

L a calibration d'antenne

Position et nature des problèmes de calibration d'antenne Particularités de l'application au radar

The Problem of Antenna Array Calibration for Radar Applications

par F. LE CHEVALIER, D. MEDYNSKI*, D. MULLER**

LCTAR (Le Centre Thomson d'Applications
Radar) - 78140 Vélizy-Villacoublay.

* ONERA (Office National d'Études et
de Recherches Aérospatiales - 92320 Châtillon

** Thomson CSF/SDC - 92363 Meudon la Forêt.

Résumé

L'objet de cet article est de présenter les problèmes de calibrations d'antennes dans le cas de réseaux d'antennes radar. L'objectif de cette partie est de préciser, dans un premier temps, la *nature des données* caractéristiques du problème, dans le cadre de l'application radar, en insistant sur leurs spécificités vis-à-vis du problème générique du traitement d'antenne. La *nécessité d'une calibration* du réseau est analysée, dans une deuxième étape, en fonction de la nature des traitements appliqués aux signaux reçus. Enfin, les *causes de perturbation* sont analysées dans un dernier paragraphe, et une esquisse de leur modélisation est fournie.

Mots clés : Radar, antenne, calibration, focalisation, adaptativité.

Abstract

The objective of this paper is to present the problem of antenna array calibration for radar applications. In the first part, the nature of the data is described, with special emphasis on their specificity compared to the general antenna situation. The need for array calibration is then analyzed, depending on the signal processing effectively used. Finally, the causes of the perturbations are studied, and a coarse modelization is given.

Key words : Radar, antenna, calibration, focalisation, adaptivity.

1. Introduction

L'évolution technologique récente dans le domaine des récepteurs compacts et du traitement de signal rend désormais possible la réalisation de radars à « formation de faisceaux par le calcul » : ces radars sont constitués d'un réseau d'antennes et de récepteurs associés, suivis d'un traitement permettant de focaliser les observations dans les directions souhaitées. Si le principe de tels réseaux de capteurs est déjà largement connu – et mis en œuvre dans les domaines voisins du sonar ou de la sismique –, en revanche les problèmes posés en détection radar présentent certaines particularités (cohérence des signaux, densité des cibles, présence de fouillis, contraintes de fausse alarme, etc.) qui peuvent conduire à l'emploi de procédés de traitement particuliers.

L'objectif de cette partie est de préciser, dans un premier temps, la *nature des données* caractéristiques du problème, dans le cadre de l'application radar, en insistant sur leurs spécificités vis-à-vis du problème générique du traitement d'antenne. La *nécessité d'une calibration* du réseau est analysée, dans une deuxième étape, en fonction de la nature des traitements appliqués aux signaux reçus. Enfin les *causes de perturbation* sont analysées dans un dernier paragraphe, et une esquisse de leur modélisation est fournie.

2. Nature du problème en radar

L'objet de ce chapitre est de décrire sommairement la nature des signaux sources, les caractéristiques des réseaux d'antennes

considérés en radar, et la forme des traitements appliqués sur les signaux reçus en sortie de l'antenne.

2.1. NATURE DES SIGNAUX SOURCES

Les signaux reçus par une antenne radar comportent diverses contributions, classifiées principalement en signaux « utiles », destinés à être détectés et caractérisés par le radar, et en signaux « parasites », susceptibles de perturber le traitement des signaux de la catégorie précédente.

2.1.1. Signaux « utiles »

Les signaux « utiles » sont constitués par les « échos radar », obtenus par réflexion sur les objets à détecter d'un signal déterministe rayonné à l'émission, et capté par le dispositif de réception après réflexion. Les signaux « utiles » sont généralement des signaux à support temporel bref (de quelques centaines de nanosecondes à quelques dizaines de microsecondes), de faible énergie, et dont la forme est déterministe et connue, à un terme de retard pur, de décalage fréquentiel (Doppler), et de direction d'arrivée près.

Les signaux « utiles » possèdent, de par leur origine, une propriété forte de cohérence temporelle : leur nature déterministe a pour conséquence le fait, par exemple, que les signaux provenant de deux cibles séparées angulairement, mais situées à la même distance du radar, et affectées de la même vitesse radiale, présentent une matrice interspectrale qui diffère notablement de celle que fourniraient deux sources incohérentes placées aux mêmes positions.

Enfin ils possèdent une propriété de cohérence spatiale, caractéristique de sources spatialement ponctuelles.

2.1.2. Signaux « parasites »

2.1.2.1. Fouillis

Les signaux « parasites » sont constitués d'une part, par les échos radar de « fouillis », obtenus par réflexion des signaux émis sur l'environnement du radar (sol, mer, pluie,...). Ces signaux présentent généralement des propriétés de cohérence temporelle moins forte que les signaux engendrés par des réflexions ponctuelles; ils correspondent en effet à la superposition des signaux réfléchis par un très grand nombre de réflecteurs élémentaires, d'amplitude et de phase aléatoires. Leur cohérence spatiale est généralement faible, (autrement dit leur spectre angulaire est « large »).

