

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

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

3 111 994

②① N° d'enregistrement national : **20 06870**

⑤① Int Cl⁸ : **G 01 S 13/88** (2019.12), G 01 S 13/89

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Procédé de détection de cible pour radar à pénétration de sol et radar associé.

②② Date de dépôt : 30.06.20.

③⑦ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 31.12.21 Bulletin 21/52.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 24.02.23 Bulletin 23/08.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public — FR.*

⑦② Inventeur(s) : *D'ERRICO Raffaele, DORE Jean-
Baptiste, MAKHOUL Gloria et MARET Luc.*

⑦③ Titulaire(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public.*

⑦④ Mandataire(s) : *Marks&Clerk France.*

FR 3 111 994 - B1



Description

Titre de l'invention : Procédé de détection de cible pour radar à pénétration de sol et radar associé

- [0001] L'invention concerne le domaine des radars à pénétration de sol ou géoradars qui couvrent l'ensemble des techniques permettant de détecter, localiser ou identifier des cibles souterraines au moyen d'un système radiofréquence.
- [0002] Les cibles souterraines sont, par exemple, des canalisations de diamètre et nature différentes (acier, PVC, ciment, béton...) qui peuvent être enterrées à différentes profondeurs.
- [0003] Un objectif des radars à pénétration de sol est de localiser de tels objets avec précision afin de pouvoir cartographier correctement un sous-sol, par exemple pour des besoins de sécurité lors de travaux.
- [0004] Un problème général visé par l'invention concerne la localisation de cibles souterraines avec précision quels que soient les milieux diélectriques traversés par les signaux radars.
- [0005] Un premier type de méthode de localisation compatible des radars à pénétration de sol concerne des techniques dites de migration issues de l'imagerie. Ces méthodes sont basées sur la résolution de l'équation d'onde par une interpolation dans le domaine fréquentiel.
- [0006] Le document [1] décrit une méthode d'imagerie radar pour des systèmes à une antenne d'émission et une antenne de réception (de type SISO pour « Single Input Single Output » en anglais). Les documents [4] et [6] donnent des exemples de méthodes d'imagerie radar appliquées à des systèmes ayant plusieurs antennes d'émission et de réception, c'est-à-dire des réseaux d'antennes (de type MIMO pour « Multiple Input Multiple Output » en anglais).
- [0007] Un inconvénient des méthodes d'imagerie ou de migration est qu'elles n'exploitent généralement que l'information de phase des signaux captés. L'information d'amplitude n'est pas utilisée ni pour déterminer la position d'une cible ni pour estimer les pertes de transmission des signaux dans le milieu traversé. Par ailleurs, ces méthodes ont pour objectif de construire une image d'une zone et nécessitent un post traitement pour déterminer la position d'une cible.
- [0008] Le document [5] décrit une autre méthode basée sur un réseau d'antennes pour créer virtuellement une onde plane. Cette solution présente également l'inconvénient de nécessiter un prétraitement en émission.
- [0009] Le document [2] décrit une technique radar de type MIMO qui exploite l'amplitude des signaux captés mais ne considère pas l'influence des pertes de transmission lors de

la propagation des signaux dans le sol. Cette simplification a pour effet de limiter la précision de localisation notamment dans le cas de milieux hétérogènes et de zones comportant plusieurs cibles proches à détecter.

[0010] La présente invention vise à remédier aux inconvénients des techniques de l'état de l'art précitées en proposant une méthode de localisation qui prend en compte les pertes diélectriques dans le sol afin d'améliorer la précision de détection et localisation des cibles.

[0011] L'invention a pour objet un procédé de détection d'au moins une cible enterrée dans une zone du sol, à l'aide d'un radar à pénétration de sol, le radar comprenant au moins une antenne d'émission et au moins une antenne de réception, le procédé comprenant les étapes de :

- Acquérir, sur chaque antenne de réception, une mesure d'un signal émis par chaque antenne d'émission et réfléchi dans la zone du sol,
- Déterminer, à partir desdites mesures, une estimée, dans le domaine fréquentiel, du canal de propagation pour chaque couple constitué d'une antenne d'émission et d'une antenne de réception, lesdites estimées étant regroupées dans une matrice de canal ayant une première dimension égale au nombre d'antennes de réception, une seconde dimension égale au nombre d'antennes d'émission et une troisième dimension égale au nombre de fréquences,
- définir une première hypothèse H_0 correspondant à une absence de cible dans la zone du sol, la matrice de canal sous cette première hypothèse étant modélisée par du bruit,
- définir une seconde hypothèse H_1 correspondant à la présence d'au moins une cible dans la zone du sol, la matrice de canal sous cette seconde hypothèse étant modélisée par un modèle de canal de propagation dépendant au moins des caractéristiques des antennes d'émission et des antennes de réception et des pertes de propagation du signal dans le sol,
- réaliser un test du rapport de vraisemblance entre la vraisemblance de la matrice de canal sous la seconde hypothèse H_1 et la vraisemblance de la matrice de canal sous la première hypothèse H_0 , pour conclure à la présence d'une cible en une position donnée dans la zone du sol.

[0012] Selon un aspect particulier de l'invention, l'étape de réaliser un test du rapport de vraisemblance entre la première hypothèse H_0 et la seconde hypothèse H_1 comprend les sous-étapes de :

- Déterminer au moins un estimateur du maximum de vraisemblance de la position et de la surface équivalente radar d'une cible, sous la seconde hypothèse H_1 ,
- Déterminer la vraisemblance de la matrice de canal sous la seconde hypothèse

- H1 pour chaque estimateur,
- Déterminer la vraisemblance de la matrice de canal sous la première hypothèse H0,
 - comparer le ratio entre les deux vraisemblances à un seuil de détection prédéterminé pour en déduire la présence ou l'absence d'une cible pour chaque position estimée.
- [0013] Selon un aspect particulier de l'invention, l'étape de déterminer au moins un estimateur du maximum de vraisemblance de la position et de la surface équivalente radar d'une cible, sous la seconde hypothèse H1 est réalisée en recherchant au moins un extremum d'une fonction de trois variables dépendant de la position d'une cible dans la zone du sol, de la surface équivalente radar d'une cible et d'un coefficient de pertes de transmission du signal dans la zone du sol.
- [0014] Selon un aspect particulier de l'invention, la recherche d'au moins un extremum de ladite fonction de trois variables est réalisée en :
- déterminant un estimateur du maximum de vraisemblance de la surface équivalente radar en calculant une corrélation normalisée entre la matrice de canal et une matrice de pertes incluant les fonctions de transfert des antennes d'émission et de réception, les pertes de propagation du signal dans l'espace libre et dans la zone du sol,
 - recherchant au moins un extremum selon la position et le coefficient de pertes de ladite fonction évaluée pour la surface équivalente radar estimée.
- [0015] Selon un aspect particulier de l'invention, la vraisemblance de la matrice de canal sous la seconde hypothèse H1 est déterminée par un extremum de ladite fonction.
- [0016] Selon un aspect particulier de l'invention, la vraisemblance de la matrice de canal sous la première hypothèse H0 est déterminée au moins en calculant l'énergie de la matrice de canal.
- [0017] Selon un aspect particulier de l'invention, une position de cible est recherchée dans une grille en deux ou trois dimensions ayant un pas initial défini, le procédé étant itéré sur plusieurs itérations en réduisant la zone et le pas initial à chaque itération.
- [0018] Dans une variante de réalisation, le procédé selon l'invention comprend les étapes de :
- Convertir les estimées de canal de propagation pour chaque couple constitué d'une antenne d'émission et d'une antenne de réception, dans le domaine temporel,
 - Appliquer un filtre aux estimées sous la forme d'un fenêtrage temporel,
 - Convertir les estimées filtrées dans le domaine fréquentiel,
 - Regrouper les estimées filtrées dans une matrice de canal
- [0019] Selon un aspect particulier de l'invention, le fenêtrage temporel est défini de manière

à filtrer les contributions des signaux correspondant à un intervalle de distance entre le radar et la zone du sol.

