

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 27.03.07.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 03.10.08 Bulletin 08/40.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

71 Demandeur(s) : THALES Société anonyme — FR.

72 Inventeur(s) : SAVY LAURENT.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : MARKS & CLERK FRANCE.

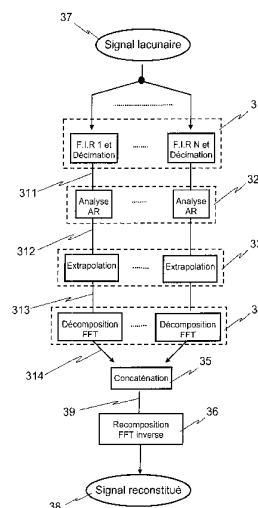
54 PROCÉDE D'EXTRAPOLATION DE SIGNAUX PAR MODELISATION AR REGULARISEE MULTICANAUX
SPECTRAUX.

57 La présente invention concerne de manière générale
l'extrapolation de tout type de signal stationnaire compor-
tant des zones lacunaires.

Le procédé selon l'invention procède par décomposition
du signal lacunaire en une somme de sous-signaux élémen-
taires. Le spectre de chaque sous-signal représente une
fraction du spectre du signal traité tandis que la juxtaposi-
tion des spectres de différents sous-signaux correspondant
au spectre du signal traité. Selon l'invention, chaque sous-
signal fait l'objet d'une opération d'extrapolation dans l'es-
pace de définition, et les spectres des sous-signaux extra-
polés sont concaténés pour former le signal résultant. Ce
signal résultant correspond avantageusement au signal ini-
tial dont les zones lacunaires ont été comblées.

Selon l'invention, l'opération d'extrapolation est réalisée,
pour chaque sous-signal, à partir d'un modèle de signal ob-
tenu par analyse auto-régressive "log-régularisée".

L'invention s'applique en particulier à l'analyse haute ré-
solution doppler ou distance (imagerie SAR du sol, reconsti-
tution de profils distance de cibles détectées pour
l'application à la classification de cibles aériennes) de si-
gnaux radars.



PROCEDE D'EXTRAPOLATION DE SIGNAUX PAR MODELISATION AR REGULARISEE MULTICANAUX SPECTRAUX

La présente invention concerne de manière générale l'extrapolation de tout type de signal stationnaire comportant des zones lacunaires. Elle concerne plus particulièrement l'analyse haute résolution doppler ou distance (imagerie SAR du sol, reconstitution de profils distance de cibles détectées
5 pour l'application à la classification de cibles aériennes) de signaux radars.

Dans le domaine de l'imagerie radar, le mode de fonctionnement SAR est un mode de cartographie à haute résolution utilisé pour constituer des images du sol. Le terme "SAR" est l'acronyme de la dénomination anglo-saxonne "Synthetic Aperture Radar" ou "radar à ouverture synthétique" en
10 français. Ce mode de traitement des signaux radars permet de satisfaire les exigences liées à l'obtention d'images ayant une résolution extrêmement fine (submétrique), dont l'élaboration requiert en particulier que le spectre du signal traité présente un faible niveau de lobes secondaires. Il est par ailleurs
15 connu que pour obtenir cette haute résolution, il est nécessaire de combiner une forme d'onde à large bande passante avec une durée importante d'intégration cohérente.

Or, à partir d'une certaine résolution (décimétrique), il ne devient plus possible de trouver une bande radar continue suffisamment large pour
20 permettre la mise en œuvre d'un traitement SAR classique. En effet, les plans de fréquences adoptés par les instances internationales allouent aux radars des bandes de fréquence bien précises, de largeur insuffisante, et il devient donc nécessaire soit d'utiliser des bandes de fréquences disjointes, soit de se contenter d'une bande d'émission plus réduite.

25 La limitation de la bande totale disponible est préjudiciable à l'obtention d'une qualité image correcte. Elle se traduit par une dégradation de la réponse impulsionnelle ou, plus concrètement, par manque de résolution. Il devient ainsi nécessaire de régénérer, par traitement, la bande manquante pour obtenir une qualité d'image satisfaisante.

30

Un but de l'invention est de résoudre ce problème de dégradation de la résolution de l'analyse obtenue consécutif à une bande passante

insuffisante.

A cet effet l'invention a pour objet un procédé pour extrapoler un signal par décomposition spectrale multicanaux, ledit procédé comportant:

- 5 - une première étape pour décomposer le signal traité en M sous-signaux, de sorte que chaque sous-signal ait un spectre représentant une portion distincte du spectre du signal traité, et que la concaténation des spectres de l'ensemble des sous-signaux reconstitue le spectre du signal traité;
- 10 - une deuxième étape pour définir un modèle analytique d'identification pour chacune des M séquences d'échantillons correspondant à un des M sous-signaux,
- une troisième étape pour effectuer l'extrapolation de chacune des M séquences au moyen du modèle d'identification défini pour cette séquence,
- 15 - une quatrième étape pour effectuer la décomposition spectrale de chacun des sous-signaux correspondant aux M séquences extrapolées.
- une cinquième étape pour effectuer la concaténation des spectres obtenus à l'issue de l'étape de décomposition spectrale.

- 20 Dans une forme de mise en oeuvre préférée, l'étape de définition d'un modèle pour chacune des M séquences obtenues à l'issue de l'étape de décomposition en sous-signaux du signal traité, met en oeuvre une méthode de modélisation auto régressive identifiant chaque séquence à un modèle défini par la relation générale suivante:

$$25 \quad x(n) = - \sum_{k=1}^K w^*(k) x(n-k) + b(n)$$

où $x(n)$, $w(k)$ et $b(n)$ représentent respectivement:

- $x(n)$, l'échantillon de signal,
- $w(k)$, le k-ième coefficient du filtre AR (auto-régressif) définissant le modèle
- 30 - $b(n)$ un échantillon de bruit blanc

Dans cette forme de mise en oeuvre préférée, l'étape d'extrapolation consiste à extrapoler la séquence initiale à N échantillons $\{x(0) \dots x(N-1)\}$ au delà de son support d'origine, au moyen des relations suivantes:

$$x(n) = - \sum_{k=1}^K w^*(k) x(n-k), \text{ pour } n > N-1$$

et

$$x(n) = - \sum_{k=1}^K w(k) x(n+k), \text{ pour } n < 0$$

- 5 Dans cette forme de mise en oeuvre préférée, les coefficients $w(k)$ du filtre auto-régressif sont déterminés en cherchant les valeurs qui minimisent le produit:

$$(w^H \cdot \hat{R} \cdot w) \cdot (w^H \cdot w)$$

- 10 où w représente le vecteur des coefficients du filtre, et $\hat{R}$ une estimée de la matrice d'autocorrélation du signal (analyse autorégressive "log régularisée").

- 15 Dans une forme de mise en oeuvre particulière, pouvant être combinée à la forme précédente, la décomposition du signal traité en M sous-signaux, est réalisée en appliquant une batterie de M filtres FIR passe-bande dont les bandes passantes sont juxtaposées, et dont le réunion des bandes passantes couvre la totalité du spectre du signal traité. Les séquences correspondantes sont obtenues par décimation des séquences résultant de l'application de chacun des filtres FIR au signal traité.