Ils présentent en revanche une propriété de cohérence en fréquence Doppler, leur spectre de vitesse radiale étant concentré sur un domaine lié à la distribution des vitesses composées (vitesse radiale des réflecteurs, et vitesse propre de l'antenne). Dans le cas des radars fixes de surveillance aérienne, cette concentration fréquentielle permet de s'affranchir par filtrage Doppler de la présence des signaux de fouillis. Dans le cas des radars aéroportés,

ou des radars de surveillance du sol, en revanche, le domaine de vitesses occupé par les cibles utiles recouvre celui du fouillis, et les traitements spatiaux doivent prendre en compte la présence de ce dernier.

2.1.2.2. Interférences externes

Les signaux « parasites » sont constitués, d'autre part, par des sources d'émission externes, non cohérentes avec les signaux d'émission du radar. Ces dernières peuvent être issues, soit d'émissions interférentes non volontaires (par exemple de signaux de communication), soit d'émissions de brouillage destinées à mettre en défaut les capacités de détection du radar.

Ces signaux peuvent généralement être considérés comme temporellement incohérents, non cohérents également en fréquence Doppler, et en revanche spatialement cohérents puisque provenant d'une source d'émission ponctuelle définie. Les signaux parasites externes présentent donc des propriétés assez similaires aux sources rencontrées en acoustique sous-marine passive.

2.1.2.3. Bruit thermique

Les signaux mentionnés précédemment se trouvent superposés, de façon systématique, à un bruit de fond dont la contribution essentielle est due à l'agitation thermique des électrons dans les étages supérieurs des chaînes de réception. Ce bruit possède généralement des propriétés simples sur le plan statistique : bruit gaussien, temporellement et spatialement blanc, stationnaire. Sa nature le rend donc beaucoup plus aisé à traiter que le bruit de réverbération en acoustique sous-marine, par exemple.

2.2. CARACTÉRISTIQUES DES ANTENNES

La fonction « antenne » d'un radar disposant d'une fonction de traitement spatial numérique comporte principalement deux étages, intervenant à différents titres dans la qualification des propriétés de calibration du radar :

– le premier étage est constitué de l'aérien, qui assure la conversion du champ électromagnétique incident en un signal électronique. Le champ d'ondes incident est échantillonné par un certain nombre d'antennes élémentaires (typiquement de quelques unes à quelques dizaines). Une antenne élémentaire peut être constituée soit d'un élément rayonnant unique (dipôle, par exemple), soit d'un « sous-réseau », constitué lui-même du regroupement, réalisé en hyperfréquence, de sources rayonnantes élémentaires.

Dans tous les cas, une antenne élémentaire est caractérisée par son diagramme de rayonnement (éventuellement fonction de la fréquence), et par la position de son centre de phase.

– le deuxième étage est constitué par les chaînes de réception électroniques, assurant l'amplification, la transposition en

fréquence, le filtrage, la démodulation cohérente et l'échantillonnage numérique des signaux reçus par les antennes élémentaires. La fonction requise des chaînes de réception est d'assurer, de la façon la plus linéaire possible, le filtrage des signaux utiles, et la suppression des parasites situés en dehors de la bande de fréquence occupée par les signaux utiles.

Le signal obtenu en sortie d'une chaîne de réception élémentaire contient donc la superposition des différents signaux sources (utiles et parasites) affectés des différences de marche correspondant à leur direction d'arrivée, ainsi que du bruit thermique. Les signaux numérisés sont disponibles sous forme complexe.

2.3. NATURE DES TRAITEMENTS SPATIAUX

2.3.1. Principes

Les signaux numérisés en sortie des chaînes de réception élémentaires font l'objet de divers types de traitements numériques. Les traitements « temporels » sont ici simplement cités pour mémoire; leur fonction est d'assurer l'exploitation des propriétés « temporelles » des signaux reçus en vue de leur détection, et de l'estimation des paramètres de distance et de vitesse des cibles qui les ont réfléchis.

Les traitements « spatiaux » ont pour objectif principal d'assurer l'intégration cohérente des signaux reçus sur les antennes élémentaires (filtrage adapté spatial) en vue de la détection des signaux utiles, et l'estimation des directions d'arrivée de ces derniers.

2.3.1.1. Filtrage spatial

Les qualités requises du filtrage spatial sont essentiellement des capacités d'isolation entre sources d'énergies très différentes (signaux utiles associés à des cibles de réflectivités très différentes, ou signaux utiles de faible énergie superposés à des signaux parasites puissants).

Selon les ordres de grandeur requis, ces qualités peuvent être atteintes par un traitement de formation de voies classique (à coefficients fixes, affectés éventuellement d'une pondération d'amplitude) permettant d'atteindre un niveau suffisant de « lobes secondaires » angulaires; dans certaines applications néanmoins, notamment en présence de parasites puissants, ou de cibles à fort contraste, le niveau de « lobes secondaires » accessibles est insuffisant, et une formation de voie adaptative est nécessaire.

