

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
 INSTITUT NATIONAL
 DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
 PARIS

(11) N° de publication :
 (à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

2 703 789

(21) N° d'enregistrement national :

94 04196

(51) Int Cl⁵ : G 01 S 13/89

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 08.04.94.

(30) Priorité : 08.04.93 DE 4311754.

(71) Demandeur(s) : DEUTSCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT e.V. — DE.

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : 14.10.94 Bulletin 94/41.

(72) Inventeur(s) : Dr. Joao Moreira et Noichi Bernd-Peter.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : Ce dernier n'a pas été établi à la date de publication de la demande.

(73) Titulaire(s) :

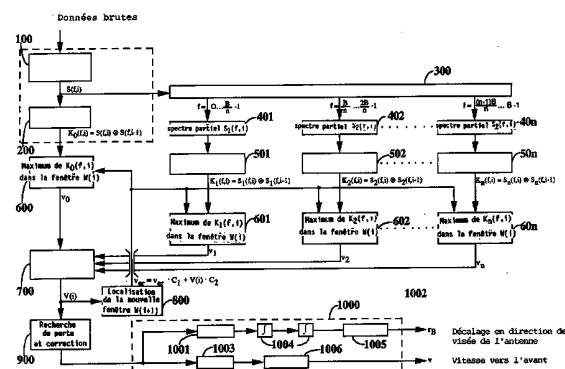
(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

(74) Mandataire : Cabinet Plasseraud.

(54) Procédé et dispositif d'extraction, d'erreurs de mouvement d'un réacteur sur lequel est monté un système radar cohérent de formation d'image à partir de données brutes du radar .

(57) Dans un procédé d'extraction d'erreur de mouvement d'un vecteur sur lequel est monté un système radar cohérent de formation d'image à partir de données brutes du radar, le spectre azimuthal est décomposé sur la totalité de la largeur de bande en n spectres partiels ((S(f,i)... S(f,i))) après calcul de l'ensemble du spectre azimuthal (S(f,i)... S(f,i)) et avant une corrélation. n spectres partiels se succédant dans le temps et appartenant au même ensemble de deux spectres azimuthaux sont corrélés l'un avec l'autre; une largeur de fenêtre est alors déterminée au moyen d'un décalage attendu (v_e). La valeur maximale de la courbe à l'intérieur de la fenêtre est déterminée à partir de la courbe obtenue par la corrélation du spectre azimuthal ($K_0(f,i)$) et à partir des courbes partielles ($K_1(f,i)... K_n(f,i)$) obtenues par les corrélations partielles.

Le nouveau décalage de fréquence attendu (v_e') est déterminé à partir du décalage de fréquence attendu (v_e) et d'un décalage de fréquence ($V(i)$). Après exécution des étapes de procédé décrites ci-dessus sur plusieurs bandes de portes de distance (N_s), on calcule à partir de chaque bande un décalage de fréquence ($V(i,m)$) et on forme ainsi une matrice dans laquelle sont recherchées toutes les valeurs qui sont égales à zéro, alors qu'une nouvelle valeur est interpolée à partir des positions voisines de chaque position zéro.



FR 2 703 789 - A1



- 5 L'invention concerne un procédé d'extraction d'erreurs de mouvement d'un vecteur sur lequel est monté un système radar cohérent de formation d'image à partir de données brutes du radar, procédé dans lequel sont formés de façon continue dans le temps et au cours d'une durée déterminée des spectres azimutaux successifs, une corrélation est effectuée pour calculer un décalage de fréquence sur l'ensemble du spectre azimutal, les valeurs du décalage de fréquence sont ensuite traitées et la déviation dans la direction de visée de l'antenne ainsi que la vitesse vers l'avant sont calculées.
- 10 L'invention concerne également un dispositif pour la mise en oeuvre du procédé, qui comprend un dispositif pour calculer le spectre azimutal de façon à former de façon continue dans le temps des spectres azimutaux successifs à partir de données brutes du radar et un dispositif pour la formation d'une corrélation entre respectivement deux spectres azimutaux formés immédiatement l'un après l'autre dans le temps.
- 15 Les systèmes radar cohérents de formation d'image sont montés entre autres à bord d'un vecteur tel qu'un avion, un missile ou un hélicoptère. En raison des conditions concernant ces vecteurs et des influences de l'environnement, par exemple de turbulences, un vecteur ne peut pas normalement tenir une trajectoire prédéterminée. Le vecteur dévie de sa trajectoire de consigne désirée, ce qui est appelé

erreur de mouvement. Dans les systèmes radar cohérents de formation d'image, les erreurs de mouvement provoquent des distorsions qui sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du signal émis par le radar, qui ont une influence très négative sur la qualité de l'image.

5 La qualité d'une image est jugée en fonction de sa résolution, du contraste ainsi que des distorsions géométriques.

Pour obtenir pour l'image une résolution élevée, un contraste élevé et de faibles distorsions géométriques, il faut que les données brutes reçues soient corrigées avant le traitement et la génération de l'image. Une telle correction peut être effectuée en temps réel ou en différé. Une correction en temps réel a lieu au cours de la réception des signaux rétrodiffusés à l'aide d'un composant numérique ou analogique. Une correction en différé est réalisée au sol après mise en mémoire des données brutes, à l'aide de programmes de calcul.

10 Ce n'est qu'après une correction, appelée compensation de mouvement, que le traitement ou la génération d'une image peut être réalisée. Pour générer une image, on effectue une corrélation entre les données brutes et l'historique théorique de phases attendu, et ce n'est qu'après une telle corrélation que l'on obtient une image 15 bidimensionnelle de forte résolution.

20 Il faut que l'erreur de mouvement du vecteur soit déterminée avec une grande précision pour que les données brutes puissent être corrigées. A cette fin, il faut que les mouvements suivants du vecteur soient déterminés, à savoir la vitesse vers l'avant et la déviation 25 dans la direction de visée de l'antenne.

Tous les systèmes de compensation de mouvement en temps réel connus sont conçus pour des systèmes de navigation inertIELS embarqués (INS-Inertial Navigation System) et d'autres systèmes de navigation tel que le GPS (Global-Positioning-Systems). Tous les procédés 30 d'extraction de mouvement sont des procédés dans lesquels les erreurs de mouvement du vecteur peuvent être extraites des données brutes du radar. Par exemple, on peut utiliser à cette fin le procédé dit à focalisation automatique et également le procédé dit de décalage connu par le document DE 39 22 428 C2, des résultats sensiblement améliorés 35 pouvant être obtenus avec le procédé à décalage qui vient d'être

indiqué.

Tous les systèmes de compensation de mouvement connus présentent cependant divers inconvénients. En raison des exigences élevées imposées aux données de mouvement concernant la précision, la largeur 5 de bande et la stabilité dans le temps, il faut utiliser avec les systèmes radar cohérents de formation d'image dans lesquels est effectuée une compensation de mouvement, par exemple des systèmes de navigation inertielle réalisés de façon particulière. Mais dans ce cas, les coûts de conception, de constitution et d'entretien sont très 10 élevés.

Quand on utilise des système de compensation de mouvement fonctionnant avec des récepteurs GPS, un soutien par une station au sol est inévitable. Mais les coûts de fonctionnement sont alors très 15 élevés alors que d'autre part il faut s'attendre à des limitations considérables concernant le choix du domaine d'utilisation. Sans support par une station au sol, les données de mouvement GPS qui sont absolument nécessaires pour une compensation du mouvement ne sont pas suffisantes.

Bien que les procédés à focalisation automatique ne soient pas 20 conçus pour des systèmes de navigation inertiels, ces procédés ne peuvent cependant pas être exécutés en temps réel en raison du nombre élevé des calculs. En outre, la largeur de bande des procédés à focalisation automatique n'est pas étendue et sa précision n'est pas élevée, ce qui fait que les erreurs de mouvement qui sont provoquées 25 surtout par des rafales de vent ne peuvent pas être corrigées. Pour cette raison, les procédés à focalisation automatique ne sont normalement utilisés que pour évaluer la vitesse vers l'avant d'un vecteur.

Dans le système de compensation de mouvement fonctionnant selon 30 le procédé dit à décalage selon le document DE 39 22 428 C2, le décalage est évalué entre deux spectres azimutaux se succédant dans le temps. Le décalage est alors déterminé par la position du maximum de la corrélation des deux spectres azimutaux, mais les défauts pendant la corrélation ne sont pas pris en compte. Ces défauts apparaissent 35 quand il y a une forte modification dans le temps de la fraction taux

de rétrodiffusion du spectre azimutal, par exemple quand il y a apparition d'une forte cible ponctuelle dans l'un des deux spectres azimutaux mis en corrélation. Des défauts apparaissent également souvent quand est formée l'image de régions à faible contraste, comme 5 la mer ou des déserts, ce qui réduit la précision et la fiabilité du procédé.

Le but de l'invention est donc d'améliorer considérablement la qualité des images avec un procédé d'extraction d'erreurs de mouvement d'un vecteur sur lequel est embarqué un système radar cohérent de formation d'image à partir de données brutes du radar ainsi qu'avec un dispositif pour la mise en oeuvre de ce procédé, même par rapport au procédé à décalage connu par le DE 39 22 428 C2, et sans que l'on ait à se reporter à un système de navigation tel que le système INS.

