

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
7 janvier 2010 (07.01.2010)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2010/001035 A2

(51) Classification internationale des brevets :
G01S 13/90 (2006.01) G01S 13/58 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2009/051095

(22) Date de dépôt international :
10 juin 2009 (10.06.2009)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
08 53886 11 juin 2008 (11.06.2008) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES [FR/
FR]; 2, Place Maurice Quentin, F-75001 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : TISON,
Céline [FR/FR]; 19 bis rue Henri Tagnères, F-31400
Toulouse (FR). POURTHIE, Nadine [FR/FR]; 12 rue du

Nivernais, F-31100 Toulouse (FR). AMBERG, Virginie
[FR/FR]; 14 rue Mamy, F-31500 Toulouse (FR).
OLLER, Guillaume [FR/FR]; 7 rue des Cèdres, F-31140
Saint-Loup-Gammas (FR). PETIT, David [FR/FR];
Résidence Etoile - 21 avenue Emile Zola, F-31520
Ramonville Saint Agne (FR).

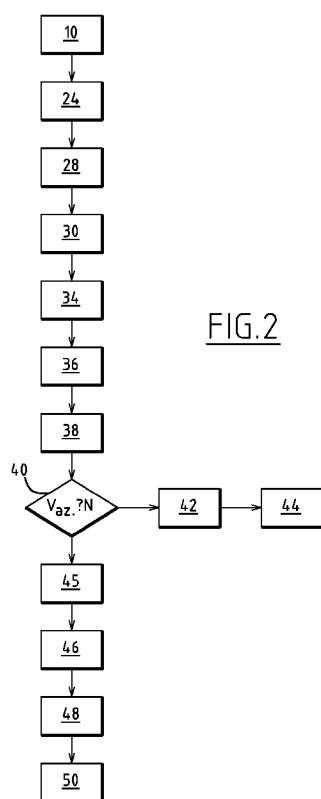
(74) Mandataire : JACOBSON, Claude; Cabinet Lavoix, 2
Place d'Estienne d'Orves, F-75441 Paris Cedex 09 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ,
CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD,
SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT,
TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD AND DEVICE FOR ESTIMATING AT LEAST ONE SPEED COMPONENT OF A MOVING TARGET

(54) Titre : PROCÉDÉ ET DISPOSITIF D'ESTIMATION D'AU MOINS UNE COMPOSANTE DE VITESSE D'UNE CIBLE MOBILE.



(57) Abstract : The invention relates to a method for estimating at least one speed component (V_{az}) for a moving target from a single radar image synthesized in terms of distance and azimuth. The estimating method comprises the following steps: - seeking (10, 24), from the radar image, a spatial correlation pattern for the phase generated by the movement of the target; - seeking (28, 30) a parabola along the spatial correlation pattern of the phase and modeling (34, 36) the parabola through a second degree polynomial; - determining (36) a quadratic parameter of said second degree polynomial; and - estimating (38) the azimuth speed component (V_{az}) of the speed of the target from said quadratic parameter. The invention also relates to a device for implementing the above-mentioned estimation method.

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé d'estimation d'au moins une composante (V_{az}) de vitesse d'une cible mobile à partir d'une unique image radar synthétisée en distance et en azimuth. Le procédé d'estimation comporte les étapes suivantes : - recherche (10, 24) d'un motif de corrélation spatiale de la phase généré par le mouvement de la cible, à partir de l'image radar; - recherche (28, 30) d'une parabole le long du motif de corrélation spatiale de la phase et modélisation (34, 36) de la parabole par un polynôme du second degré; - détermination (36) d'un paramètre quadratique dudit polynôme du second degré; et estimation (38) de la composante azimutale (V_{az}) de la vitesse de la cible à partir dudit paramètre quadratique. L'invention concerne également un dispositif d'estimation pour la mise en œuvre du procédé d'estimation précité.

WO 2010/001035 A2



(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)*

Procédé et dispositif d'estimation d'au moins une composante de vitesse d'une cible mobile.

La présente invention concerne un procédé et un dispositif d'estimation d'au moins une des deux composantes de vitesse d'une cible mobile à partir d'une image radar synthétisée en distance et en azimut.

Les techniques de détection de cibles mobiles usuellement appelées techniques MTI de l'anglais « Moving Target Indicator » visent à détecter une cible mobile et à estimer à partir d'un ou plusieurs signaux radar la position de la cible et les composantes radiale et/ou azimutale de sa vitesse.

Les techniques MTI peuvent être classées en deux types, à savoir les techniques multi-images et les techniques mono-image.

Les techniques multi-images consistent à utiliser plusieurs signaux radar de la même scène enregistrés par plusieurs plate-formes ou par plusieurs antennes alignées en azimut sur une plate-forme. Ces techniques permettent une bonne estimation de la position et de la vitesse de la cible, notamment en ce qui concerne sa composante de vitesse radiale. En contrepartie, elles nécessitent l'utilisation d'une plate-forme ayant plusieurs antennes ou de plusieurs plate-formes disposées selon des contraintes géométriques. Elles sont donc liées à des contraintes systèmes fortes et coûteuses.

La plupart des techniques mono-image extrait les positions et/ou les composantes de vitesse à partir des données compressées en distance mais pas en azimut.

L'invention a pour but un procédé et un dispositif alternatifs d'estimation d'au moins une des deux composantes de vitesse d'une cible mobile.

A cet effet, l'invention a pour objet un procédé d'estimation d'au moins une des deux composantes de vitesse d'une cible mobile à partir d'une unique image radar synthétisée en distance et en azimut, lesdites composantes de la vitesse de la cible étant une composante azimutale et une composante perpendiculaire à la composante azimutale dite composante radiale, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

- recherche d'un motif de corrélation spatiale de la phase généré par le mouvement de la cible, à partir de l'image radar ;

- recherche d'une parabole le long du motif de corrélation spatiale de la phase et modélisation de la parabole par un polynôme du second degré ;

- détermination d'un paramètre quadratique dudit polynôme du second degré ; et estimation de la composante azimutale de la vitesse de la cible à partir dudit paramètre quadratique.

Suivant des modes particuliers de mise en œuvre, le procédé d'estimation comporte l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou en combinaison :

- l'étape de recherche d'un motif de corrélation spatiale de la phase comporte les étapes suivantes :

a) extraction d'une image de phase de l'image radar synthétisée ;

b) recherche d'un motif de corrélation spatiale de la phase sur l'image de phase ;

- l'étape de recherche d'une parabole comporte une étape de déroulement de la phase le long du motif de corrélation spatiale de la phase ;

- l'étape de modélisation comporte une étape de détermination de l'extremum de la parabole, et d'un intervalle de traitement de part et d'autre de l'extremum ;

- le procédé comporte en outre les étapes suivantes :

- comparaison de la composante azimutale de la vitesse de la cible avec un nombre prédéfini, et lorsque la composante azimutale de la vitesse de la cible est inférieure au nombre prédéfini ;

- détermination d'un paramètre linéaire du polynôme de second degré ;

- détermination de la composante radiale de la vitesse de la cible à partir dudit paramètre linéaire ;

- le procédé comporte également les étapes suivantes :

c) extraction d'une image d'amplitude de l'image radar synthétisée ;

d) recherche d'un motif d'amplitude sur l'image d'amplitude ;

- l'étape d) comporte en outre une étape de binarisation de l'image d'amplitude à partir d'un seuil prédéfini ;

- le seuil est égal à la valeur d'amplitude maximale de l'image d'amplitude divisée par un nombre supérieur ou égal à 3 ;

3

- l'étape d) comporte en outre une étape de filtrage morphologique ;
- le procédé comporte en outre les étapes suivantes :

- détermination de la position en azimuth du centre du motif d'amplitude ;

5 - détermination du décalage spectral généré par le déplacement radial de la cible, à partir de ladite position du centre du motif d'amplitude et de la relation suivante : $f_0 = a_1 - 2 a_2 \left(\frac{y' - y_0}{V_a} \right)$:

dans laquelle a_1 est le paramètre linéaire du polynôme de second degré, a_2 est le paramètre quadratique du polynôme de second degré, f_0 est le décalage spectral, (V_a) est la vitesse d'un capteur imageur ayant capturé l'image radar, 10 $(y' - y_0)$ est la coordonnée en azimuth du centre du motif d'amplitude ;

