

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



ANTENNES SYNTHETIQUES CIRCULAIRES ET IMAGERIE ASSOCIEE

Jacques Dorey

Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) - 92320 Châtillon (France)

RESUME

On présente une étude théorique et expérimentale des antennes synthétiques circulaires, hertziennes ou acoustiques, associées à un traitement bidimensionnel du signal et conduisant à une imagerie énergétique du système d'ondes.

La qualité de l'image est analysée en fonction:

- de la complexité de l'antenne synthétique (nombre d'éléments, répartition spatiale, loi de mouvements),
- des connaissances a priori sur le système d'ondes (spectre spatio-temporel),
- des possibilités techniques de traitement du signal.

On expose deux méthodes de traitement du signal en temps réel, optronique ou numérique par ordinateur câblé.

Enfin, on effectue une revue du champ d'application de ces méthodes et on indique, à titre d'exemple, les résultats d'expériences réalisées au Centre d'Essais en Vol de Brétigny et relatives à un système de navigation aérienne.

SUMMARY

SYNTHETIC APERTURE SYSTEMS AND ASSOCIATED IMAGING

The paper presents a theoretical and experiment study of circulaire synthetic aperture systems, whether radioelectric or acoustic, associated with a two-dimensional processing of the signal leading to an energetic imaging of the wave system.

The image quality is analyzed as a function of:

- the synthetic aperture antenna complexity (number of elements, spatial distribution, law of motion),
- the a priori knowledge of the wave system (spatio-temporal spectrum),
- the technical possibilities of signal processing.

Two methods for real time signal processing are presented, one optronic, the other digital with cabled computer.

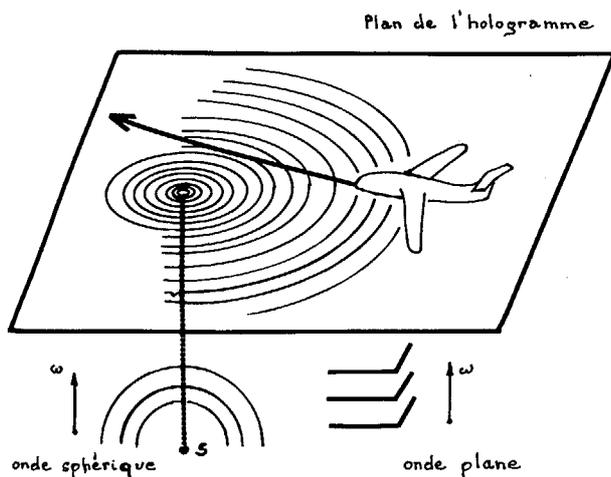
Lastly, the field of application of these methods is reviewed and, as an example, the results of experiments performed at the French Flight Test Centre of Brétigny, concerning an air navigation system, are presented.

Introduction

En électromagnétisme, pour la localisation angulaire de balises, différents auteurs ont proposé l'utilisation d'antennes de réception ou d'émission tournant sur un contour circulaire, soit par mouvement mécanique, soit par commutation cyclique de dipôles élémentaires [1,2,3]; en radio-astronomie, l'on trouve des méthodes similaires qui utilisent le mouvement de rotation de la terre ou des planètes, en association avec un traitement du signal conduisant à une restitution "photographique" des directions des sources analysées. L'on se propose, dans cet article, d'exploiter l'analogie quasi holographique pour d'une part, en extraire une méthode optronique de traitement du signal délivré par une antenne synthétique circulaire électromagnétique ou acoustique et d'autre part, pour en déduire les limitations quant aux performances (précision, lobes latéraux, nombre de cibles indépendantes).

A titre d'exemple, l'on expose les résultats obtenus au cours de l'expérimentation au Centre d'Essais en Vol de Brétigny d'une antenne synthétique circulaire et du dispositif d'imagerie associé (optronique ou numérique câblé).