- 20 Dans une forme de réalisation particulière, pouvant être combinée aux formes précédentes, l'étape de décomposition spectrale (34) de chacun des sous-signaux extrapolés (313) est réalisée par transformée de Fourier rapide (FFT).

- 25 Dans une variante d'implémentation le procédé selon l'invention comporte en outre une étape ultérieure de recombinaison du signal après traitement, cette étape étant préférentiellement réalisée par transformée de Fourier rapide inverse (FFT^{-1}) au spectre global obtenu à l'issue de la
- 30 cinquième étape qui procède à la concaténation des spectres des sous-signaux extrapolés.

Le procédé selon l'invention effectue donc, un partitionnement du

signal traité en M sous-signaux. Chacun de ces sous-signaux a un spectre qui correspond à une partie du spectre du signal initial. On obtient ainsi une décomposition spectrale multicanaux (i.e. à M canaux). Puis pour chacun des sous-signaux, le procédé selon l'invention réalise une identification du sous-signal considéré, à un modèle à partir duquel il réalise une extrapolation dudit sous-signal sur son domaine de définition. Le signal résultant de l'extrapolation fait ensuite l'objet d'une décomposition par FFT ou plus généralement par transformation de Fourier. Le signal résultant de la décomposition par FFT du signal obtenu par extrapolation du sous-signal considéré, présente avantageusement une densité de composantes plus importante que le signal résultant de la simple décomposition par FFT de ce sous-signal. Le spectre du signal extrapolé obtenu présente ainsi un spectre ayant une résolution accrue.

Ensuite, selon l'invention, les différents signaux résultant de la transformation de Fourier des M sous-signaux extrapolés, sont concaténés et le signal résultant de la concaténation est recomposé par transformation de Fourier inverse. Le signal obtenu correspond alors avantageusement au signal initial dans lequel les zones lacunaires sont reconstituées.

Les caractéristiques et avantages de l'invention seront mieux appréciés grâce à la description qui suit, description qui expose le principe du procédé selon l'invention au travers d'applications particulières prises comme exemples non limitatifs et qui s'appuie sur les figures annexées, figures qui présentent:

- les figures 1 et 2, une illustration du problème auquel l'invention apporte une solution au travers de son application à l'amélioration d'une image SAR,
- la figure 3, un organigramme de principe général du procédé selon l'invention
- la figure 4, un organigramme de principe du procédé selon l'invention appliqué à la reconstitution d'un signal lacunaire,
- la figure 5, un organigramme de principe du procédé selon l'invention appliqué à l'analyse hyper résolvente d'un signal,

L'invention concerne un procédé de traitement du signal qui s'applique de manière générale à l'extrapolation de tous types de signaux stationnaires dont la représentation dans un espace donné présentant des trous ou lacunes ou dont la représentation est insuffisamment étendue.

- 5 Le procédé peut en particulier être appliqué, de manière non limitative, à un signal dont la représentation temporelle ou fréquentielle présente des lacunes sur des intervalles de temps ou de fréquence de longueur donnée, dans le but de restaurer la continuité temporelle ou fréquentielle de cette représentation. Le signal peut par exemple être exploité sous cette forme ou
10 au travers de sa représentation spectrale.

Il peut également, de manière non plus limitative, être appliqué à un signal temporel dont la connaissance dans le temps est limitée par un temps d'observation trop court pour l'utilisation que l'on souhaite faire de ce signal.

- La suite de la description présente les différentes étapes du procédé selon
15 l'invention et leur implémentation au travers d'exemples concrets non limitatifs de signaux lacunaires.

- Les figures 1 et 2 présentent une illustration schématique du problème posé dans la présente demande, problème auquel l'invention apporte une
20 solution. Le problème est ici présenté sur l'exemple d'une image SAR. Les figures 1 et 2 montrent la dégradation causée sur une image SAR par la présence de bandes de fréquences lacunaires sur le signal SAR correspondant. On rappelle ici que l'image SAR qui propose une représentation dans un espace Azimut-distance radiale de l'amplitude du
25 signal radar reçu, peut être considérée comme le résultat de la transformation de Fourier du signal SAR sur l'axe des fréquences, signal SAR qui traduit lui-même les variations de l'amplitude du signal radar reçu dans un espace Azimut-fréquence.

- La figure 1-b présente de manière schématique l'image SAR 11 d'un objet
30 réel 13 représenté en pointillés, cette image étant produite à partir d'un Signal SAR ne présentant pas d'altération de type lacunaire de son spectre.

La figure 2-b quant à elle, présente, de manière schématique également, l'image SAR 21 du même objet 13, obtenue à partir d'un signal SAR dont le spectre présente des lacunes.

- 35 Comme on peut le constater la présence de lacunes dans le spectre du

signal radar a pour conséquence d'altérer la résolution de l'image SAR. Suivant l'étendue et la répartition des bandes lacunaires, la dégradation de l'image SAR obtenue est plus ou moins importante. Néanmoins, celle-ci peut être suffisamment important pour altérer la résolution de l'image au point de
5 rendre impossible la reconnaissance de l'objet 13.

Si l'on considère à présent les figures 1-a et 2-a qui représentent respectivement le signal SAR 12 correspondant à l'image SAR 11 de la figure 1-b et le signal SAR 22 correspondant à l'image SAR 21 de la figure 2-b, on peut constater que le signal SAR 22 de la correspondant à l'image SAR
10 altérée 21 présente des bandes lacunaires 23 et 24 qui correspondent par ailleurs aux plages de fréquences altérées au niveau du signal radar reçu. Par suite le signal SAR 12 ne présentant pas ces bandes lacunaires, il est aisé de déduire que si l'on restaure une certaine intégrité au signal SAR 22, en comblant les bandes lacunaires en particulier, comme le propose le
15 procédé selon l'invention, il est possible d'améliorer la résolution de l'image SAR 21 correspondante.

La figure 3 présente de manière schématique, sous la forme d'un organigramme, l'ensemble des étapes du procédé selon l'invention. Comme
20 le montre la figure, le procédé selon l'invention comporte les étapes suivantes:

- une première étape 31 de filtrage, durant laquelle on applique aux échantillons du signal lacunaire traité 37, une série de N filtres passe-bande de type FIR dont les bandes passantes sont juxtaposées. Cette opération
25 produit N sous-signaux 311 auxquels on applique une opération de décimation visant à en limiter la bande.

- une deuxième étape 32 de modélisation durant laquelle on détermine par analyse autorégressive, ou "analyse AR", le modèle de correspondant à chacun des sous-signaux 311 obtenus lors de l'étape 31.

- une troisième étape 33 d'extrapolation durant laquelle chaque sous-signal 311 est enrichi d'échantillons calculés à partir de l'expression du modèle défini à l'étape 32 pour le sous-signal considéré. On obtient ainsi des sous-signaux extrapolés 312
30

- une quatrième étape 34 de décomposition par transformation de Fourier de chacun des sous-signaux extrapolés 312.
35

- une cinquième étape 35 de concaténation durant laquelle les signaux résultant des décompositions des sous-signaux extrapolés 312 sont concaténés pour former un signal unique 39..