- détermination de la composante radiale de la vitesse de la cible à partir du décalage spectral ;

- le procédé comporte en outre les étapes suivantes :

15 - mesure de la distance entre la position en azimuth du centre du motif d'amplitude et la position en azimuth de l'extremum du motif de phase ;

- détermination du décalage spectral généré par le déplacement radial de la cible, à partir de ladite distance mesurée et de la relation :

$$f_0 = 2a_2 D$$

20 dans laquelle D est la distance mesurée, a_2 est le paramètre quadratique du polynôme de second degré, et f_0 est le décalage spectral ; et

- estimation de la composante radiale de la vitesse de la cible à partir du décalage spectral ;

25 - la composante radiale de la vitesse de la cible est obtenue à partir du décalage spectral et de la relation suivante :

$$V_{rad} = \frac{\lambda f_0}{2 \sin(\theta)}$$
 dans laquelle :

- V_{rad} est la composante radiale de la vitesse de la cible mobile,

- f_0 est le décalage spectral issu du déplacement radial de la cible mobile,

30 - θ est l'angle d'incidence de prise de vue du radar, et

- λ est la longueur d'onde du signal émis par le radar ; et

- l'image radar est une image à très haute résolution.

L'invention concerne également un dispositif d'estimation d'au moins une composante de vitesse d'une cible mobile à partir d'une unique image radar synthétisée en distance et en azimut, caractérisé en ce qu'il comporte :

- 5 - une unité de recherche d'un motif de corrélation spatiale de la phase généré par le mouvement de la cible, à partir de l'image radar ;
- une unité de recherche d'une parabole le long du motif de corrélation spatiale de la phase ; et
- une unité de modélisation de la parabole par un polynôme du second
- 10 degré ; ladite unité de modélisation étant propre à déterminer un paramètre quadratique dudit polynôme du second degré ; et à estimer la composante azimutale de la vitesse de la cible à partir dudit paramètre quadratique.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés,

15 sur lesquels :

- la figure 1 est une représentation en trois dimensions de l'observation selon une direction d'incidence d'une scène par un radar à synthèse d'ouverture ;
- la figure 2 est un diagramme des étapes du procédé d'estimation selon l'invention ;
- 20 - la figure 3 est une image représentant l'amplitude d'une image radar comportant une cible mobile ;
- la figure 4 est une image représentant la phase d'une image radar comportant une cible mobile ;
- la figure 5 est un graphe représentant la phase en fonction de la direction
- 25 azimutale de l'image radar, le long d'un motif de phase d'une cible mobile ;
- la figure 6 est l'image illustrée sur la figure 3, binarisée et filtrée pour faire apparaître la trace d'une cible mobile ;
- la figure 7 est un diagramme d'une variante d'une partie du procédé d'estimation selon l'invention ;
- 30 - la figure 8 est une image de phase et une image d'amplitude représentant la même cible mobile ;
- la figure 9 est un graphe représentant l'amplitude en fonction de la direction azimutale de l'image le long du motif de phase et un graphe représentant

la phase en fonction de la direction azimutale de l'image le long du motif d'amplitude ; et

- la figure 10 est une vue schématique d'un dispositif d'estimation selon l'invention.

5 En référence à la figure 1, le procédé d'estimation selon l'invention est réalisé à partir d'une image radar 2 obtenue par un capteur imageur 4 monté sur une plate-forme aéroportée ou une plate-forme spatiale se déplaçant à une vitesse V_a par rapport à la terre et se trouvant à une altitude H. Comme visible sur la figure 1, le capteur imageur 4 est un radar à visée latérale dont l'angle
10 d'incidence de prise de vue est référencé θ .

Sur la figure 1, l'axe d'azimut est représenté par l'axe y, et l'axe de distance ou axe radial est représenté par l'axe R. L'axe R est parallèle à une droite passant par la cible mobile 6 et le capteur 4. L'axe x est perpendiculaire à l'axe y. Les axes x et y forment un plan dans lequel la cible mobile 6 se déplace. L'axe x et l'axe R
15 définissent la géométrie de l'image radar. Comme les spécialistes radar désignent la composante selon l'axe x par le terme « composante radiale » ou « composante en distance », nous avons également désigné la composante de la vitesse selon l'axe x par le terme « composante radiale » dans la présente demande bien qu'en réalité cette dénomination soit un abus de langage.

20 La composante de la vitesse selon l'axe x est obtenue en divisant la composante de la vitesse selon l'axe R par $\sin \theta$. Cette division correspond à une projection de l'axe R sur l'axe x.

Le mouvement en distance de la cible est aussi appelé mouvement radial de la cible. C'est un mouvement selon l'axe x. Le mouvement en azimut de la cible
25 est un mouvement selon l'axe y.

Le capteur imageur 4 est un radar à synthèse d'ouverture (RSO). Il comprend une antenne qui émet des impulsions hyperfréquences vers la surface de la terre et réceptionne les signaux rétrodiffusés par la surface imagée. Il transmet les signaux rétrodiffusés vers un dispositif 5 d'enregistrement et de
30 traitement au sol.

Le dispositif d'enregistrement et de traitement 5 comprend deux unités disposées l'une à bord et l'autre au sol. Il réalise un traitement appelé « synthèse d'ouverture », puis transmet l'image radar 2 dite image radar synthétisée

complexe mono-vue (ou SLC, de l'anglais « Single Look Complex ») à un dispositif 8 d'estimation des composantes azimutale et radiale de la vitesse de la cible.

Le principe de la synthèse d'ouverture consiste à exploiter la modulation de fréquence produite par les variations de distance capteur 4 - cible 6 (en azimut) et la modulation de l'onde émise (en distance) pour améliorer la résolution de l'image. D'un point de vue pratique, le signal radar rétrodiffusé par la cible 6 est convolué par un signal de référence bidimensionnel linéairement modulé en fréquence avec le même taux de modulation que le signal émis.

La réponse impulsionnelle d'une cible 6 ponctuelle immobile dans une image radar est un sinus cardinal en deux dimensions. Les pixels correspondant à cette réponse contiennent une information d'amplitude et une information de phase, phase formée par la somme de la phase propre de la cible et de la phase liée au trajet de l'onde émise.

La synthèse d'ouverture de cibles immobiles génère une image ayant une phase aléatoire identiquement distribuée entre 0 et 2π . La bande Doppler est la bande passante du signal en azimut.

La synthèse d'ouverture d'un signal rétro diffusé par une cible 6 mobile uniquement selon l'axe azimutal génère un élargissement ou une diminution de la bande Doppler de ce signal qui fait apparaître sur l'image radar 2 un motif de corrélation spatiale de la phase qui prend la forme d'une parabole de phase résiduelle.

La synthèse d'ouverture d'un signal rétro diffusé par une cible 6 mobile uniquement selon l'axe radial R génère un décalage du spectre Doppler de ce signal qui fait apparaître sur l'image radar 2 un motif de corrélation spatiale de la phase qui prend la forme d'une rampe de phase résiduelle. La synthèse d'ouverture d'une telle cible génère également une délocalisation selon l'azimut de la cible 6 sur l'image.

Une étude théorique permet de mettre en évidence la relation entre d'une part les composantes radiale et azimutale de la vitesse de la cible 6 et d'autre part la parabole et la rampe de phase visible sur l'image radar synthétisée.

En négligeant la compression en distance, le signal radar enregistré à l'instant t par le capteur 4 et rétrodiffusé par une cible fixe située en (x_0, y_0) vaut :

$$s_1(t) = A \exp \left(j \left(\Phi_0 + 2\pi K_a \frac{(t_0 - t)^2}{2} + \varphi \right) \right)$$

avec

$$\begin{cases} \Phi_0 = \frac{4\pi R_0}{\lambda} \\ K_a = 2 \frac{V_a^2}{\lambda R_0} \end{cases} \quad t_0 = \frac{y_0}{V_a}$$

Dans laquelle λ est la longueur d'onde du signal émis, (x_0, y_0) est la position de la cible fixe, t_0 est le début d'acquisition du signal rétrodiffusé, R_0 est la distance minimale entre la cible et le capteur 4, $R_0 = \sqrt{H^2 + x_0^2}$, V_a est la vitesse du capteur 4, K_a est le taux de modulation en azimuth et A est une constante.