1 - Trajectoire d'une ou plusieurs antennes dans l'hologramme associé

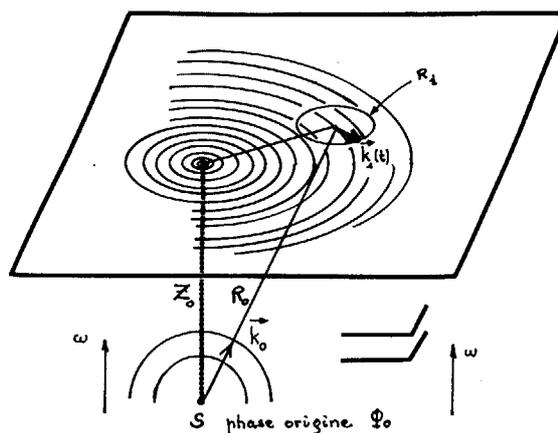


Considérons en premier lieu (fig.1), une antenne et un capteur embarqués dans un avion se déplaçant sur une trajectoire contenue dans un plan fixe. L'on suppose que le récepteur reçoit simultanément une onde sphérique de pulsation ω issue d'une source S et une onde plane, de même fréquence, de vecteur d'onde perpendiculaire au plan de la trajectoire ; il est clair que si le récepteur possède un élément quadratique, la partie basse fréquence du

produit des signaux reçus fera apparaître une onde modulée en amplitude selon une loi caractéristique de la trajectoire de l'avion par rapport au centre de l'hologramme. Il est clair également que la même loi de modulation sera obtenue en remplaçant le signal créé par l'onde plane par le signal délivré par un oscillateur local de même fréquence. L'onde de pulsation ω peut en particulier résulter de l'émission d'une onde de même pulsation par l'avion, suivie d'une rétrodiffusion vers l'avion par un diffuseur élémentaire. Dans ce cas, le signal de modulation sera exactement le même que celui obtenu dans la configuration indiquée figure 1, mais avec un hologramme engendré à l'aide d'une pulsation équivalente, égale à 2ω . Il y a donc une analogie étroite entre l'holographie et le procédé consistant à utiliser l'effet doppler pour la localisation des cibles ; c'est cette analogie qui a amené les initiateurs des radars à vision latérale à développer des méthodes optiques de traitement du signal [4, 5], puis a conduit de nombreux auteurs à élaborer des méthodes similaires.

En suivant la même ligne de pensée, considérons à présent (fig.2a), un hologramme d'amplitude formé de la même façon que précédemment ; l'on suppose cet hologramme fixé à l'altitude Z_0 et l'on cherche la loi temporelle de l'évolution de l'amplitude le long de la portion de l'hologramme décrite par un mobile animé d'un mouvement circulaire (rayon R_1 , vecteur unitaire $\vec{k}_1(t)$), autour d'un centre fixe (distance à la source R_0 , vecteur unitaire \vec{k}_0) ; l'on aboutit à une loi de modulation du type :

$$S(t) = \cos \left[\phi_0 - \frac{2\pi}{\lambda_0} (R_0 \cdot z_0) - \frac{2\pi R_1}{\lambda_0} \left\{ \vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1 + \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_0} (\vec{k}_0 \wedge \vec{k}_1)^2 \left(1 - \frac{R_1}{R_0} \vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1 \right) + O \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^3 \right\} \right] \quad (1)$$



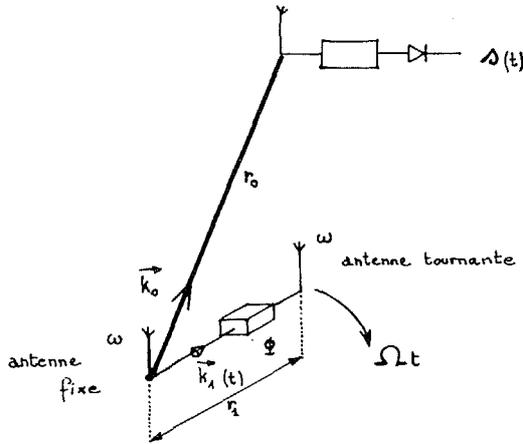


Fig. 2b

Si l'on réalise maintenant (fig.2b), une expérience dans laquelle, à l'aide d'un récepteur non linéaire placé au point (\vec{k}_0, r_0) , l'on effectue le produit des signaux issus de 2 sources d'ondes sphériques, l'une fixe et l'autre mobile sur un cercle contenu dans un plan parallèle à celui de l'hologramme de rayon r_1 , de vecteur unitaire $\vec{k}'_1(t)$, le signal basse fréquence a pour loi d'évolution temporelle.