- [0020] Selon un aspect particulier de l'invention, le procédé est répété pour plusieurs filtres différents de manière à couvrir toute la zone du sol.
- [0021] Dans une variante de réalisation, le procédé selon l'invention comprend en outre une étape d'annulation de la contribution d'une cible détectée dans les mesures de signaux acquis, par exemple au moyen d'un algorithme d'annulation d'écho, le procédé étant itéré sur plusieurs itérations successives, en annulant à chaque nouvelle itération l'écho de la cible détectée à l'itération précédente.
- [0022] L'invention a aussi pour objet un radar à pénétration de sol comprenant au moins une antenne d'émission et au moins une antenne de réception et un dispositif de détection d'au moins une cible enterrée dans une zone du sol configuré pour exécuter les étapes du procédé de détection selon l'invention.
- [0023] L'invention a aussi pour objet un programme d'ordinateur comportant des instructions pour l'exécution du procédé selon l'invention, lorsque le programme est exécuté par un processeur ainsi qu'un support d'enregistrement lisible par un processeur sur lequel est enregistré un programme comportant des instructions pour l'exécution du procédé selon l'invention, lorsque le programme est exécuté par un processeur.
- [0024] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit en relation aux dessins annexés suivants.
- [0025] [fig.1] la figure 1 représente un schéma illustratif du fonctionnement d'un radar à pénétration de sol,
- [0026] [fig.2] la figure 2 représente un organigramme général décrivant les étapes d'un procédé de détection de cible selon un mode de réalisation de l'invention,
- [0027] [fig.3] la figure 3 représente un organigramme décrivant un mode de réalisation de l'étape de détection de cible du procédé selon l'invention,
- [0028] [fig.4] la figure 4 représente un schéma illustratif d'un exemple de fonctionnement itératif de l'invention,
- [0029] [fig.5] la figure 5 représente un organigramme décrivant les étapes d'une variante de réalisation du procédé selon l'invention,
- [0030] [fig.6] la figure 6 représente un diagramme d'une réponse temporelle d'un canal de propagation pour illustrer une variante de réalisation de l'invention,
- [0031] [fig.7] la figure 7 représente un organigramme décrivant les étapes d'une autre variante de réalisation du procédé selon l'invention,
- [0032] [fig.8] la figure 8 représente un schéma d'un exemple de radar à pénétration de sol apte à exécuter l'invention.
- [0033] La figure 1 représente un schéma simplifié du principe de fonctionnement d'un radar

à pénétration de sol RDR. Un tel radar comporte une ou plusieurs antennes d'émission et une ou plusieurs antennes de réception. Sur l'exemple de la figure 1, le radar comporte cinq antennes en émission et quatre antennes en réception. Sans sortir du cadre de l'invention, le nombre d'antennes en émission et en réception peut prendre n'importe quelle valeur entière non nulle.

- [0034] Une zone du sol décomposée en une grille G est analysée par le géoradar RDR en effectuant une séquence d'émissions et d'acquisitions de signaux pour chaque couple constitué d'une antenne d'émission et d'une antenne de réception. Par exemple, une séquence d'acquisition consiste à émettre un signal radar depuis la première antenne Tx1 en émission, ce signal est réfléchi sur une cible éventuelle P située dans la zone G puis rétro-propagé vers chaque antenne de réception Rx1,Rx2,Rx3,Rx4. Cette séquence est répétée pour chaque antenne d'émission Tx2,Tx3,Tx4,Tx5.
- [0035] La zone de recherche de cible peut être une zone en deux ou trois dimensions.
- [0036] Le radar peut être mobile, par exemple embarqué sur un véhicule, pour couvrir différentes zones du sol.
- [0037] L'invention est mise en œuvre par un radar du type de la figure 1.
- [0038] La figure 2 illustre les principales étapes du procédé de détection de cibles selon l'invention.
- [0039] La première étape 201 consiste à acquérir les signaux lors d'une séquence d'émission-réception telle que décrite ci-dessus.
- [0040] La séquence d'acquisition réalise un balayage en fréquence selon un ensemble de fréquences prédéfini. Autrement dit les séquences d'émission-réception sur l'ensemble des antennes sont répétées pour plusieurs fréquences définissant une bande de fréquences à analyser.
- [0041] La séquence d'acquisition peut être séquentielle à l'émission comme décrit ci-dessus mais peut aussi être réalisée en émettant simultanément plusieurs signaux orthogonaux sur toutes les antennes d'émission de sorte à réaliser directement une acquisition simultanée des différents échos de chaque antenne émettrice pour une fréquence donnée.
- [0042] Par ailleurs le balayage en fréquences successives peut être remplacé par l'utilisation d'une forme d'onde de type OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) qui permet de coder en émission les signaux par répartition sur des canaux fréquentiels orthogonaux sous forme de multiples sous-porteuses. La largeur des canaux ou sous-bandes et leur espacement peut être paramétré. Ces paramètres peuvent varier pour chaque sous-bande selon le rapport signal à bruit propre à cette sous-bande.
- [0043] A partir des signaux reçus, une étape 202 d'estimation de matrices de canal est réalisée. L'acquisition des signaux est déclenchée de manière synchrone avec l'émission. Après acquisition, les signaux sont transposés en bande de base puis démodulés via une démodulation OFDM.

- [0044] Après démodulation OFDM, une estimation de canal est réalisée sur chaque sous-porteuse, par exemple en corrélant les symboles reçus avec les symboles connus émis sur cette sous-porteuse.
- [0045] L'estimation de canal est réalisée sur plusieurs symboles OFDM en moyennant de façon cohérente le résultat pour réduire l'impact du bruit thermique ou des interférences.
- [0046] Une estimation de canal est réalisée pour chaque canal de propagation défini par une liaison entre une antenne d'émission T_{xi} et une antenne de réception R_{xj} mais aussi pour chaque sous-bande de fréquence.
- [0047] La réponse en fréquence complète est obtenue par concaténation des réponses de chaque sous-bande.
- [0048] Ainsi, à l'issue de l'étape 202, on obtient un ensemble de matrices de canal $H_r(f)$, pour plusieurs fréquences, chaque matrice ayant une dimension égale au nombre d'antennes de réception par le nombre d'antennes d'émission.
- [0049] On peut écrire l'expression de la matrice de canal estimée en réception en fonction de la fréquence au moyen de la relation suivante :
- [0050]
$$H_r(f) = \sum_{k=0}^{K-1} H(f, p_k) + n(f) \quad (1)$$
- [0051] $H(f, p_k)$ est la matrice de canal, hors bruit, pour la fréquence f et une cible située en position $p_k = \{x_k, y_k, z_k\}$. K est le nombre de cibles pour lesquelles un écho est reçu. $n(f)$ désigne la matrice de bruit pour la fréquence f .
- [0052] L'invention est notamment basée sur une modélisation particulière de la matrice de canal telle que détaillée ci-dessous, qui prend en compte les pertes diélectriques dans le milieu dont est constitué le sol.
- [0053] La matrice de canal hors bruit $H(f, p_k)$ peut s'exprimer à l'aide de la relation suivante, où \odot est l'opérateur de multiplication termes à termes entre deux matrices.
- [0054]
$$H(f, p_k) = A(f, p_k, L) \odot U(f, p_k, L) \quad (2)$$
- [0055] $U(f, p_k, L)$ est la matrice des retards de propagation dont les éléments (i, j) s'expriment à l'aide de la relation suivante :
- [0056]
$$U[i, j](f, p_k, L) = e^{\sqrt{-1} * 2\pi \frac{f}{v\sqrt{2}} d(p_k^{i, j}) \sqrt{\sqrt{1+L^2} + 1}} \quad (3)$$
- [0057] $\sqrt{-1}$ désigne l'unité imaginaire.
- [0058] v est la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu traversé par l'onde supposé homogène. Selon le positionnement du radar, le milieu traversé est en partie constitué par l'air et par les couches du sol ou uniquement par les couches du sol si les antennes d'émission sont positionnées directement contre la surface du sol.
- [0059] $d(p_k^{i, j})$ est la somme des distances respectives entre l'antenne d'émission d'indice i