Selon l'invention, ce résultat est obtenu avec un procédé 15 d'extraction d'erreurs de mouvement d'un vecteur sur lequel est embarqué un système radar cohérent de formation d'image à partir de données brutes du type indiqué dans le préambule, qui est caractérisé en ce qu'après le calcul de l'ensemble du spectre azimutal et avant l'établissement de la corrélation, le spectre azimutal est décomposé 20 sur la totalité de la largeur de bande, qui est constituée par B points, en n spectres partiels, la fréquence de début correspondant au j^{ème} spectre partiel et à sa fréquence finale;

en ce que les n spectres partiels des deux spectres azimutaux qui se succèdent dans le temps et appartiennent au même ensemble sont 25 corrélés l'un avec l'autre;

en ce qu'avec le secours d'un décalage de fréquence attendu est déterminée une fenêtre;

en ce qu'il est déterminé à partir de la courbe obtenue par la 30 corrélation de l'ensemble du spectre azimutal et des courbes partielles à l'intérieur de la fenêtre la valeur maximale de la courbe;

le décalage partiel étant dans la position de la valeur maximale, le décalage partiel n'étant pas pris en compte dans le cas où le maximum est situé à la limite de la fenêtre, et des décalages 35 partiels valables étant ensuite classés en montant, et

1. seuls des décalages partiels différents de zéro sont utilisés,
 2. un décalage de fréquence est calculé à partir de la valeur moyenne allant jusqu'à trois dans les décalages partiels situés au centre, et
 3. un marquage d'erreur est transmis, par lequel un décalage de fréquence est fixé à zéro pour le cas où toutes les valeurs sont égales à zéro, ou quand il n'y a pas de petit décalage partiel; en ce que le nouveau décalage de fréquence attendu est déterminé
- 5 à partir du décalage de fréquence attendu et du décalage de fréquence qui vient d'être calculé;
- en ce que les étapes du procédé décrites dans ce qui précède sont effectuées simultanément et indépendamment sur plusieurs rangées de portes de distance;
- 10 en ce qu'un décalage de fréquence est calculé pour chaque rangée et une matrice est ainsi formée;
- en ce que toutes les valeurs qui sont égales à zéro sont recherchées à partir de cette matrice et une nouvelle valeur est interpolée à partir des positions voisines de chaque position zéro, et
- 15 en ce que la matrice corrigée continue d'être traitée pour le traitement des valeurs de décalage de fréquence et finalement la déviation dans la direction de visée de l'antenne et la vitesse vers l'avant sont calculées.
- 20 En ce qui concerne le dispositif pour la mise en oeuvre de ce procédé, qui comprend un dispositif pour le calcul du spectre azimutal, pour former de façon continue à partir des données brutes du radar des spectres azimutaux se succédant dans le temps, et un dispositif pour la formation d'une corrélation entre deux spectres azimutaux formés dans le temps directement l'un après l'autre, ce
- 25 dispositif est caractérisé par
- un dispositif pour former n spectres partiels sur la totalité de la largeur de bande à partir du spectre calculé par le dispositif;
- des registres pour mettre en mémoire les n spectres partiels;
- des dispositifs pour la formation d'une corrélation entre
- 30 respectivement deux spectres partiels formés immédiatement à la suite
- 35

- l'un de l'autre;
- des dispositifs pour déterminer la position du maximum à l'intérieur d'une fenêtre;
- un dispositif pour classer et marquer les valeurs obtenues au moyen des dispositifs de détermination de position;
- 5 un dispositif pour fixer une nouvelle fenêtre;
- un dispositif pour rechercher et corriger les erreurs obtenues par le dispositif de classement et de marquage; et
- 10 un dispositif pour traiter les valeurs de décalage de fréquence et pour calculer le décalage dans la direction de visée de l'antenne et la vitesse vers l'avant.
- Pour la mise en oeuvre du procédé de l'invention, la condition est toujours que les données de mouvement d'un vecteur à bord duquel est monté un radar de formation d'images soient déterminées de façon 15 aussi précise que possible, de manière à pouvoir corriger de façon appropriée les données brutes ainsi obtenues. Il faut alors que la vitesse vers l'avant du vecteur, la déviation, c'est-à-dire le déport dans la direction de visée de l'antenne ainsi que l'angle de dérive du vecteur soient déterminés. A cette fin, on utilise dans le procédé de 20 l'invention un nouvel algorithme pour calculer le décalage de la fréquence entre deux spectres azimutaux, ce qui améliore même le procédé à décalage selon le DE 39 22 428 C2 par sa précision et sa fiabilité. Le procédé de l'invention convient donc notamment pour des processeurs à réseaux et des systèmes de calcul en parallèle, mais 25 peut être également utilisé dans des systèmes de calcul traditionnels. Dans le procédé de l'invention, le spectre azimutal est subdivisé encore plus. Le décalage de fréquence de chaque partie du spectre peut donc être calculé avec encore plus de précision au moyen d'un décalage de fréquence attendu et d'un procédé dit à fenêtres. Grâce à un 30 classement des valeurs de décalage de fréquence qui sont sûres et grâce à la formation d'une valeur moyenne à partir de ces valeurs de décalage, et quand le décalage de fréquence calculé n'est pas situé dans la zone du décalage de fréquence attendu, ceci est reconnu comme constituant une erreur et est corrigé.
- 35 Le procédé de l'invention présente par rapport aux systèmes de

navigation inertIELS l'avantage que le procédé d'extraction de mouvement selon l'invention peut être réalisé de façon économique car la puissance de calcul dont il a besoin peut être facilement atteinte par les systèmes de calcul actuels aussi bien en temps réel qu'en différé.

Par rapport aux systèmes GPS mentionnés dans le préambule, il est avantageux dans le procédé d'extraction de mouvement de l'invention permettant une compensation du mouvement que toutes les informations nécessaires soient prélevées des données brutes du radar.

Aucune station au sol n'est alors nécessaire, le procédé de l'invention étant très souple et de ce fait plus autarcique que le système GPS.

Par comparaison avec le procédé à focalisation automatique, le procédé d'extraction de mouvement selon l'invention présente une largeur de bande beaucoup plus importante. En outre, il est possible de déterminer de nombreuses erreurs de mouvement, telles que d'accélération, de vitesse et de décalage, c'est-à-dire une déviation dans la direction de visée de l'antenne; toutes celles-ci sont des données que l'on ne peut pas obtenir avec le procédé à focalisation automatique. Les procédés à focalisation automatique ne peuvent pas non plus être exécutés en temps réel.

Avantageusement et par rapport au procédé dit à décalage selon le document DE 39 22 428 C2, la quantité de calculs est moins élevée car toutes les données brutes n'ont plus à être traitées pour obtenir une précision de même importance. En outre, une erreur de décalage de fréquence est rapidement reconnue et corrigée. De plus, le procédé d'extraction de mouvement selon l'invention est beaucoup moins sensible à des perturbations que le procédé à décalage connu quand il y a peu de contraste dans la zone dont l'image est formée.

L'invention va maintenant être expliquée en détail dans ce qui suit au moyen de modes de réalisation préférés et en référence aux dessins annexés dans lesquels:

la figure 1 représente sous forme d'un schéma par blocs un dispositif pour la mise en oeuvre du procédé de l'invention;

la figure 2a représente un spectre azimutal A et plusieurs

spectres partiels A₁ à A₄;

la figure 2b représente un autre spectre azimutal B et quelques spectres partiels B₁ à B₄;

les figures 3a à 3e sont des représentations schématiques des résultats obtenus par des corrélations de spectres partiels;

la figure 4 est une représentation schématique de l'utilisation d'une fenêtre dite de décalage pour déterminer un décalage;

la figure 5 est une représentation schématique d'une matrice de résultats provenant des corrélations;

la figure 6 représente un spectre azimutal d'ensemble obtenu et ses spectres partiels;

la figure 7a est une représentation schématique générale de la géométrie d'un radar;

la figure 7b représente un spectre azimutal d'une porte de distance sous la forme d'un diagramme;

les figures 8a à 8c sont des représentations schématiques de diagrammes qui forment ensemble un spectre azimutal,

la figure 8a représentant schématiquement un spectre azimutal d'une porte de distance,

la figure 8b représentant la forme schématisée d'un spectre d'un diagramme d'antenne, et

la figure 8c représentant la forme schématique d'un spectre d'un taux de rétrodiffusion, et

la figure 9 montre la forme schématisée d'un spectre azimutal dans deux points dans le temps différents ($t = i-1$ et $t = i$) ainsi que leur corrélation pour déterminer un décalage de fréquence selon le procédé d'extraction de mouvement selon le DE 39 22 428 C2.

A la figure 7a est représenté un exemple d'une géométrie de radar habituelle et du spectre azimutal correspondant. Un vecteur sur lequel est embarqué un système radar, présenté sous forme d'un avion 1 représenté schématiquement, est prévu pour voler à une vitesse V_y et de ce fait présenter une erreur de vitesse V_b dans la direction de visée d'une antenne qui n'est pas représentée, dont le lobe principal est représenté schématiquement. Les deux grandeurs de vitesse V_y et V_b dépendent du temps t et sont de ce fait désignées sur le dessin et dans

ce qui suit par $V_v(t)$ ou par $V_b(t)$. Grâce à l'antenne radar qui est montée sur l'avion 1, une région dont l'image doit être formée peut être éclairée par le lobe principal de l'antenne, qui est en alignement avec la direction du vol. Les cibles à détecter sont par exemple les points A, B, C, D et E pré-déterminés dans une certaine porte d'éloignement ET. A la figure 7a, seuls les points A, B et C de la cible sont éclairés.