$$(2) \Delta(t) = a^2 \cos \left[\phi - \frac{2\pi r_1}{\lambda} \left\{ -\vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1 + \frac{1}{2} \frac{r_1}{r_0} (\vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1)^2 + \frac{1}{6} \frac{r_1^2}{r_0^2} (\vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1)^3 + O\left(\frac{r_1^3}{r_0^3}\right) \right\} \right]$$

Les deux expressions sont donc identiques si tous les termes le sont, soit :

$$(3) \begin{cases} \phi_0 - \frac{2\pi}{\lambda_0} (R_0 - \vec{z}_0) = \phi & , \quad \frac{R_1}{R_0} = \frac{r_1}{r_0} \dots \\ \frac{R_1}{\lambda_0} = \frac{r_1}{\lambda} & , \quad \vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1(t) = -\vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1(t) \dots \end{cases}$$

Il existe donc une classe d'hologrammes associés au signal formé par le battement basse fréquence des signaux issus de deux antennes émettant à la même fréquence, et dont l'une décrit un cercle autour de l'autre. En théorie, il est équivalent de faire tourner l'hologramme autour du centre du cercle $(R_0, \vec{k}_0, \text{fig.2a})$ de façon à obtenir la même loi d'évolution temporelle que précédemment. En pratique cela n'est réalisable que si le rapport $\frac{r_1}{r_0}$ est suffisamment faible pour que l'évolution de la phase de la modulation, due au terme $\frac{r_1}{\lambda} \frac{r_1}{r_0}$ (équation 2) ne dépasse pas la valeur de $\frac{\pi}{4}$, limite couramment admise. Si cette limite est dépassée (R_0 inférieure à la longueur de la zone de Fraunhofer définie par la distance $\frac{r_1^2}{4\lambda}$), il y a autant de centres de

rotation que de sources à localiser ; dans le cas contraire ($r_0 > \frac{4r_1^2}{\lambda}$), il suffit de faire tourner un réseau de droites parallèles autour d'un centre de rotation unique pour réaliser toutes les lois de modulation possibles, à deux paramètres angulaires indépendants. Afin de minimiser l'effet de la distance de Fraunhofer il est aisé de réaliser une antenne synthétique circulaire symétrique (fig.3), de même rayon que celui de l'antenne schématisée (fig.2b).

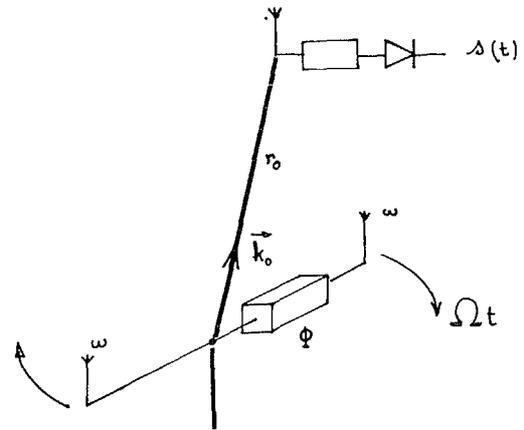


Fig. 3

Le signal de modulation reçu a alors pour expression :

$$(4) \Delta(t) = a^2 \cos \left[\phi - \frac{4\pi r_1}{\lambda} \vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1 + \frac{2\pi r_1}{\lambda} \frac{r_1^2}{r_0^2} (\vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1) (\vec{k}_0 \cdot \vec{k}_1)^2 \right]$$

L'on constate cette fois-ci que la distance de Fraunhofer est définie par la longueur $d \approx 1,7 r_1 \left(\frac{r_1}{\lambda}\right)^{1/2}$, ce qui correspond à des distances très faibles en pratique ; enfin, le cercle décrit dans l'hologramme associé a un diamètre deux fois plus élevé, ce qui double la précision angulaire.

2 - Précision, nombre de cibles discernables, lobes latéraux, apodisation - Cas d'antennes discrétisées.