Ce signal $s_1(t)$ est un signal modulé linéairement en fréquence de taux de modulation K_a et de fréquence porteuse nulle.

La synthèse d'ouverture de la cible 6 lorsque celle-ci est fixe, consiste à effectuer la convolution du signal enregistré $s_1(t)$ modulé linéairement en fréquence avec le taux de modulation K_a avec un signal de référence modulé linéairement en fréquence avec le même taux de modulation K_a . Le signal obtenu en sortie du filtre de synthèse d'ouverture pour la cible 6 lorsque celle-ci est fixe, vaut :

$$s(t) = A \frac{B_d}{K_a} \cdot \exp(j(\Phi_0 + \varphi)) \sin_c(\pi B_d(t - t_0))$$

dans laquelle B_d est la bande passante du signal rétrodiffusé $s(t)$ en azimuth (bande Doppler).

Le signal radar $s_2(t)$ enregistré à l'instant t par le capteur 4 et rétrodiffusé par la cible 6 lorsque celle-ci se déplace uniquement selon l'azimut avec une vitesse V_{az} , vaut :

$$s_2(t) = A \exp \left(j \left(\Phi_0 + 2\pi K_{a,v} \frac{(t - t_0)^2}{2} + \varphi \right) \right) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \Phi_0 = \frac{4\pi R_0}{\lambda} \\ K_{a,v} = 2 \frac{(V_a - V_{az})^2}{\lambda R_0} \\ |t - t_0| < \frac{Z_{a,v}}{2} \end{cases}$$

où $Z_{a,v}$ est la durée de l'illumination d'une cible mobile, de vitesse uniquement azimutale V_{az}

$t_0 = \frac{y_0}{V_a}$, et (x_0, y_0) est la position de la cible en début d'acquisition.

5 Le signal radar $s_2(t)$ est modulé linéairement en fréquence avec un taux de modulation $K_{a,v}$ différent du taux de modulation du signal radar $s_1(t)$ calculé lorsque la cible 6 était fixe. Le taux de modulation $K_{a,v}$ dépend de la composante azimutale V_{az} de la vitesse de la cible 6.

10 La synthèse d'ouverture d'une cible mobile est réalisée sous hypothèse de cible fixe. Elle consiste à effectuer le filtrage du signal modulé linéairement en fréquence avec le taux de modulation $K_{a,v}$, avec un signal de référence modulé linéairement avec un taux de modulation K_a .

Le signal $g(t)$ obtenu en sortie du filtre de synthèse d'ouverture pour la cible 6 lorsque celle-ci se déplace en azimut, est :

$$15 \quad g(t) = \frac{1}{\sqrt{K_a K_{a,v}}} \exp\left(-j\frac{\pi}{4}\right) \exp(j(\Phi_0 + \varphi)) \exp\left(j2\pi K' \frac{(t-t_0)^2}{2}\right) \cdot \Pi_{z'}(t)$$

dans lequel :

$$K' = \frac{K_a K_{a,v}}{K_a - K_{a,v}}, \quad \Pi_{z'}(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } |t| < \frac{Z'}{2}, \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}, \quad Z' = \frac{B''}{K'}, \quad B'' = \min(B_d, B_{d,v})$$

$$B_{d,v} = K_{a,v} Z_{a,v}$$

avec les notations définies précédemment dans cette demande de brevet.

20 Le signal $g(t)$ est modulé linéairement en fréquence avec le taux de modulation K' . Il est possible de déduire de cette modulation que la vitesse azimutale V_{az} de la cible 6 vaut :

$$|V_{az}| = V_a - \sqrt{\frac{\lambda R_0}{\left(\frac{\lambda R_0}{V_a^2} + \frac{2}{K'}\right)}}$$

En effet, la composante azimutale V_{az} de la vitesse de la cible 6 induit une mauvaise focalisation de la cible par le processus de synthèse d'ouverture dont la

réponse prend la forme d'un chirp résiduel (modulé par un sinus cardinal). Le taux de modulation de ce chirp est fonction de la vitesse azimutale de la cible.

Le signe de K' est fonction du sens de déplacement de la cible 6 par rapport au capteur 4. Si la cible 6 se déplace dans le même sens que le capteur 4, $V_{az} > 0$ et donc $K_{a,V} < K_a$, ceci signifie que $K' > 0$ et donc que la fréquence du signal résiduel associée à la cible 6 après synthèse d'ouverture croît avec le temps. La phase du signal résiduel a la forme caractéristique d'une parabole positive. Si la cible 6 circule dans le sens contraire au capteur, $V_{az} < 0$, $K' < 0$ et la fréquence du signal résiduel associée la cible décroît avec le temps. La phase du signal résiduel a la forme caractéristique d'une parabole négative.

Enfin, le signal radar $s_3(t)$ enregistré à l'instant t par le capteur et rétrodiffusé par la cible 6 lorsque celle-ci se déplace uniquement en distance (c'est-à-dire selon l'axe x) avec une vitesse V_{rad} , s'écrit :

$$s_3(t) = A \exp \left(j(\Phi_0 + \varphi) + 2j\pi \left(f_0(t - t_0) + K_a \frac{(t - t_0)^2}{2} \right) \right)$$

Pour $|t - t_0| < \frac{Z_{a,V}}{2}$ où $Z_{a,V}$ est la durée d'illumination de la cible, et

$$\text{avec } \begin{cases} \Phi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + \frac{V_{rad} y_0^2 \sin(\theta)}{2R_0^2} t_0 + V_{rad} \sin(\theta) t_0 \right) \\ f_0 = 2 \frac{V_{rad} \sin(\theta)}{\lambda} \\ K_a = 2 \frac{V_a^2}{R_0 \lambda} \end{cases}$$

Le signal $s_3(t)$ est linéairement modulé en fréquence avec un taux de modulation K_a . Le terme f_0 est le décalage spectral généré par le mouvement en distance de la cible (c'est-à-dire le mouvement selon x).

Le signal $h(t)$ obtenu en sortie du filtre de synthèse d'ouverture pour la cible 6 lorsque celle-ci se déplace en distance, est :

$$h(t) = \frac{B'}{K_a} \exp(j(\Phi_0 + \varphi)) \operatorname{sinc} \left(\pi B' \left(t - t_0 + \frac{1}{K_a} f_0 \right) \right) \exp(j\pi f_0 t)$$

avec $B' = B_d - |f_0|$, B_d étant la bande passante du signal rétrodiffusé $s_3(t)$.

Le signal résultant $h(t)$ est délocalisé en azimuth par rapport à la position y_0 de la cible en début d'acquisition de la grandeur suivante :

$$\Delta y = (y - y_0) = \frac{V_{rad} R_0 \sin(\theta)}{V_a} = V_a \frac{f_0}{K_a} \text{ dans laquelle } y \text{ est la position azimuthale}$$

réelle de la cible mobile.

- 5 La composante radiale V_{rad} de la vitesse de la cible mobile 6, induit un décalage spectral f_0 de la réponse de la cible qui se traduit par une rampe de phase résiduelle. Ce décalage spectral vaut :

$$f_0 = \frac{2V_{rad} \cdot \sin(\theta)}{\lambda}$$

dans laquelle :

- 10 - θ désigne l'angle d'incidence de la prise de vue du capteur 4 ;
 - V_{rad} est la composante radiale de la vitesse de la cible 6,
 - f_0 est le décalage spectral induit par le déplacement en distance de la cible, et
 - λ est la longueur d'onde du signal émis.