Le signal 39 ainsi obtenu correspond à la décomposition par transformée de Fourier du signal reconstitué et à ce titre, il constitue pour certaines applications, comme cela sera décrit par la suite, le signal recherché. En revanche, pour d'autres applications, le signal recherché est le signal reconstitué lui-même. Ce signal est obtenu effectuant durant une étape complémentaire 36 la recombinaison du signal dans sa forme originale au moyen d'une transformation de Fourier inverse. De la sorte, dans sa forme de base, le procédé selon l'invention comporte les étapes 31 à 35, tandis que dans une forme alternative il comporte en plus l'étape 36.

Dans la suite de la description, le détail de fonctionnement des différentes étapes, est décrit, pour des raisons de clarté au travers du cas particulier du traitement d'un signal SAR lacunaire. Les lacunes se traduisant par un niveau de signal faible (bruit), voire nul, pour certaines bandes de fréquence. Un tel signal peut être représenté de manière schématique par la figure 2-a.

Partant de cette description, la généralisation de la mise en oeuvre des différentes étapes à d'autres types de signaux lacunaires, est aisément accessible à l'homme du métier.

Le signal traité 37 étant ici un signal fréquentiel échantillonné et numérisé, $S(n)$,

La première étape 31 consiste à appliquer au signal lacunaire 37 une batterie de M filtres passe-bande, juxtaposés de façon à décomposer la bande passante du signal 37 en M sous-signaux. Chaque sous-signal $S_i(n)$ 311 correspond ainsi au produit du filtrage de $S(n)$ par un filtre passe-bande donné. On rappelle ici que le signal 37 étant un signal SAR, un signal fréquentiel, le spectre du signal correspond ici non pas à une décomposition fréquentielle du signal mais à une décomposition spatiale (bande passante en distance); cette décomposition, par transformation de Fourier par exemple, conduisant à l'obtention de l'image SAR proprement dite c'est à dire à une représentation azimuth-distance. Par suite, chaque sous-signal 311 correspond au signal initial 37 pour la "sous-bande distance" considérée.

Les filtres mis en œuvre sont, classiquement, des filtres numériques à réponse impulsionnelle finie, ou filtres FIR, appliqués au signal lui-même.

Chaque opération de filtrage est suivie d'une opération de décimation de façon à limiter strictement la bande occupée par chaque sous-signal 311 à la
 5 bande du filtre appliqué. De la sorte, à l'issue de la première étape, le signal 37 est décomposé en une série de sous-signaux 311, chaque sous-signal permettant d'obtenir par décomposition une sous-image SAR correspondant à une fraction sur l'axe distance de l'image totale pouvant être obtenue à partir du signal initial 37. Par suite la juxtaposition des différentes sous-
 10 images SAR ainsi obtenues permet de reconstituer la totalité l'image SAR tirée du signal initial 37. Chaque sous-signal présente à ce stade les mêmes lacunes de spectre que le signal initial.

Le nombre et l'ordre des filtres FIR mis en œuvre sont définis, classiquement
 15 par le nombre et l'étendue des lacunes du signal, ainsi que par la puissance de calcul disponible et la taille de la mémoire dont dispose la machine utilisée. Typiquement Ces filtres sont dimensionnés pour obtenir après filtrage et décimation des sous-signaux composés de 64 à 256 échantillons.

20 La deuxième étape 32 consiste quant à elle, comme cela a été dit précédemment, à déterminer pour chacun de M sous-signaux 311 à bande étroite, obtenus à l'issue de l'étape 31 un modèle permettant d'effectuer une extrapolation du signal considéré sur l'espace de mesure, extrapolation réalisé au cours de l'étape suivante 33. Cette extrapolation a pour objet de
 25 combler les lacunes présentes sur le signal original (Cf. figure 2-b). Dans le cadre de l'invention, ces deux opérations sont exécutées en mettant en œuvre une méthode originale dont le principe est décrit ci-après par comparaison à l'art antérieur connu.

30 Pour modéliser un signal dont on connaît une séquence de longueur donnée, comme c'est le cas pour les sous-signaux 311 $X_i(n)$ obtenus à l'issue de l'étape 31, il est connu d'utiliser un processus de filtrage autorégressif. Un tel processus peut être décrit de manière générale, pour un sous-signal donné par la relation de récurrence suivante:

35

$$x(n) = - \sum_{k=1}^K w^*(k) x(n-k) + b(n) \quad [1]$$

$x(n)$ représente, dans le cas présent un échantillon du sous-signal 311 considéré que l'on veut modéliser, tandis que $w(k)$ est un coefficient du filtre AR (auto-régressif) que l'on cherche à déterminer, coefficient dont on considère le conjugué $w^*(k)$. $b(n)$ représente quant à lui un échantillon de bruit blanc.

L'analyse AR est une méthode classique, dont une caractéristique avantageuse est qu'elle peut convenir aussi bien pour modéliser des signaux à bande large tels que des bruits colorés, que des signaux à bande étroite, présentant par exemple un spectre de raies borné.

Cette propriété est notamment très intéressante lorsque l'on cherche à modéliser un signal SAR, issus d'échos ponctuels, de fouillis diffus, et de bruit thermique. L'analyse à mettre en œuvre sur ce type de signal doit en effet présenter à la fois des capacités de haute résolution sur les sources ponctuelles de signal, dont les contours sont bien déterminés, qui correspondent à des cibles d'intérêts et a des infrastructures, tout en effectuant une analyse satisfaisante des fouillis de sol diffus (pas de pics parasites notamment), qui peut être vu comme des équivalents en imagerie de bruits colorés.

Le processus de filtrage autorégressif décrit par la relation[1], peut être reformulé de manière plus compacte par la relation suivante:

$$b = w^H x \quad [2]$$

pour laquelle:

- $x = [x(K) \dots (N-1)]^T$ représente le transposé du vecteur des échantillons du signal
- $b = [b(K) \dots b(N-1)]^T$ représente le transposé du vecteur des échantillons de bruit,
- $w = [w(0) \dots w(K)]^T$ représente le transposé du vecteur des coefficients du filtre AR recherché, avec $w(0) = 1$,

Par suite l'analyse AR classique consiste à résoudre, au sens des moindres carrés, les équations classiques en w suivantes, en trouvant la solution minimisant la puissance en sortie du filtre w :

5

$$\min_w \{w^H \cdot R \cdot w\} = \min_w \{w^H \cdot E\{x \cdot x^H\} \cdot w\} = \min \{E\{b^H \cdot b\}\} \quad [3]$$

et

$$w^H \cdot e = 1 \quad [4]$$

10

avec $e = [1 \ 0 \ 0 \dots 0]^T$

Dans la relation [3], R représente la matrice d'autocorrélation des données x , matrice définie par:

15

$$R = E\{x \cdot x^H\} \quad [5]$$

w est classiquement appelé filtre de blanchiment des données x .

La solution d'un tel système d'équations a pour expression:

20

$$w^H = \frac{e^T \cdot R^{-1}}{e^T \cdot R^{-1} \cdot e} \quad [6]$$

par suite, e étant défini, la détermination de w passe par celle de R .