Par ailleurs, le filtrage spatial est généralement astreint à préserver les propriétés temporelles des signaux filtrés, de façon à garantir l'efficacité des traitements temporels mentionnés plus haut. En particulier toute distorsion de la forme des signaux doit être maîtrisée.

2.3.1.2. Localisation

La fonction de localisation angulaire peut être remplie directement à l'aide du filtrage spatial : les signaux incidents sont dans

ce cas traités par une batterie de filtres adaptés à un jeu de directions angulaires, et la direction d'arrivée des cibles détectées est déduite des directions de pointage des filtres ayant donné lieu à la détection. Dans certains cas, la précision fournie par cette approche est insuffisante, et des traitements particuliers (haute-résolution, maximum de vraisemblance, par exemple) sont appliqués au voisinage de cibles préalablement détectées, dans le but de mesurer précisément leurs paramètres angulaires.

2.3.2. Mise en œuvre

2.3.2.1. Traitement par blocs

Les caractéristiques de fonctionnement générales d'un radar conditionnent la mise en œuvre des traitements précédemment décrits. En particulier, la durée d'intégration cohérente des signaux reçus est limitée :

- par la nécessité de fonctionner en « agilité de fréquence d'émission », pour des raisons de discrétion, et de « levée d'ambiguïté » en distance ou en vitesse,
- par le « temps de cohérence » des cibles,
- par l'influence du déplacement des cibles ou des sources d'émissions parasites,
- par l'influence éventuelle du mouvement de l'antenne (par exemple dans le cas d'une antenne tournante au sol, ou dans celui d'une antenne portée par un mobile).

Dans ces conditions, le traitement est généralement mis en œuvre sous la forme d'un traitement par blocs (ou « rafales ») de données : une séquence élémentaire de signal est mémorisée, puis traitée, éventuellement selon plusieurs modes en parallèle; deux rafales successives sont dans ce cas généralement traitées avec des paramètres différents.

2.3.2.2. Modes de traitement

Sur un même bloc de données peuvent être par exemple appliqués en parallèle :

- un traitement de détection, constitué d'un banc de filtres spatiaux, à coefficients fixes ou adaptatifs, destiné à effectuer la surveillance panoramique d'un secteur angulaire donné. Ce mode de traitement est utilisé dans les radars de veille.
- un traitement de mesure ou d'analyse, destiné à effectuer la mesure précise des paramètres angulaires d'une cible détectée. Un tel traitement peut être utilisé par exemple dans le but d'identifier une cible à la suite d'une première détection, ou dans celui de mettre à jour la mesure de sa position dans un processus de poursuite entretenue. Les traitements implantés dans ce cas sont généralement des traitements à haute-résolution, ou des traitements basés sur une estimation au sens du maximum de vraisemblance. Ils sont utilisés dans les radars de poursuite, ou les radars multifonctions.

3. Nécessité de la calibration

Ce chapitre a pour objet de mettre en évidence les raisons particulières qui nécessitent la mise en œuvre de procédés de calibration, dans les différents modes de traitement décrits brièvement ci-dessus.

3.1. DÉTECTION ET FORMATION DE VOIES FIXES

3.1.1. Origine du problème

Un traitement de formation de voies à coefficients fixes peut être envisagé dans le cas où le contraste entre les signaux sources à détecter est limité (à une valeur qui dépend fortement de la forme des diagrammes des antennes élémentaires, et de leur nombre). L'objectif de la formation de voies est dans ce cas d'assurer la détectabilité d'une source faible, située au voisinage d'une source forte, conformément au schéma présenté en figure 1 ci-dessous.

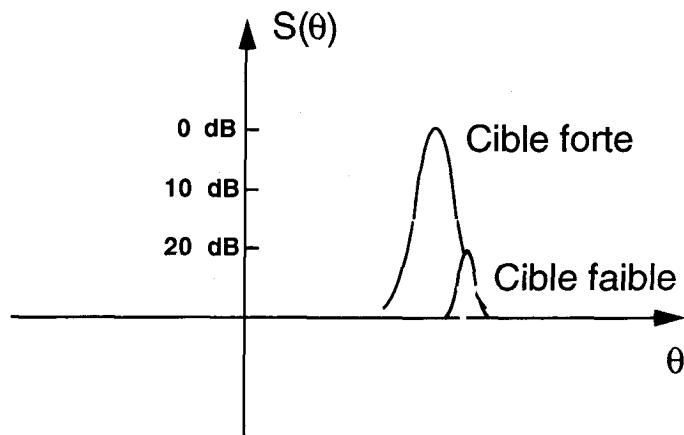


Figure 1. – Détection des cibles faibles

Si les performances obtenues par la formation de voies élémentaire (compensation des déphasages associés à la direction de visée) sont insuffisantes, on peut être conduit à « apodiser » l'antenne, c'est-à-dire à effectuer une pondération des signaux reçus sur les différents capteurs avant de les sommer en phase. Cette opération permet, au prix d'un faible élargissement du lobe formé, de réduire considérablement le niveau des lobes secondaires. Typiquement, le niveau souhaité pour ces lobes secondaires, compte tenu de la dynamique des cibles attendues, est généralement situé entre 0 et -20 dB par rapport à l'isotrope (c'est-à-dire entre -30 et -50 dB par rapport au lobe principal, pour des antennes de gain voisin de 30 dB dans les bandes radar classiques).