- 15 Ainsi à partir de la connaissance du décalage spectral f_0 , il est possible de trouver la composante radiale V_{rad} de la vitesse de la cible 6 par :

$$V_{rad} = \frac{\lambda f_0}{2 \sin(\theta)}$$

Lorsque la cible 6 est animée d'un mouvement en azimuth et en distance, le signal $i(t)$ résultant de la synthèse d'ouverture vaut :

20
$$i(t) = A \exp \left(2j\pi \left(\frac{f_0}{2} (t - t_0 + t') + K' \frac{(t - t_0 + t')^2}{2} \right) \right)$$

pour $|t - t_0| < \frac{B_d}{K'}$ où B_d est la bande Doppler et A est une constante, et

$$\text{avec } \begin{cases} K' = \frac{K_{a,V_{az}} K_a}{K_a - K_{a,V_{az}}} \\ t' = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{K_{a,V_{az}}} + \frac{1}{K_a} \right) f_0 \end{cases}$$

Le signal $i(t)$ est modulé linéairement en fréquence avec un taux de modulation K' et une porteuse de fréquence $\frac{f_0}{2}$.

La composante de la vitesse radiale induit un décalage spectral f_0 égal à $\frac{2V_{rad} \sin \theta}{\lambda}$.

5 Ce résultat rejoint le résultat obtenu lorsque la cible se déplace uniquement selon l'azimut et uniquement en distance. La composante de la vitesse azimutale induit une délocalisation en azimut se traduisant par un chip résiduel de modulation K' et une délocalisation en azimut provenant du mouvement en azimut

et en distance de $\Delta y = (V_a - V_{az}) \frac{f_0}{2} \left(\frac{1}{K_{a,v}} + \frac{1}{K_a} \right)$

10 La phase du signal $i(t)$ issu de la synthèse d'ouverture est $\varphi(t) = \Psi_0 + f_0(t - t_0 + t') + K'(t - t_0 + t') = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$.

Elle se factorise en : $\varphi(t) = \Psi_0 + K' \left(t - t_0 + t' + \frac{f_0}{2K'} \right)^2 - \left(\frac{f_0}{2K'} \right)^2$

La phase $\varphi(t)$ passe par une valeur extrême pour une position temporelle $t_0 - t' - \frac{f_0}{2K'}$. En conséquence, l'amplitude du signal rétrodiffusé par la

15 cible mobile est délocalisée par rapport à la phase du signal rétrodiffusé par cette même cible. En d'autres termes, le centre du motif d'amplitude de la cible mobile est délocalisé en azimut par rapport à la valeur minimale de la phase de la cible de $\frac{f_0}{2K'}$. En d'autres termes, la composante radiale de la vitesse de la cible a pour

effet de décaler de $\frac{f_0}{2K}$ la valeur extrême de la phase par rapport à la valeur

20 extrême de l'amplitude dans l'image radar 2 dans le cas d'un mouvement à la fois radial et azimutal.

Une mesure du décalage entre le centre du motif d'amplitude et le centre du motif de phase permet de déterminer le décalage spectral f_0 si le taux de modulation K' est connu.

25 La phase $\varphi(t)$ associée à une cible mobile est donc modélisée par :

- le terme $\varphi_1(t) = f_0(t + t' - t_0)$ qui est centré sur la coordonnée temporelle $(t' - t_0)$ et qui évolue linéairement en fonction du temps. Ce terme n'est fonction que de la composante radiale de la vitesse,

- le terme $\varphi_2(t) = K'(t - t_0 + t')^2$ centré sur la coordonnée temporelle $(t' - t_0)$ et qui évolue quadratiquement en fonction du temps. Ce terme est fonction de la composante azimutale de la vitesse.

- le troisième terme Ψ_0 est constant au cours du temps. Il est non impacté par la vitesse de la cible.

Les deux composantes de vitesse d'une cible mobile peuvent ainsi être déduites des paramètres des composantes quadratique (composante azimutale) et linéaire (composante radiale) de la phase de la cible.

En référence à la figure 2, le procédé d'estimation selon l'invention débute par une étape 10 d'extraction d'une image d'amplitude 12 et d'une image de phase 14 de l'image radar 2.

De façon connue en soi, le signal radar réceptionné par l'antenne subit une transformation analytique pour obtenir un signal analytique ayant une composante réelle et une composante imaginaire. Ce signal analytique est traité pour produire une image d'amplitude 12 et une image de phase 14.

Selon l'invention, l'image radar 2 est soit une image radar à haute résolution (résolution inférieure à 2 mètres) ou une image radar à très haute résolution (résolution inférieure à 1 mètre).

Au cours d'une étape 24, un motif de corrélation spatiale de la phase, appelé motif de phase 26 est recherché sur l'image de phase 14. Cette recherche est réalisée visuellement ou par ordinateur à l'aide d'un logiciel de recherche des sinusoïdes (franges). Ce motif de phase 26 est illustré sur la figure 4.

Le motif de phase 26 est généré par une cible mobile.

Au cours d'une étape 28, la phase $\varphi(t)$ est déroulée le long du motif de phase 26 (c'est-à-dire selon l'azimut), comme visible sur la figure 5.

Au cours d'une étape 30, une parabole 32 est recherchée sur le profil de la phase déroulée $\varphi(t)$.

Cette parabole 32 est centrée. L'intervalle de traitement de la parabole est réduit autour de l'extrémité E pour faciliter le traitement de celle-ci, au cours d'une étape 34.

5 Au cours d'une étape 36, la parabole 32 est modélisée par un polynôme de second degré, par exemple par une méthode des moindres carrés. Cette modélisation de la phase $\varphi(t)$ à un instant t est notée $\varphi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$. Le paramètre quadratique a_2 du polynôme de second degré est déterminé à partir de la parabole 32.

10 La composante azimutale V_{az} de la vitesse de la cible est directement déduite au cours d'une étape 38 du paramètre quadratique a_2 du polynôme de second degré.

Comme démontré précédemment, le paramètre quadratique a_2 du polynôme de second degré est égal à K' . La vitesse en azimut V_{az} de la cible mobile 6 est alors déduite de K' par la relation :

$$15 \quad |V_{az}| = V_a - \sqrt{\frac{\lambda R_0}{\left(\frac{\lambda R_0}{V_a^2} + \frac{2}{K'}\right)}}$$

dans laquelle V_a est la vitesse du capteur 4.

Au cours d'une étape 40, la composante azimutale V_{az} de la vitesse de la cible est comparée avec un nombre prédéfini N proche de 0.

20 Lorsque celle-ci est inférieure au nombre prédéfini N, le paramètre linéaire a_1 du polynôme de second degré est considéré comme étant égal au décalage spectral f_0 , et au cours d'une étape 42, ce paramètre linéaire a_1 est déterminé.

Au cours d'une étape 44, la composante radiale V_{rad} de la vitesse de la cible est obtenue à partir de la relation $V_{rad} = \frac{\lambda f_0}{2 \sin(\theta)}$

dans laquelle :

- 25
- V_{rad} est la composante radiale de la vitesse de la cible mobile,
 - f_0 est le décalage spectral,
 - θ est l'angle d'incidence de prise de vue du capteur 4, et
 - λ est la longueur d'onde du signal émis.

Lorsque la composante azimutale V_{az} de la vitesse de la cible n'est pas inférieure au nombre prédéfini N , il est possible d'obtenir le décalage spectral f_0 en recherchant le centre d'un motif d'amplitude 22 d'une image d'amplitude.

A cet effet, au cours d'une étape 45, un motif d'amplitude 22, généralement appelé trace, est recherché sur l'image d'amplitude 12. Cette recherche est effectuée visuellement à partir de la position du motif de phase 26. En effet, le décalage entre le motif d'amplitude 22 et le motif de phase 26 est faible. Ainsi, les deux motifs sont très proches l'un de l'autre.

En variante, cette recherche est effectuée par traitement informatique. A cet effet, l'image d'amplitude 12 est binarisée à partir d'un seuil prédéfini V . Ce seuil V est égal par exemple à trois fois la variance σ de l'image d'amplitude additionnée à la moyenne radiométrique μ de cette image.

En variante, le seuil V est égal à la valeur d'amplitude maximale de l'image d'amplitude 12 divisée par un nombre supérieur ou égal à 3 et de préférence égal à 4.

L'image d'amplitude 12 est ensuite filtrée par un filtrage morphologique d'ouverture. Ce type de filtrage est décrit dans les livres intitulés « *Image analysis and mathematical morphology* », volumes 1 et 2 Academic press, Londres.