25

Le vecteur w des coefficients du filtre AR étant déterminé, l'extrapolation du signal x au delà de son support d'origine peut être réalisé en utilisant les relations suivantes.

$$x(n) = -\sum_{k=1}^K w^*(k) x(n-k), \quad \text{pour } n > N-1 \quad [7]$$

30

et

$$x(n) = -\sum_{k=1}^K w(k) x(n+k), \quad \text{pour } n < 0 \quad [8]$$

Le problème dans la mise en œuvre de l'analyse AR classique réside généralement dans l'obtention d'un estimé $\hat{R}$ de la matrice d'autocorrélation R des données. La matrice R est classiquement estimée par la méthode de la covariance modifiée.

5 En outre, s'agissant de l'estimation de R , le choix de l'ordre K du modèle répond quant à lui à la nécessité de satisfaire deux contraintes antagonistes :

10 Un ordre K faible conduit à une bonne estimation de la matrice d'autocorrélation R , mais à une détérioration de la résolution du spectre de la partie extrapolée du signal (le spectre considéré étant un spectre spatial dans le cas d'un signal SAR).

Un ordre K élevé conduit à bonne résolution du spectre du signal extrapolé, mais à une mauvaise estimation de la matrice d'autocorrélation R , ce qui se traduit par des pics "parasites" sur la représentation de ce spectre.

15 La difficulté d'établir un compromis satisfaisant, rend parfois délicate la mise en œuvre des méthodes autorégressive classiques, en particulier dans le cas où le signal traité est un signal SAR lacunaire à partir duquel on cherche à obtenir une image SAR de bonne résolution et dépourvue de formes parasites. C'est pourquoi l'étape de modélisation selon l'invention met
20 en œuvre une méthode alternative originale.

Cette méthode d'analyse AR originale, baptisée Analyse AR "log-régularisée" consiste à rechercher non plus les vecteurs w permettant de minimiser le produit $w^H \cdot \hat{R} \cdot w$ [9], mais plutôt les vecteurs w permettant de
25 minimiser le produit $(w^H \cdot \hat{R} \cdot w) \cdot (w^H \cdot w)$ [10].

En effet, dans le produit [10], la norme $w^H \cdot w$ représente la valeur de "l'amplification" du bruit thermique, toujours présent dans les données d'entrées soumises à modélisation. Une valeur de cette norme trop éloignée de l'unité a pour effet d'induire l'apparition de pics parasites dans l'estimation
30 spectrale obtenue à partir du signal extrapolé par modélisation AR.

Le facteur $w^H \cdot \hat{R} \cdot w$ représente, quant à lui, le bruit propre du modèle AR, dont la valeur, lorsque la matrice R est bien estimée et l'ordre du modèle suffisamment élevé, est proche de la valeur du bruit thermique présent dans les données d'entrées, condition qui n'est en principe, comme on l'a dit
35 précédemment, pas vérifiée si l'on travaille avec un modèle d'ordre élevé.

Or des essais effectués par la déposante ont par ailleurs montré que la valeur $(w^H \cdot \hat{R} \cdot w) \cdot (w^H \cdot w)$ constitue une bonne estimée du niveau de bruit thermique dans les données d'entrées, lorsque l'ordre du modèle est suffisamment élevé, typiquement égal à $N/2$ par exemple, N étant la taille de la séquence constituant le signal à modéliser.

Ainsi, en déterminant le vecteur w qui minimise le produit [10], il est avantageusement possible de déterminer un modèle d'ordre élevé présentant un niveau de bruit suffisamment faible pour que le signal obtenu par extrapolation ait une représentation spectrale (spectre spatial dans le cas d'un signal SAR) de haute résolution et dépourvue de pics parasites.

Selon l'invention L'opération de minimisation, $\min_w \{ (w^H \cdot \hat{R} \cdot w) \cdot (w^H \cdot w) \}$, est réalisée en utilisant un algorithme classique de descente de gradient.

Par suite, le vecteur w des coefficients du filtre AR étant déterminé, l'extrapolation du signal x au delà de son support d'origine peut être réalisé en utilisant de manière conventionnelle les relations [7] et [8].

Ainsi, à l'issue des étapes 32 et 33, on dispose pour chaque sous-signal 311, d'un modèle extrapolé 313 formé d'une suite d'échantillon plus importante. Selon les cas d'utilisation l'extrapolation peut être réalisée pour obtenir des échantillons de signal d'un rang précédent le premier échantillon de la suite formant le sous-signal initial 311 (on parle alors d'extrapolation "à droite") ou bien pour obtenir des échantillons de signal d'un rang suivant le dernier échantillon de la suite formant le sous-signal 311 initial (on parle alors d'extrapolation "à gauche"). Alternativement, l'extrapolation peut être réalisée "à droite" et "à gauche". De la sorte en fonction de la position des lacunes sur le domaine de définition du signal (axe fréquentiel par exemple pour un signal SAR) l'application des étapes 32 et 33 permet de combler au moins partiellement ces lacunes au niveau de chacun des sous-signaux 311 obtenu à l'issue de l'étape 31.

Dans la pratique si la séquence représentant le sous-signal 311 considéré comporte N échantillons il est possible, en utilisant la méthode de modélisation et d'extrapolation des étapes 32 et 33, d'extrapoler ce signal sur une séquence comportant $N/2$ échantillons supplémentaires à droite et/ou à gauche.

Le signal initial 37 ayant subi les étapes 31, 32 et 33 de traitement, on dispose alors de M sous-signaux extrapolés 313, sur tout ou partie des zones lacunaires initialement présentes, auxquels on applique l'étape 34 de décomposition spectrale. Chaque sous-signal extrapolé 313 présente un spectre 314 de largeur identique à celle du spectre du sous-signal 311 initial, obtenu à l'issue de l'étape 31. En revanche ce spectre comporte un nombre de composantes plus important et constitue donc une décomposition plus fine du signal. Le "comblement" des zones lacunaires se traduit ainsi par un accroissement de résolution spectrale.

S'agissant d'un signal SAR, pour lequel le spectre "spatial" obtenu correspond comme il a été dit précédemment à l'image SAR, cette amélioration de la finesse du spectre se traduit par une amélioration de la résolution de la sous-image SAR 314 obtenue par décomposition du sous-signal extrapolé 313, par rapport à la résolution de la sous-image obtenue par décomposition du sous-signal 311 non extrapolé, les deux sous-images ayant par ailleurs une taille identique.

La décomposition spectrale peut bien entendu être réalisée par tout procédé de décomposition connu, par FFT par exemple, le procédé selon l'invention n'étant nullement limitatif sur ce point.

20

De la sorte, après l'étape 34 de décomposition spectrale, on dispose de M représentations spectrales améliorées, de M sous-images 314 de définition améliorée dans le cas de signaux SAR, qui sont concaténées au cours de l'étape 35. Cette concaténation, permet de restituer une représentation spectrale 315 du signal initial 37 présentant une finesse accrue, ou plus précisément dans le cas du traitement d'un signal SAR, une image globale 315 de définition améliorée.