et la cible en position p_k d'une part et cette cible et l'antenne de réception d'indice j d'autre part.

[0060] L est un coefficient de pertes qui dépend du milieu traversé par l'onde. Selon le milieu (terre, sable, roche) dont le sol est constitué, l'onde émise subit des atténuations plus ou moins importantes qu'il convient de prendre en compte pour modéliser correctement la matrice de canal.

[0061] La matrice $A(f, p_k, L)$ représente la matrice des amplitudes des échos réfléchis sur la cible. Cette matrice intègre les pertes dans le milieu, les gains d'antennes et la surface équivalente radar de la cible.

[0062] Cette matrice est exprimée à l'aide de la relation suivante :

$$[0063] A(f, p_k, L) = \gamma(f, p_k) \odot G_t(f, p_k) \odot G_r(f, p_k) \odot B_0(f, p_k) \odot B_1(f, p_k, L) \quad (4)$$

[0064] $\gamma(f, p_k)$ modélise la surface équivalente radar de la cible à la position p_k .

[0065] $G_t(f, p_k)$ modélise le diagramme d'antenne d'émission dans la direction de la position de la cible.

[0066] $G_r(f, p_k)$ modélise le diagramme d'antenne de réception dans la direction de la position de la cible.

[0067] Les deux matrices $G_t(f, p_k)$ et $G_r(f, p_k)$ sont connues et sont déterminées à partir des caractéristiques des antennes.

[0068] $B_0(f, p_k)$ et $B_1(f, p_k, L)$ sont deux matrices qui modélisent ensemble les pertes de propagation des ondes sphériques dans le sol.

$$[0069] B_0[i, j](f, p_k) = \frac{v}{4\pi\sqrt{4\pi}f d_{\Pi}(p_k^{i,j})} \quad (5)$$

[0070] $d_{\Pi}(p_k^{i,j})$ est le produit des distances respectives entre l'antenne d'émission d'indice i et la cible en position p_k d'une part et cette cible et l'antenne de réception d'indice j d'autre part.

$$[0071] B_1[i, j](f, p_k, L) = e^{\frac{2\pi f}{v\sqrt{2}}d(p_k^{i,j})\sqrt{\sqrt{1+L^2}-1}} \quad (6)$$

[0072] L'invention se différencie notamment des méthodes de l'état de l'art par la prise en compte du coefficient de pertes L dans le milieu du sol.

[0073] Un objectif de la méthode de détection par traitement radar, selon l'invention, est de déterminer la position d'une cible ayant connaissance de la réponse fréquentielle de la zone surveillée.

[0074] Ainsi, la troisième étape 203 du procédé selon l'invention consiste à réaliser un test de détection de cible à partir de la modélisation du canal de propagation introduite ci-dessus, des matrices de canal déterminées à l'étape 202 et en considérant un problème de détection à deux hypothèses H_0 et H_1 . H_0 correspond à une hypothèse d'absence de cible et H_1 correspond à une hypothèse de présence de cible.

[0075] La matrice de canal peut être exprimée sous les deux hypothèses à l'aide des relations suivantes :

$$[0076] \quad H_0 : H(f, p_k) = n(f) \quad (7)$$

$$[0077] \quad H_1 : H(f, p_k) = A(f, p_k, L) \odot U(f, p_k, L) + n(f) \quad (8)$$

[0078] Sous l'hypothèse d'un bruit blanc non corrélé, on peut exprimer les log-rapports de vraisemblance de la matrice de canal sous chacune des deux hypothèses via les relations suivantes :

$$[0079] \quad \log Pr(H_r | H_0) \propto - \sum_f |H_r(f)|^2 \quad (9)$$

$$[0080] \quad \log Pr(H_r | H_1) \propto - \sum_f |H_r(f) - A(f, p_k, L) \odot U(f, p_k, L)|^2 \quad (10)$$

[0081] $Pr(H_r | H_0)$ désigne la probabilité que la matrice de canal reçue corresponde à l'hypothèse H_0 .

[0082] $Pr(H_r | H_1)$ désigne la probabilité que la matrice de canal reçue corresponde à l'hypothèse H_1 .

[0083] Le signe \propto signifie « proportionnel à ».

[0084] On utilise le critère de Neyman-Pearson qui a été développé pour maximiser la probabilité de détection tout en assurant une probabilité de fausse alarme donnée. Ce critère consiste à comparer le rapport des vraisemblances des matrices de canal, sous chacune des hypothèses, à un seuil λ prédéterminé. Il s'agit d'un test dit LRT pour « Likelihood Ratio Test ».

[0085] Une cible est détectée lorsque la relation suivante est vérifiée :

$$[0086] \quad \log Pr(H_r | H_0) - \log Pr(H_r | H_1) \leq \lambda \quad (11)$$

[0087] La relation (11) s'écrit aussi sous la forme :

$$[0088] \quad - \sum_f |H_r(f)|^2 + \sum_f |H_r(f) - A(f, p_k, L) \odot U(f, p_k, L)|^2 \leq \lambda \quad (12)$$

[0089] En pratique, les matrices A et U sont inconnues et le log rapport de vraisemblance pour l'hypothèse H_1 ne peut pas être calculé directement.

[0090] Ainsi, on propose d'utiliser un test dit GLRT pour « Generalized Likelihood Ratio Test » consistant à injecter dans le test LRT défini par l'équation (12) une estimation des paramètres inconnus du rapport de vraisemblance pour l'hypothèse H_1 au sens du maximum de vraisemblance.

[0091] Le test défini à l'équation (11) devient alors :

$$[0092] \quad \log Pr(H_r | H_0) - \max_{A, U} \log Pr(H_r | H_1) \leq \lambda \quad (13)$$

[0093] La figure 3 détaille les étapes nécessaires à la réalisation du test de détection 203.

[0094] La première étape 301 consiste à estimer les paramètres inconnus, c'est-à-dire la position de la cible et sa surface équivalente radar, ainsi que le coefficient de pertes L, au sens du maximum de vraisemblance.