5 ex. les points A, B, C, D et E pré-déterminés dans une certaine porte d'éloignement ET. A la figure 7a, seuls les points A, B et C de la cible sont éclairés.

En raison de la vitesse de vol $V_v(t)$ et de la vitesse $V_b(t)$ dans la direction de visée, chaque signal rétrodiffusé comporte un décalage de fréquence ou un décalage Doppler selon l'équation (1) suivante:

10 ex. de fréquence ou un décalage Doppler selon l'équation (1) suivante:

$$F_{\text{doppler}} = \frac{2 \cdot V_v(t) \cdot \sin \delta}{\lambda} \quad \frac{2 \cdot V_b(t) \cdot \cos \delta}{\lambda} \quad (1)$$

15

où δ représente l'angle entre la ligne de visée du radar et le point de la cible, et la ligne perpendiculaire à la trajectoire du vol, et λ désigne la longueur d'onde de l'impulsion radar émise.

Pour le point A de la cible, un angle $\delta > 0$ de la vitesse de vol $V_v(t)$ conduit à un décalage de fréquence positif, alors que pour le point C est produit un décalage de fréquence négatif avec un angle $\delta < 0$ pour une vitesse de vol $V_v(t)$. Pour le point B de la cible ($\delta = 0$), il n'y a pas de décalage de fréquence dû à la vitesse $V_v(t)$.

A la figure 7b est représenté schématiquement un spectre azimutal de la porte de distance ET, la fréquence étant portée sur l'axe vertical et la puissance S concernant les trois points A, B et C de la cible étant portée sur l'axe horizontal. En outre, il a été indiqué sur la gauche et contre l'axe vertical que la fréquence f dans la direction positive est supérieure à zéro, et inférieure à zéro dans la direction négative.

25 ex. de la porte de distance ET, la fréquence étant portée sur l'axe vertical et la puissance S concernant les trois points A, B et C de la cible étant portée sur l'axe horizontal. En outre, il a été indiqué sur la gauche et contre l'axe vertical que la fréquence f dans la direction positive est supérieure à zéro, et inférieure à zéro dans la direction négative.

Aux figures 8a à 8c est représentée de façon schématique la courbe représentant la composition d'un spectre azimutal, la fréquence f étant portée sur l'axe vertical sur la représentation des figures individuelles, et la puissance S sur l'axe horizontal. Comme on peut le voir en particulier sur les figures 8b et 8c, la spectre azimutal d'une porte de distance ET représentée schématiquement sur la figure

30 ex. de la porte de distance ET représentée schématiquement sur la figure

- 8a est constitué essentiellement par le produit du diagramme d'antenne représenté à la figure 8b dans la direction azimutale et du taux de rétrodiffusion donné par les points respectifs de la cible, par exemple A, B et C, et représenté à la figure 8c, le taux de rétrodiffusion devant être considéré comme désignant le rapport entre la puissance d'un signal reçu et celle d'un signal envoyé.
- 5 La fraction du diagramme d'antenne représenté à la figure 8b d'un spectre azimutal est décalé en fréquence par un angle de dérive et par la vitesse dans la direction de visée de l'antenne selon 10 l'équation (2), et on a pour un décalage de fréquence f_a :

$$15 \quad f_a = \frac{2 \cdot v_v(t) \cdot \sin\varphi(t)}{\lambda} - \frac{2 \cdot v_b(t)}{\lambda} \quad (2)$$

- où $\varphi(t)$ représente l'angle de dérive du vecteur.
- La fraction du taux de rétrodiffusion des signaux du spectre azimutal est décalée en fréquence selon l'équation (3) qui suit par 20 les vitesses dans la direction de visée de l'antenne. Pour ce décalage de fréquence f_r , on a:

$$25 \quad f_r = \frac{2 \cdot v_b(t)}{\lambda} \quad (3)$$

- Dans le procédé de décalage connu par le document DE 39 22 428 C2, les deux parties d'un spectre azimutal représentées schématiquement aux figures 8b et 8c, à savoir la partie diagramme 30 d'antenne et la partie taux de rétrodiffusion, sont séparées l'une de l'autre et évaluées séparément.

A la figure 9 sont représentés deux spectres azimutaux de ce type, à savoir dans la partie supérieure pour le temps $t = i-1$ et dans la partie inférieure pour le temps $t = i$, i étant un nombre entier supérieur à 1. Dans les deux spectres azimutaux sont représentés sur l'axe vertical la puissance S en fonction de la fréquence f qui est portée sur l'axe horizontal. En outre et sur le diagramme du bas est

représenté un décalage $v(i)$ d'un maximum par rapport au spectre azimutal de la partie supérieure de la figure 9.

L'allure d'un taux de rétrodiffusion présente toujours un décalage de fréquence négatif car un vecteur (1) qui emporte le système radar vole toujours en direction de l'avant et tous les éléments à détecter, c'est-à-dire tous les objets qui sont éclairés par le radar et rétrodiffusés, ont un décalage Doppler d'allure négative.

De ce fait, deux spectres reçus l'un après l'autre sont très semblables entre eux et on obtient après un développement approprié à partir des équations (1) et (3) qui précèdent un déplacement de fréquence avec un décalage de fréquence V (en Hz):

$$15 \quad V = \frac{2 \cdot V^2 v(t) \cdot \Delta t}{\lambda \cdot R} + \frac{2 \cdot v_b(t) \cdot \Delta T}{\lambda} \quad (4)$$

ou R représente l'éloignement de la porte de distance par rapport à l'antenne montée sur le vecteur 1 et ΔT la distance dans le temps entre les spectres reçus l'un après l'autre dans le temps. Comme montrée dans le bas de la figure 9, le décalage peut être déterminé par la position d'un maximum à l'aide d'une corrélation entre les deux spectres, ainsi que cela est montré schématiquement sur la droite de la figure 9, ce qui donne la forme de la courbe représentée sur la droite de la figure 9 concernant l'exemple représenté. Dans ce cas, l'amplitude est portée sur l'axe vertical en fonction du décalage f_V et de la grandeur i portés sur l'axe horizontal.

L'algorithme au moyen duquel, grâce au procédé de l'invention, on calcule un décalage de fréquence à partir de deux spectres azimutaux qui se suivent dans le temps, est représenté schématiquement par un schéma par blocs à la figure 1. On procède de la façon suivante pour le calcul: après avoir choisi une rangée de N_S portes de distance, on calcule à partir de ces N_S portes de distance N_S spectres azimutaux à l'aide d'une transformation de Fourier rapide (TFR). Un spectre de puissance azimutal déterminé est formé à partir de la valeur moyenne des N_S spectres de puissance azimutale des N_S portes de

distance respectives. Ce spectre de puissance azimutale déterminé est appelé spectre azimutal $S(f, i)$.

Un schéma par blocs du dispositif pour la mise en oeuvre du procédé d'extraction d'erreurs de mouvement d'un vecteur emportant un système radar de formation d'image à partir de données brutes du radar est représenté en détail à la figure 1. Pour former l'image d'une zone, cette zone est éclairée par le lobe principal d'une antenne montée sur l'avion 1 (voir figure 7a). On reçoit ainsi pendant une durée déterminée et au moyen d'un dispositif 100 de détection de 5 spectres azimutaux, des spectres azimutaux qui se suivent dans le temps, c'est-à-dire à des points dans le temps différents i (où i est un nombre entier supérieur à 1). La durée de réception des données est alors beaucoup plus courte que la durée dont l'avion 1 a besoin pour survoler la zone dont on doit former l'image. Deux spectres azimutaux 10 de ce type sont représentés de façon schématique et à titre d'exemples sur la gauche de la figure 9 pour les points dans le temps $t = i-1$ ainsi que $t = i$. Les spectres azimutaux reçus dans le temps les uns à la suite des autres en fonction de la fréquence f du radar et d'une puissance $S(f, i)$ sont formés dans un dispositif 200 de formation de 15 corrélation entre des spectres azimutaux reçus respectivement et directement les uns à la suite des autres dans le temps, à savoir 20 $K(f, i) = S(f, i) \otimes S(f, i-1)$. Le décalage de fréquence ainsi obtenu et calculé sous forme d'un décalage de fréquence $V(i)$ à la figure 9 est appelé dans ce qui suit décalage partiel $V_0(i)$. Conformément au 25 procédé de l'invention, le spectre azimutal $S(f, i)$ est décomposé à la sortie d'un autre dispositif 300 en n spectres partiels $S_1(f, i) \dots S_n(f, i)$ sur la totalité de la largeur de bande, qui est constituée par B points. La fréquence f peut être subdivisée en les fréquences partielle suivantes:

30

$$f_{S1} = 0..(B/n)-1; f_{S2} = B/n..(2B/n)-1; f_{SN} = (n-1)B/n...B-1$$

Les n spectres partiels $S_1(f, i) \dots S_n(f, i)$ formés sont mis en mémoire dans des registres montés en parallèle 401, 402, ... 40n qui 35 suivent le dispositif 300 de formation de spectres partiels. Les n

spectres partiels $S_j(f, i)$ mis en mémoire dans les registres 401 à 40n, où j est un nombre entier entre 0 et n, sont envoyés dans des dispositifs 501, 502,... 50n disposés à la suite des registres 401 à 40n, dans lesquels est réalisée une corrélation entre deux spectres partiels formés directement à la suite l'un de l'autre dans le temps, de manière que par exemple on ait à la sortie du dispositif 501:

$$K_1(f, i) = S_1(f, i) \otimes S_1(f, i-1)$$

alors que par exemple on a comme résultat de la corrélation dans le dispositif 50n: $K_n(f, i) = S_n(f, i) \otimes S_n(f, i-1)$. Les spectres partiels sont mis en corrélation individuellement pour éliminer des influences parasites de surfaces ou de lignes, dont la réflectivité dépend fortement du temps et de l'angle de visée. On a représenté en tant qu'exemples aux figures 2a et 2b deux spectres A et B qui sont respectivement subdivisés en quatre spectres partiels A_1 à A_4 ou B_1 à B_4 . Les spectres A et B sont respectivement corrélés selon le procédé de décalage décrit dans le DE 39 22 428 C2 de façon analogue à la représentation de la figure 9 et les explications qui viennent d'être données sur la figure 9, une corrélation étant respectivement formée entre spectres partiels faisant partie de mêmes groupes $A_1 \otimes B_1 \dots A_4 \otimes B_4$. Sous la forme:

$$K_j(f, i) = S_j(f, i) \otimes S_j(f, i-1), \text{ avec } j = 0 \dots n$$

Grâce à la corrélation, on obtient les courbes $K_j(f, i)$ à partir desquelles on peut déterminer le décalage de fréquence.

Avec le secours d'un décalage de fréquence attendu V_{er} , on détermine une fenêtre $W(i) = (V_{er} \pm \delta)$, où δ désigne la largeur d'une demi-fenêtre. Il faut alors que le décalage de fréquence déterminé se trouve à l'intérieur d'une telle fenêtre, comme montré schématiquement sous une forme générale à la figure 4. Les résultats qui correspondent aux corrélations individuelles des spectres partiels A_1 à A_4 ou B_1 à B_4 sont représentés aux figures 3a à 3e. Sur ces figures individuelles, le décalage de fréquence est représenté par une ligne

continue verticale et les limites de droite ou de gauche de la fenêtre par des lignes en tiretés verticales. Sur la figure 3a sur laquelle est représentée la corrélation $A \otimes B$ des deux spectres A et B, le décalage de fréquence est situé sur la limite de gauche de la fenêtre, et c'est pourquoi la ligne verticale en tiretés qui est montrée tombe sur la ligne continue de la figure 3a; de ce fait, le décalage de fréquence n'est pas valable. La figure 3b dans laquelle la corrélation $A_1 \otimes B_1$ est formée par les deux spectres partiels A_1 et B_1 , le décalage de fréquence est $v_1 = 2$ car il est situé de façon univoque à l'intérieur des limites représentées par des lignes en tiretés verticales; le décalage de fréquence $v_1 = 2$ est alors valable.

A la figure 3c est formée la corrélation $A_2 \otimes B_2$ à partir des spectres partiels A_2 et B_2 , le décalage de fréquence étant situé dans ce cas également sur la limite de gauche et n'étant donc pas valable. Par contre, à la figure 3d, dans laquelle la corrélation $A_3 \otimes B_3$ est formée par les spectres partiels correspondants A_3 et B_3 , le décalage de fréquence V est univoque à l'intérieur des limites indiquées à nouveau par des lignes verticales en tiretés et est donc valable sous la forme du décalage de fréquence $V_3 = 6$. A la figure 3e également dans laquelle est représentée la corrélation $A_4 \otimes B_4$ des deux spectres partiels A_4 et B_4 , le décalage de fréquence $v_4 = 4$ est situé de façon univoque à l'intérieur des limites indiquées également par des lignes verticales en tiretés et est donc valable.

Partant de la courbe $K_0(f, i)$ obtenue par la corrélation du spectre azimutal d'ensemble à la sortie du dispositif 200 et à partir des courbes partielles $K_1(f, i), K_2(f, i) \dots K_n(f, i)$ obtenues par les corrélations partielles dans les dispositifs correspondant 501, 502, 50n, la valeur maximale de la courbe est déterminée à l'intérieur de la fenêtre, ce qui fait qu'à la sortie des dispositifs 600 à 60n apparaissent les décalages de fréquence partiels correspondant à V_0 à v_n en tant que position de la valeur maximale respective. Si le maximum correspondant est situé sur la limite de la fenêtre, ceci est considéré comme une erreur et le décalage partiel correspondant n'est pas pris en compte ou est considéré comme non valable, comme indiqué en référence aux exemples des figures 3a et 3c.

On obtient pour les courbes $K_0(f,i)$ à $K_n(f,i)$ au maximum ($n+1$) décalages partiels $v_0(i)$ à $v_n(i)$. Les décalages partiels qui sont valables et doivent donc être pris en compte sont finalement classés en montant dans un dispositif 700 et évalués de la façon qui suit, et 5 simultanément marqués:

- (a) On utilise seulement des valeurs qui ne sont pas égales à 0 car dans la pratique deux spectres identiques ne peuvent pas se succéder dans le temps.
- 10 (b) Si le nombre des valeurs qui arrivent et qui ne sont pas égales à 0 est pair, on utilise pour une formation de valeur moyenne les deux décalages partiels situés au centre, et de façon correspondante on utilise quand le nombre de décalages partiels est impair trois décalages partiels situés au centre.
- 15 (c) Quand il n'y a qu'un unique décalage partiel valable, ce dernier est transféré directement.
- (d) Dans le cas où toutes les valeurs sont égales à 0, ou quand il n'y a aucun décalage partiel, c'est un 0 que l'on transfère en tant que marque d'erreur.

La valeur qui apparaît à la sortie du dispositif de tri et de 20 marquage 700, qui résulte de l'évaluation qui a été faite, constitue alors le nouveau décalage de fréquence $v(i)$.

Le nouveau décalage de fréquence attendu v'_{er} est déterminé à partir du décalage de fréquence attendu v_{er} et à partir du décalage de fréquence $v(i)$ qui a été calculé de la façon suivante:

25

$$v'_{er} = v_{er} \cdot C_1 + v(i) \cdot C_2,$$

où C_1 et C_2 sont des constantes spécifiques au système. Le nouveau décalage de fréquence attendu v'_{er} est alors calculé dans le cas où 30 $v(i)$ est différent de 0.

Le procédé est exécuté simultanément et indépendamment sur plusieurs rangées m de N_S portes de distance. Les bandes ne se chevauchent pas et sont simultanément réparties sur l'ensemble de la plage de distance. On obtient à partir de chaque bande n un décalage 35 de fréquence $V(i,m)$ où i représente le temps et m le nombre de bandes.

Comme montré schématiquement à la figure 5, on obtient ainsi une matrice qui contient tous les décalages de fréquence calculés $V(i,m)$, où $m = 0$ à N_{RDM} , et on calcule simultanément avec N_{RDM} le nombre de processus ou de bandes à effectuer simultanément.

5 Toutes les valeurs qui sont égales à 0 sont alors recherchées dans la matrice 900. Les valeurs qui sont à 0 représentent les positions où l'algorithme de tri a marqué une erreur, ou bien où toutes les valeurs de décalage partiel étaient non valables. Pour chacune de ces positions qui sont à 0, une nouvelle valeur est
10 interpolée à partir des positions voisines et une erreur ou une position zéro est ainsi corrigée. Ceci peut être réalisé de la façon suivante. Dans le cas où un point de coin est un 0, on le calcule à nouveau à partir de la valeur moyenne des trois positions immédiatement voisines. Un point de bord qui est de 0 est à nouveau
15 calculé à partir de la valeur moyenne des cinq positions immédiatement voisines, alors que lorsque l'erreur est située au centre, la position est remplacée par la valeur moyenne provenant des huit positions directement voisines.

La matrice 900 ainsi corrigée est alors appliquée à un
20 dispositif 1000 dans lequel les valeurs de décalage de fréquence sont traitées de façon analogue au procédé à décalage de fréquence selon le DE 39 22 428 C2, et aussi bien la déviation de la direction de visée de l'antenne que la vitesse de l'avant sont déterminées de la façon suivante. La séparation de la vitesse vers l'avant $V_y(t)$ qui est
25 contenue dans le premier terme de l'équation (4) et l'accélération $V_b(t)$ dans la direction de visée d'une porte de distance ET qui est contenue dans le second terme de l'équation (4) sont appliquées au dispositif représenté à la figure 1 par un bloc entouré par une ligne en tirets en passant par un filtre passe-haut 1001 ou par un filtre
30 passe-bas 1003. Ceci est possible car la vitesse vers l'avant V_y en cas de rafales de vent présente une largeur de bande très réduite jusqu'à 1 m/s, et qui atteint par exemple de 0 à 0,1 Hz.
L'accélération V_b en direction de visée de l'antenne présente une
35 largeur de bande sensiblement plus importante, raison pour laquelle seules les parties les plus élevées de la fréquence sont

significatives pour une composante de mouvement et ainsi seules les fractions de fréquence à partir de 0,1 Hz sont prises en compte.