Le procédé de traitement selon l'invention permet ainsi à partir d'un signal lacunaire, d'obtenir un signal pour lequel les portions correspondant aux lacunes sont reconstruites, le signal étant ainsi défini sur tout le domaine considéré. Cette reconstruction a en outre pour effet avantageux d'améliorer la résolution du spectre du signal traité. Selon le domaine d'utilisation, l'effet recherché est soit l'amélioration du spectre soit la reconstruction du signal lacunaire.

Dans le cas d'un signal SAR présentant des lacunes en fréquence, cas pris comme support pour la description qui précède, le résultat recherché dans l'application du procédé selon l'invention consiste plutôt une amélioration de la résolution spectrale du signal, c'est à dire en une
5 amélioration de l'image SAR obtenue à partir du signal lacunaire dont on dispose.

Inversement, pour d'autres domaines d'application, le résultat recherché peut consister en la reconstruction du signal lacunaire dont on dispose. C'est en particulier le cas, par exemple quand le signal lacunaire
10 considéré est un signal vidéo radar présentant des lacunes sur certains intervalles de temps, pour diverses raisons non détaillées ici. Le procédé selon l'invention est alors appliqué à un signal temporel 37. Par suite le procédé selon l'invention procède à la décomposition du signal (étape 31) en sous signaux 311 dont les spectres, des spectres fréquentiels dans ce cas,
15 sont juxtaposés en fréquence et couvrent ensemble la bande spectrale du signal temporel initial 37. Ces sous-signaux 311 sont ensuite modélisés et extrapolés (étapes 32 et 33) de façon à obtenir des sous-signaux 313 ne présentant plus de lacunes temporelles. Ces sous-signaux 313 font ensuite l'objet d'une décomposition spectrale (étape 34), une décomposition
20 fréquentielle dans ce cas, et les sous-spectres 314 ainsi obtenus sont concaténés de façon à obtenir un spectre global 39. Par suite, au cours d'une étape complémentaire 36, le spectre global obtenu fait l'objet d'une recomposition, par exemple par FFT inverse, qui restitue un signal temporel
25 38 qui correspond au signal temporel initial 37 dont les lacunes ont été avantageusement comblées.

Comme il a été dit précédemment, le procédé selon l'invention peut être appliqué, de manière non limitative, à la restauration d'un signal présentant des lacunes, ou encore à l'extrapolation d'un signal connu de
30 manière trop limitative. Les figures 4 et 5 illustrent ces deux applications.

La figure 4 présente de manière schématique, un premier exemple d'application du procédé selon l'invention, à un signal S présentant une zone lacunaire C entre deux zones non lacunaires A et B. Dans cet exemple le but
35 recherché est par exemple de restaurer le signal S lui-même.

La restauration du signal S est ici réalisée en appliquant le procédé selon l'invention simultanément sur les signaux 41 et 42 correspondant à deux zones non lacunaires A et B de part et d'autre de la lacune C à traiter. Le traitement de la zone lacunaire C est réalisé en la divisant tout d'abord cette

5 zone en deux zones C_1 et C_2 , de tailles inégales: la zone C_1 , contiguë de la zone A et la zone C_2 contiguë de la zone B. Ensuite, le procédé selon l'invention est appliqué séparément à la portion de signal correspondant à la zone A de façon à reconstituer par extrapolation l'élément de signal correspondant à la zone C_1 et à la portion de signal correspondant à la zone

10 B de façon à reconstituer par extrapolation l'élément de signal correspondant à la zone C_2 . Enfin les signaux 43 et 44 obtenus par application du procédé selon l'invention font l'objet d'une opération de concaténation 45, de façon à constituer un signal S' ne présentant avantageusement plus de lacune.

Dans cet exemple, le procédé selon l'invention est mis en œuvre sur

15 la partie A pour réaliser une extrapolation à droite de la suite d'échantillons $x_A(n)$ de signal, de taille N_A , correspondant à cette partie A (ajout d'échantillons de rang supérieur à N). et sur la partie B pour réaliser une extrapolation à gauche de la suite d'échantillons $x_B(n)$ de signal, de taille N_B de signal correspondant à cette partie B (ajout d'échantillons de rang

20 inférieur à 1).

De manière pratique, les tailles relatives, des zones C_1 et C_2 sont définies en fonction des tailles relatives (N_A et N_B) des zones A et B, la zone non lacunaire la plus étendue étant utilisée pour restaurer la partie la plus importante de la zone C.

25

La figure 5 présente de manière schématique, un deuxième exemple d'application du procédé selon l'invention à un signal S qui, bien que ne présentant pas de lacune, est connu de manière insuffisante, la suite d'échantillons définissant le signal étant par exemple de taille trop faible pour

30 obtenir une résolution spectrale satisfaisante du signal. Le but ici est donc d'extrapoler ce signal de façon à obtenir une meilleure résolution spectrale. On parle dans ce cas d'analyse "hyper résolvente".

L'extrapolation du signal S est effectuée en appliquant directement le procédé selon l'invention à ce signal, de façon à réaliser une extrapolation à

35 droite (ajout d'échantillons de rang supérieur à N) et à gauche (ajout

16

d'échantillons de rang inférieur à 1) de la suite des N échantillons $x(n)$ décrivant le signal S . Le signal S' , ainsi extrapolé, présente avantageusement une résolution spectrale accrue.

REVENDICATIONS

1. Procédé pour extrapoler un signal (37) par décomposition spectrale multi canaux, caractérisé en ce qu'elle comporte:

- 5 - une première étape (31) pour décomposer le signal traité en M sous-signaux (311), de sorte que chaque sous-signal ait un spectre représentant une portion distincte du spectre du signal traité (37), et que la concaténation des spectres de l'ensemble des sous-signaux (311) reconstitue le spectre du signal traité (37)
- 10 - une deuxième étape (32) pour définir un modèle analytique d'identification pour chacune des M séquences d'échantillons correspondant à un des M sous-signaux (311),
- une troisième étape (33) pour effectuer l'extrapolation de chacune des M séquences au moyen du modèle d'identification défini pour cette séquence,
- 15 - une quatrième étape (34) pour effectuer la décomposition spectrale de chacun des sous-signaux (313) correspondant aux séquences extrapolées.
- une cinquième étape (35) pour effectuer la concaténation des spectres (314) obtenus à l'issue de l'étape de décomposition spectrale (34).
- 20

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que, l'étape de décomposition du signal (37) en M sous-signaux (311), est réalisée en appliquant une batterie de M filtres FIR passe-bande dont
25 les bandes passantes sont juxtaposées, et dont le réunion des bandes passantes couvre la totalité du spectre du signal traité (37), les séquences correspondantes étant obtenues par décimation des séquences résultant de l'application de chacun des filtres FIR au signal traité (311).

30

3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que l'étape de définition d'un modèle pour chacune des M séquences obtenues à l'issue de l'étape de décomposition (31) du signal traité

(37), met en œuvre une méthode de modélisation auto régressive identifiant chaque séquence à un modèle défini par la relation générale suivante:

$$x(n) = - \sum_{k=1}^K w^*(k) x(n-k) + b(n)$$

5 où $x(n)$, $w(k)$ et $b(n)$ représentent respectivement:

- $x(n)$, l'échantillon de signal,
- $w(k)$, le k-ième coefficient du filtre AR (auto-régressif) définissant le modèle
- $b(n)$ un échantillon de bruit blanc.