[0095] En l'absence de connaissance de la position exacte de la cible, la zone ou l'espace d'observation est discrétisé sous forme d'une grille G ayant un pas prédéfini (cf figure 1). Une détection est déclarée pour toute case de la grille validant le test sous l'hypothèse H_1 .

[0096] L'estimateur du maximum de vraisemblance des paramètres γ et p est obtenu en recherchant le minimum de la fonction suivante :

$$[0097] \quad \min_{\gamma, p} \sum_f |H_r(f) - A(f, p_k, L) \odot U(f, p_k, L)|^2 \quad (14)$$

[0098] En effet la minimisation de la fonction donnée par la relation (14) est équivalente à la maximisation du log rapport de vraisemblance $\log Pr(H_r|H_1)$ (tel que défini à l'équation (13)).

[0099] En développant la relation (14) à partir du modèle des matrices A et U (relations (3) et (4)), l'étape 301 consiste à rechercher le minimum d'une fonction $g(\gamma, p_k, L, f)$, la fonction g étant définie à partir de la relation (14).

$$[0100] \quad g(\gamma, p_k, L, f) = \sum_f (|\gamma(f)|^2 Tr(M(f, p_k, L)M(f, p_k, L)^H) - \gamma(f)^* Tr(H_r(f)M(f, p_k, L)^H) + \gamma(f) Tr(M(f, p_k, L)H_r(f)^H)) \quad (15)$$

$$[0101] \quad M(f, p_k, L) = G_i(f, p_k) \odot G_r(f, p_k) \odot B_0(f, p_k) \odot B_1(f, p_k, L) \odot U(f, p_k, L) \quad (16)$$

[0102] La fonction g peut présenter plusieurs minima locaux dans l'espace défini par les trois paramètres (γ, p_k, L) .

[0103] Une première variante de l'invention consiste à rechercher plusieurs minima locaux (par exemple les N minima prépondérants, avec N un entier prédéfini) qui correspondront chacun à une cible potentielle.

[0104] Une autre variante de l'invention consiste à se limiter à la recherche d'un seul minimum local (le plus important), le procédé décrit aux figures 2 et 3 étant appliqué pour la recherche d'une seule cible.

[0105] La recherche d'un ou plusieurs minima locaux peut être réalisée par une fonction d'optimisation à la disposition de l'Homme du métier, par exemple une des fonctions de résolution numérique décrites dans l'une des références [7],[8],[9].

[0106] Une autre solution moins couteuse en opérations, consiste à effectuer cette recherche en plusieurs étapes.

[0107] Tout d'abord, on différencie la fonction g par rapport à la variable $\gamma(f)$, en recherchant la valeur de $\gamma(f)$ qui est solution de l'équation suivante :

$$[0108] \quad \frac{\partial g(\gamma, p_k, L, f)}{\partial \gamma(f)} = 0 \quad (17)$$

[0109] Une solution de l'équation (17) est donnée par :

$$[0110] \quad \gamma(f) = \sum_f \frac{Tr(H_r(f)M(f, p_k, L)^H)}{Tr(M(f, p_k, L)M(f, p_k, L)^H)} \quad (18)$$

[0111] Ainsi une estimée de la surface équivalente radar peut être calculée à partir de la

relation (18) en réalisant une corrélation normalisée entre la matrice de canal reçue et la matrice M définie par l'équation (16).

[0112] L'estimée de $\hat{p}(f)$ est calculée à l'aide de la relation (18) pour un ensemble d'hypothèses de position p_k et de coefficient de pertes L.

[0113] Par exemple, les positions p_k varient sur l'ensemble des positions de la grille G superposée à la zone à analyser. Ces positions peuvent être définies en deux ou en trois dimensions.

[0114] De même les valeurs du coefficient L peuvent être choisies parmi plusieurs hypothèses en tenant compte de la connaissance a priori de la composition du sol.

[0115] Ensuite, pour chaque estimée de $\hat{p}(f)$ calculée, on détermine la valeur de $g(\hat{p}(f))$.

[0116] Ensuite on retient la valeur minimale de $g(\hat{p}(f))$ parmi celles calculées avec les estimées de p_k et L correspondantes.

[0117] L'étape 301 peut être affinée par itérations successives en redéfinissant, à chaque itération, une nouvelle grille G2 de pas plus fin autour de l'estimée de la position p_k obtenue à l'itération précédente tel qu'illustré à la figure 4.

[0118] A l'issue de l'étape 301 on obtient une (ou plusieurs) estimée de $g(\hat{p}(f))$ qui est ensuite utilisée pour réaliser un test de détection via l'équation (13).

[0119] Pour cela, dans une étape 302, on calcule la vraisemblance de la matrice de canal reçue sous l'hypothèse H_1 . Ce calcul est en fait directement donné par la valeur de l'estimée de $g(\hat{p}(f))$.

[0120] Dans une étape 303 on calcule la vraisemblance de la matrice de canal reçue sous l'hypothèse H_0 . Ce calcul est réalisé en calculant le terme $\sum_f |H_r(f)|^2$ qui

correspond à la somme ou à la moyenne, sur l'ensemble des fréquences, du module au carré de la matrice de canal. Il correspond à l'énergie en fréquence de la matrice de canal. L'opérateur de norme d'une matrice complexe est défini par la trace du produit de la matrice et de la matrice transposée conjuguée :

[0121] $|H_r(f)|^2 = \text{trace}(H_r(f) H_r(f)^h)$, où h est l'opérateur Hermitien et $\text{trace}()$ désigne la trace d'une matrice.

[0122] Enfin, dans une étape 304, on réalise le test de vraisemblance de l'équation (13) en comparant la différence entre les termes respectivement calculés aux étapes 302 et 303, à un seuil de détection λ .

[0123] En variante, la vitesse v de propagation de l'onde dans les milieux traversés, peut être estimée par une méthode externe ou bien peut être considérée comme une variable supplémentaire du problème de minimisation.

[0124] La figure 5 schématise une variante de réalisation de l'invention adaptée à la détection de multiples cibles.

[0125] Dans cette variante, le procédé de détection de cible décrit aux figures 2 et 3 est

appliqué pour rechercher une seule cible (étape 501), c'est-à-dire la cible ayant l'écho prépondérant.