3.1.2. Nature des besoins en calibration

Dans de nombreux cas pratiques, cependant, la fonction de réseau apodisée théorique est affectée par différentes perturbations qui dégradent notablement ses caractéristiques : imperfection de réalisation des antennes, non-identité des différents récepteurs, influence de l'environnement — perturbations qui seront décrites plus en détail au paragraphe 4. Ces perturbations conduisent à effectuer une pondération inexacte des signaux reçus, et une sommation « pas tout à fait en phase » de ces signaux : le résultat est la formation de lobes imparfaits, éventuellement élargis mais surtout affectés de lobes secondaires qui dans certains cas peuvent perturber gravement la détection des cibles les plus faibles.

La première raison qui justifie la nécessité de calibrer l'antenne est donc la recherche du modèle qui permette d'obtenir la « meilleure » fonction de pondération fixe possible compte tenu de la présence des perturbations. Dans un nombre important de situations, les qualités de pondération obtenues après calibration, et compensation dans la loi d'apodisation permettent d'atteindre les performances requises pour la détection des cibles.

3.1.3. Limitation de la méthode

Dans nombre de situations opérationnelles, néanmoins, la qualité de l'apodisation obtenue après calibration n'est pas suffisante pour garantir l'efficacité de la détection des cibles les plus faibles. Cette situation se présente, en particulier lorsque des signaux interférents puissants (brouilleurs) sont superposés au signaux utiles, ou bien lorsque le contraste entre signaux utiles dépasse la limite imposée par les caractéristiques propres de l'antenne. Cette situation se présente fréquemment lorsque le réseau d'antennes élémentaires est lacunaire. C'est le cas par exemple, pour une antenne découpée en un petit nombre de sous-réseaux ; lorsque la formation de voie est pointée dans une direction distincte de la normale au plan de l'antenne, des « lobes de recombinaison » peuvent apparaître, et dégrader fortement les capacités de détection du dispositif. Un exemple de cette situation est donné sur la figure 2, pour une antenne optimisée composée de 6 sous-réseaux de 3 ou 5 éléments.

3.2. DÉTECTION ET FORMATION DE VOIES ADAPTATIVES

3.2.1. Origine du problème

La solution retenue dans ces conditions consiste alors à effectuer un filtrage spatial à coefficients adaptatifs. Les coefficients de filtrage sont généralement obtenus par résolution directe d'un problème d'optimisation sous contraintes :

– le critère à minimiser est lié à la puissance de sortie du filtrage, éventuellement assortie d'une fonction d'erreur mesurant

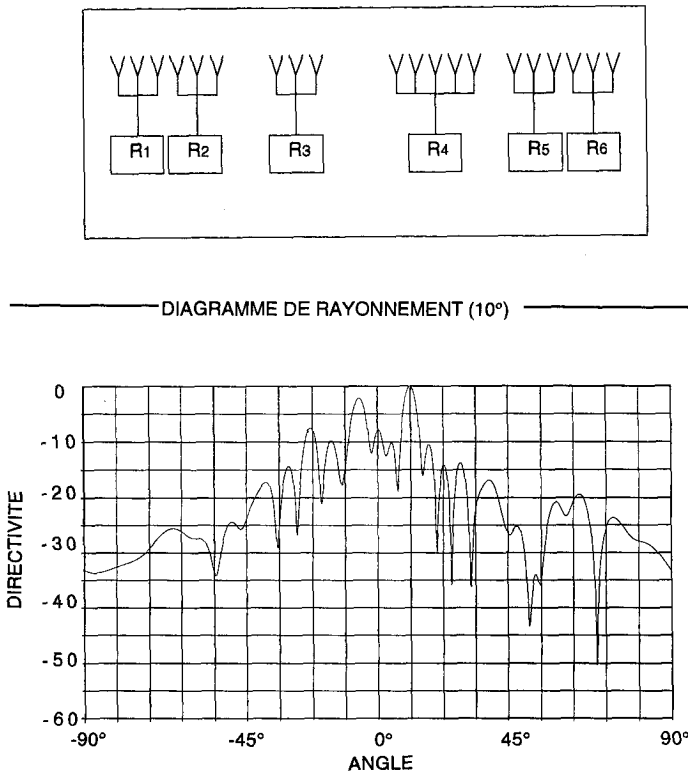


Figure 2. – Regroupement par sous-réseaux.

l'écart entre le filtre obtenu et un filtre « gabarit » représentant la forme de la réponse désirée en l'absence de signaux parasites.

- les contraintes permettent de maîtriser la direction de pointage du diagramme formé, ainsi que certaines de ses propriétés : zéros dans des directions prédéfinies, forme de la dérivée,... La version la plus simple de cette adaptation est celle donnée par l'algorithme de Capon.