Comme visible sur la figure 3, ce motif d'amplitude 22 présente la forme d'un segment de droite. Il s'étend selon la direction d'azimut. Il présente une amplitude supérieure à celle du reste de l'image d'amplitude 12, lorsque le rapport signal sur bruit est suffisant.

Au cours d'une étape 46, le centre Ca du motif d'amplitude 22 est obtenu par détermination de la position $y'-y_0$ en azimut. A cet effet, les coordonnées de colonne des extrémités du motif d'amplitude 22 sont déterminées, comme visible sur la figure 6, à partir de l'image d'amplitude 12 binarisée puis filtrée par le filtre morphologique.

La variable temporelle $(t'-t_0)$ résulte de la relation :

$$(t'-t_0) = (y'-y_0) \frac{1}{V_a}$$

$$\text{dans laquelle } y' = \frac{t'}{V_a} = \frac{1}{2V_a} \left(\frac{1}{K_{a,v_{rad}}} + \frac{1}{K_a} \right) f_0$$

Au cours d'une étape 48, le décalage spectral f_0 est calculé à partir de la variable temporelle $(t' - t_0)$, du paramètre quadratique a_2 , et de la relation suivante : $f_0 = a_1 - 2 a_2(t' - t_0)$.

Enfin, au cours d'une étape 50, la composante radiale V_{rad} de la vitesse de la cible est obtenue à partir de la relation : $V_{rad} = \frac{\lambda f_0}{2 \sin(\theta)}$

Selon une variante de réalisation du procédé selon l'invention illustrée sur les figures 7 à 9, la composante radiale V_{rad} de la vitesse de la cible 6 comprend les étapes suivantes en lieu et place des étapes 46 à 50.

Au cours d'une étape 52, la position C_a du centre du motif d'amplitude 22 est recherchée ainsi que la position de l'extremum E de la parabole 32 dans la phase déroulée.

Puis, au cours d'une étape 54, le décalage ou la distance D entre d'une part la position $y'-y_0$ du motif d'amplitude 22 et la position de l'extremum E de la parabole 32 est mesurée, comme visible sur les figures 8 et 9. La position $y'-y_0$ représente la position qu'aurait la cible 6 dans l'image d'amplitude 12 si la synthèse d'ouverture était effectuée de façon à focaliser la cible mobile. Comme cette position n'est pas délocalisée dans l'image d'amplitude et compte tenu des études théoriques décrites précédemment, la distance D vaut $\frac{f_0}{2K'}$.

Au cours d'une étape 56, le décalage spectral f_0 est calculé à partir de ladite distance D mesurée, du paramètre quadratique a_2 obtenu par modélisation de la parabole 32 et de la relation : $f_0 = 2a_2 D$

Puis, la composante radiale V_{rad} de la vitesse de la cible est déterminée à partir du décalage spectral, comme décrit précédemment.

Avantageusement, ce procédé est mis en œuvre à l'aide d'une unique image radar 2.

Avantageusement, ce procédé est mis en œuvre à partir d'une image radar synthétisée (SLC, de l'anglais « Single Look Complex ») et non à partir de données brutes ou de données compressées en distance mais pas en azimut. Or, il est plus facile de se procurer sur le marché actuel des images radar synthétisées plutôt que des images non compressées ou partiellement

compressées. De plus, le traitement d'images non compressées nécessite une expertise particulière.

Cette méthode permet d'obtenir une valeur très précise en ce qui concerne la composante azimutale de la vitesse du mobile. Elle est peu coûteuse en nombre d'images radar nécessaires et en terme de calcul. Elle peut être associée à d'autres méthodes de détermination de vitesse. Par exemple, il est possible de déterminer en premier lieu la position et/ou les deux composantes de vitesse avec cette méthode puis d'appliquer une méthode plus précise, par exemple une méthode d'autofocus, en vue d'affiner les résultats. Dans ce cas, l'utilisation de la méthode selon l'invention permet de restreindre la durée et la complexité en termes de calcul de la méthode d'autofocus. Elle peut également être associée à des techniques multi images qui généralement obtiennent des résultats de faible qualité en ce qui concerne la composante azimutale de la vitesse du mobile.

Le dispositif d'estimation 8, illustré sur la figure 10 comprend une unité 62 d'extraction d'une image d'amplitude 12 et d'une image de phase 14, une unité de binarisation 64 reliée à l'unité d'extraction 62 et un filtre 66 morphologique d'ouverture relié à l'unité de binarisation 64.

Le dispositif d'estimation 8 comporte en outre une unité 70 de recherche du motif d'amplitude 22 sur l'image d'amplitude et du motif de phase 24 sur l'image de phase 14, une unité 72 de recherche d'une parabole le long du motif de phase $\varphi(t)$ connectée à l'unité 70, et enfin une unité de calcul 76 reliée à l'unité 70.

L'unité de calcul 76 est apte à modéliser la parabole par un polynôme de second degré comme explicité ci-dessus.

REVENDEICATIONS

1.- Procédé d'estimation d'au moins une des deux composantes (V_{az} , V_{rad}) de vitesse d'une cible mobile (6) à partir d'une unique image radar (2) synthétisée en distance et en azimuth, lesdites composantes de la vitesse de la cible (6) étant
 5 une composante azimutale (V_{az}) et une composante perpendiculaire à la composante azimutale (V_{az}) dite composante radiale (V_{rad}), caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

- recherche (10, 24) d'un motif (26) de corrélation spatiale de la phase ($\varphi(t)$) généré par le mouvement de la cible (6), à partir de l'image radar (2) ;

10 - recherche (28, 30) d'une parabole (32) le long du motif (26) de corrélation spatiale de la phase ($\varphi(t)$) et modélisation (34, 36) de la parabole (32) par un polynôme du second degré ;

- détermination (32, 36) d'un paramètre quadratique (a_2) dudit polynôme du second degré ; et estimation (38) de la composante azimutale (V_{az}) de la vitesse
 15 de la cible (6) à partir dudit paramètre quadratique (a_2).

2. Procédé d'estimation selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'unique image radar (2) est une image radar complexe mono-vue (SLC).

3.- Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel l'étape de recherche d'un motif de corrélation spatiale (26) de la
 20 phase ($\varphi(t)$) comporte les étapes suivantes :

a) extraction (10) d'une image de phase (14) de l'image radar synthétisée (2) ;

b) recherche (24) d'un motif (26) de corrélation spatiale de la phase sur l'image de phase (14).

4.- Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications
 25 précédentes, dans lequel l'étape de recherche (28, 30) d'une parabole (32) comporte une étape de déroulement (28) de la phase ($\varphi(t)$) le long du motif (26) de corrélation spatiale de la phase.

5.- Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'étape de modélisation (34, 36) comporte une étape
 30 (34) de détermination de l'extremum (E) de la parabole (32), et d'un intervalle de traitement de part et d'autre de l'extremum (E).

6.- Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications précédentes, qui comporte en outre les étapes suivantes :

- comparaison (40) de la composante azimutale (V_{az}) de la vitesse de la cible (6) avec un nombre prédéfini (N), et lorsque la composante azimutale de la vitesse de la cible est inférieure au nombre prédéfini (N);

- détermination (42) d'un paramètre linéaire (a_1) du polynôme de second degré ;

- détermination (44) de la composante radiale (V_{rad}) de la vitesse de la cible (6) à partir dudit paramètre linéaire (a_1).

7.- Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications précédentes, qui comporte en outre les étapes suivantes :

c) extraction (10) d'une image d'amplitude (12) de l'image radar synthétisée (2) ;

d) recherche (45) d'un motif d'amplitude (22) sur l'image d'amplitude (22).

8.- Procédé d'estimation selon la revendication 7, dans lequel l'étape d) comporte en outre une étape de binarisation de l'image d'amplitude (12) à partir d'un seuil prédéfini (V).

9.- Procédé d'estimation selon la revendication 8, dans lequel le seuil (V) est égal à la valeur d'amplitude maximale de l'image d'amplitude (12) divisée par un nombre supérieur ou égal à 3.

10.- Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications 7 à 9, dans lequel l'étape d) comporte en outre une étape de filtrage morphologique.