La précision à - 3 db de mesure simultanée des angles de site (φ) et d'azimut (θ), à l'aide d'une antenne synthétique circulaire symétrique, est définie (fig. 4) par la relation :

$$(5) \int_0 \left[\frac{4\pi R}{\lambda} (\cos^2 \varphi \Delta \theta^2 + \sin^2 \varphi \Delta \varphi^2) \right]^{1/2} = 0,707$$

soit encore

$$(6) \frac{4\pi R}{\lambda} (\cos^2 \varphi \Delta \theta^2 + \sin^2 \varphi \Delta \varphi^2)^{1/2} \neq 1$$



L'expression (6) généralise à deux dimensions l'expression de l'erreur en azimut primitivement calculée par Drabowitch [1]. L'on constate que la précision limite en site ou en azimut est définie par l'inverse du taux de compression maximal C :

$$(7) \quad C = \frac{4\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi R}{\lambda/2}$$

Ce taux de compression est égal au nombre de demi longueurs d'ondes inscrites dans la circonférence de l'antenne synthétique et définit ainsi le nombre maximal théorique de cibles discernables.

Les lobes latéraux de l'antenne synthétique sont caractérisés par la courbe $J_0(Cd)$, où d représente la longueur de la projection, dans le plan de l'hologramme, du vecteur joignant les intersections des axes vrai et estimé, avec la sphère de rayon unité (fig. 4).

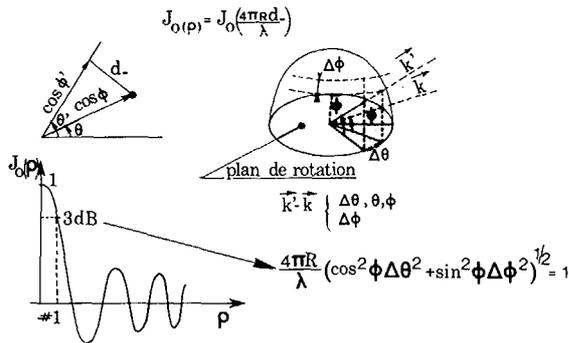


Fig. 4

Puisque les relations d'équivalence (3), définissant la classe des hologrammes associés, conduisent à une relation d'homothétie entre les rayons des cercles et les longueurs d'ondes, il est possible d'apodiser la courbe de réponse par utilisation de plusieurs antennes circulaires concentriques, ou ce qui revient au même, par une seule antenne circulaire émettant plusieurs fréquences simultanément. Le résultat d'une telle opération est illustré (fig. 5) et correspond à l'utilisation simultanée de 3 ou 6 rayons d'antennes, ou encore à une antenne excitée à 3 ou 6 fréquences dans des rapports déterminés. L'on constate, en pratique, qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser un grand nombre de combinaisons pour aboutir à un résultat très honorable, et tendre vers la courbe de réponse caractéristique de la transformée de Fourier de la fonction d'éclairage d'un disque plan (fonction $J_0(d)$). Enfin, la figure 6 illustre la répartition angulaire d'amplitude d'une antenne synthétique circulaire échantillonnée en 5, 11 ou 21 éléments ; l'on constate que la précision à -3 db est constante et ne dépend que du périmètre de l'hologramme, par contre la courbe de réponse est dégradée par l'apparition de lobes latéraux importants qui limitent le nombre de cibles discernables. L'on retrouve aussi la propriété essentielle de l'holographie :
- précision proportionnelle à l'étendue de l'hologramme,
- nombre de cibles discernables proportionnel à la densité de l'hologramme.