10

4. procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que les coefficients $w(k)$ du filtre auto-régressif sont déterminés en cherchant les valeurs qui minimisent le produit:

$$(w^H \cdot \hat{R} \cdot w) \cdot (w^H \cdot w)$$

15

où w représente le vecteur des coefficients du filtre, et $\hat{R}$ une estimée de la matrice d'autocorrélation du signal.

5. Procédé selon l'une des revendications 3 ou 4, caractérisé en ce que lors de l'étape d'extrapolation (33) la séquence initiale à N échantillons $\{x(0) \dots x(N-1)\}$ est extrapolée au delà de son support d'origine au moyen des relations suivantes:

20

$$x(n) = - \sum_{k=1}^K w^*(k) x(n-k), \text{ pour } n > N-1$$

et

$$x(n) = - \sum_{k=1}^K w(k) x(n+k), \text{ pour } n < 0$$

25

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, l'étape de décomposition spectrale (34) de chacun des sous-signaux extrapolés (313) est réalisée par transformée de Fourier rapide (FFT).

30

7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte en outre une étape complémentaire (36), de recomposition du signal après traitement, cette étape étant réalisée

par transformée de Fourier rapide inverse (FFT^{-1}) au spectre global obtenu à l'issue de la cinquième étape (35) qui procède à la concaténation des spectres des sous-signaux extrapolés (313).