11.- Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications 7 à 10, qui comporte en outre les étapes suivantes :

- détermination (46) de la position ($y'-y_0$) en azimut du centre (C_a) du motif d'amplitude (22);

- détermination (48) du décalage spectral (f_0) généré par le déplacement radial de la cible (6), à partir de ladite position ($y'-y_0$) du centre (C_a) du motif d'amplitude et de la relation suivante : $f_0 = a_1 - 2 a_2 \left(\frac{y'-y_0}{V_a} \right)$:

dans laquelle a_1 est le paramètre linéaire du polynôme de second degré, a_2 est le paramètre quadratique du polynôme de second degré, f_0 est le décalage

spectral, (V_a) est la vitesse d'un capteur imageur (4) ayant capturé l'image radar (2), $(y'-y_0)$ est la coordonnée en azimuth du centre (C_a) du motif d'amplitude (22) ;

- détermination (50) de la composante radiale (V_{rad}) de la vitesse de la cible (6) à partir du décalage spectral (f_0) .

12.- Procédé d'estimation selon les revendications 5 et 7 prises en combinaison, qui comporte en outre les étapes suivantes :

- mesure (52) de la distance (D) entre la position $(y'-y_0)$ en azimuth du centre (C_a) du motif d'amplitude (22) et la position en azimuth de l'extrémum (E) du motif (26) de corrélation spatiale de la phase ;

- détermination (54) du décalage spectral (f_0) généré par le déplacement radial de la cible (6), à partir de ladite distance mesurée (D) et de la relation :

$$f_0 = 2a_2 D$$

dans laquelle D est la distance mesurée, a_2 est le paramètre quadratique du polynôme de second degré, et f_0 est le décalage spectral ; et

- estimation (56) de la composante radiale (V_{rad}) de la vitesse de la cible (6) à partir du décalage spectral (f_0) .

13.- Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications 11 et 12, dans laquelle la composante radiale (V_{rad}) de la vitesse de la cible (6) est obtenue à partir du décalage spectral (f_0) et de la relation suivante :

$$V_{rad} = \frac{\lambda f_0}{2 \sin(\theta)} \text{ dans laquelle :}$$

- V_{rad} est la composante radiale de la vitesse de la cible mobile,
 - f_0 est le décalage spectral issu du déplacement radial de la cible mobile,
 - θ est l'angle d'incidence de prise de vue du radar par rapport à la direction nadir du radar, et
 - λ est la longueur d'onde du signal émis par le radar.

14.- Procédé d'estimation selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'image radar (2) est une image ayant une résolution inférieure à un mètre.

15.- Dispositif (8) d'estimation d'au moins une des deux composantes (V_{az} , V_{rad}) de vitesse d'une cible mobile (6) à partir d'une unique image radar (2) synthétisée en distance et en azimuth, caractérisé en ce qu'il comporte :

5 - une unité de recherche (62, 64, 66, 70) d'un motif (22, 26) de corrélation spatiale de la phase ($\varphi(t)$) généré par le mouvement de la cible (6), à partir de l'image radar (2) ;

 - une unité de recherche (72) d'une parabole (32) le long du motif (22, 26) de corrélation spatiale de la phase ($\varphi(t)$) ; et

10 - une unité de calcul (76) apte à modéliser la parabole (32) par un polynôme du second degré ; à déterminer un paramètre quadratique (a_2) dudit polynôme du second degré ; et à estimer la composante azimuthale (V_{az}) de la vitesse de la cible (6) à partir dudit paramètre quadratique (a_2).

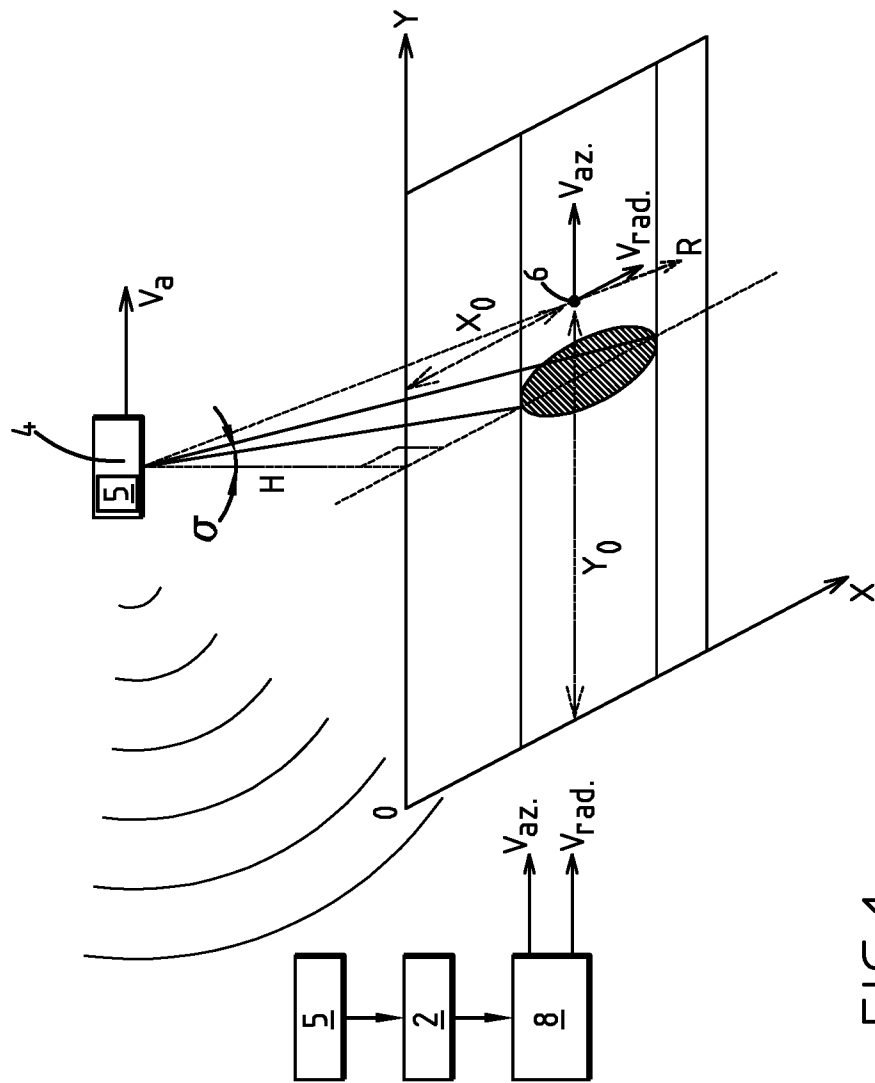
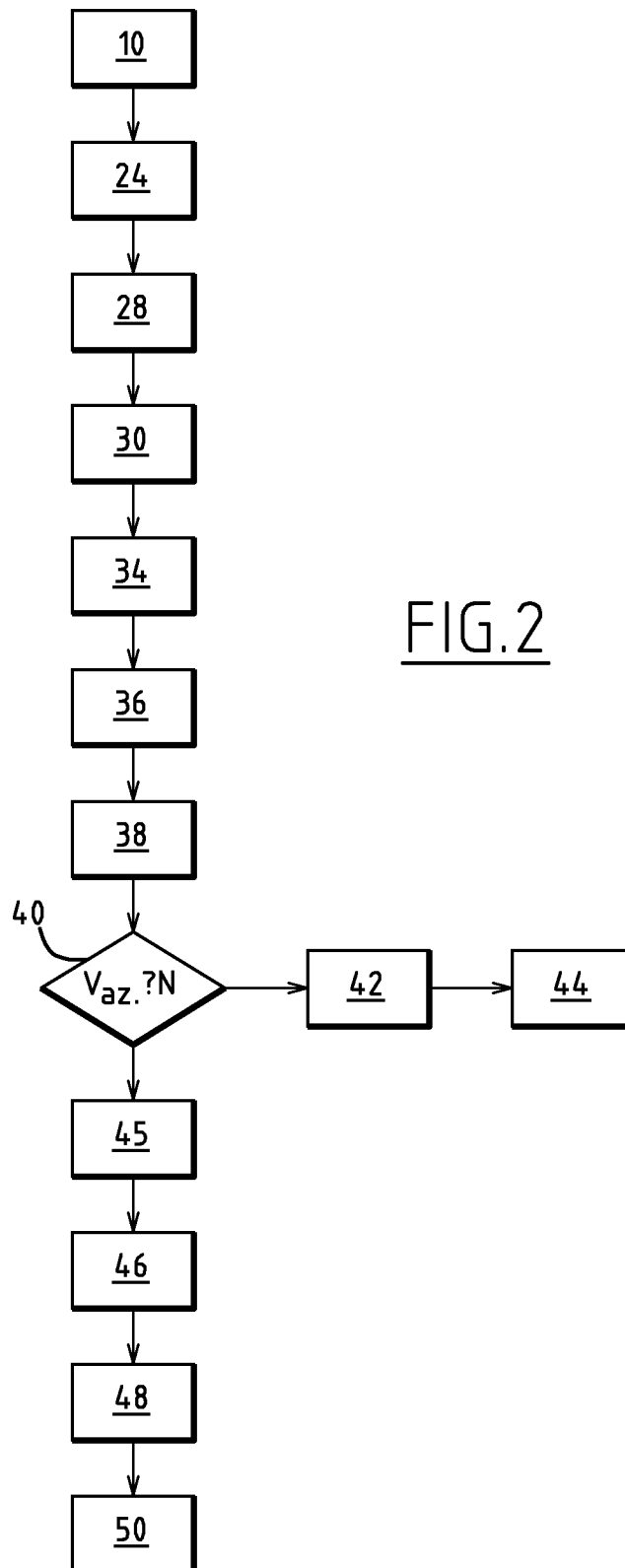