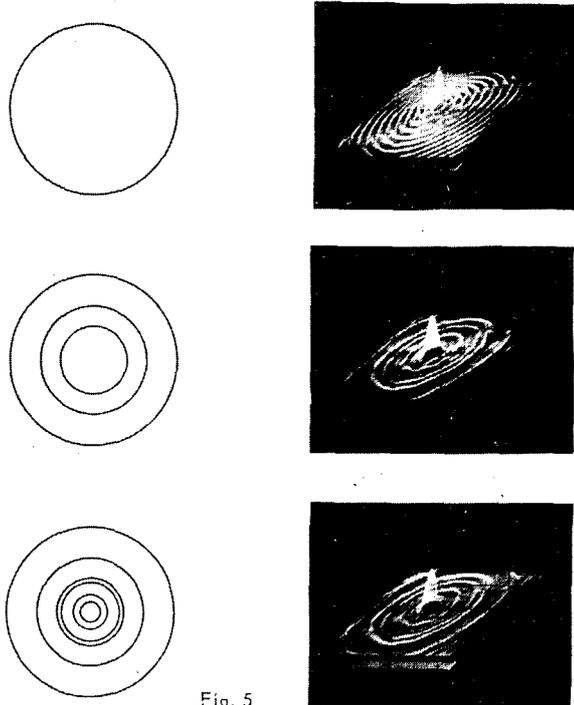
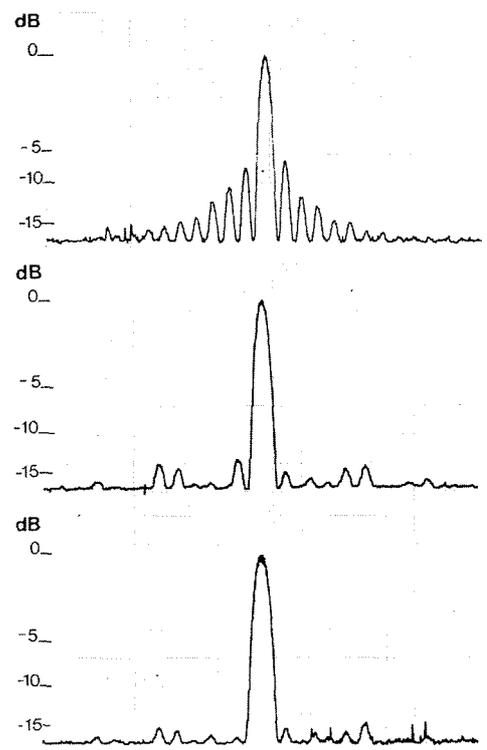


Fig. 5



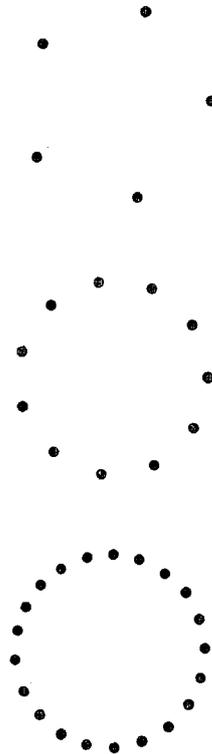
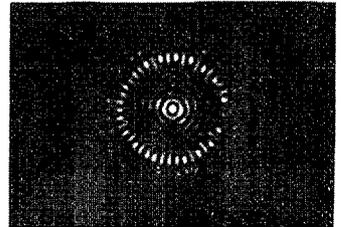
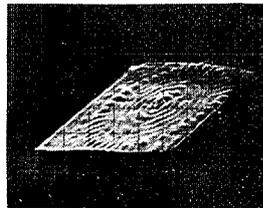
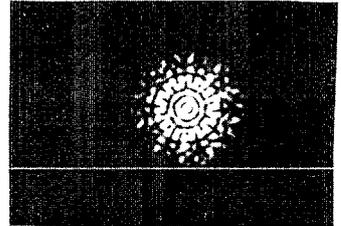
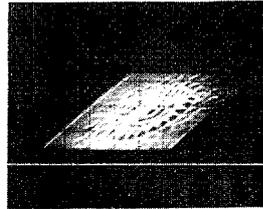
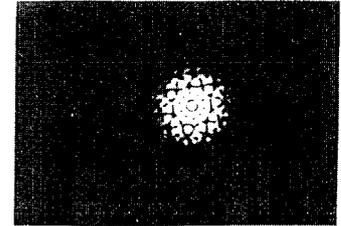
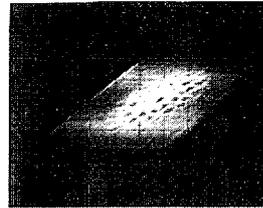


Fig. 6



3 - Traitement du signal en temps réel

3.1. Traitement optronique

En se limitant au cas des distances supérieures à la distance de Fraunhofer, l'on a vu que l'hologramme associé est un réseau de droites parallèles. Soit donc, un réseau de transparence sinusoidale tournant autour d'un centre fixe, selon une loi synchrone du mouvement de rotation d'une antenne synthétique symétrique électromagnétique ou acoustique, et fonctionnant en émission ou en réception. Le déphasage entre les deux antennes d'émission ou de réception est choisi égal à $\frac{\pi}{4}$, ce qui fixe la position du centre de rotation (phase à l'origine du réseau égale à $\frac{\pi}{4}$). Le signal détecté par le récepteur est appliqué à une diode électroluminescente, éclairant l'hologramme tournant. Le flux transmis est maximal en un point du disque défini par les relations de similitude (3); l'intégrale temporelle du flux transmis (temps de pose au moins égal à une révolution complète) fera apparaître la courbe de réponse (fonction de Bessel J_0 (Cd)), centrée sur le point de coordonnées polaires.

