrant, pour chaque tir, les signaux reçus par les géophones ou les hydrophones. L'ensemble complet de ces émissions définit une antenne qui peut être pointée a posteriori en n'importe quelle position. En réalité le procédé n'est pas si simple car dans les solides il existe à la fois des ondes de compression et de cisaillement qui se propagent à des vitesses différentes. Par ailleurs il peut être difficile de contrôler le signal émis (ex. : explosion). En traitement sismique, on parle de « stacking », plutôt que de pointage.

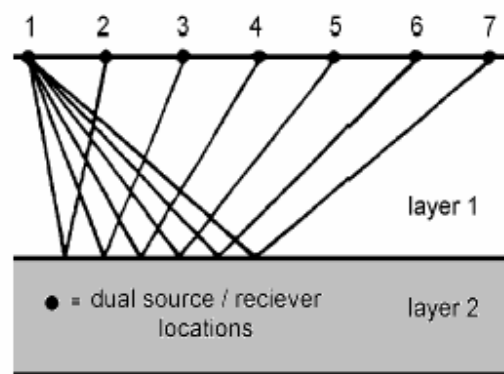


Figure 10: Utilisation du principe de l'antenne synthétique en prospection sismique

5.1.3. Emission spatialement codée

L'antenne synthétique n'est finalement qu'un cas particulier d'un système utilisant un réseau d'émetteurs sur lequel on peut se donner la liberté d'appliquer un signal différent sur chaque émetteur [18-21]; sur les antennes traditionnelles, chaque émetteur rayonne le même signal à un retard près.

Soit donc N émetteurs sur lesquels on cherche à définir les signaux $\{e_n(t)\}_{n=1,N}$ qu'il faut appliquer pour atteindre un objectif d'ambiguïté satisfaisant. Pour faire une émission classique, ou même synthétique, on définit un signal de base (CW, FM, PSK, etc.) et l'on cherche seulement à préciser l'instant de référence τ_n auquel le signal est appliqué :

$$e_n(t) = e(t - \tau_n)$$

C'est ainsi que fonctionnent tous les systèmes actifs.

Mais d'autres stratégies d'émission sont possibles. On peut citer par exemple le cas de l'émission colorée [18] dans lequel chaque émetteur rayonne un signal de fréquence distincte ; ceci en vue d'éclairer tout point de l'espace avec un signal différent. On obtient alors une directivité d'émission par filtrage adapté.

En [18] la possibilité est considérée d'utiliser une famille de signaux orthogonaux, et il est montré que, pour que ceci soit efficace, il faut que les signaux soient « fortement orthogonaux » par paires (les familles PSK ne sont pas fortement orthogonales, alors que les signaux SAR le sont).

5.2 Systèmes Passifs

Dans les systèmes passifs on ne maîtrise pas le signal émis. Il n'est généralement pas répétitif ou du moins sa cohérence temporelle n'est pas suffisante. Par contre, on peut supposer que le signal émis par chaque source est spatialement stationnaire et que la densité spectrale croisée des signaux reçus par deux antennes est constante. C'est typiquement le cas des signaux émis par des sources célestes.

5.2.1. Radio-Astronomie

Il est connu que la densité spectrale croisée des signaux reçus par 2 capteurs séparés par une distance z est une fonction de z , qui est la transformée de Fourier de la distribution spatiale de l'intensité. C'est le théorème de VAN CITTERT ZERNIKE :

$$\gamma_{12}(f, z) = \int \exp\left(-2i\pi \frac{zu}{\lambda}\right) I(u) du$$

L'enregistrement de $\gamma_{12}(f, z)$ comme fonction de z fournira la distribution spatiale de l'intensité $I(u)$ par une transformée de Fourier inverse.

Il s'agit de la synthèse d'ouverture ou de la supersynthèse d'ouverture en radio-astronomie. Dans cette application, on dispose d'un ou de plusieurs interféromètres dont la longueur de base et l'orientation varient au cours du temps soit par la rotation propre de la terre soit par le changement volontaire d'écartement entre les capteurs de réception (les antennes de Jodrell Banks sont disposées sur des rails).