Les données ayant passé par le filtre passe-haut 1001 sont soumises dans deux unités d'intégration 1004 situées à la suite à une double intégration et ensuite normalisées dans une unité de normalisation 1005, alors que les parties de la fréquence qui ont passé par le filtre passe-bas 1003 ne doivent être soumises qu'à une seule normalisation dans une unité de normalisation 1006. A la sortie de l'unité de normalisation 1005, on obtient alors la déviation r_B , c'est-à-dire la divergence dans la direction de visée de l'antenne, alors qu'à la sortie de l'unité de normalisation 1006 la vitesse vers l'avant v est reçue en tant que donnée de mouvement.

Le procédé d'extraction de mouvement selon l'invention a été utilisé avec beaucoup de succès par la déposante dans le système expérimental SAR(E-SAR-). Ce système fonctionne dans la bande C et donc à 5,3 GHz, et est monté actuellement à bord d'un avion du type Dornier 228. Au cours d'essais pratiques, il s'est avéré que l'on obtient les meilleures résultats avec un spectre déterminé à partir d'une bande d'éloignement formée par 32 Bins de distance, ce qui correspond à 32 spectres ou à 32 portes de distance N_S . Le spectre qui présente une largeur de bande B de 256 points de fréquence, c'est-à-dire $B = 256$, est subdivisé en huit spectres partiels, (c'est-à-dire $n = 8$), parmi lesquels chaque spectre partiel comprend 64 points de fréquence pour un chevauchement de 50%. Avec une fréquence des impulsions radar de 1 KHz, on peut déterminer environ quatre (4) décalages de fréquence à la seconde ($1000/B$). L'ensemble du spectre est alors subdivisé en les huit (8) spectres partiels suivants: comme montré à la figure 6, à savoir:

- un spectre partiel I avec des points de fréquence de 0 à 63;
- 30 un spectre partiel II avec des points de fréquence de 32 à 95;
- un spectre partiel III avec des points de fréquence de 64 à 127;
- un spectre partiel IV avec des points de fréquence de 96 à 159;
- un spectre partiel V avec des points de fréquence de 128 à 191;
- un spectre partiel VI avec des points de fréquence de 160 à 223;
- 35 un spectre partiel VII avec des points de fréquence de 192 à 255;

un spectre partiel VIII avec des points de fréquence de 223 à 31.

On effectue alors chaque fois neuf (9) corrélations, à savoir une corrélation entre tous les spectres conformément au procédé dit à décalage décrit en détail dans le DE 39 22 428 C2 qui a été traité 5 dans le préambule de la description en ce qui concerne ses points essentiels. En outre, huit (8) corrélations sont effectuées entre les huit spectres partiels indiqués ci-dessus. La précision visée est d'environ trois fois supérieure à la précision atteinte avec le procédé à décalage selon le DE 39 22 428 C2 dans le cas de zones à 10 fort contraste, et d'environ dix fois dans les zones à faible contraste (par exemple des déserts, la mer, ou autres).

L'avantage du procédé de l'invention, non seulement par rapport aux systèmes de navigation inertIELS utilisés jusqu'ici dans de nombreux cas et expliqués dans le préambule, mais également et 15 contrairement au procédé d'extraction de mouvement appelé procédé à décalage dans le DE 39 22 428 C2, est de pouvoir être réalisé de façon considérablement plus économique que le procédé à décalage mentionné car les opérations de calcul nécessaires sont effectuées très facilement et rapidement en temps réel ou en différé. En outre le 20 procédé de l'invention peut être également utilisé de façon très efficace dans le procédé d'extraction à partir de données brutes connu par le DE 41 24 062 d'erreurs de phase du signal de rétrodiffusion d'un système radar de formation d'images qui sont provoquées par l'atmosphère. Le procédé de l'invention peut être également mis en 25 oeuvre avec des systèmes sonar et lidar.

REVENDICATIONS

1. Procédé d'extraction d'erreurs de mouvement d'un vecteur sur lequel est monté un système radar cohérent de formation d'image à partir de données brutes du radar, procédé dans lequel sont formés de façon continue dans le temps et au cours d'une durée déterminée des spectres azimutaux successifs, une corrélation ($K_0(f, i) = S(f, i) \otimes S(f, i-1)$, $S(f, i)$ représentant le spectre azimutal au point i dans le temps, $S(f, i-1)$ le spectre azimutal au point $(i-1)$ dans le temps et la corrélation) est effectuée pour calculer un décalage de fréquence sur l'ensemble du spectre azimutal ($S(f, i)$), les valeurs du décalage de fréquence sont ensuite traitées et la déviation dans la direction de visée de l'antenne ainsi que la vitesse vers l'avant sont calculées,
- caractérisé en ce qu'après le calcul de l'ensemble du spectre azimutal ($S(f, i)$) et avant l'établissement de la corrélation ($K_0(f, i)$), le spectre azimutal $S(f, i)$ est décomposé sur la totalité de la largeur de bande, qui est constituée par B points, en n spectres partiels ($S(f, i) \dots S(f, i)$), la fréquence de début ($(j-1) \cdot B/n$) correspondant au j ème spectre partiel et à sa fréquence finale ($(j(B/n) - 1)$ où $j = 1 \dots n$);
- en ce que les n spectres partiels des deux spectres azimutaux qui se succèdent dans le temps et appartiennent au même ensemble sont corrélés l'un avec l'autre, à savoir $K_j(f, i) = S_j(f, i) \otimes S_j(f, i-1)$;
- en ce qu'avec le secours d'un décalage de fréquence attendu (v_{er}), est déterminée une fenêtre ($W(i) = v_{er} \pm \delta$ où δ représente la largeur d'une demi-fenêtre);
- en ce qu'il est déterminé la courbe ($K_0(f, i)$) à partir de la corrélation de l'ensemble du spectre azimutal et les courbes partielles ($K_1(f, i) \dots K_n(f, i)$) à l'intérieur de la fenêtre des valeurs maximales de la courbe;
- le décalage partiel étant dans la position de la valeur maximale, le décalage partiel n'étant pas pris en compte dans le cas où le maximum est situé à la limite de la fenêtre, et des décalages partiels valables étant ensuite classés en montant, et
1. seuls des décalages partiels différents de zéro sont

utilisés,

2. un décalage de fréquence ($(V(i))$) est calculé à partir de la valeur moyenne allant jusqu'à trois dans les décalages partiels situés au centre, et

5 3. un marquage d'erreur est transmis, par lequel un décalage de fréquence est fixé à zéro pour le cas où toutes les valeurs sont égales à zéro, ou quand il n'y a pas de petit décalage partiel; en ce que le nouveau décalage de fréquence attendu (v'_{er}) correspondant à la relation ($v'_{er} = v_{er} \cdot C_1 + V(i) \cdot C_2$ où C_1 et C_2 sont des constantes) est déterminé à partir du décalage de fréquence attendu (v_{er}) et du décalage de fréquence ($V(i)$) qui vient d'être calculé;

10 en ce que les étapes du procédé décrites dans ce qui précède sont effectuées simultanément et indépendamment sur plusieurs rangées de portes de distance (N_S);

15 en ce qu'un décalage de fréquence ($V(i,m)$, où i représente le temps et m la distance) est calculé pour chaque rangée et une matrice est ainsi formée;

20 en ce que toutes les valeurs qui sont égales à zéro sont recherchées à partir de cette matrice et une nouvelle valeur est interpolée à partir des positions voisines de chaque position zéro, et
25 en ce que la matrice corrigée continue d'être traitée pour le traitement des valeurs de décalage de fréquence et finalement la déviation dans la direction de visée de l'antenne et la vitesse vers l'avant sont calculées.

30 2. Dispositif pour la mise en oeuvre du procédé, qui comprend un dispositif (100) pour calculer le spectre azimutal ($S(f,i)$) de façon à former de façon continue dans le temps des spectres azimutaux successifs à partir de données brutes du radar et un dispositif (200) pour la formation d'une corrélation ($K_0(f,i)$) entre respectivement deux spectres azimutaux ($S(f,i); S(f,i-1)$) formés immédiatement l'un après l'autre dans le temps, caractérisé par
35 un dispositif (300) pour former n spectres partiels sur la totalité de la largeur de bande (B) à partir du spectre calculé par le dispositif (100);

- des registres (401, 402, ... 40n) pour mettre en mémoire les n spectres partiels ($S(f,i)$, où $j = 1,..n$);
- des dispositifs (501, 502,... 50n) pour la formation d'une corrélation entre respectivement deux spectres partiels formés
- 5 immédiatement à la suite l'un de l'autre;
- des dispositifs (600, 601, 602, 603,... 60n) pour déterminer la position du maximum à l'intérieur d'une fenêtre ($W(i)$);
- un dispositif (700) pour classer et marquer les valeurs obtenues au moyen des dispositifs de détermination de position (600, 601,
- 10 602,...60n);
- un dispositif (800) pour fixer une nouvelle fenêtre ($W(i+1)$);
- un dispositif (900) pour rechercher et corriger les erreurs obtenues par le dispositif de classement et de marquage (700); et
- un dispositif (1000) pour traiter les valeurs de décalage de
- 15 fréquence et pour calculer le décalage dans la direction de visée de l'antenne et la vitesse vers l'avant.