- [0126] Ensuite, dans une étape 502, on applique un algorithme d'annulation d'écho aux signaux reçus (ou directement à la matrice de canal $H_r(f)$) pour annuler la contribution des réflexions du signal sur la cible détectée à l'étape 501. Un algorithme possible est l'algorithme connu sous l'acronyme CLEAN par exemple décrit dans la référence [3].
- [0127] Les itérations sont arrêtées via un critère d'arrêt 503 qui peut consister en un nombre d'itérations fixe ou en un critère dépendant de la surface équivalente radar ou de l'énergie des échos des cibles détectées. Le critère peut aussi être défini à partir d'une différence d'énergie ou de surface équivalente radar entre deux cibles détectées à deux itérations successives.
- [0128] Dans une variante de réalisation, l'image de la zone analysée est fournie en entrée d'un algorithme d'optimisation 504 pour améliorer la précision de l'image. L'algorithme d'optimisation est, par exemple, choisi parmi ceux décrits dans les références [7], [8] ou [9]. L'algorithme peut être basé sur la méthode du gradient stochastique.
- [0129] La méthode décrite à la figure 5 basée sur l'annulation d'échos par itérations successives présente cependant certains inconvénients.
- [0130] Tout d'abord, l'annulation de la contribution d'une cible n'est jamais parfaite et introduit donc des effets parasites. C'est particulièrement vrai lorsque plusieurs échos sont reçus avec des dynamiques très différentes, par exemple parce que les différentes cibles sont éloignées les unes des autres.
- [0131] Ensuite, l'hypothèse de base pour la détection d'une cible via un test sous deux hypothèses tel que décrit précédemment, est que la statistique du bruit correspond à un bruit blanc additif Gaussien. Dans le cas de plusieurs cibles, cette hypothèse n'est plus vraie ce qui amène à des biais dans l'algorithme de détection.
- [0132] Pour pallier ces inconvénients, on propose une variante de réalisation de l'invention décrite aux figures 6 et 7.
- [0133] Cette variante consiste à appliquer un filtre sous forme de fenêtrage temporel aux matrices de canal afin de traiter séparément différentes sous-zones de la zone du sol à analyser et ainsi de s'affranchir des problèmes de dynamique.
- [0134] Les étapes supplémentaires mises en œuvre dans cette variante sont illustrées à la figure 7. Si on note h un vecteur constitué de l'estimée du canal de propagation en fréquence pour un couple d'antennes d'émission et de réception, ce vecteur est converti dans le domaine temporel via une transformée de Fourier inverse IFFT (étape 701). Ensuite, un filtre est appliqué dans le domaine temporel (étape 702) à la réponse temporelle du canal. Le filtre w modélise une fenêtre temporelle, il est par exemple de la forme $w=[0,0,0,\dots,0,1,1,0,0,0]$, le nombre de 1 consécutifs et leur position dans le

filtre permettant de définir une tranche de la zone du sol à analyser en profondeur (dans la direction principale de propagation de l'onde). Sans sortir du cadre de l'invention, tout type de fenêtre peut être utilisée, par exemple une fenêtre de Hanning, ou encore une fenêtre de Blackman-Harris.

- [0135] Après filtrage, le résultat est converti (étape 703) dans le domaine fréquentiel via une transformée de Fourier directe puis le nouveau vecteur fréquentiel obtenu est utilisé pour constituer la matrice de canal $H_i(f)$ en entrée du procédé de détection selon l'une des variantes décrites précédemment. Le processus décrit à la figure 7 est appliqué pour chaque canal de propagation reliant l'une des antennes d'émission à l'une des antennes de réception.
- [0136] Le procédé de détection, dans son intégralité, est itéré pour plusieurs fenêtres temporelles différentes, par exemple en faisant varier les fenêtres sur l'intégralité de la zone à analyser en permutant circulairement à chaque itération le filtre w de $p/2$ positions où p est égal au nombre de 1.
- [0137] La figure 6 schématise, sur un diagramme, un exemple de réponse temporelle 601 d'un canal de propagation entre une antenne d'émission et une antenne de réception. Sur le même diagramme, on a représenté plusieurs fenêtres temporelles disposées en quinconce et correspondant à plusieurs itérations du procédé décrit ci-dessus.
- [0138] L'application de fenêtres temporelles permet de s'affranchir des problèmes de dynamique et d'analyser le sol par couches successives. Cette méthode permet de détecter des cibles dont l'écho est faible (par exemple du fait d'une cible profonde) dans une scène avec la présence d'échos forts espacés en profondeur.
- [0139] La méthode proposée permet, en plus de détecter la position d'une cible, d'estimer les pertes de propagation dans le milieu du sol et la surface équivalente radar de la cible. Ces informations peuvent servir à caractériser les sols ou la nature de la cible.
- [0140] La figure 8 schématise un exemple de radar à pénétration de sol configuré pour mettre en œuvre l'invention.
- [0141] Le radar est constitué d'un émetteur EM et d'un récepteur REC, chacun pourvu d'au moins une antenne A1, A2.
- [0142] L'émetteur EM comporte un générateur d'une séquence de bits ou symboles GEN, un modulateur OFDM MOD, un convertisseur de fréquence RF1 pour transposer le signal vers une fréquence porteuse et un amplificateur AMP.
- [0143] Le récepteur REC comporte un convertisseur de fréquence RF2 pour transposer le signal reçu en bande de base, un démodulateur OFDM DEMOD et une unité de traitement constituée d'une module d'estimation de canal EST qui détermine les matrices de canal à partir des signaux démodulés et de la séquence émise par le générateur GEN, un intégrateur INT qui réalise une intégration (moyenne) et une concaténation des sous-bandes fréquentielles et un module de détection de cible DET qui

met en œuvre les étapes de traitement décrites précédemment pour réaliser l'un quelconque des modes de réalisation de l'invention.

[0144] Sans sortir du cadre de l'invention, le schéma de la figure 8 est donné à titre purement illustratif et le radar peut comporter d'autres équipements non identifiés à la figure 8.

[0145] Les modules d'estimation de canal EST, d'intégration INT et de détection DET peuvent être réalisés sous forme logicielle et/ou matérielle notamment en utilisant un ou plusieurs processeur(s) et une ou plusieurs mémoire(s). Le processeur peut être un processeur générique, un processeur spécifique, un circuit intégré propre à une application (connu aussi sous le nom anglais d'ASIC pour « Application-Specific Integrated Circuit ») ou un réseau de portes programmables in situ (connu aussi sous le nom anglais de FPGA pour « Field-Programmable Gate Array »).

Références

- [0146] [1] M. Ambrosanio, M. T. Bevacqua, T. Isernia, and V. Pascazio. The tomographic approach to ground-penetrating radar for underground exploration and monitoring : A more user-friendly and unconventional method for subsurface investigation. *IEEE Signal Processing Magazine*.
- [0147] [2] Chin Yuan Chong. Signal processing for MIMO radars : detection under gaussian and non-gaussian environments and application to STAP. In PhD thesis, 2011.
- [0148] [3] J. A. Hogbom. Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines. *AAPS*, 15 :417, Jun 1974.
- [0149] [4] D. H. N. Marpaung and Yilong Lu. A comparative study of migration algorithms for UWB GPR images in SISO-SAR and MIMO-array configurations. In 2014 15th International Radar Symposium (IRS), pages1-4, 2014.
- [0150] [5] Z. Zeng, J. Li, L. Huang, and F. Liu. Improvement of target imaging quality by multi-polarization MIMO GPR. In 2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), pages 119-124, 2012.
- [0151] [6] X. Zhuge and A. G. Yarovoy. Three-dimensional near-field mimo array imaging using range migration techniques. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(6) :3026-3033, 2012.
- [0152] [7] Byrd, R. H., J. C. Gilbert, and J. Nocedal. "A Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming." *Mathematical Programming*, Vol 89, No. 1, 2000, pp. 149–185.
- [0153] [8] Byrd, R. H., Mary E. Hribar, and Jorge Nocedal. "An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming." *SIAM Journal on Optimization*, Vol 9, No. 4, 1999, pp. 877–900.
- [0154] [9] Coleman, T. F. and Y. Li. "An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Mi-

nimization Subject to Bounds.” *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 6, 1996, pp. 418–445.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de détection d'au moins une cible enterrée dans une zone du sol, à l'aide d'un radar à pénétration de sol, le radar comprenant au moins une antenne d'émission et au moins une antenne de réception, le procédé comprenant les étapes de :

- Acquérir (201), sur chaque antenne de réception, une mesure d'un signal émis par chaque antenne d'émission et réfléchi dans la zone du sol,
- Déterminer (202), à partir desdites mesures, une estimée, dans le domaine fréquentiel, du canal de propagation pour chaque couple constitué d'une antenne d'émission et d'une antenne de réception, lesdites estimées étant regroupées dans une matrice de canal ayant une première dimension égale au nombre d'antennes de réception, une seconde dimension égale au nombre d'antennes d'émission et une troisième dimension égale au nombre de fréquences,
- définir une première hypothèse H_0 correspondant à une absence de cible dans la zone du sol, la matrice de canal sous cette première hypothèse étant modélisée par du bruit,
- définir une seconde hypothèse H_1 correspondant à la présence d'au moins une cible dans la zone du sol, la matrice de canal sous cette seconde hypothèse étant modélisée par un modèle de canal de propagation dépendant au moins des caractéristiques des antennes d'émission et des antennes de réception et des pertes de propagation du signal dans le sol,
- réaliser (203) un test du rapport de vraisemblance entre la vraisemblance de la matrice de canal sous la seconde hypothèse H_1 et la vraisemblance de la matrice de canal sous la première hypothèse H_0 , pour conclure à la présence d'une cible en une position donnée dans la zone du sol.