5.2.2. Sonar Passif et Trajectographie

En Sonar Passif, on utilise des mesures successives d'azimuts pour estimer la position complète et la vitesse (supposée constante) des diverses sources détectées. Le procédé consiste à identifier la suite des mesures à un modèle inertiel. Il existe toute une famille d'options algorithmiques constituant ce qu'on nomme la

« Trajectographie par Azimétrie », depuis des procédés manuels (règle à trous) jusqu'à des méthodes par Filtrage de KALMAN, en passant par divers procédés plus ou moins empiriques. Le problème du sonar passif c'est que la situation acoustique n'est pas stationnaire ! Les durées mises en jeux sont considérables et la situation cinématique évolue fortement pendant la durée de l'observation (plusieurs dizaines de minutes). Il est donc nécessaire, si l'on veut exploiter le temps (l'essence même de l'antenne synthétique !), de tenir compte au moins de la cinématique des sources en supposant qu'elles évoluent de manière inertielle. Si chaque point de l'espace est alors supposé porteur potentiel d'une source en mouvement inertiel, on peut dire que la cartographie à réaliser porte, non pas sur un espace à 2 ou 3 dimensions, mais sur un espace à 4, 5 ou 6 dimensions (pour tenir compte de la vitesse).

6. DISCUSSIONS : LIMITES NOUVELLES ET SPÉCULATIONS

Il est rassurant de voir comment le dépassement d'une contrainte a permis d'ouvrir des voies nouvelles. Les trois exemples précédents se sont révélés particulièrement féconds en développements et applications.

L'antenne adaptative est le prototype même des antennes à traitement du signal. L'exposé de son fonctionnement fait désormais partie de l'enseignement du traitement des antennes réseaux, et ses applications sont innombrables. La compréhension de son fonctionnement intime a orchestré le développement du traitement d'antenne pendant de nombreuses années et a ouvert la voie aux traitements "Haute Résolution" (MUSIC, ESPRIT).

L'antenne paramétrique a également donné lieu à diverses applications spectaculaires, mais assez peu connues, en acoustique aérienne (projecteurs de sons) et aquatique (sondage sédimentaire principalement). Dans l'ensemble cependant, les applications restent encore confidentielles.

Nouvelles limites ?

Ces trois histoires peuvent-elles nous être utiles aujourd'hui ? Ne sommes-nous pas actuellement en prise avec des blocages similaires à celui de la "limite de diffraction" ? Cela est certain ... Mais ces blocages et leurs dépassements nourriront la génération suivante...

Certaines limitations sont évidentes aujourd'hui et des voies de recherche déjà ouvertes.

D'une façon générale c'est la critique des hypothèses fondatrices qui va structurer la suite.

Pour l'antenne adaptative et le traitement d'antenne en général, les hypothèses contraignantes sont relatives aux aspects déterministes statiques (connaissance de la variété d'antenne) et dynamiques (durée de validité du modèle, par exemple mouvement d'antenne), ainsi qu'aux aspects aléatoires (statistiques non gaussiennes). Les premières critiques de ces hypothèses ouvrent de nombreuses voies de recherches en cours (autocalibration, séparation statistique,...).

Pour l'antenne synthétique, la limitation principale provient de l'hypothèse de stationnarité. Certains domaines utilisent déjà des méthodes prenant en compte la non stationnarité. Par exemple, la trajectographie par azimétrie intègre un modèle de mouvement inertiel des objets observés, c'est-à-dire un modèle dans lequel on autorise les objets à se déplacer en mouvement rectiligne uniforme. On peut penser généraliser cette approche en introduisant une modélisation dynamique des objets observés. Aujourd'hui cela paraît prohibitif, mais si on la place dans un cadre ambitieux comme par exemple la détection des collisions astrales, on peut imaginer qu'il soit indispensable d'intégrer un signal pendant un temps si long qu'il faut s'intéresser au mouvement des objets à détecter.

4. REMERCIEMENTS

Cet article n'aurait pu voir le jour sans l'aide et les encouragements de plusieurs personnes que l'auteur tient à remercier ici. Tout d'abord Jean-Jacques FUCHS le commanditaire de cette publication, Hervé ARDITTY le provocateur fécond, et Francine KOPP, inspiratrice et correctrice intransigeante. Merci également à Lee-Ann BALAZUC pour son œil professionnel dans la traduction et l'édition, et Thierry BALAZUC pour sa complicité.