Fig. 1

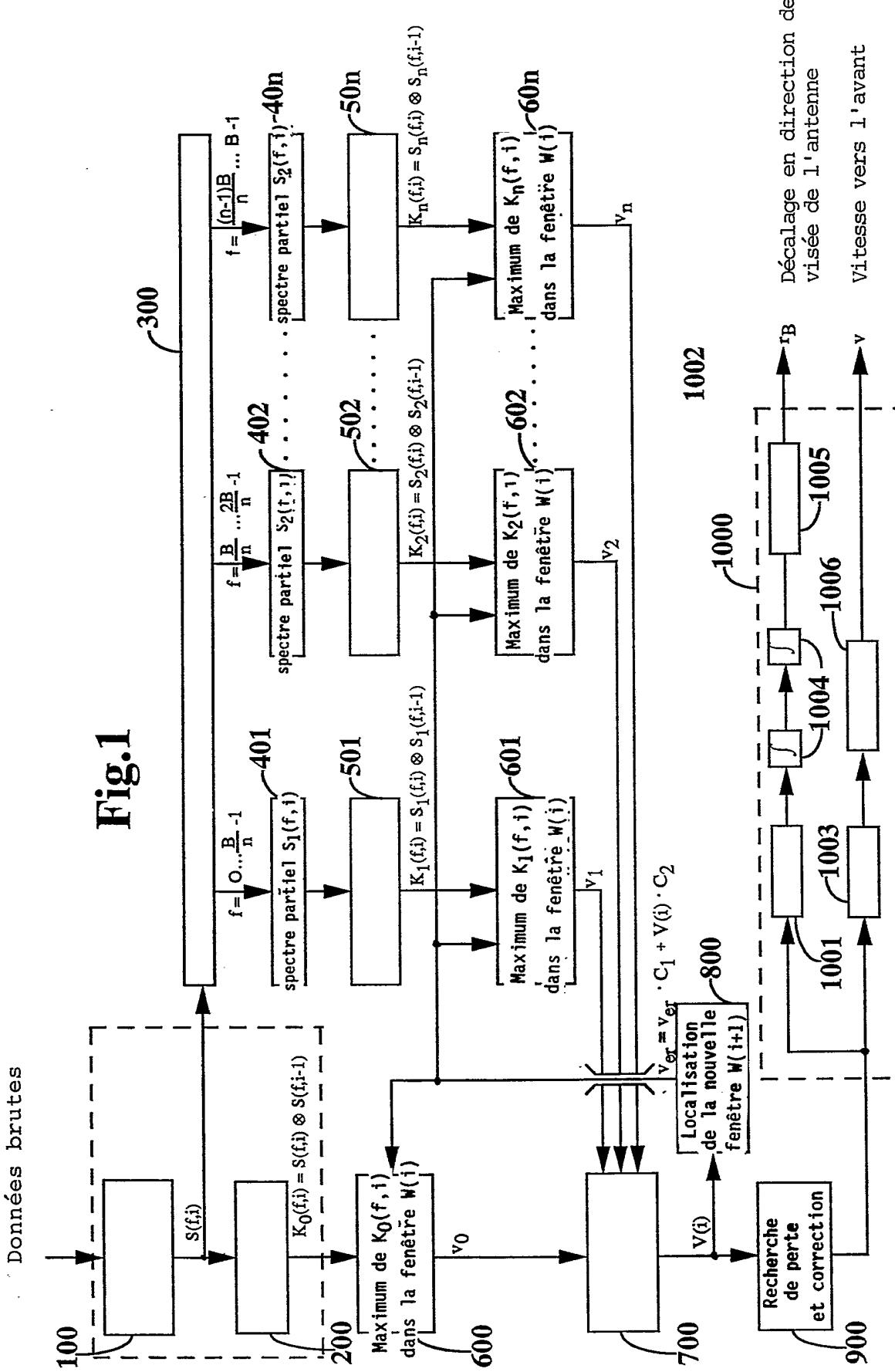


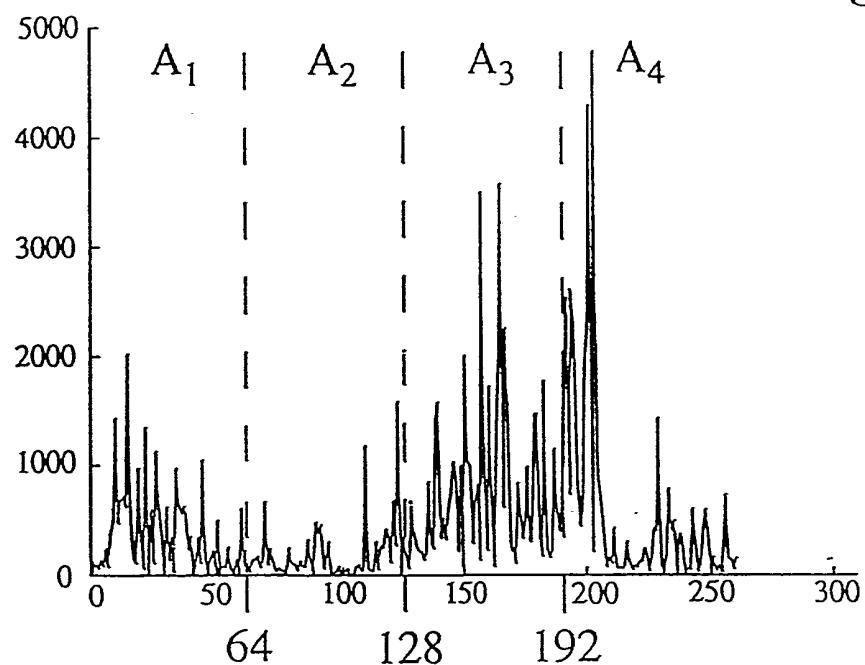
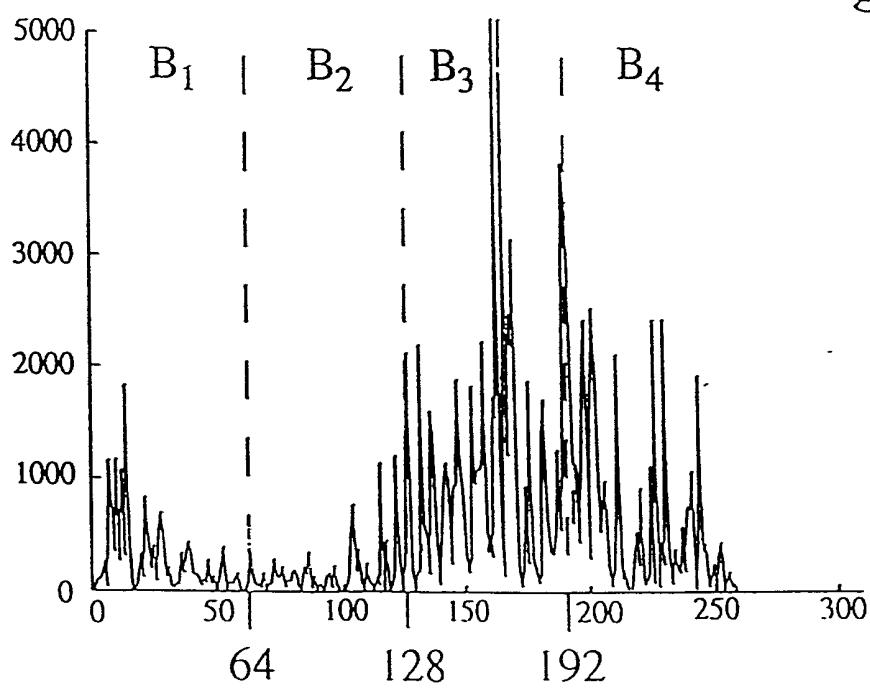
Fig. 2a**Fig. 2b**