$$(8) \quad \begin{cases} R = R_{max} \cos \varphi \\ \theta = \theta \end{cases} \quad \begin{aligned} & (\varphi : \text{angle de} \\ & \quad \text{site}) \\ & (\theta : \text{angle} \\ & \quad \text{d'azimut}) \end{aligned}$$

avec

$$(9) \quad \begin{cases} R_{max} = \frac{r_1}{\lambda} \\ \lambda_0 = \lambda \end{cases}$$

R_{max} : rayon de l'hologramme
 λ_0 : longueur d'onde spatiale de l'hologramme
 r_1 : rayon de l'antenne synthétique
 λ : longueur d'onde émise ou reçue.

La corrélation holographique, opération linéaire, fournit aussi l'imagerie associée à l'antenne synthétique circulaire.

3.2. Traitement numérique par ordinateur câblé

Alors que l'hologramme tournant réalise simultanément toutes les lois de modulation temporelles possibles, parmi lesquelles il y a corrélation exacte avec l'ensemble des signaux issus de sources différentes, il est nécessaire, en traitement numérique, de confronter successivement le signal reçu avec la mémoire de tous les signaux images des différentes directions angulaires de l'espace. Cette opération, impossible en temps réel avec les ordinateurs conventionnels, est réalisable actuellement à l'aide des circuits intégrés rapides, pour des taux de compression élevés. Dans le cas des antennes synthétiques circulaires, un avantage important réside dans le fait que la mémoire de l'image des directions de l'espace ne comporte qu'une seule valeur de l'azi-

mut , puisque toutes les autres valeurs s'en déduisent par permutation temporelle circulaire. Un exemple de calculateur, réalisé à l'ONERA, non miniaturisé, est représenté figure 7; ce calculateur a une capacité de traitement de 62 500 points d'image par seconde, et qui pourrait raisonnablement être multipliée par 10 à l'aide des composants intégrés les plus récents. Il est certain que le calcul numérique offre maints avantages, dont les principaux semblent être la précision, la fiabilité et l'aptitude au traitement préalable à l'affichage de l'image. Par contre des limitations de capacité apparaissent pour les taux de compression élevés (> 1000) alors que le calcul optique n'a pas de limite théorique autre que celle apportée par la définition et la dynamique des dispositifs intégrateurs, lesquels font actuellement l'objet de progrès considérables (notamment les matrices CCD)

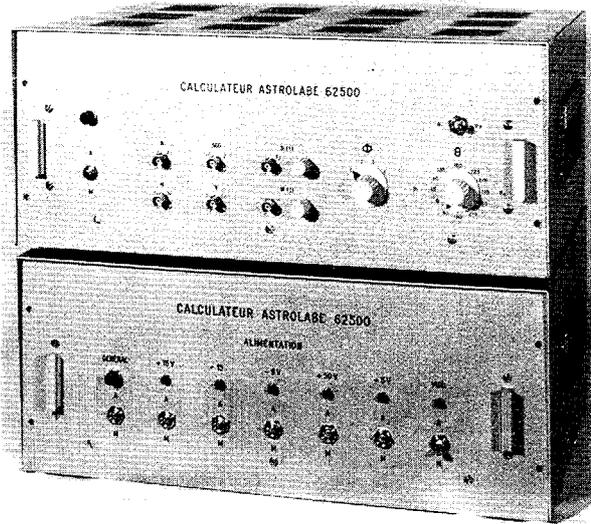


Fig. 7

4 - Exemples de réalisation

L'on donnera uniquement les résultats d'une expérience effectuée au CEV , de localisation angulaire d'un avion par rapport à une antenne synthétique circulaire symétrique émettant à une longueur d'onde de 6 cm, et de 60 cm de rayon (taux de compression voisin de 120). L'on trouvera dans les références [6, 7] des explications détaillées sur les conditions expérimentales, l'influence des échos parasites, l'élimination de l'effet dû au traitement non linéaire qui, en présence de n sources, conduirait à une image à n^2 points.