8. REFERENCES

Antenne adaptative

- [1] B. Widrow, P. E. Mantey, L. J. Griffiths, and B. B. Goode, "Adaptive Antenna Systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 55, No. 12, December 1967, pp. 2143-2159.
- [2] D. Thubert and L.Kopp, "Measurement accuracy and resolving power of High Resolution passive methods", *EUSIPCO Proceed.*, 1986, pp.1037-1040.
- [3] P.Germain, A. Maguer and L. Kopp, "Comparison of resolving power of array processing methods by using an analytical criterion", 1989, *Glasgow ICASSP89 Proceed.*, pp.2791-2794.

Antenne Paramétrique

- [4] P.J. Westervelt. "Parametric Acoustic Array", *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 35, 535-537, 1963.
- [5] H.O. Berktaay and D.J. Leahy. "Farfield performance of parametric transmitters," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 55, pp. 539-546, 1974.
- [6] R.H. Mellen and M.B. Moffett, " Model for parametric acoustic sources," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 61 , 325 -337, 1977
- [7] Non-Linear Acoustics: A Tutorial Meetings, *Proceedings of the IOA*, Vol. 14, part 3, Bath, 8th July 1992.
- [8] L. Kopp, "Communication with parametric array", *IEEE Trans. Ocean Engineer.*, Jan. 2000.

Antenne Synthétique Radar et Sonar

- [9] C.A. Wiley, "Synthetic Aperture Radars – a paradigm for technology evolution", 1985, *IEEE AES-21 Trans.*, pp.440-443.
- [10] C.A. Wiley, "Pulsed Doppler Radar method and apparatus", 1965, *US Patent 3,196,436*.
- [11] L.J.Cutrona, "Comparison of sonar system performance achievable using synthetic aperture techniques with the performance achievable by more conventional means," *Journal of the Acoustic Society of America*, 1975, 58 (2), pp. 336-348.
- [12] Special Issue on Acoustic Synthetic Aperture Processing, *IEEE Ocean Engineering Trans.* , Vol. 17 ,Jan 1992.
- [13] D. Billon and F. Fohanno, "Theoretical performance and experimental results for synthetic aperture sonar self-calibration", in *Proceedings of Ocean 98*, Nice, France, September 1998, pp. 965-970.

Antenne Synthétique en échographie et en sismique

- [14] J. A. Jensen, O. Holm, L. J. Jensen, H. Bendtsen, H. M. Pedersen, K. Salomonsen, J. Hansen, and S. Nikolov. "Experimental ultrasound system for real-time synthetic imaging". In *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, volume 2, pages 1595–1599, 1999.
- [15] M. Karaman, P. C. Li, and M. O'Donnell. "Synthetic aperture imaging for small scale systems". *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, 42:429–442, 1995.
- [16] S. I. Nikolov and J. A. Jensen. "Investigation of the Feasibility of 3D Synthetic Aperture Imaging". In *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, 2003.
- [17] J.L. Mari, F. Glangeaud and F. Coppens, *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens*, Editions Technip, Paris 2001.

Emission codée

[18] G. Bienvenu, D. Pillon, P. Tournois, “Ambiguity functions of an imaging system using simultaneous multiple transmission”, *GRETSI Proc.*, 1981, pp.975-984.

[19] F. Gran and J. A. Jensen. “Multi Element Synthetic Aperture Transmission using a Frequency Division Approach”. In *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, 2003.

[20] R. Y. Chiao, L. J. Thomas, and S. D. Silverstein. “Sparse array imaging with spatially-encoded transmits”. In *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, pages 1679–1682, 1997.

[21] N.Okada,Y.Tamura, C.Ishihara, M.Miura, H.Yanagida, M. Sato, N. Ishii, T. Aoki and T. Hisamoto. “Evaluation of High-Speed 3D Imaging System which Utilizes Coded Wavefront”, In *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, 2003.