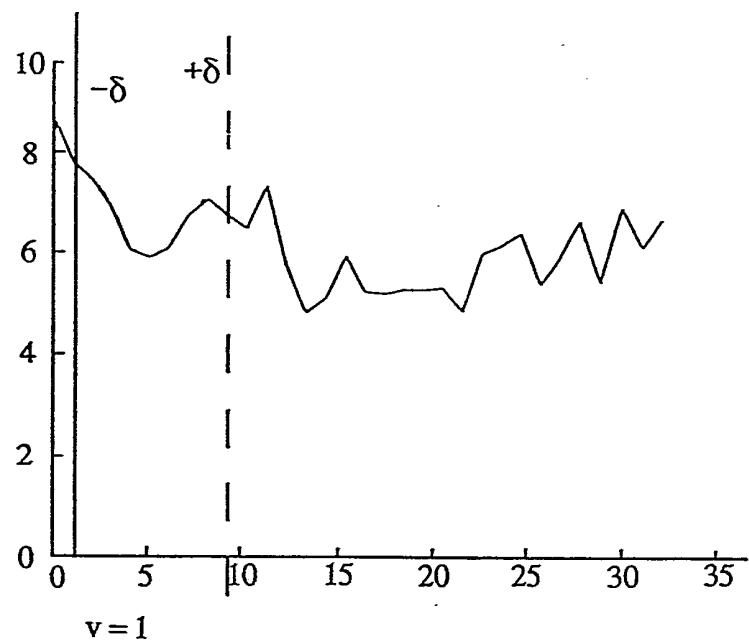
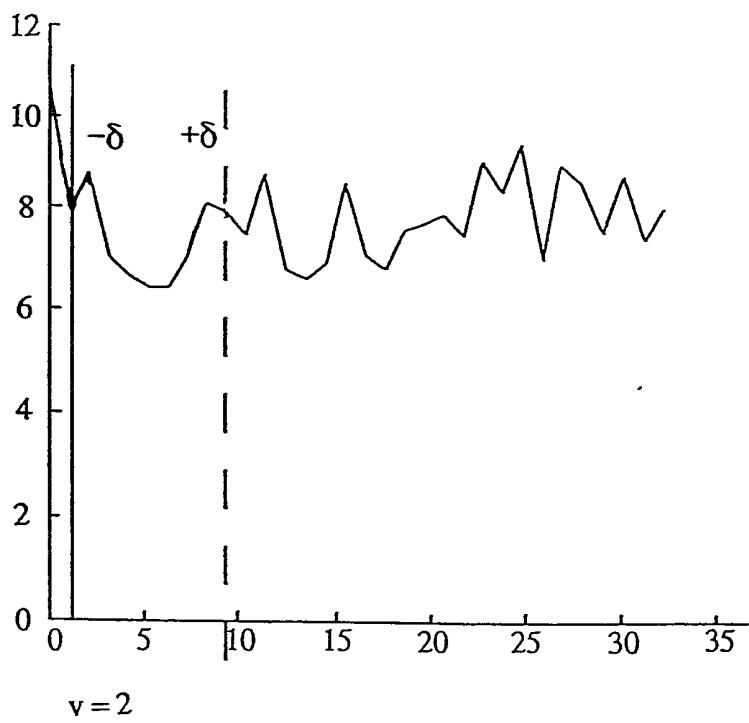
Fig. 3a**Fig. 3b**

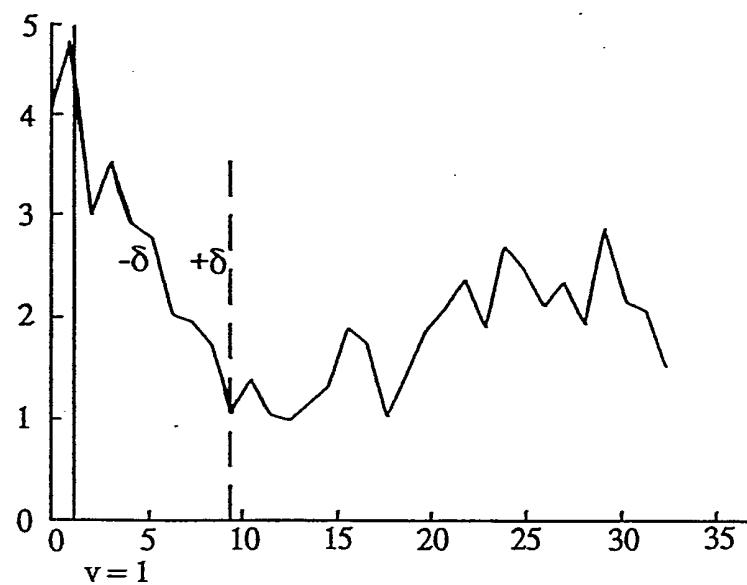
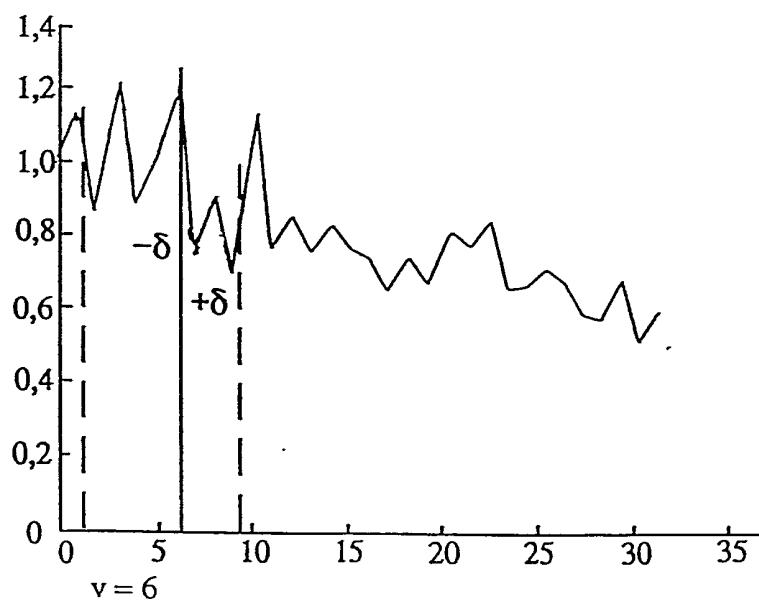
Fig. 3c**Fig. 3d**

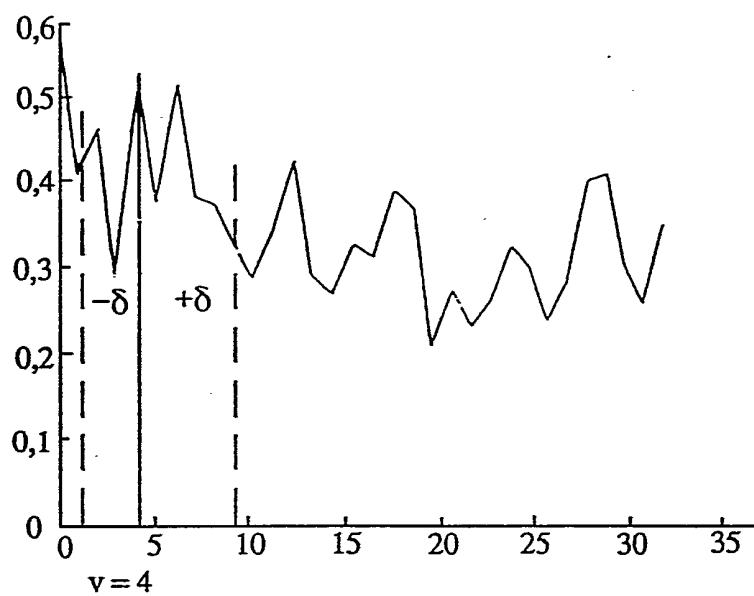
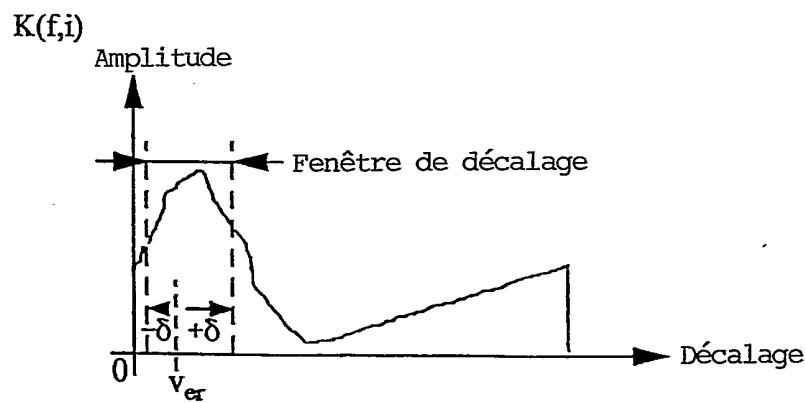
Fig. 3e**Fig.4**