Le schéma de récepteur ainsi obtenu est représenté sur la figure 3 (où K est la matrice de corrélation des bruits sur les voies de réception).

3.2.2. Nature des besoins en calibration

Une bonne maîtrise des caractéristiques de l'antenne reste requise dans cette configuration de traitement. En particulier, la connaissance précise des diagrammes d'antenne élémentaires est indispensable pour assurer l'efficacité des contraintes appliquées dans le processus d'optimisation; une calibration insuffisante de ces derniers conduit en effet par exemple à un phénomène d'« auto-étouffement » des signaux utiles, ceux-ci n'étant plus « protégés » par la contrainte de pointage, dans le calcul du jeu de coefficients adaptés à une direction donnée.

De plus, un appairage des voies de réception est nécessaire pour assurer la suppression d'éventuels signaux de brouillage.

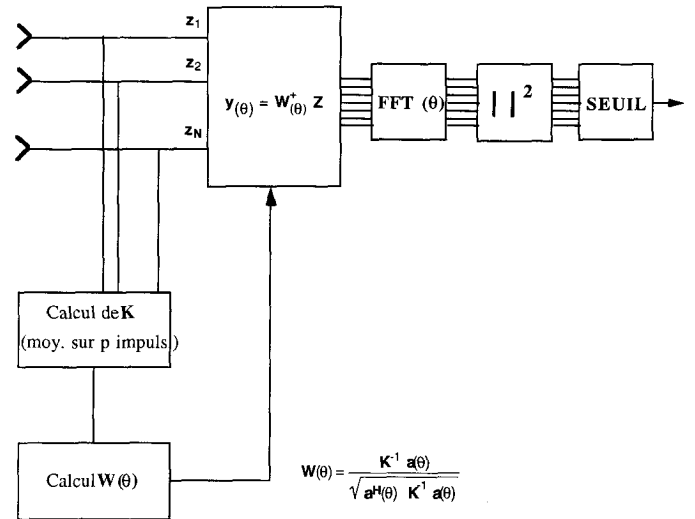


Figure 3. – Traitement adaptatif.

3.2.3. Limitations de la méthode

Dans cette approche de traitement, subsistent néanmoins des limitations importantes :

- les algorithmes utilisés sont nettement sous-optimaux vis-à-vis d'une superposition de signaux temporellement cohérents (échos de cibles radar à la même distance, et à la même vitesse radiale); plus précisément, les prétraitements (« lissage spatial », par exemple) intégrés pour permettre la prise en compte des signaux cohérents conduisent à dégrader les performances en résolution angulaire; de plus ils contraignent notablement les géométries d'antenne envisageables.

- surtout, le nombre de cibles simultanément détectables est limité (en théorie par le nombre d'éléments du réseau, qui est le nombre de « degrés de liberté » du système). Cette limitation est souvent gênante : elle réduit la résistance au brouillage (en diminuant le nombre de brouilleurs dont la suppression peut être assurée), elle oblige à effectuer un filtrage des échos de fouillis avant filtrage spatial (ce qui n'est pas toujours possible, en particulier pour les radars aéroportés); elle peut conduire, pour des situations de cibles nombreuses, à effectuer un traitement adaptatif dont les coefficients sont renouvelés pour chaque case distance (dans ce cas, la qualité d'estimation des matrices de corrélation des signaux peut devenir insuffisante, puisque élaborée sur une seule case distance).

Dans un certain sens, les limitations énoncées dans le cas de la détection de sources cohérentes par filtre adapté spatial proviennent en réalité de l'**inadéquation de la réponse théorique apportée (détection d'une source en présence de bruit spatialement coloré) au problème réel posé (calibration insuffisante des éléments du réseau)**. Dans la pratique, un compromis est en fait à trouver dans l'élaboration de processus de traitement adaptés aux conditions particulières de la configuration d'antenne.

Cette limitation des traitements adaptatifs est particulièrement accentuée dans le cas où le réseau traité ne comporte que peu d'éléments, éventuellement séparés de plus d'une demie longueur d'onde (comme c'est généralement le cas pour les radars fonctionnant aux grandes longueurs d'onde) : dans ce cas en effet, le niveau relatif des lobes secondaires est par nature élevé (puisque le gain d'antenne est faible), et le nombre de cibles ou brouilleurs tolérables est faible : la situation devient donc très critique.

3.3. TRAITEMENTS DE LOCALISATION À HAUTE-RÉSOLUTION

Des traitements de localisation à haute-résolution angulaire sont utilisés, en radar, principalement dans la perspective d'une mesure précise des caractéristiques de sources préalablement détectées, comme cela a été mentionné plus haut.

Le principe de telles méthodes de traitement, qu'elles soient algébriques ou basées sur la maximisation d'un critère de vraisemblance, repose de façon essentielle sur une connaissance du modèle d'antenne. Il s'agit en particulier de maîtriser précisément le diagramme en amplitude et phase des antennes élémentaires, la position de leur centre de phase, et l'appariage entre les voies de réception.