FIG.1

2/6



3/6

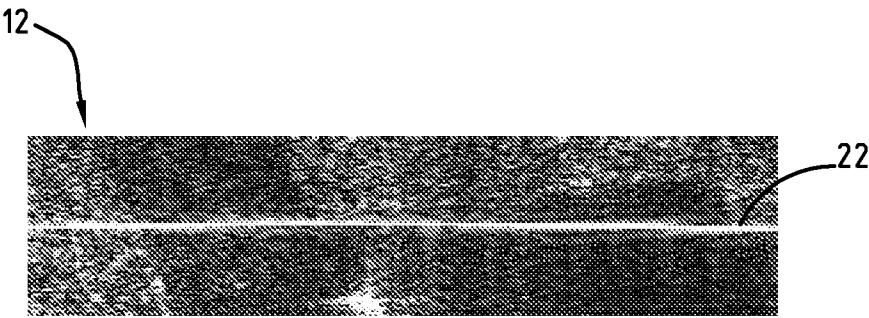


FIG.3

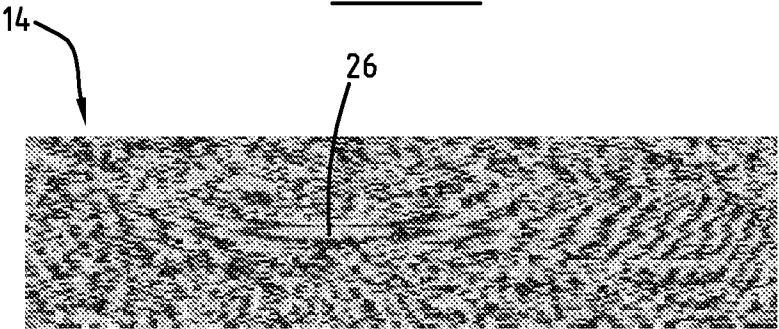


FIG.4

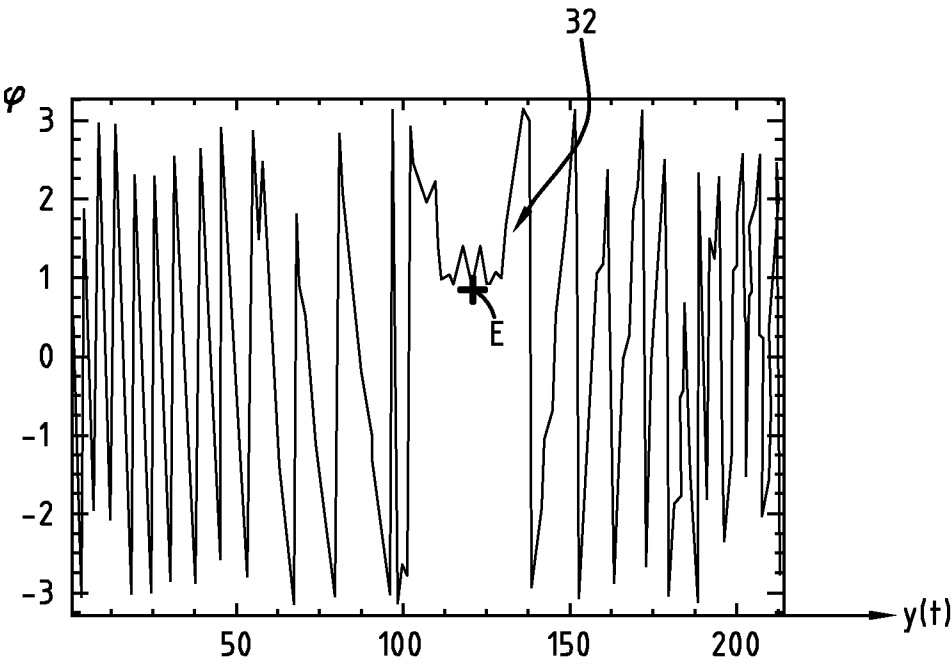
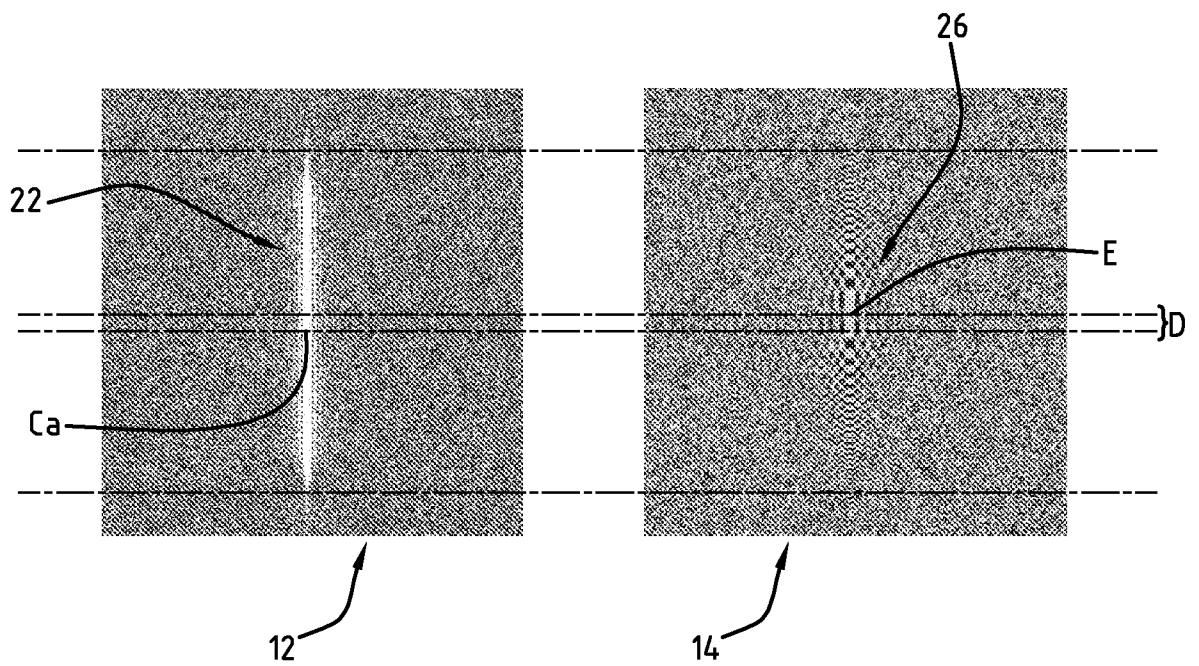