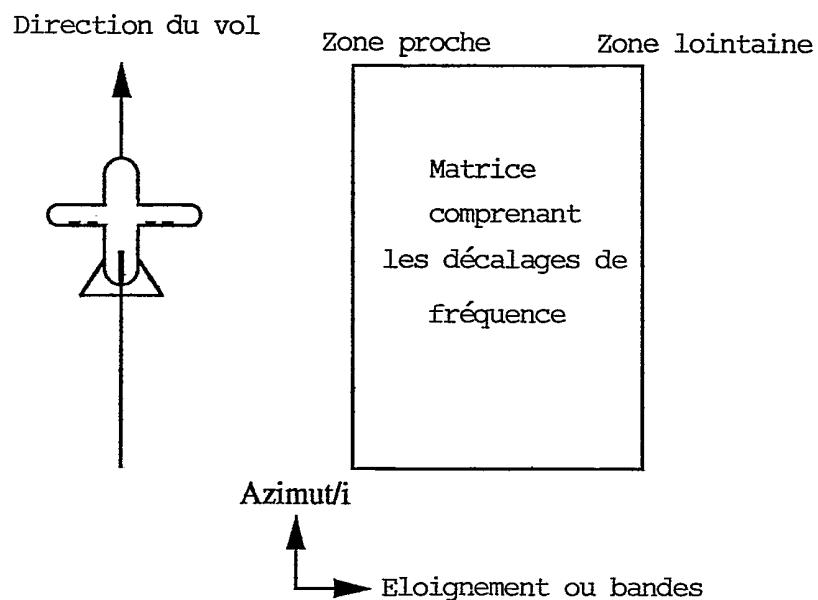
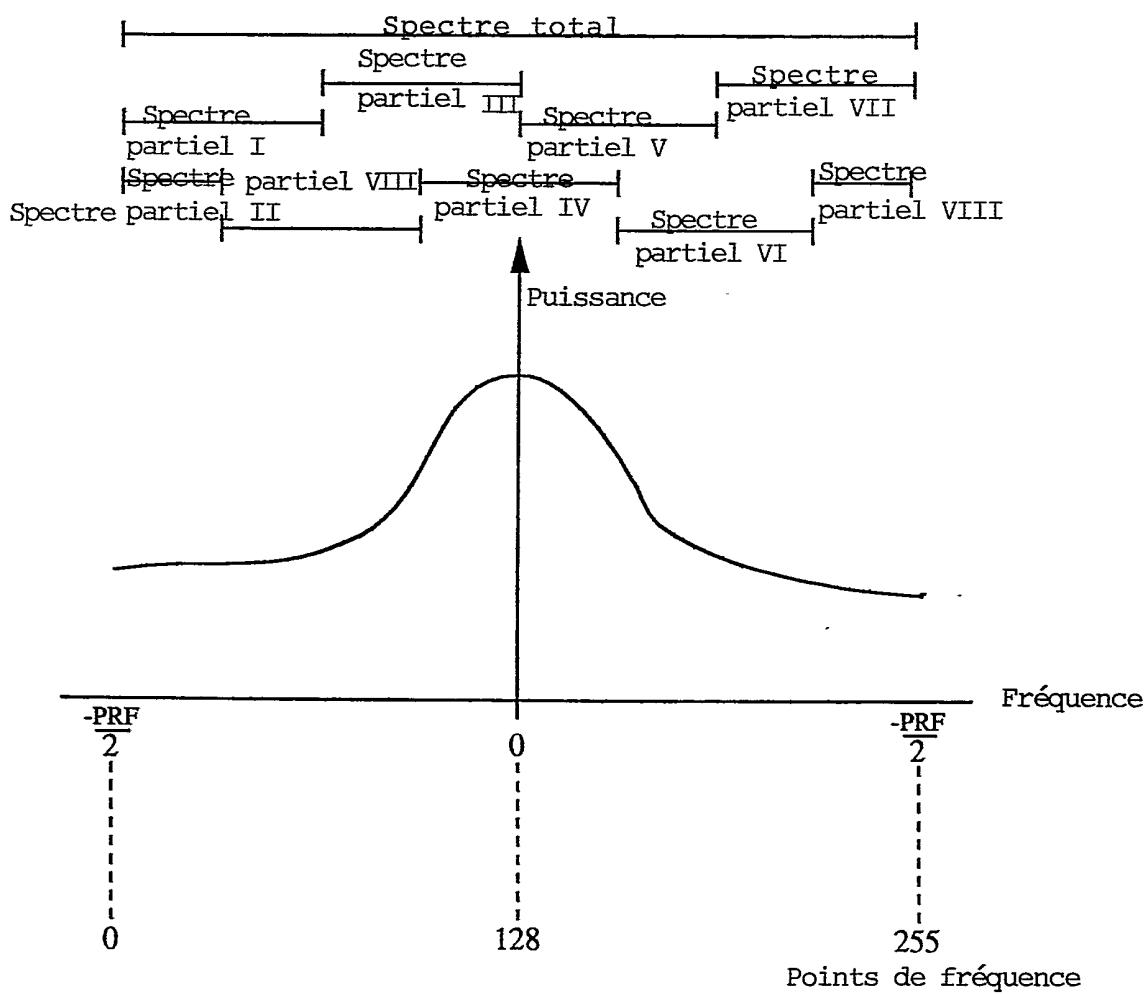
Fig.5**Fig.6**

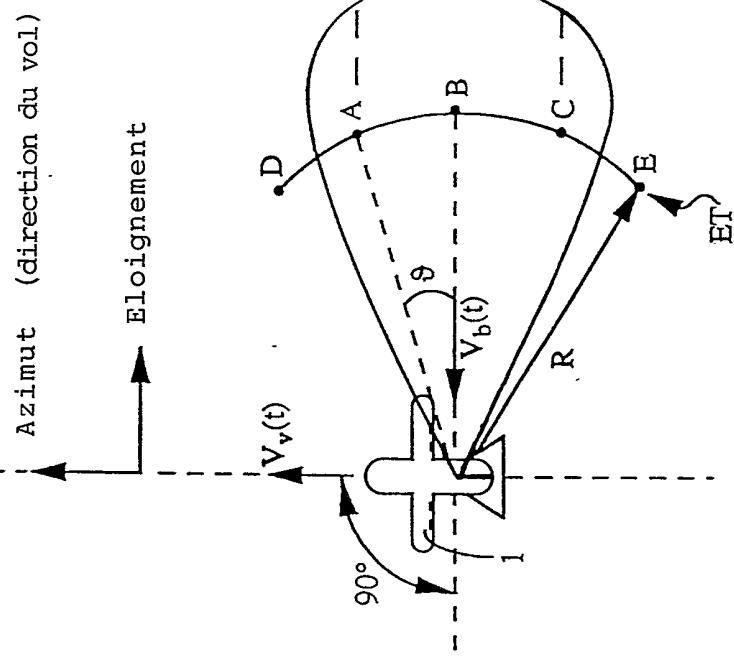
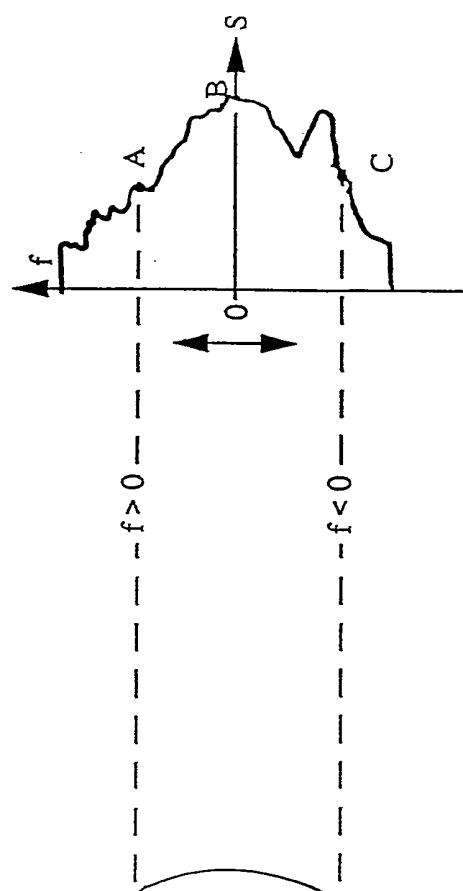
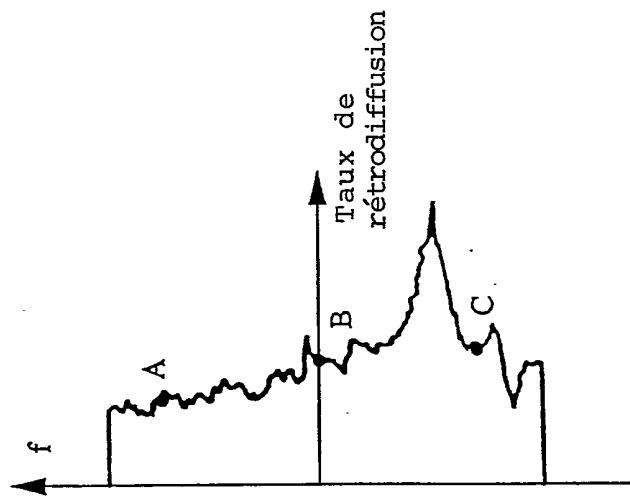
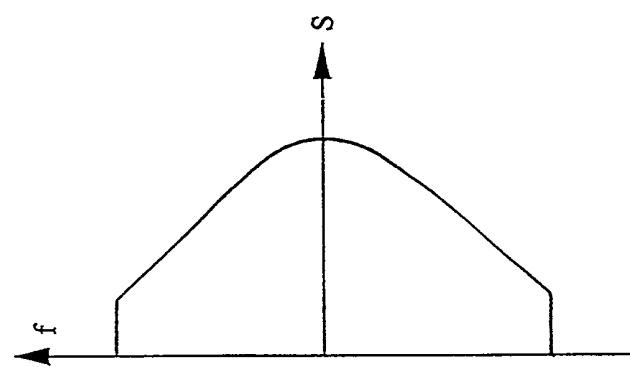
Fig. 7a**Fig. 7b**

Fig. 8c



X

Fig. 8b



=

Fig. 8a

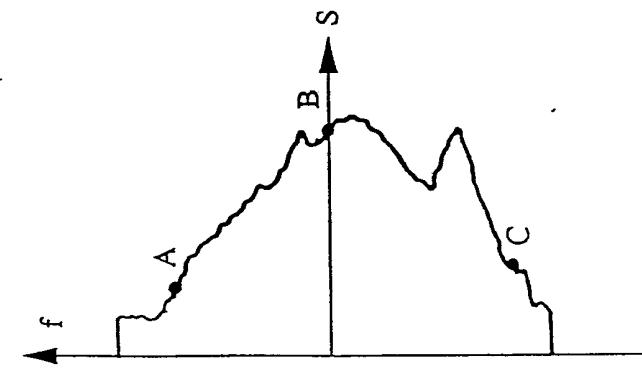


Fig.9