Sans qu'il soit nécessaire d'entrer dans le détail des traitements appliqués pour réaliser cette fonction, il ressort clairement que la performance finale de la mesure est directement conditionnée par la qualité de la calibration.

3.4. CONCLUSIONS

Il ressort de cette analyse que le rôle joué par la calibration d'antenne dans les traitements radar est fondamental : la nature des problèmes posés rend en effet l'existence de cette calibration nécessaire dans la grande majorité des applications. Les contraintes de mise en œuvre et les précisions requises pour une application donnée sont alors conditionnées par la nature des traitements appliqués et par les performances recherchées.

On rappellera ici néanmoins que, si le problème de la calibration dans le contexte radar présente des analogies importantes avec le cas d'autres applications, certaines caractéristiques influent directement sur la façon de mettre en œuvre des solutions opérationnelles. Parmi celles-ci, on peut citer :

- la polarisation, qui, lorsqu'elle est exploitée, rend nécessaire une calibration combinée des deux voies de réception des antennes bipolarisation (ou à polarisation commutée).
- l'agilité de fréquence, requise par ailleurs (lutte contre le brouillage, amélioration de la détection des cibles fluctuantes, reconnaissance des cibles, levée d'ambiguïté en vitesse) qui nécessite de calibrer en permanence les antennes sur une large gamme de fréquences.

- les propriétés des signaux reçus (cohérence temporelle, présence éventuelle de signaux de fouillis, et de brouillage,...) qui rend fortement dépendantes de l'application les possibilités d'utilisation de références de calibration externe (qu'elles soient coopératives ou non).

4. Nature des perturbations

En radar, la calibration est rendue nécessaire par trois grandes classes de perturbations, d'importance différente suivant le type de radar : les défauts de construction ou de mesure de l'antenne, l'interaction entre le réseau d'antennes et son environnement immédiat, et les défauts de calibration des voies de réception.

4.1. DÉFAUTS D'ANTENNE

4.1.1. Description de principe

Les défauts de calibration dus à l'antenne proprement dite peuvent avoir différentes origines, parmi lesquelles on peut citer :

- les défauts de réalisation ou les déformations causées par divers effets mécaniques ou thermiques (vieillesse, soleil, etc.) ; dans le cas des antennes aéroportées, lorsque les éléments sont répartis sur une surface assez large (ailes ou dérives), les déformations de cette surface ne peuvent plus être négligées, ni considérées comme constantes ;
- les défauts apportés par la liaison entre l'élément rayonnant et la voie de réception proprement dite (distributeur en site, par exemple) ;
- les effets « de bord » qui interdisent aux éléments du réseau placés au bord de l'antenne d'avoir le même diagramme de rayonnement que ceux placés au centre ; plus généralement, le rayonnement électromagnétique ne peut être rigoureusement identique pour tous les éléments du réseau.

Ces défauts spécifiques à l'antenne sont en général assimilables à des retards ou des déplacements, et leur ordre de grandeur typique est inférieur au dixième de millimètre – soit, en phase, inférieur à environ 1° en bande X . Ces erreurs fluctuent lentement avec le temps (inertie thermique), sauf dans le cas des antennes aéroportées, où la vitesse de fluctuation est liée aux fréquences propres de la cellule porteuse (entre 0 et 20 Hz pour les déformations les plus sensibles).

Il est important de remarquer que les éventuelles déformations du réseau d'antennes conduisent à une antenne de forme géométrique différente de la forme théorique, et que les lois de pondération dépendent de la forme de l'antenne (la loi de pondération d'une antenne linéaire n'est, par exemple, pas la même que celle d'une antenne circulaire) : dans ce cas, la calibration ne se traduit donc pas simplement par une compensation des retards, mais par une