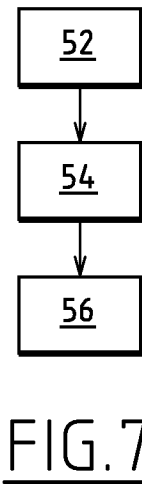
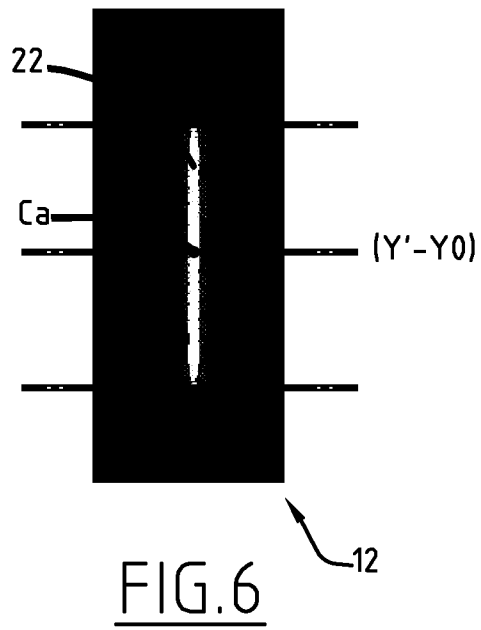
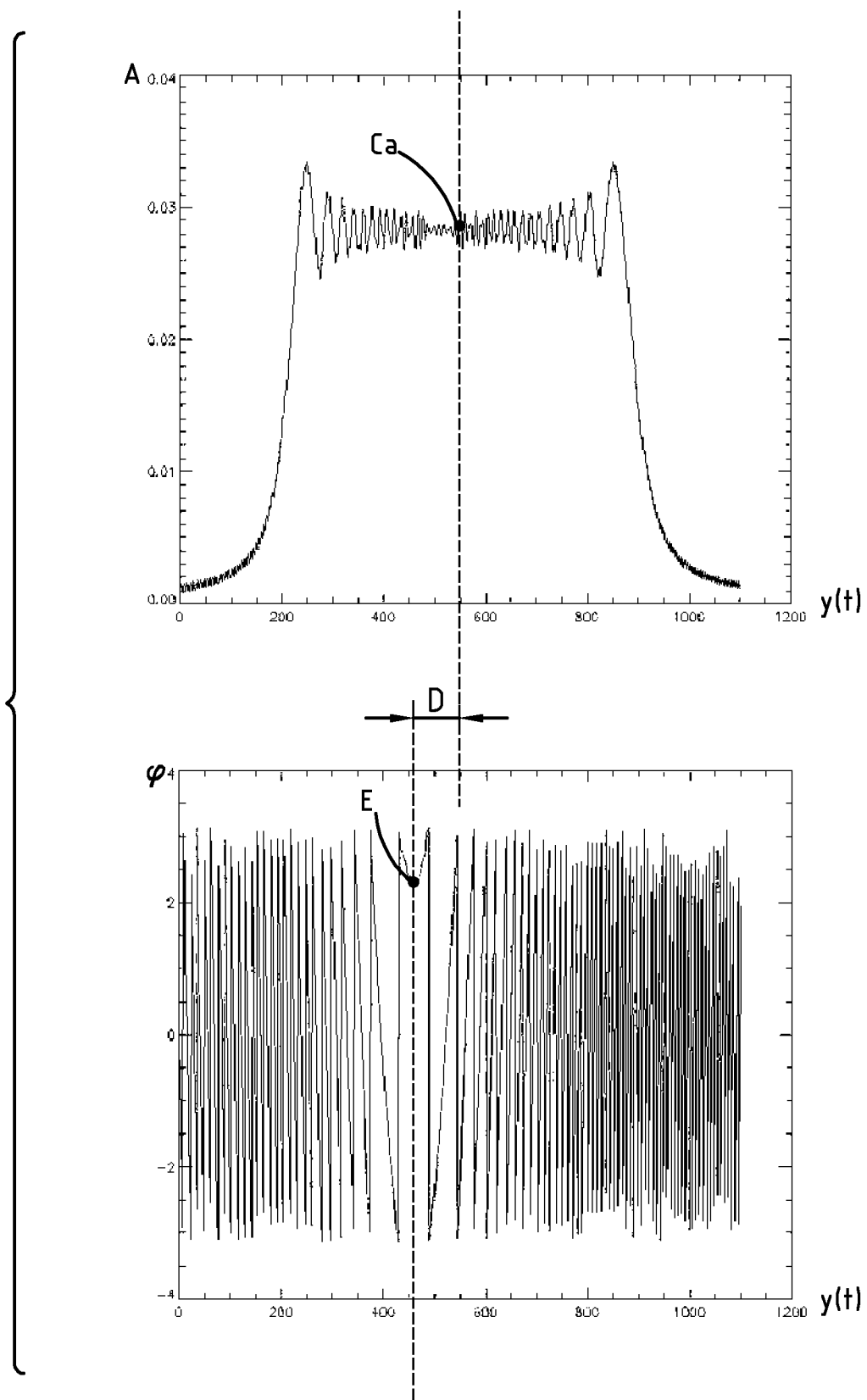


FIG.5

4/6



5/6

FIG.9

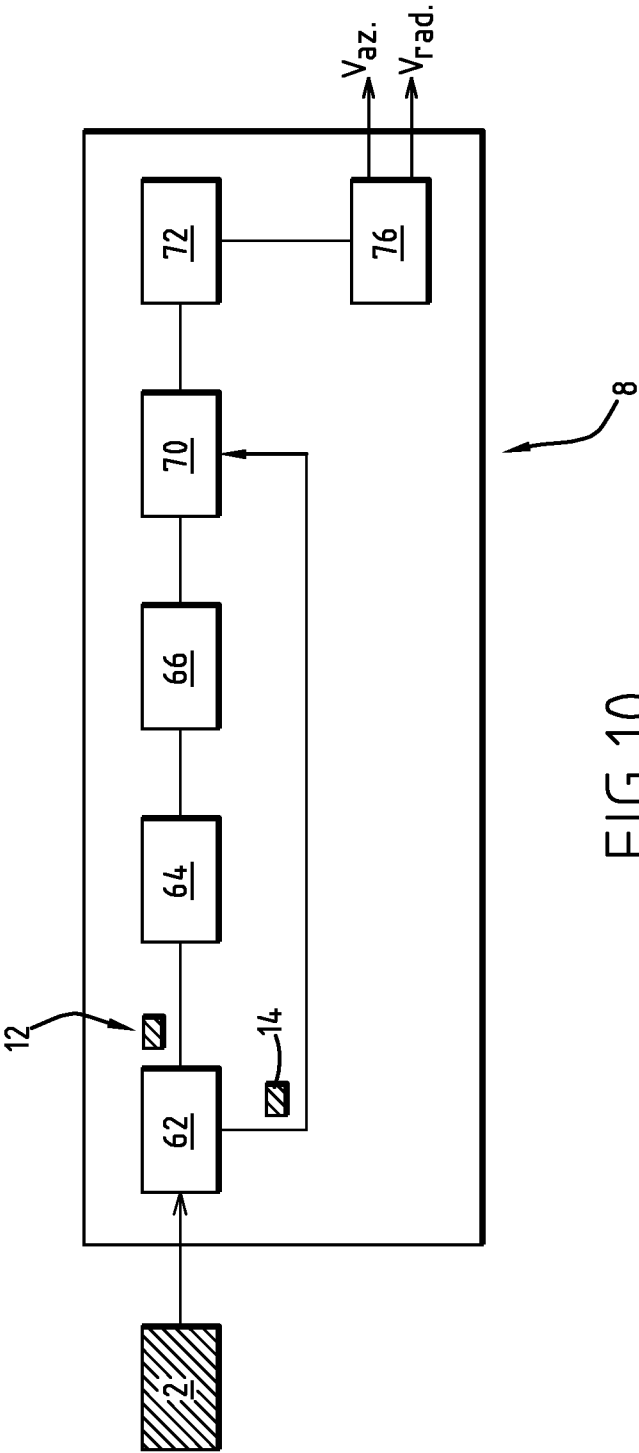


FIG.10