[Revendication 2]

Procédé de détection selon la revendication 1 dans lequel l'étape de réaliser un test du rapport de vraisemblance entre la première hypothèse H_0 et la seconde hypothèse H_1 comprend les sous-étapes de :

- Déterminer (301) au moins un estimateur du maximum de vraisemblance de la position et de la surface équivalente radar

d'une cible, sous la seconde hypothèse H1,

- Déterminer (302) la vraisemblance de la matrice de canal sous la seconde hypothèse H1 pour chaque estimateur,
- Déterminer (303) la vraisemblance de la matrice de canal sous la première hypothèse H0,
- comparer (304) le ratio entre les deux vraisemblances à un seuil de détection prédéterminé pour en déduire la présence ou l'absence d'une cible pour chaque position estimée.

[Revendication 3] Procédé de détection selon la revendication 2 dans lequel l'étape de déterminer (301) au moins un estimateur du maximum de vraisemblance de la position et de la surface équivalente radar d'une cible, sous la seconde hypothèse H1 est réalisée en recherchant au moins un extremum d'une fonction de trois variables dépendant de la position d'une cible dans la zone du sol, de la surface équivalente radar d'une cible et d'un coefficient de pertes de transmission du signal dans la zone du sol.

[Revendication 4] Procédé de détection selon la revendication 3 dans lequel la recherche d'au moins un extremum de ladite fonction de trois variables est réalisée en :

- déterminant un estimateur du maximum de vraisemblance de la surface équivalente radar en calculant une corrélation normalisée entre la matrice de canal et une matrice de pertes incluant les fonctions de transfert des antennes d'émission et de réception, les pertes de propagation du signal dans l'espace libre et dans la zone du sol,
- recherchant au moins un extremum selon la position et le coefficient de pertes de ladite fonction évaluée pour la surface équivalente radar estimée.

[Revendication 5] Procédé de détection selon la revendication 4 dans lequel la vraisemblance de la matrice de canal sous la seconde hypothèse H1 est déterminée par un extremum de ladite fonction.

[Revendication 6] Procédé de détection selon l'une des revendications 2 à 5 dans lequel la vraisemblance de la matrice de canal sous la première hypothèse H0 est déterminée au moins en calculant l'énergie de la matrice de canal.

- [Revendication 7] Procédé de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel une position de cible est recherchée dans une grille (G1,G2) en deux ou trois dimensions ayant un pas initial défini, le procédé étant itéré sur plusieurs itérations en réduisant la zone et le pas initial à chaque itération.
- [Revendication 8] Procédé de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes comprenant les étapes de :
- Convertir (701) les estimées de canal de propagation pour chaque couple constitué d'une antenne d'émission et d'une antenne de réception, dans le domaine temporel,
 - Appliquer (702) un filtre aux estimées sous la forme d'un fenêtrage temporel,
 - Convertir (703) les estimées filtrées dans le domaine fréquentiel,
 - Regrouper les estimées filtrées dans une matrice de canal
- [Revendication 9] Procédé de détection selon la revendication 8 dans lequel le fenêtrage temporel est défini de manière à filtrer les contributions des signaux correspondant à un intervalle de distance entre le radar et la zone du sol.
- [Revendication 10] Procédé de détection selon la revendication 9, le procédé étant répété pour plusieurs filtres différents de manière à couvrir toute la zone du sol.
- [Revendication 11] Procédé de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes comprenant en outre une étape d'annulation (501) de la contribution d'une cible détectée dans les mesures de signaux acquis, par exemple au moyen d'un algorithme d'annulation d'écho, le procédé étant itéré sur plusieurs itérations successives, en annulant à chaque nouvelle itération l'écho de la cible détectée à l'itération précédente.
- [Revendication 12] Radar à pénétration de sol comprenant au moins une antenne d'émission et au moins une antenne de réception et un dispositif de détection d'au moins une cible enterrée dans une zone du sol configuré pour exécuter les étapes du procédé de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes.
- [Revendication 13] Programme d'ordinateur comportant des instructions pour l'exécution du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, lorsque le programme est exécuté par un processeur.
- [Revendication 14] Support d'enregistrement lisible par un processeur sur lequel est en-

registré un programme comportant des instructions pour l'exécution du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, lorsque le programme est exécuté par un processeur.

[Fig. 1]

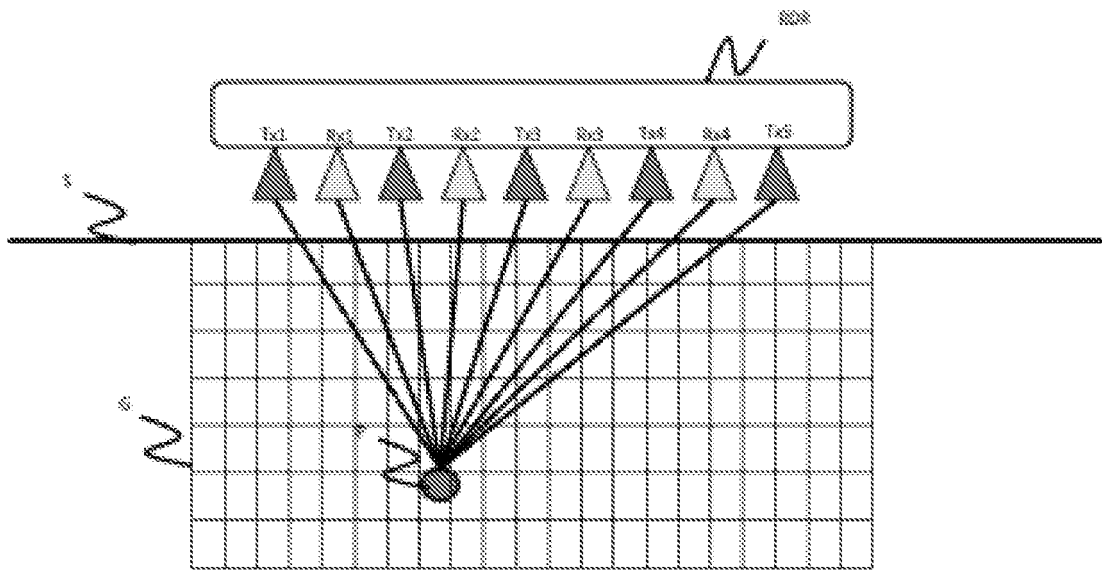


FIG 1

[Fig. 2]