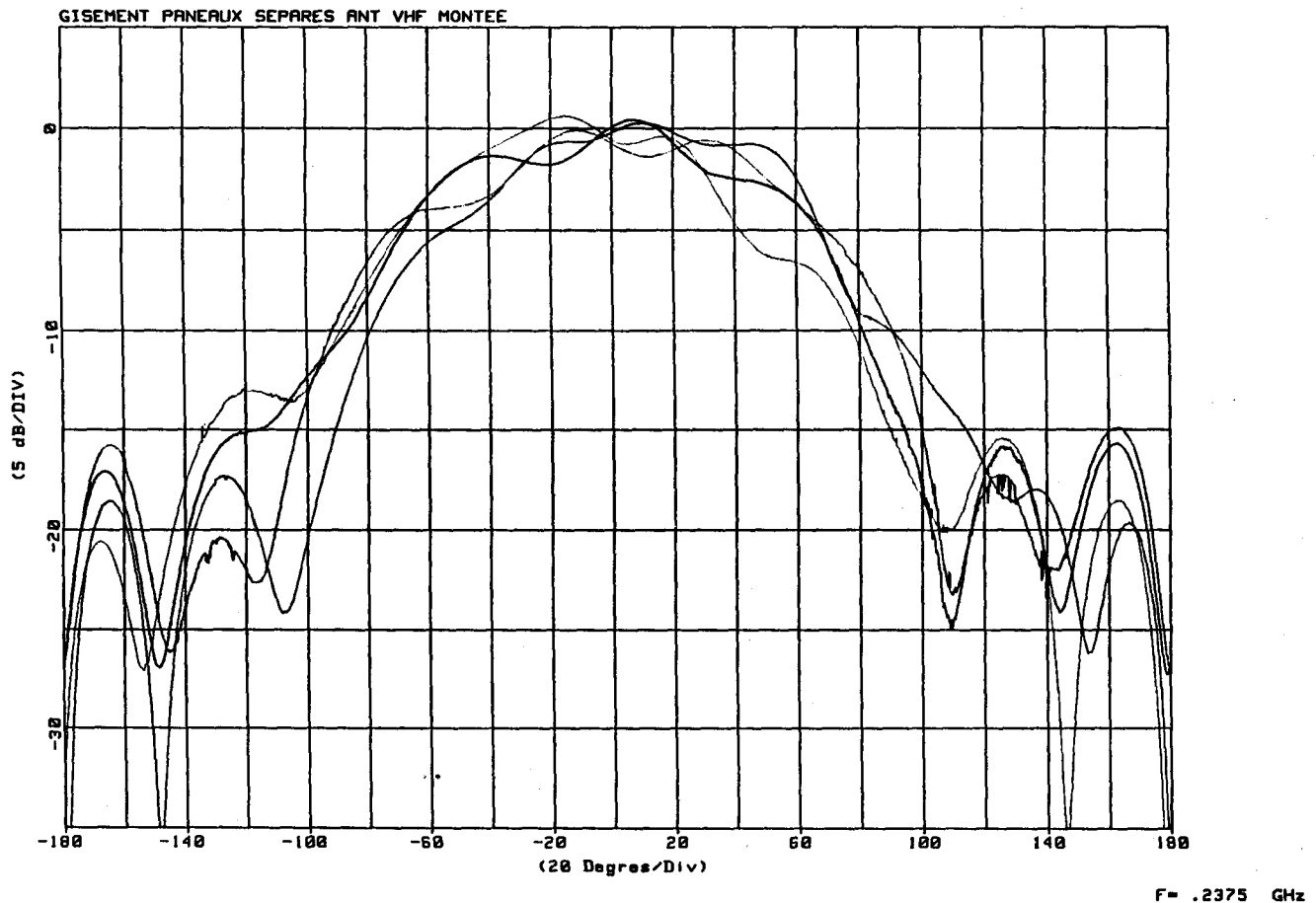


Figure 4. - Influence de l'environnement.

modification du filtre spatial de réception, différente suivant la direction visée.

A ces erreurs d'antenne proprement dite s'ajoutent des erreurs dues à la liaison entre les sources et les voies de réception (distributeur), qui sont fixes, donc étalonnables, égales en ordre de grandeur à environ $\pm 5^\circ$ en phase et 0,5 dB en amplitude.

4.1.2. Modélisation analytique

En résumé, les perturbations sur les antennes sont constituées essentiellement par les erreurs sur la connaissance des positions des capteurs, et sur celle des gains (en amplitude et phase) des capteurs élémentaires, si bien que le vecteur directeur des sources, $a(\theta, f)$, s'écrit, si $G(\theta, f)$ est le gain théorique de la source élémentaire et u le vecteur directeur dans la direction θ :

$$a(\theta, f) = [G(\theta, f) + \delta G(\theta, f)] \cdot \exp \left[\frac{2\pi j}{c} f u \cdot (r_m + \delta r_m) \right]$$

Remarque : On remarquera que les couplages entre sources (généralement faibles, à un niveau de l'ordre de -20 dB) n'ont pas été évoqués dans cette description des perturbations apportées à

l'antenne : comme ce couplage existe aussi au niveau des voies de réception, il sera développé dans un paragraphe suivant

4.2. INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT

En toute rigueur le diagramme de rayonnement d'une antenne dépend toujours de son environnement, avec lequel elle est toujours plus ou moins fortement couplée. Ceci est particulièrement vrai dans deux situations particulières :

- pour les radars aéroportés, où les éléments du réseau sont disposés sur la cellule porteuse, le diagramme d'antenne doit être mesuré en présence de la structure environnante;
- pour les radars basse fréquence (longueurs d'onde métriques ou décimétriques), le diagramme des éléments du réseau est très sensible à l'environnement.

Un exemple de cette dernière situation est donné sur la figure 4, qui donne les diagrammes mesurés des quatre sources, de fabrication identique (doublets repliés) d'un réseau phasé fonctionnant à 250 MHz : les fluctuations d'un élément à un autre sont dues en partie au fait que sur un réseau de 4 sources, les effets de couplage

tendent à différencier largement les différents éléments, mais également aux effets dus à l'environnement proche de l'antenne.

Les ordres de grandeur de ces imprécisions de calibration dues à l'environnement peuvent atteindre quelques décibels et quelques dizaines de degrés de phase, en particulier pour les radars fonctionnant en bande basse. Ils fluctuent à la vitesse de variation de l'environnement — ou de la position de l'antenne par rapport à l'environnement.