La figure 8 présente une photographie de l'écran optronique où apparaissent les images de la

direction angulaire de l'avion et de la direction réfléchiée dans le sol. La figure 9 présente l'image bidimensionnelle, obtenue par traitement numérique, de la trajectoire de l'avion au cours de l'approche, du survol et de l'éloignement de l'antenne synthétique.

Tous les résultats de cette expérience ont confirmé les prévisions théoriques et ont conduit à un écart type inférieur à $0,2^\circ$ en site et en azimut pour toutes les positions de la trajectoire.

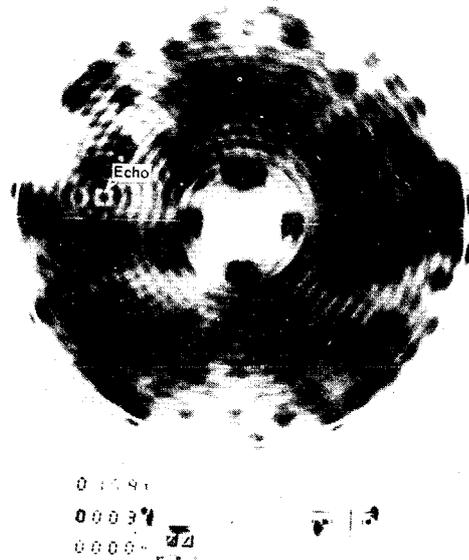
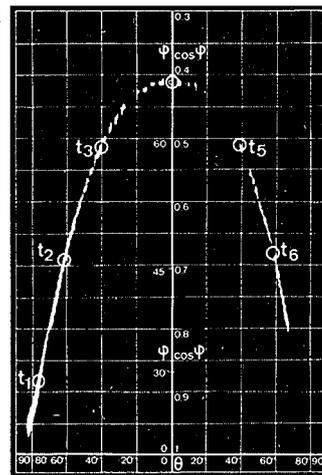


Fig. 8



Trajectoire donnée par le calculateur

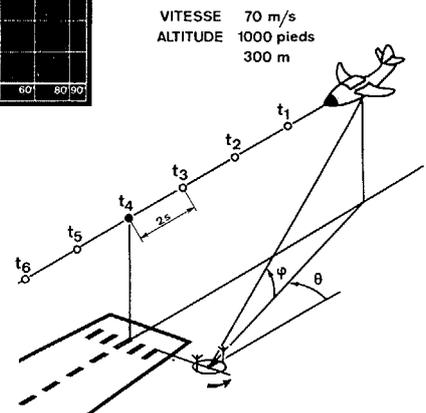


Fig. 9

Exemple de qualification par survol de la piste



ANTENNES SYNTHETIQUES CIRCULAIRES ET IMAGERIE ASSOCIEE

Jacques Dorey

CONCLUSION

L'analogie holographique s'avère très féconde pour la simulation des propriétés des antennes synthétiques : elle permet de guider la réalisation de dispositifs simples de traitement du signal et surtout, permet, par des expériences en laboratoire, d'optimiser au maximum les caractéristiques des antennes synthétiques, en fonction des connaissances a priori de "l'image" de la situation représentée par l'ensemble des sources à localiser.

Actuellement ces méthodes sont utilisées pour la conception de systèmes d'imagerie synthétique appliquée à l'électromagnétisme, à l'acoustique et, d'une façon générale, à la reconnaissance holographique des formes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] - S. Drabowitch - Application aux antennes de la théorie du signal, L'onde électrique n° 458, mai 1965, 550-560.
- [2] - Jacobson - A Radio detection finder for helicopter, US patent n° 3, 787-862 1974.
- [3] - H.T. Budenbom, Direction finder, US patent n° 2 414 798, 1947.
- [4] - E.N. Leith - Quasi holographic techniques in the microwave region, Proc. IEEE, vol 59, n° 9, sept. 1971.
- [5] - R.O. Harger-Synthetic aperture radar systems, Academic Press, 1970.
- [6] - J. Dorey, G. Garnier - Synthetic circular aperture for landing and navigation, 8 th International Aerospace Instrumentation Symposium, Cranfield, 24/27 mars 1975, édition provisoire TP ONERA 75-7.
- [7] - J. Dorey, G. Ringenbach - Dispositif intégré de navigation et d'aide à l'atterrissage : Présentation au sol et à bord des informations, Réunion AGARD Edinburgh 7/11 avril 1975, édition provisoire TP ONERA n° 75-17.