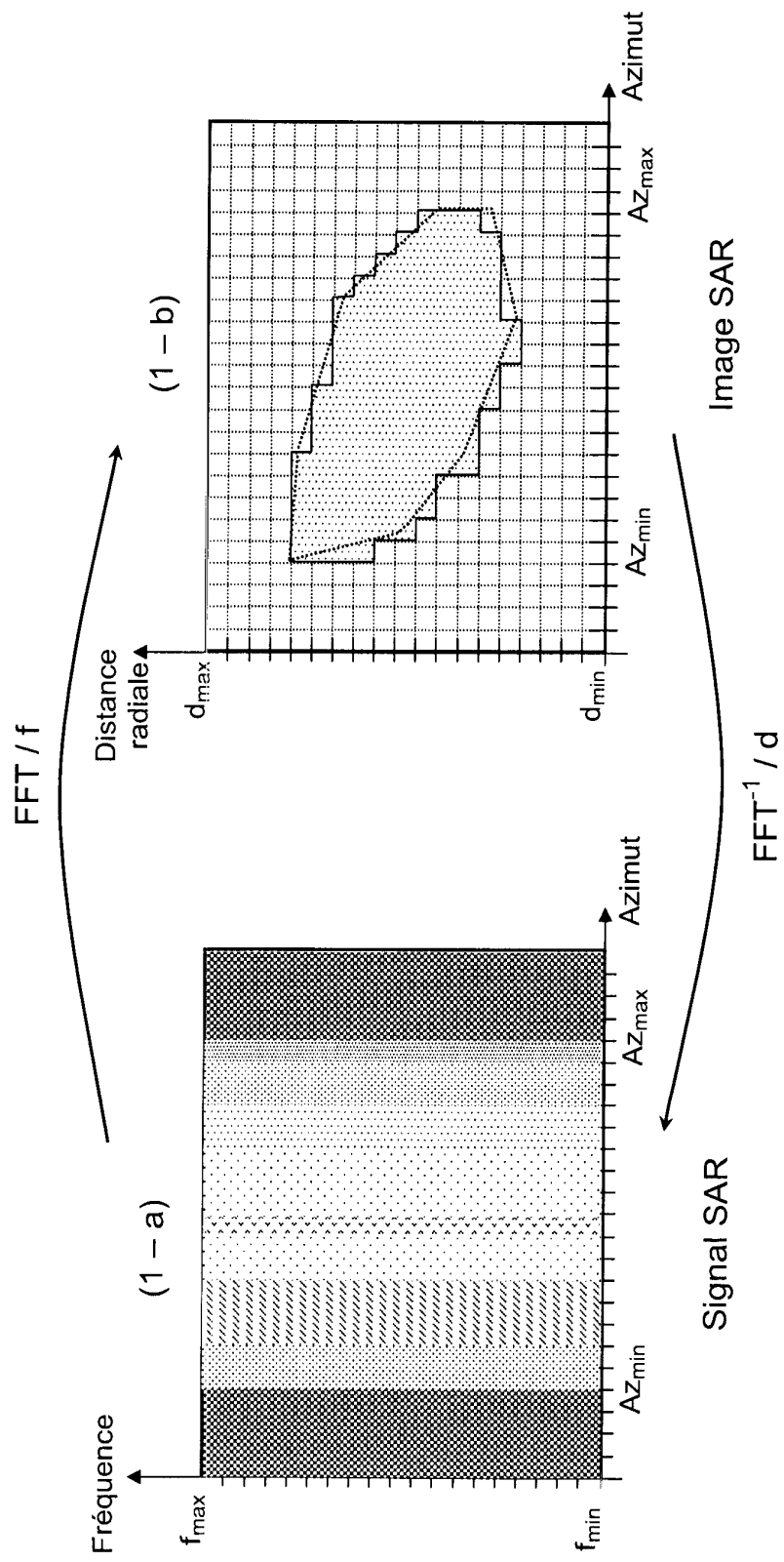


FIG.1

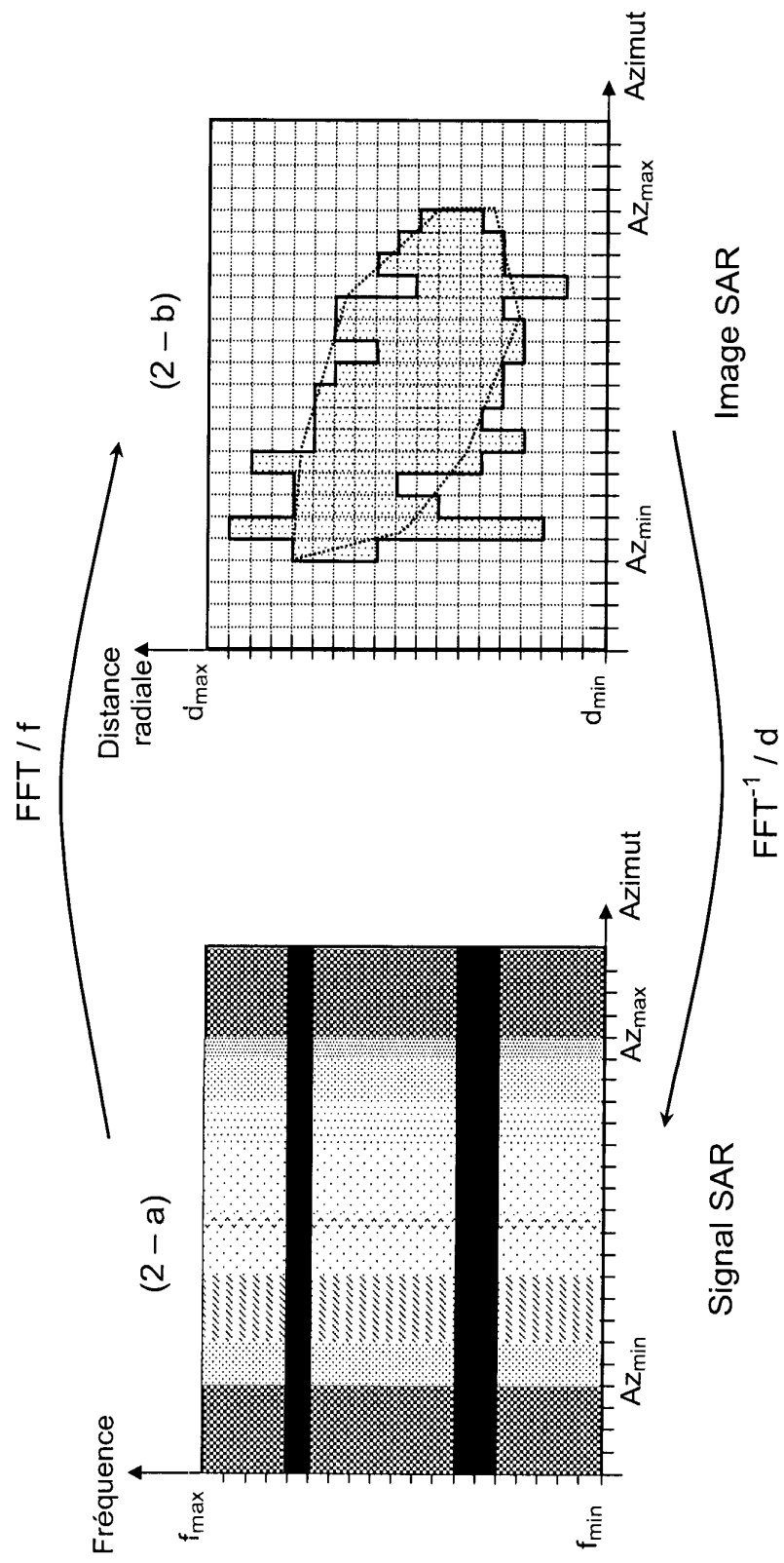


FIG.2

3/5

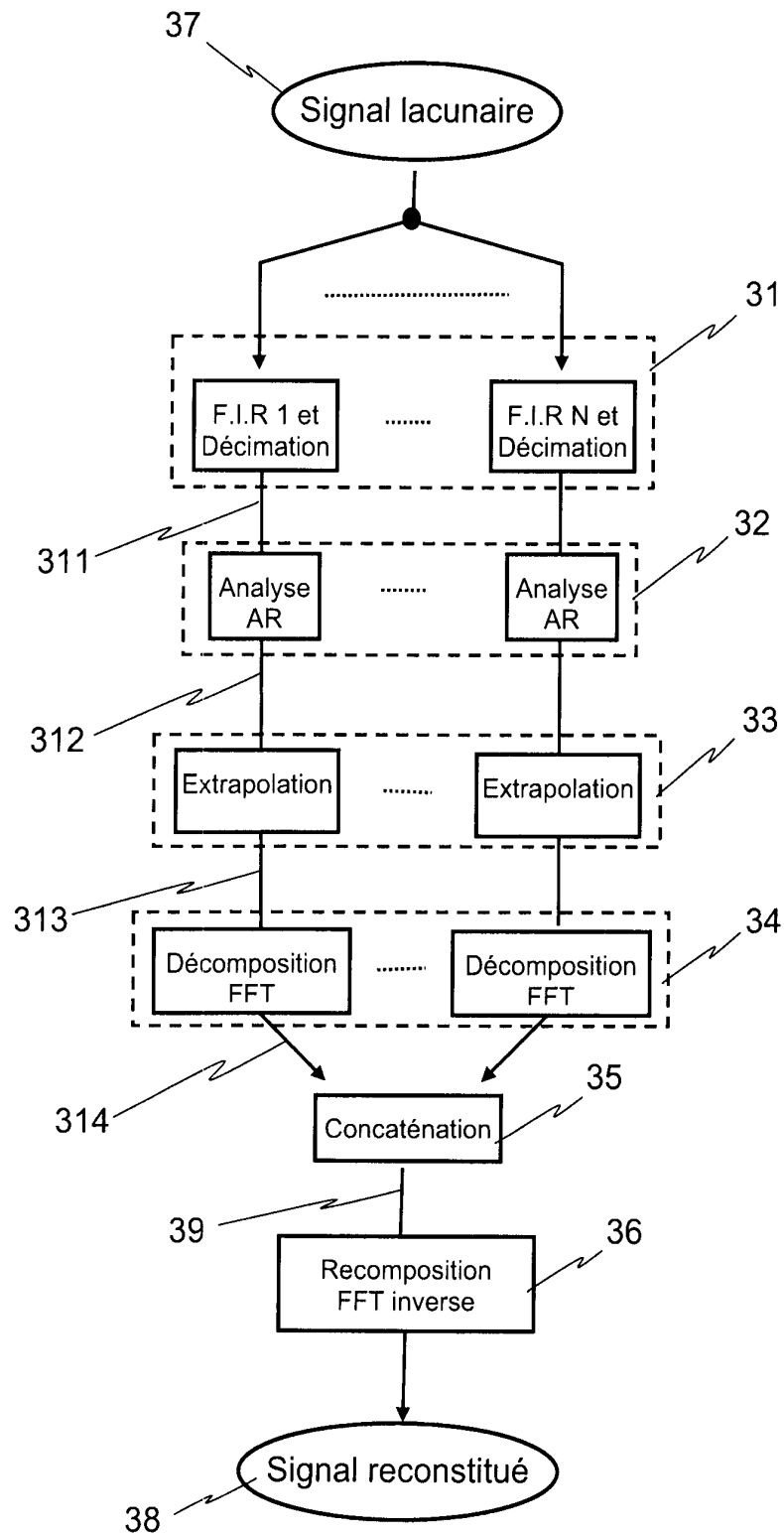


FIG.3

4/5

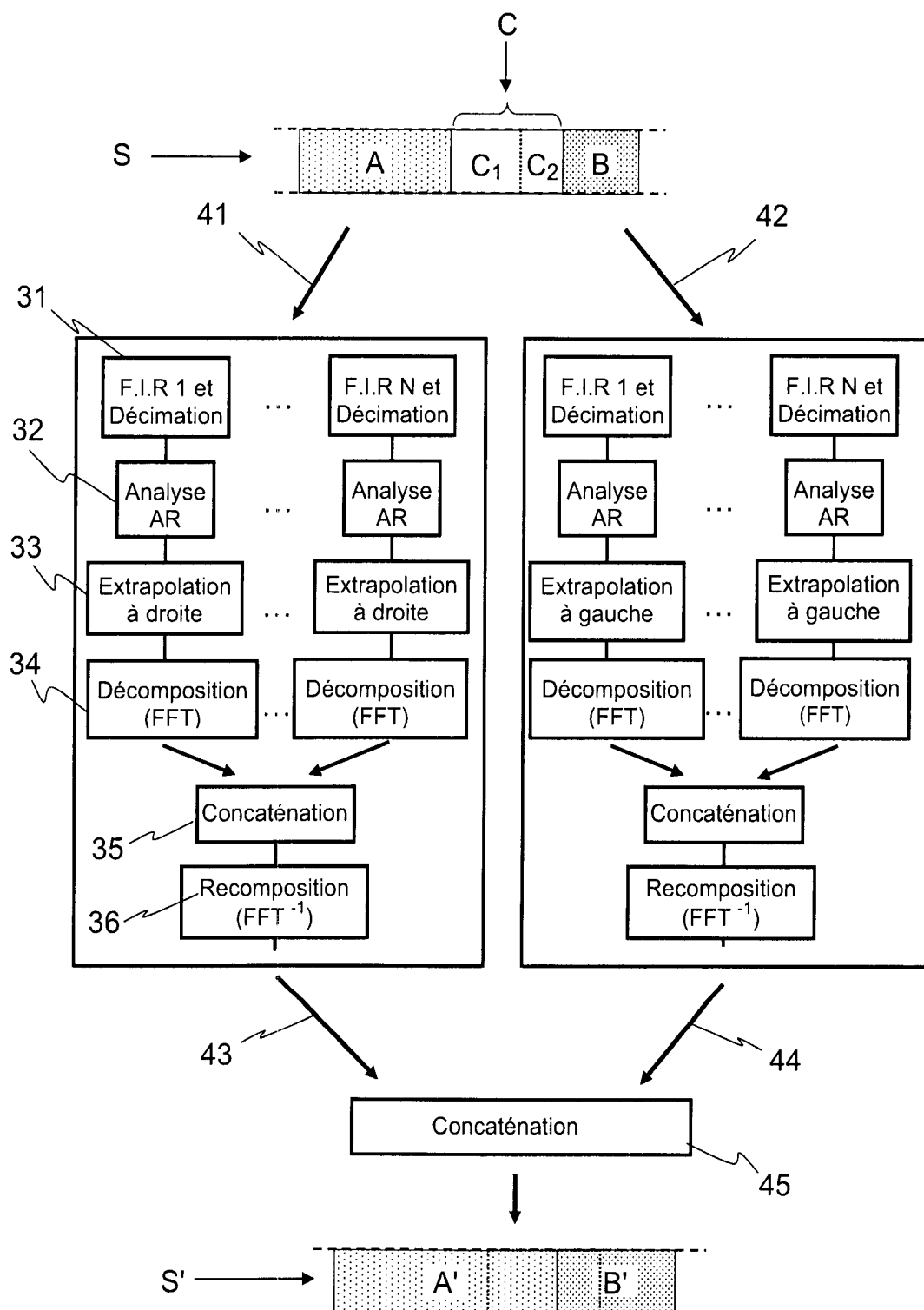


FIG.4

5/5

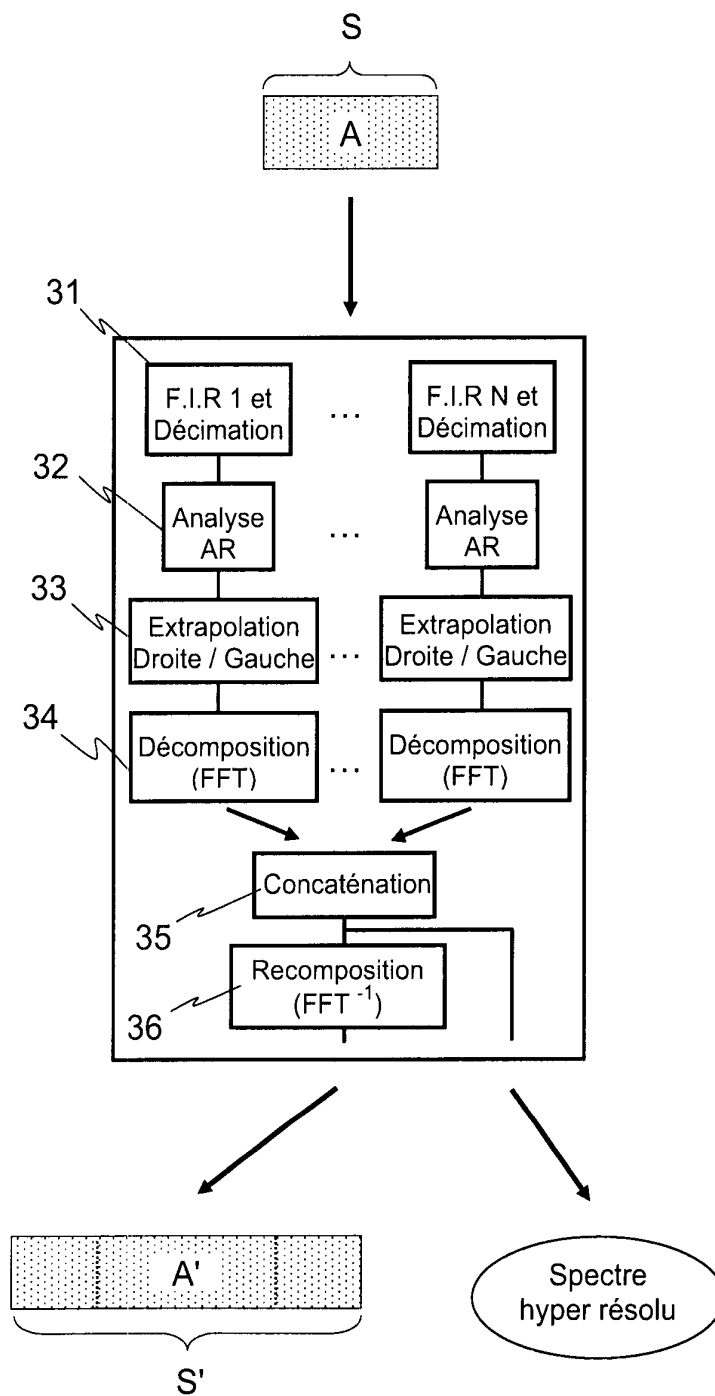


FIG.5



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 695751
FR 0702223

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 7 006 031 B1 (ABATZOGLOU THEAGENIS J [US] ET AL) 28 février 2006 (2006-02-28)	1,2	G01S13/90
A	* colonne 1, ligne 60 - colonne 2, ligne 24; figures 3b,5b,6a,6b * * colonne 4, ligne 46 - ligne 55 * * colonne 5, ligne 62 - colonne 9, ligne 7 *	3-7	
X	----- ADAMS J W ET AL: "Digital filters for synthetic aperture radar" IEEE, 20 avril 1988 (1988-04-20), pages 171-176, XP010075224 * abrégé * * alinéas [00II], [0III], [00IV] *	1,2	
A	----- CURTIS T E: "Digital signal processing for sonar. I. The sonar problem and front-end DSP algorithms" IEE, 1990, pages 3-1, XP006519224 * page 10, alinéa 2.2 - page 11, ligne 18 *	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
A	----- US 6 864 827 B1 (TISE BERTICE L [US] ET AL) 8 mars 2005 (2005-03-08) * abrégé *	1	G01S
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
6 novembre 2007		Mercier, Francois	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0702223 FA 695751

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **06-11-2007**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 7006031	B1	28-02-2006	AUCUN

US 6864827	B1	08-03-2005	AUCUN