4.3. IMPERFECTION DES CHAÎNES DE RÉCEPTION

4.3.1. Description de principe

4.3.1.1. Défauts linéaires

Une source importante de défauts de calibration des réseaux d'antennes est le non-appariement des voies de réception (réception hyperfréquence, amplifications et mélanges aux fréquences intermédiaires, démodulation et codage analogique-numérique), sur la largeur de bande de fonctionnement du radar (par exemple 1% de bande).

Ce défaut d'appariement peut se décomposer en plusieurs termes dont la mesure et la correction présente une complexité croissante :

- une perturbation « d'ordre 0 », correspondant au défaut moyen dans la bande (en amplitude et phase), en général voisin du défaut mesuré à la fréquence centrale;
- une perturbation « d'ordre 1 », correspondant au défaut moyen de retard de groupe;
- une perturbation « résiduelle », correspondant à une variation d'amplitude et de phase en fonction de la fréquence dans la bande, de forme quadratique, sinusoïdale, voire plus complexe, selon les technologies utilisées dans les chaînes de réception.

Cette représentation peut être vue comme un simple développement limité, en fonction de la fréquence, du défaut différentiel global de fonction de transfert.

Sans voie de calibration interne, ces erreurs atteignent quelques décibels en amplitude et quelques dizaines de degrés en phase (par exemple 2 dB et 40° en phase). L'emploi d'une référence de calibration interne — injection d'un signal connu juste derrière les sources — permet, au prix d'une complexité et d'un supplément de coût significatifs, de ramener ces défauts au voisinage du décibel et de quelques degrés de phase, voire aux alentours de 0,1 dB et 1° au prix d'un système de calibration par « double pesée ».

Les fluctuations de ces erreurs, d'origine thermique, sont relativement lentes, à l'échelle de la dizaine de secondes par exemple.

4.3.1.2. Défauts non linéaires

A ces erreurs différentielles linéaires de fonction de transfert, viennent s'ajouter des perturbations non linéaires :

- les effets de saturation ou de compression introduits par les éléments actifs des chaînes de réception (limiteurs, amplificateurs, mélangeurs,...);
- un couplage linéaire entre les voies de réception, qui aggrave le couplage existant au niveau des sources élémentaires;
- l'influence du repliement spectral effectué par l'échantillonnage, en fonction de la raideur des filtres de limitation de bande situé dans les derniers étages de la réception analogique;
- l'influence des caractéristiques des dispositifs de conversion analogique-numérique (linéarité de la réponse amplitude-amplitude, jitter d'échantillonnage, bruit de quantification,...).

4.3.2. Modélisation analytique

Les perturbations linéaires peuvent être caractérisées globalement sous la forme d'une dispersion des fonctions de transfert, modélisée simplement sous la forme :

$$H_m(f) = H_o(f) (A_m \exp(j\Phi_m) + f \cdot j2\pi\tau_m + O(f^2))$$

dans laquelle :

A_m représente l'erreur d'amplitude sur la voie m

Φ_m représente l'erreur de phase sur la voie m

τ_m représente l'erreur de retard de groupe sur la voie m

et les termes résiduels correspondent aux contributions d'ordre 2 en suivants en fonction de la fréquence.

Le couplage entre voies peut être représenté sous la forme d'une matrice C telle que :

$$\mathbf{x}_c(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t)$$

où :

$\mathbf{x}(t)$ désigne le signal qui serait reçu en l'absence de couplage,

et :

$\mathbf{x}_c(t)$ le signal réellement reçu.

La matrice C est en général peu différente de l'identité; le module et la phase de ses coefficients non diagonaux $C_{m,m}$, correspondent au coefficient de couplage mutuel entre voies.

5. Conclusions

L'objectif du présent chapitre était de présenter les particularités inhérentes au contexte de l'application des traitements d'antenne au domaine du radar.

On a précisé les caractéristiques physiques principales des signaux sources, et les ordres de grandeurs typiques qui leur sont associés. Une revue rapide des divers traitements appliqués permet d'identifier, dans la panoplie générale des algorithmes de traitement d'antenne, lesquels sont couramment utilisés en radar, et dans quelles conditions.

Enfin, une description schématique des principales sources d'erreur de modèle rencontrées dans les applications pratiques a permis de mettre en évidence la forme générale des perturbations. On peut dès à présent distinguer :

– d'une part, celles dont les effets sont susceptibles d'être compensés par un dispositif de calibration automatique — parce que caractérisées par un comportement linéaire et un nombre discret de paramètres,

– d'autre part, celles dont l'influence — du fait de sa forme non linéaire, ou de sa nature aléatoire ou instationnaire — ne saura

raisonnablement être compensée qu'à travers l'optimisation d'un critère, de contraste par exemple.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. FARINA, "Antenna based signal processing techniques for radar systems". Artech House, 1992.
- [2] F. LE CHEVALIER, "Bases physiques du radar". Revue technique Thomson CSE, vol. 25, n° 4, déc. 93.