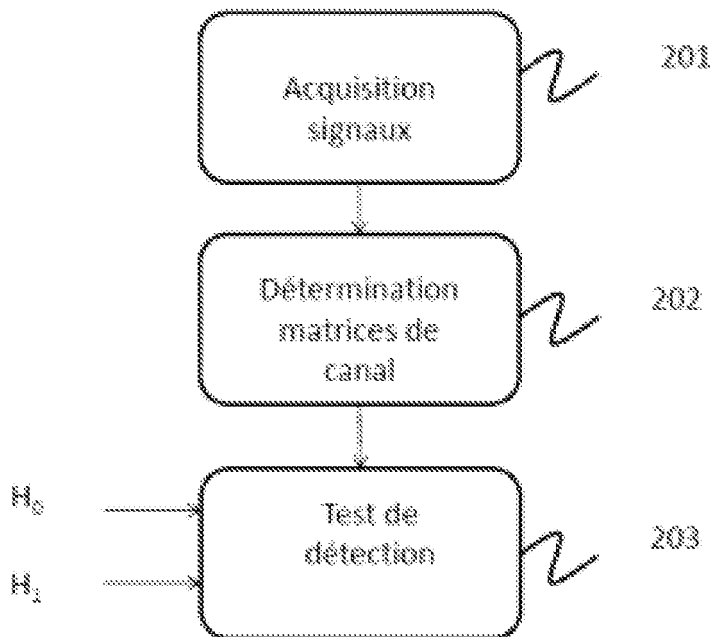


FIG 2

[Fig. 3]

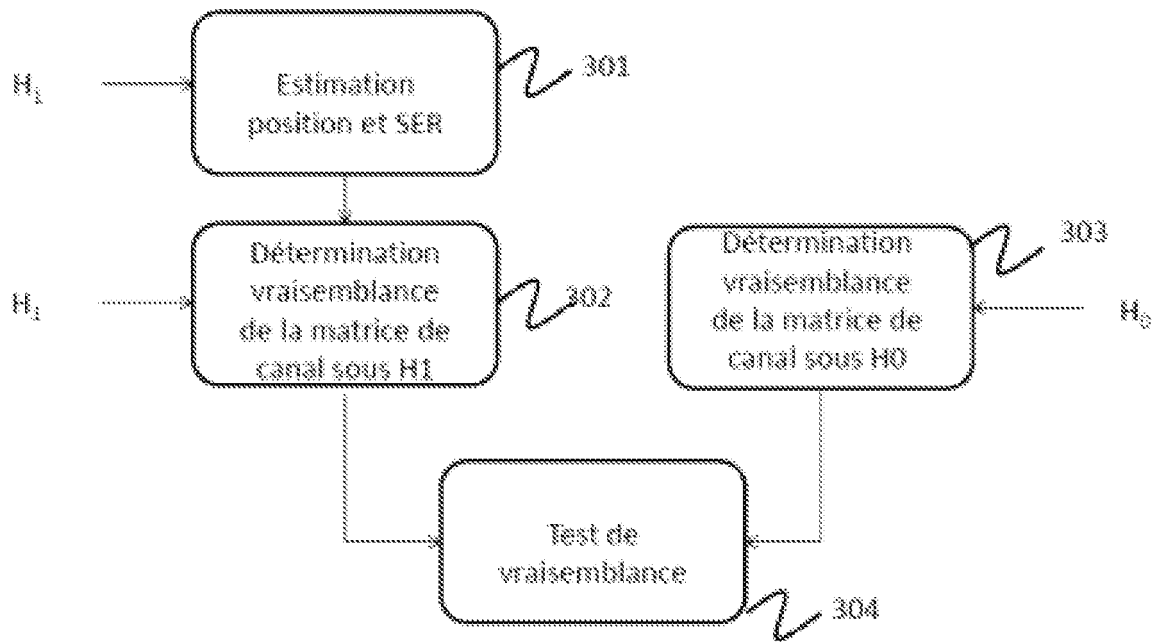


FIG 3

[Fig. 4]

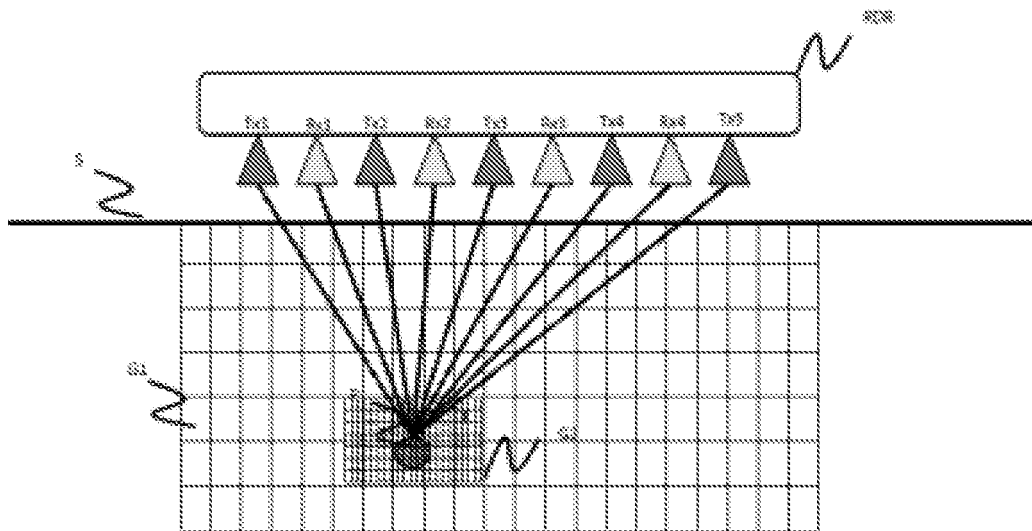


FIG 4

[Fig. 5]

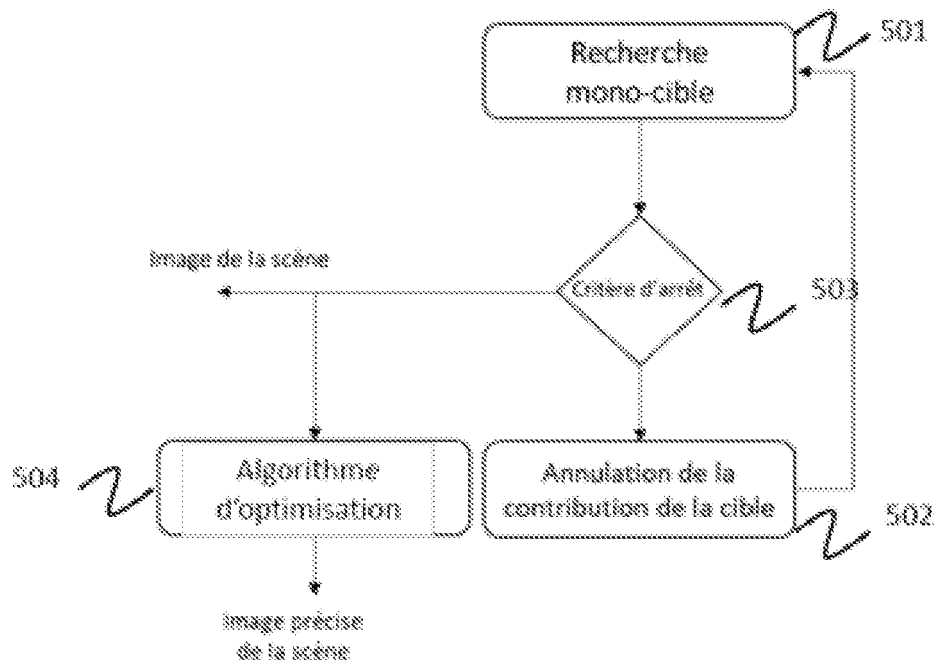


FIG 5

[Fig. 6]

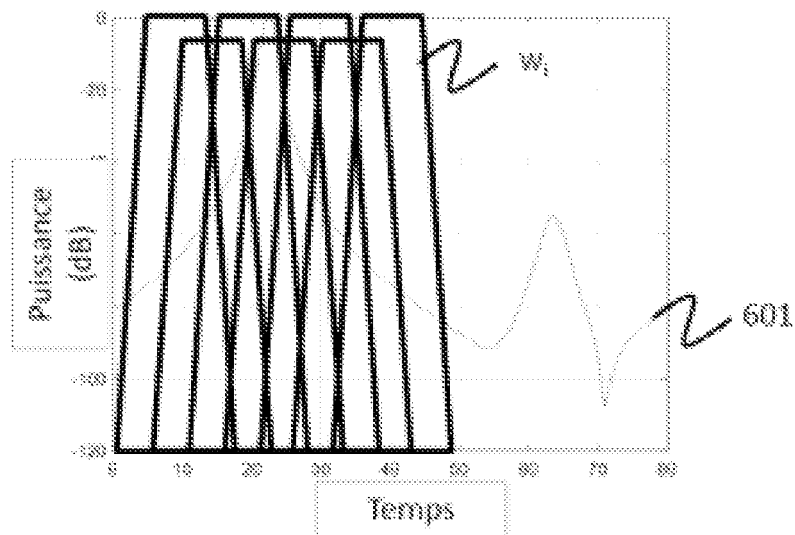


FIG 6

[Fig. 7]

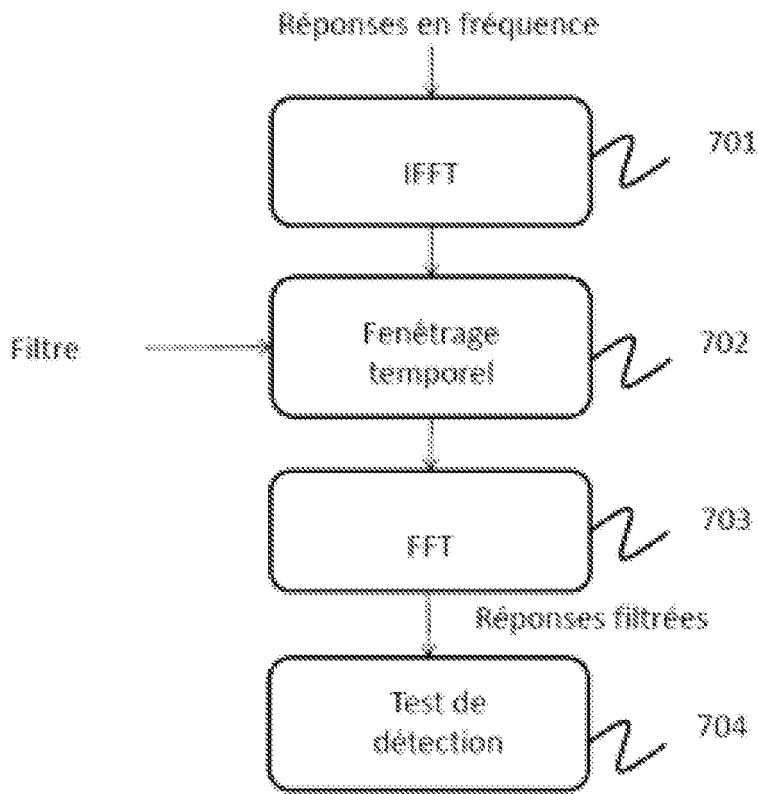


FIG 7

[Fig. 8]

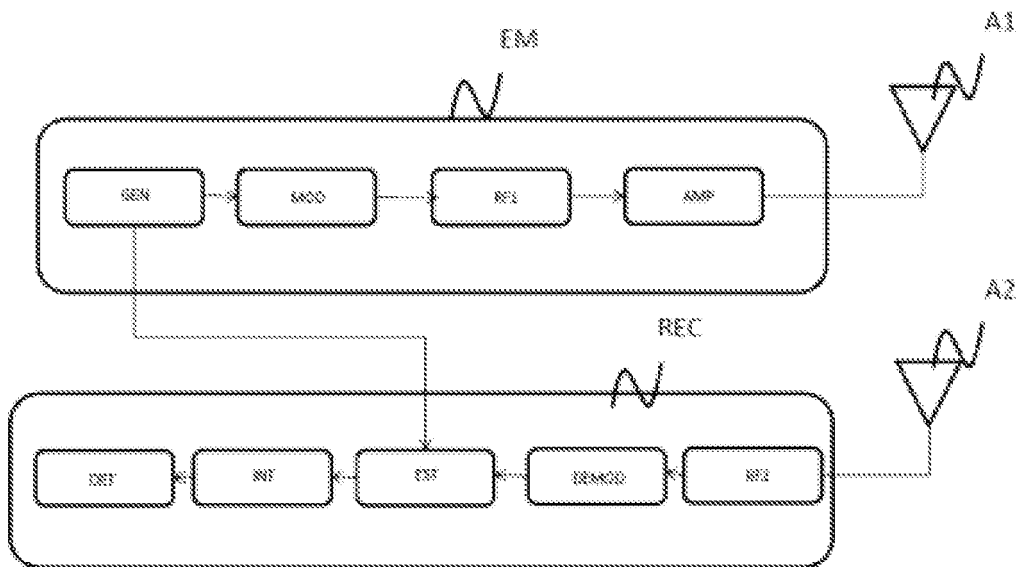


FIG 8

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

HO K C ET AL: "A Linear Prediction Land Mine Detection Algorithm for Hand Held Ground Penetrating Radar",
IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US,
vol. 40, no. 6, 1 juin 2002 (2002-06-01),
XP011073152,
ISSN: 0196-2892

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

HO K C ET AL: "An Investigation of Using the Spectral Characteristics From Ground Penetrating Radar for Landmine/Clutter Discrimination",
IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US,
vol. 46, no. 4, 1 avril 2008 (2008-04-01),
pages 1177-1191, XP011206371,
ISSN: 0196-2892

US 10 175 350 B1 (TSOKOS CHRIS P [US] ET AL) 8 janvier 2019 (2019-01-08)

PAMBUDI AFIEF D ET AL: "Minimax Robust Landmine Detection Using Forward-Looking Ground-Penetrating Radar",
IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US,
vol. 58, no. 7, 24 juin 2020 (2020-06-24),
pages 5032-5041, XP011794961,
ISSN: 0196-2892, DOI:
10.1109/TGRS.2020.2971956
[extrait le 2020-06-23]

HOARAU Q ET AL: "Robust adaptive detection of buried pipes using GPR",
SIGNAL PROCESSING,
vol. 132, 1 mars 2017 (2017-03-01), pages
293-305, XP029809654,
ISSN: 0165-1684, DOI:
10.1016/J.SIGPRO.2016.07.001

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT

