

⑮ Lidar statique à grand champ de vue.

⑲ Date de dépôt : 21.12.21.

⑳ Priorité :

⑳ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

㉑ Demandeur(s) : *CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public —
FR et UNIVERSITE PARIS-SACLAY Etablissement
public — FR.*

㉒ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 23.06.23 Bulletin 23/25.

㉓ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 22.03.24 Bulletin 24/12.

㉔ Inventeur(s) : CROMIERES Jean-Paul.

㉕ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

㉖ Titulaire(s) : *CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public,
UNIVERSITE PARIS-SACLAY Etablissement public.*

㉗ Mandataire(s) : IPAZ.



Description

Titre de l'invention : Lidar statique à grand champ de vue

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention concerne le domaine des lidars réalisant une mesure par temps de vol (« time of flight » en anglais ou TOF), et plus particulièrement des lidars présentant un champ de vue supérieur à 5°. On s'intéresse ici aux lidars statiques (sans pièces mécaniques en mouvement) faible consommation, petites dimensions et bas coût. Ce type de lidar trouve par exemple des applications dans la détection d'obstacles.

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0002] Un lidar (Light Detection And Ranging) est un appareil servant à la mesure de distance par mesure de temps de vol d'une impulsion lumineuse.

[0003] Il émet pour cela une impulsion lumineuse de forte puissance et de courte durée (typiquement quelques ns), et récupère un temps plus tard une impulsion réfléchie/rétrodiffusée sur un obstacle. Connaissant la vitesse de propagation de la lumière, la distance est déduite de ce retard, appelé temps de vol. Elle est calculée selon la formule

$$[0004] \quad d = \frac{cR}{2} \quad (1)$$

[0005] dans laquelle $c = 3,10^8 m/s$ est la vitesse de la lumière, R le retard lié à la distance d entre l'émetteur et l'obstacle. Ainsi, pour un obstacle distant de 1m, il est admis que le retard est de 6.67 ns.

[0006] Le lidar est constitué :

[0007] -d'un émetteur d'impulsions optiques (diode laser ou diode électroluminescente), contrôlé par un composant logique de type microprocesseur, microcontrôleur ou FPGA

[0008] -d'un récepteur optoélectronique dont le rôle est la conversion de l'impulsion réfléchie en signal électrique dans le respect de qualité de mesure, en particulier en maximisant le rapport signal à bruit de mesure, noté S/N

[0009] -d'un organe de traitement du signal électrique fourni par le récepteur pour en déduire la distance de l'obstacle. Cet organe peut être un convertisseur temps-distance, ou « *Time to Distance Convert* » (TDC), ou un système de traitement numérique du signal à base de microprocesseur, microcontrôleur ou FPGA.

[0010] Typiquement dans le cas de l'utilisation d'un émetteur à diode laser, la puissance optique émise peut aller jusqu'à quelques dizaines de watts sur une durée de quelques nanosecondes. Les ordres de grandeurs de puissances reçues issues des échos sont typiquement de quelques nanowatts à quelques centaines de milliwatts. Le fond lumineux peut varier de la puissance nulle pour le noir complet jusqu'à 1kW/m² (120klux) en cas de plein soleil. Ainsi, un éclairage de 10W/m² correspondant à un

éclairage artificiel moyen éclairant une photodiode silicium de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ engendrera un courant de photo génération d'environ $500 \mu\text{A}$, le plein soleil un courant d'environ 20 mA .

- [0011] Les lidars sont utilisés pour mesurer des distances, cartographier des surfaces, détecter des objets. On distingue plusieurs types de lidars :
- [0012] Le lidar 1D, souvent à champ étroit, présente un faisceau lumineux impulsionnel émis de faible ouverture (lidar faible champ de vision - *Field Of View – FOV*). Il mesure la distance d'un point précis, où est situé l'objet. Les composants optoélectroniques (diode d'émission de faisceau, photodiode de réception) sont alors souvent associés à des composants optiques (lentilles, filtres,...) pour la collimation et la focalisation des faisceaux. Ces lidars 1D à champ étroit (typiquement moins de 3°) et courte portée sont commercialisés pour des applications de détection d'obstacles dans les applications légères d'objets à déplacement autonome ou semi autonome tels que les drones ou robots au sens large (aspirateurs et tondeuses autonomes, véhicules radiocommandés à détection d'obstacles ...). Ils ont supplanté les traditionnels télémètres à ultrasons dont le champ est beaucoup plus large et dont on ne sait pas exactement quel objet va constituer son premier obstacle détecté.
- [0013] Les lidars 1D ont l'avantage d'être relativement peu encombrants et faible cout mais présentent un inconvénient majeur qui est un champ de vision étroit, inférieur à 3° (Safran LRF3013, Benewake TF02).
- [0014] Le besoin de détection d'obstacle nécessitant un champ d'observation large, ce rôle est plutôt assuré actuellement par l'utilisation de lidars 3D à technologie scan. Le faisceau impulsionnel est également de faible ouverture, mais couplé à un système de balayage mécanique pour irradier toute une portion de l'espace: plusieurs tirs dirigés vers plusieurs endroits sont nécessaires pour réaliser une cartographie. Les lidars 3D permettent d'établir une cartographie précise de l'environnement par l'utilisation de systèmes mécaniques plus ou moins complexes ou encore par l'utilisation de MEMS (Micro Electro Mechanic Systems). Ils sont efficaces mais possèdent l'inconvénient d'être surdimensionnés au regard des applications légères, en termes de :
 - [0015] -Volume de données : une cartographie précise nécessite un traitement lourd de données dont il est possible d'imaginer que toutes ne sont pas à traiter
 - [0016] -Encombrement physique important
 - [0017] -Consommation importante (supérieure au W dans la plupart des cas)
 - [0018] -Fréquence de rafraîchissement des mesures faible (quelques dizaines de Hz)
- [0019] C'est pourquoi dans le domaine des radars de recul nécessitant de détecter des obstacles dans un grand champ de vue, ce sont des dispositifs à caméra et non pas des lidars qui ont supplanté ou complété les capteurs à ultrasons. En effet pour la protection anticollision le champ large d'un capteur à ultrasons est un avantage sur le

lidar traditionnel 3D, qui pour balayer un champ large nécessite d'être monté sur une platine tournante. En outre les capteurs à ultrason sont à priori plus faciles d'utilisation de par la faible vitesse de propagation des ondes acoustiques en regard de celle des ondes électromagnétiques, avec pour conséquence des temps d'échos beaucoup plus longs et simples à mesurer. Ces derniers sont notamment retrouvés dans de nombreuses applications telles anticollision véhicules, la robotique, la détection de présence d'objets ou d'êtres vivants.

- [0020] Cependant les caractéristiques de longueur d'onde et de vitesses de propagation des ondes acoustiques font que les capteurs à ultrasons ont des défauts fondamentaux :
- [0021] -la forte sensibilité aux conditions atmosphériques et environnementales : humidité, pluie, température, bruit, et il est difficile d'obtenir des portées au-delà du mètre avec une sensibilité raisonnable dans ces conditions climatiques,
- [0022] -la présence de lobes secondaires parasites dans le champ de mesure avec risque de fausses détections,
- [0023] -l'insensibilité aux surfaces de faible rugosité (inférieure au mm) vues sous une incidence forte (phénomène de réflexion totale empêchant leur détection).
- [0024] -la difficulté de détection d'objets fins, de petites dimensions ou surface
- [0025] -la lenteur de mesure est une limite à la détection d'obstacles en mouvement relatif par rapport au capteur
- [0026] Un lidar ayant les propriétés de champ large des capteurs à ultrasons, qui éclairerait une scène selon un cône supérieur à 5° , voir 10° ou 20° , permettrait de scruter une large portion de l'espace et de détecter des échos provenant de différents éléments/obstacles présents dans la scène ou champ d'observation, avec une possibilité d'impulsion unique (plus besoin de balayage). De plus un lidar large FOV, quasi insensible à une forte humidité et/ou à la pluie et ayant la possibilité de détecter une surface peinte lisse sous forte incidence, aurait un avantage concurrentiel dans les domaines de l'anticollision encore réservés aux ultrasons. Il pourrait également être utilisé pour le déplacement autonome de robots ou de drones.
- [0027] Mais le champ large n'est pas le domaine naturel du lidar. En effet le flux optique rétrodiffusé décroît avec la distance (d) en d^{-4} pour les petits objets au lieu de décroître en d^{-2} pour un champ étroit, ce qui en limite la portée. En effet la différence se fait sur la densité d'intensité lumineuse incidente. En champ dit « étroit », il est considéré que toute l'énergie incidente est incluse sur la surface de l'obstacle (autrement exprimé, la surface de l'obstacle est supérieure à la surface éclairée suivant l'angle solide) : l'obstacle reçoit l'intégralité de l'énergie de l'émetteur. Chaque point de l'obstacle rétrodiffuse alors de l'énergie vers le récepteur suivant une loi en d^{-2} . Dans le cas d'un champ large, l'obstacle est totalement inclus dans le cône d'éclairement : l'obstacle ne reçoit qu'une partie de l'énergie de l'émetteur suivant une loi en d^{-2} , et rétrodiffuse

cette énergie vers le récepteur également suivant une loi en d^2 , avec au global une énergie sur récepteur en d^4 de l'énergie de l'émetteur.

[0028] En outre les gros objets en arrière-plan masquent les petits en premier plan, pour des raisons expliquées plus loin. La résolution centimétrique est plus difficile à obtenir, les coûts sont à priori plus élevés que pour un capteur à ultrasons.

[0029] Classiquement le récepteur présente une réponse impulsionnelle $hr(t)$ connue, que l'on détermine par mesure ou calcul. Une méthode de traitement d'un signal lidar selon l'état de l'art est d'opérer dans l'espace de Fourier. On numérise le signal en sortie du récepteur et on calcul sa transformée de Fourier, puis on lui applique un filtre $F0(f)$ dont la fonction de transfert est proche de l'inverse de la transformée de Fourier de $hr(t)$:

[0030] $F0(f) = 1/Hr(f)$ avec $Hr(f)$ transformée de Fourier de $hr(t)$.

[0031] Ces méthodes, couramment dénommée blanchiment de spectre au travers d'un filtre blanchisseur, sont largement décrites dans la littérature mais soulèvent de nombreuses difficultés de stabilité et complexité. Elles aboutissent le plus souvent à la nécessité d'utilisation de puissance de calcul élevée, inaccessible à un simple microprocesseur embarqué basse consommation d'énergie. Elles posent en outre des problèmes au niveau du traitement, la présence de bruit introduisant des divisions par zéro dans les calculs.

[0032] Un but de la présente invention est de palier certains des inconvénients précités en proposant une méthode de traitement du signal lidar pour un lidar TOF large champ de vue, permettant de discriminer les éléments/obstacles présents dans la scène éclairée et d'en déterminer la distance, et ce en un seul tir.

DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0033] La présente invention a pour objet une méthode de traitement d'un signal issu d'un lidar, ledit lidar réalisant une mesure d'un temps de vol et comprenant un dispositif d'émission configuré pour émettre des impulsions lumineuses en direction d'une scène selon un angle supérieur ou égal à 5° et un dispositif de réception, ledit dispositif de réception présentant une réponse impulsionnelle et comprenant un photo-détecteur configuré pour recevoir des impulsions réfléchies ou rétrodiffusées par au moins un élément de la scène et pour convertir lesdites impulsions en signal électrique, et un circuit d'amplification configuré pour générer un signal électrique amplifié, la méthode comprenant les étapes consistant à :

- A : numériser ledit signal électrique amplifié
- B : appliquer au moins une fonction temporelle de correction, dénommée filtre correcteur, audit signal électrique amplifié numérisé, de manière à générer un signal traité,

ledit filtre correcteur étant déterminé à partir de ladite réponse impulsionnelle et

d'une fonction d'analyse temporelle prédéterminée, ladite fonction d'analyse présentant au moins une valeur non nulle, dénommée discontinuité, à un instant donné dénommé instant de discontinuité, avec un retour vers des valeurs sensiblement nulles autour de ladite discontinuité,

- C : déterminer une distance (d_i) dudit au moins un élément (E_i) à partir dudit signal traité.

- [0034] Selon un mode de réalisation l'application du filtre correcteur consiste en une convolution du signal électrique amplifié numérisé avec ladite fonction temporelle de correction, ledit filtre correcteur étant déterminé par déconvolution de ladite réponse impulsionnelle par ladite fonction d'analyse prédéterminée.
- [0035] Selon un mode de réalisation une présence dudit au moins un élément dans ladite scène correspond à un maximum local dudit signal traité, et ladite distance associée est déterminée à partir d'une localisation temporelle dudit maximum local.
- [0036] Selon un mode de réalisation ladite réponse impulsionnelle présente un maximum à un instant t_{m-imp} , et ledit au moins un instant de discontinuité de la fonction d'analyse est localisé temporellement au voisinage dudit instant t_{m-imp} .
- [0037] Selon un mode de réalisation la fonction d'analyse présente des valeurs nulles en dehors de ladite au moins une discontinuité.
- [0038] Selon un mode de réalisation une fonction d'analyse présente soit une seule discontinuité, soit deux discontinuités, soit trois discontinuités, localisées respectivement à des instants de discontinuité rapprochés dans le temps.
- [0039] Selon un mode de réalisation on applique une pluralité de filtres correcteurs déterminés à partir d'une pluralité de fonctions d'analyse, de manière à générer une pluralité de signaux traités associés, ladite distance dudit au moins un élément de la scène étant déterminée à partir de ladite pluralité de signaux traités.
- [0040] Selon un mode de réalisation ladite pluralité de filtres correcteurs est appliquée via un processus itératif, jusqu'à ce qu'un signal traité final permette la détermination d'une distance correspondant à l'obstacle le plus proche.
- [0041] Selon un mode de réalisation le processus itératif consiste à modifier des discontinuités, c'est à dire des valeurs non nulles desdites fonctions d'analyse.
- [0042] Selon un mode de réalisation on applique d'abord un filtre correcteur correspondant à une fonction d'analyse présentant une seule discontinuité, puis des fonctions d'analyse présentant deux discontinuités ou trois discontinuités, lesdites discontinuités étant modifiées de manière itérative.
- [0043] Selon un autre aspect l'invention concerne un système lidar par mesure d'un temps de vol comprenant :
- un dispositif d'émission configuré pour émettre des impulsions lumineuses en direction d'une scène selon un angle supérieur ou égal à 5°

- un dispositif de réception présentant une réponse impulsionnelle et comprenant :
 - un photo-détecteur configuré pour recevoir des impulsions réfléchies ou rétrodiffusée par au moins un élément de la scène et pour convertir lesdites impulsions en signal électrique,
 - un circuit d'amplification configuré pour amplifier ledit signal électrique,
- une unité de traitement dudit signal électrique amplifié configurée pour :
 - numériser ledit signal électrique amplifié,
 - appliquer au moins une fonction temporelle de correction, dénommée filtre correcteur, audit signal électrique amplifié numérisé, de manière à générer un signal traité ($sf(t)$),

ledit filtre correcteur étant déterminé à partir de ladite réponse impulsionnelle et d'une fonction d'analyse temporelle prédéterminée, ladite fonction d'analyse présentant au moins une valeur non nulle, dénommée discontinuité, à un instant donné dénommé instant de discontinuité, avec un retour vers des valeurs sensiblement nulles autour de ladite discontinuité,

- déterminer une distance dudit au moins un élément à partir dudit signal traité.

[0044] Selon un mode de réalisation le circuit d'amplification comprend un amplificateur transimpédance, un transformateur comprenant un primaire et un secondaire, et une capacité, le primaire du transformateur étant connecté à une anode du photo-détecteur, le secondaire étant connecté à une capacité, ladite capacité étant connectée à une entrée dudit amplificateur transimpédance.

[0045] La description suivante présente plusieurs exemples de réalisation du dispositif de l'invention: ces exemples sont non limitatifs de la portée de l'invention. Ces exemples de réalisation présentent à la fois les caractéristiques essentielles de l'invention ainsi que des caractéristiques additionnelles liées aux modes de réalisation considérés.

[0046] L'invention sera mieux comprise et d'autres caractéristiques, buts et avantages de celle-ci apparaîtront au cours de la description détaillée qui va suivre et en regard des dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs et sur lesquels :

[0047] La [Fig.1A] illustre un lidar selon l'invention.

[0048] La [Fig.1B] illustre un drone en atterrissage muni d'un lidar 1D selon l'état de la technique.

[0049] La [Fig.1C] illustre un drone en atterrissage muni d'un lidar selon l'invention.

[0050] La [Fig.2] illustre l'évolution de la convolution pour quatre valeurs de temps, pour la situation représentée figure 1.

[0051] La [Fig.3] illustre le signal $s_0(t)$ obtenu en sortie de récepteur.

[0052] La [Fig.4] illustre le concept d'obstacle fictif.

- [0053] La [Fig.5] illustre l'évolution temporelle de différents signaux d'intérêt.
- [0054] La [Fig.6] illustre la méthode de traitement du signal lidar selon l'invention.
- [0055] La [Fig.7] illustre la chaîne de mesure et de traitement.
- [0056] La [Fig.8] illustre la réponse impulsionnelle corrigée.
- [0057] La [Fig.9] illustre la méthode temporelle qui opère une transformation de la réponse impulsionnelle non traitée du récepteur en une fonction d'analyse prédéterminée.
- [0058] La [Fig.10] illustre les coefficients de la fonction de correction, calculé par déconvolution de la réponse impulsionnelle par la fonction d'analyse prédéterminée.
- [0059] La [Fig.11] illustre l'effet d'une fonction d'analyse présentant une seule discontinuité sur un signal Ir.
- [0060] La [Fig.12] illustre la limitation d'une fonction d'analyse présentant une seule discontinuité, et d'une certaine largeur, sur un signal Ir.
- [0061] La [Fig.13] illustre une fonction d'analyse présentant une seule discontinuité.
- [0062] La [Fig.14] illustre une fonction d'analyse présentant deux discontinuités.
- [0063] La [Fig.15] illustre une variante de la méthode selon l'invention dans laquelle on applique le filtre correcteur de manière itérative.
- [0064] La [Fig.16] illustre les signaux bruts et traités pour une première configuration de 3 obstacles
- [0065] La [Fig.17] illustre un exemple de fonction d'analyse simple Dirac (A) et un exemple de fonction d'analyse double Dirac (B).
- [0066] La [Fig.18] illustre le signal traité pour une deuxième configuration de 3 obstacles
- [0067] La [Fig.19] illustre le signal traité pour une troisième configuration de 3 obstacles.
- [0068] La [Fig.20] illustre les signaux traités pour la troisième configuration traitée de manière itérative par une fonction d'analyse double Dirac.
- [0069] La [Fig.21] illustre un dispositif de réception d'un lidar selon l'état de la technique.
- [0070] La [Fig.22] illustre un dispositif de réception selon une variante du lidar selon l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

- [0071] Un lidar TOF large FOV 10 selon l'invention est illustré [Fig.1A]. Il comprend un dispositif d'émission DE configuré pour émettre des impulsions lumineuses en direction d'une scène selon un angle (FOV) supérieur ou égal à 5°, préférentiellement 10°. L'élément émissif est par exemple une diode laser ou une diode électroluminescente. Le choix de longueur d'onde pour un lidar selon l'invention est plus vaste que pour un lidar à champ étroit, car pour la sécurité oculaire le fait d'utiliser un champ large limite grandement les risques. Préférentiellement on choisit la longueur d'onde d'éclairement proche du maximum de sensibilité du détecteur dans un but d'optimisation de réception.

- [0072] Le lidar 10 comprend également un dispositif de réception DR (ou récepteur) comprenant un photo-détecteur PD configuré pour recevoir des impulsions réfléchies ou rétrodiffusées par au moins un élément (E_i indice de l'élément) de la scène et pour convertir les impulsions réfléchies en signal électrique et un circuit d'amplification CA configuré pour amplifier le signal électrique. De manière classique le récepteur (photo-détecteur et circuit d'amplification) présente une réponse impulsionnelle $h_r(t)$ que l'on peut mesurer et/ou déterminer par le calcul.
- [0073] Une unité de traitement UT contrôle l'émission, typiquement via un composant logique de type microprocesseur, microcontrôleur ou FPGA, numérise le signal électrique amplifié, et le traite de manière à en extraire l'information utile, c'est-à-dire la présence des éléments dans le champ de détection et leur distance respective. L'unité de traitement UT du lidar selon l'invention met en œuvre une méthode de traitement particulière selon l'invention décrite plus loin.
- [0074] Dans l'exemple de la [Fig.1A] on a deux éléments E_1 et E_2 dans le champ de détection, respectivement un poteau P et un véhicule V. L'impulsion initiale I_i est émise à l'instant $t=0$, et le photo-détecteur reçoit, à l'instant t_1 , une première impulsion I_{r1} issue de la rétrodiffusion du poteau P et, à l'instant t_2 , une deuxième impulsion I_{r2} issue de la rétrodiffusion du véhicule V. Le détecteur reçoit également le cas échéant de la lumière ambiante telle que la lumière du soleil. Pour l'exemple d'un lidar de recul selon l'invention embarqué sur un véhicule V, la photo 1 illustre la scène éclairée par le lidar du véhicule V. De manière générale le lidar selon l'invention peut être embarqué sur tout objet en mouvement : automobile, drone, robot, canne de malvoyant... Pour un bon fonctionnement le lidar doit détecter la présence du poteau P et en déterminer sa distance d_1 sans être gêné par la rétrodiffusion du véhicule V.
- [0075] Selon un autre exemple le Lidar est statique et détecte la présence d'objets statiques ou en mouvement.
- [0076] L'utilisation d'un lidar de proximité grand champ de vue selon l'invention tel qu'illustré sur la figure 1 implique des particularités de mesure et des difficultés. Le large champ de détection implique la possibilité d'y contenir plusieurs obstacles. Cet aspect diffère de beaucoup d'autres applications lidar pour lesquels les angles d'ouverture des émetteurs sont réduits par l'ajout d'optiques spécifiques de collimation avec pour conséquence la présence d'un seul obstacle dans le champ d'analyse.
- [0077] La [Fig.1B] illustre un drone D en action de descente sur un terrain accidenté muni d'un lidar 1D 2 selon l'état de la technique : la détection d'obstacle est incertaine du fait du champ étroit.
- [0078] La [Fig.1C] illustre ce même drone muni d'un lidar 10 selon l'invention permettant, grâce au grand champ et au traitement du signal selon l'invention, une détection exacte des obstacles.

[0079] Une première conséquence de l'ouverture du champ est l'étalement spatial de l'énergie émise conduisant à un éclairage moindre des obstacles qui fournissent en retour des échos moindres, plus difficiles à mesurer que dans le cas d'une émission de faisceau focalisé ou collimaté. Ce point, par ailleurs favorable à la notion de sécurité oculaire, soulève la notion de rapport signal sur bruit de mesure.

[0080] Une deuxième conséquence de l'ouverture de champ de détection est la probabilité plus importante d'y trouver une source émissive forte, telle le soleil.

[0081] Enfin la proximité des obstacles est synonyme de mesure de temps d'échos courts, nécessitant à priori une électronique de détection rapide.

[0082] Dans la suite du document, nous considérons que l'émetteur fournit une impulsion lumineuse temporellement parfaitement localisée de type fonction de Dirac :

[0083]

$$[0084] \quad I_i(t) = \delta(t).$$

[0085] Un obstacle situé à distance d_1 réfléchira une partie de l'énergie de cette impulsion, appelé écho, vers le récepteur. L'écho peut être décrit par la relation suivante :

[0086]

$$[0087] \quad I_{r1}(t) = a_1 \delta(t - R_1) \text{ avec } R_1 = \frac{d_1}{c},$$

[0088] où c est la vitesse de la lumière, a_1 l'amplitude, R_1 le retard lié à la distance d_1 entre l'émetteur et l'obstacle.

[0089] En cas de présence de N obstacles dans le champ de détection, le récepteur mesure un signal optique composé de la somme des échos :

[0090]

$$[0091] \quad I_r(t) = \sum_{n=1}^N a_n \delta(t - R_n) \quad (2)$$

[0092] A ces signaux optiques porteurs d'information viennent s'ajouter un fond lumineux A_0 (éclairage ambiant, soleil) considéré ici comme constant ou faiblement variable, pour aboutir au signal optique global

[0093]

$$[0094] \quad I_{gl}(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N a_n \delta(t - R_n) \quad (3)$$

[0095] De manière classique la récupération du signal optique $I_{gl}(t)$ par le récepteur, puis sa conversion en signal électrique amplifié $s_0(t)$ au moyen d'un système amplificateur, s'accompagne de certaines modifications du signal. L'amplification est inévitablement associée à l'ajout d'un bruit de mesure $\tilde{n}(t)$ et à une bande passante limitée. Cette limitation a pour conséquence un élargissement temporel de chaque impulsion réfléchie par effet de convolution entre les impulsions et la réponse impulsionnelle $h_r(t)$ de l'ensemble détecteur-amplificateur (récepteur) :

[0096]

[0097] $s_0(t) = [I_{gl}(t) + \tilde{n}(t)] * h_r(t) \quad (4)$

[0098] La conséquence directe du bruit est une erreur sur la localisation temporelle de l'instant de retour d'une impulsion écho, voire l'impossibilité de détection si cette dernière est noyée dans le bruit.

[0099] La limitation de la bande passante de l'amplificateur conduit à la difficulté voire l'impossibilité de discriminer des impulsions échos trop proches. En effet la réponse impulsionnelle $h_r(t)$ du récepteur (ensemble détecteur et circuit amplificateur) est directement liée à sa réponse fréquentielle, donc sa bande passante. Selon les résultats de la théorie de l'analyse de Fourier pour les systèmes linéaires (ici le récepteur), une faible bande passante conduira à une réponse impulsionnelle longue.

[0100] Pour une meilleure compréhension, il est rappelé que l'opérateur convolution noté * est d'expression mathématique générique suivante :

[0101]

[0102] $s_0(t) = (h_r * I_r)(t) = \int h_r(u) I_r(t-u) du \quad (5)$

[0103] Dans la suite on ne tient pas compte du bruit et la composante continue de l'éclairement. Dans la formulation de l'équation (5) la grandeur d'entrée est une intensité lumineuse I_r , la grandeur de sortie est une tension $s_0(t)$, et $h_r(t)$ est la réponse impulsionnelle de l'ensemble photodétecteur + amplificateur.

[0104] En prenant l'exemple d'une scène à deux échos :

[0105]

[0106] $I_r(t) = I_{r1}(t) + I_{r2}(t) = I1(t-R1) + I2(t-R2)$

[0107] avec $I1$ et $I2$ respectivement proportionnelle à $a1$ et $a2$ (formule (2)).

[0108] Pour illustration, la figure 2 illustre l'évolution de la convolution pour quatre valeurs de t , t'_1 à t'_4 pour la situation représentée figure 1, avec un poteau fin P renvoyant peu d'écho (I_{r1}) placé devant une voiture V renvoyant plus d'écho (I_{r2}) :

[0109] a) $t = t'_1$: seule l'impulsion I_{r1} interagit avec la réponse impulsionnelle h_r . La surface commune entre l'impulsion et la réponse impulsionnelle est faible, le signal de sortie est également faible et entame une lente croissance.

[0110] b) $t = t'_2$: les deux impulsions I_{r1} et I_{r2} interagissent avec la réponse impulsionnelle h_r . Les surfaces communes augmentent, le signal de sortie croît, par l'interaction des deux impulsions avec la réponse impulsionnelle.

[0111] c) $t = t'_3$: les deux impulsions interagissent avec h_r de manière maximale. Les surfaces communes sont maximales, le signal de sortie également.

[0112] d) $t = t'_4$: les deux impulsions sortent lentement de la réponse impulsionnelle h_r , d'abord l'impulsion I_{r1} puis l'impulsion I_{r2} . Les surfaces communes diminuent lentement, le signal de sortie décroît lentement.

[0113] La [Fig.3] illustre le signal $s_0(t)$ obtenu en sortie de récepteur.

- [0114] Le traitement standard sur le signal issu du récepteur pour détecter la présence d'un obstacle s'effectue par recherche du maximum et de l'instant t_m associé, supposé correspondre à l'écho d'un obstacle à détecter et donc au retard R . On détermine alors la distance de l'obstacle avec la formule (1), avec t_m retard lié à la distance (temps de vol).
- [0115] Les figures 2 et 3 montrent que le signal de sortie issu du récepteur n'est le résultat de l'interaction avec une seule des deux impulsions seulement en début ou fin de cycle, là où la réponse impulsionnelle est la plus progressive, donc là où le signal de sortie croît ou décroît le plus lentement. Au final le signal de sortie observé $s_0(t)$ est quasiment toujours le résultat de l'interaction du récepteur avec les deux impulsions, sans pouvoir en distinguer clairement les effets de l'une et de l'autre. Par exemple, l'effet de l'écartement et surtout du resserrement des deux impulsions n'entraînerait que peu de différence sur le signal de sortie. La discrimination temporelle n'est alors pas possible.
- [0116] Le maximum de $s_0(t)$ est une sorte de barycentre des deux impulsions échos en fonction de leurs amplitudes et retards respectifs (a_i, t_i) correspondant au final à un obstacle fictif, au lieu de deux réels : le traitement standard identifie un obstacle fictif Of en $t'3$, correspondant à une distance d_f , et non pas deux obstacles aux distances d_1 et d_2 , tel qu'illustré figure 4. Sans rendre compte de la présence de plusieurs échos, cet obstacle fictif est situé toujours plus loin que l'obstacle le plus proche. A titre d'exemple: un obstacle est situé à $d_1=1m$, et un autre plus éloigné situé à $d_2=3m$. L'obstacle fictif sera localisé entre $d_1 \leq \text{obstacle fictif} \leq d_2$. Il est situé d'autant plus éloigné de d_1 que le rapport d'amplitude $\frac{a_1}{a_2}$ est faible.
- [0117] Par l'effet de convolution, deux impulsions échos proches qui interagissent avec une réponse impulsionnelle large se retrouvent intégralement incluses en même temps dans cette réponse impulsionnelle, sans possibilité de les distinguer. Ainsi un lidar L classique effectuant un traitement standard en sortie du circuit d'amplification n'est pas capable de discriminer deux obstacles proches présents dans le champ de vue.
- [0118] La [Fig.5] synthétise l'analyse précédente et illustre l'évolution temporelle de différents signaux d'intérêt. L'impulsion I_i initiale est émise $t=0$, l'impulsion I_{r1} (poteau) est reçue à R_1 et l'impulsion I_{r2} (véhicule) à R_2 . Le signal $s_{01}(t)$ correspond à la réponse (sans bruit) du circuit d'amplification à la présence du poteau seul, le signal $s_{02}(t)$ à la réponse (sans bruit) du circuit d'amplification à la présence du véhicule seul, et le signal $s_0(t)$ à la réponse du circuit d'amplification à la présence des deux obstacles et en tenant compte du bruit de mesure. A partir de $s_0(t)$ il est impossible de discriminer les deux obstacles.
- [0119] L'unité de traitement du lidar 10 selon l'invention met en œuvre une méthode 100 de

traitement du signal reçu permettant de résoudre le problème précité de non-discrimination des obstacles, illustrée [Fig.6].

[0120] Selon un autre aspect l'invention concerne une méthode 100 de traitement du signal lidar, qui s'applique à un lidar embarqué sur un objet statique ou en mouvement, et permet de détecter les obstacles devant le lidar.

[0121] Elle comprend une première étape A de numérisation du signal électrique amplifié $s_0(t)$. On note $s_0^e(t)$ ce signal numérisé, et F_e la fréquence d'échantillonnage. Un système numérique a pour particularité, par rapport aux systèmes analogiques, de ne connaître les informations qu'aux instants d'échantillonnages $T_e = \frac{1}{F_e}$. La désignation d'information numérique est indiquée ici par l'exposant e pour les signaux issus des différents traitements.

[0122] Dans une étape B on applique au moins une fonction temporelle de correction, dénommée filtre correcteur $C^e(t)$, au signal électrique amplifié numérisé $s_0^e(t)$, de manière à générer un signal traité $s_p^e(t)$. Préférentiellement l'application du filtre correcteur consiste en une convolution du signal électrique amplifié numérisé $s_0^e(t)$ avec la fonction temporelle de correction $C(t)$, également numérisée :

[0123]

$$[0124] \quad s_p^e(t) = (s_0^e * C^e)(t) \quad (6)$$

[0125] Le signal $s_0(t)$ en sortie du dispositif de réception est classiquement déterminé par une convolution de l'impulsion lumineuse d'entrée $I_r(t)$ avec la réponse impulsionnelle $h_r(t)$ de DR (formule (5)). La chaîne de mesure et de traitement est illustrée [Fig.7].

[0126] Le filtre $C^e(t)$ agit dans le domaine temporel, directement sur $s_0^e(t)$, il n'y a pas de transformation pour passer dans l'espace de Fourier. Le filtre $C^e(t)$ appliqué a pour but d'améliorer la résolution temporelle de la détection pour discriminer les obstacles. $C^e(t)$ est déterminé à partir de la réponse impulsionnelle échantillonnée $h_r^e(t)$ et d'une fonction d'analyse temporelle prédéterminée (désirée) $h_c^e(t)$. Tout se passe comme si on avait substitué à la réponse $h_r(t)$ une réponse impulsionnelle corrigée $h_c(t)$, grâce au correcteur $C(t)$, comme illustré [Fig.8] et formule (7) ci-dessous. L'introduction d'une discontinuité dans la fonction d'analyse (voir plus loin) a pour objectif d'obtenir une réponse impulsionnelle corrigée avec une rupture de pente permettant la discrimination des obstacles.

[0127]

$$[0128] \quad h_c(t) = (h_r * C)(t) \quad (7)$$

[0129] Pour la mise en œuvre de la méthode 100 selon l'invention il convient donc d'avoir connaissance de la réponse impulsionnelle $h_r(t)$ (mesure et/ou simulation), qui est numérisée et mémorisée.

- [0130] La transformation de la réponse impulsionnelle initiale h_r vers la réponse impulsionnelle désirée h_c est réalisée à partir d'une méthode temporelle.
- [0131] Les différents calculs s'effectuent bien entendu sur les valeurs numérisées de ces fonctions, tel qu'illustré [Fig.9]. On dénomme :
- [0132] $-h_0, h_1, h_2 \dots$ les différentes valeurs numérisées de la réponse impulsionnelle $h_r(t)$ aux instants d'échantillonnage $t_0, t_1, t_2 \dots$
- [0133] $-c_0, c_1, c_2 \dots$ les différentes valeurs numérisées de la fonction de correction $C(t)$ aux instants d'échantillonnage $t_0, t_1, t_2 \dots$,
- [0134] $-a_0, a_1, a_2, \dots$ les différentes valeurs numérisées de la fonction d'analyse $h_c(t)$ aux instants d'échantillonnage $t_0, t_1, t_2 \dots$ (dans cet exemple la fonction d'analyse présente deux discontinuités de valeurs a_6 et a_7 à deux instants d'échantillonnage successifs t_6 et t_7 , les autres valeurs étant nulles).
- [0135] Le filtre correcteur C est déterminé par déconvolution de la réponse impulsionnelle h_r par la fonction d'analyse h_c :
- [0136]
- [0137] $C(t) = (h_r *^{-1} h_c)(t)$ (8)
- [0138] Appliqué aux valeurs numérisées, on détermine les coefficients c_k du correcteur avec les formules suivantes :
- [0139]
$$c_0 = \frac{a_0}{h_0}$$
- [0140] On remarque que le calcul des coefficients correcteurs nécessite de diviser par h_0 , ce qui peut poser numériquement des problèmes lorsque h_0 présente une valeur très faible voire nulle. Une solution est d'ajouter à l'ensemble de la réponse impulsionnelle une constante et de calculer les coefficients. La valeur de la constante est augmentée par itération successives jusqu'à atteindre des valeurs convergentes des coefficients.
- [0141] Un exemple de ces coefficients c_k est illustré [Fig.10].
- [0142] La fonction d'analyse prédéterminée identifiée par les inventeurs présente au moins une valeur non nulle A_0 , dénommée discontinuité, à un instant donné dénommé instant de discontinuité t_{d0} , avec un retour rapide vers des valeurs sensiblement nulles autour de ladite discontinuité. La fonction d'analyse est numérisée sur des points d'échantillonnage (voir [Fig.9]) et on entend par retour rapide vers des valeurs sensiblement nulles une diminution qui s'opère sur un faible nombre de points d'échantillonnage. Le nombre de points maximum sur lesquels doit s'effectuer le retour à zéro dépend de F_e , de la distance entre objets, de l'amplitude des échos... De manière synthétique, les performances de séparation sont d'autant meilleures que la diminution s'opère sur un faible nombre de point d'échantillonnage, mais un gain existe toujours, si minime soit-il, dès lors que la fonction d'analyse possède une ou plusieurs pentes supérieures à celle(s) de la réponse impulsionnelle.

- [0143] Ainsi l'important est que cette diminution opère comme une discontinuité (rupture de pente) au regard de la variation lente de $h_r(t)$. Typiquement la descente s'effectue sur au plus quelques points à une dizaine de points d'échantillonnage.
- [0144] Enfin dans une étape C on détermine une distance d_i de l'élément E_i (obstacle indicé i) à partir du signal traité $c_{k \geq 1} = \frac{1}{h_0} \left(a_k - \sum_{m=1}^n h_m c_{k-m} \right)$. Cette détermination est opérée par un traitement 70 qui consiste à localiser le ou les maxima locaux de $c_{k \geq 1} = \frac{1}{h_0} \left(a_k - \sum_{m=1}^n h_m c_{k-m} \right)$, et le ou les instants t_{mi} correspondants à ce ou ces maxima locaux. Cette localisation temporelle du maximum local t_{mi} correspond au retard ou temps de vol R_i pour l'obstacle associé E_i , $t_{mi}=R_i$, et on en déduit la distance d_i de l'obstacle à partir de cet instant t_{mi} , avec la formule (1).
- [0145] Les maximums locaux sont recherchés dans une plage temporelle d'intérêt, selon l'application et/ou ce qui est recherché. On s'intéresse particulièrement à l'obstacle le plus proche de l'objet sur lequel est embarqué le lidar et sa distance au lidar. La distance d'intérêt dans laquelle on sonde la scène devant le lidar dépend de l'application.
- [0146] A titre illustratif la [Fig.11] montre l'effet une fonction d'analyse $h_c(u)$ en forme de gaussienne et présentant une seule discontinuité (on entend par discontinuité un maximum avec un retour rapide vers des valeurs proches de zéro) sur un signal I_r comprenant deux impulsions I_{r1} et I_{r2} . Les différentes courbes A à D illustrent différents instants lors de la convolution.
- [0147] $s_p^e(t)$: aucune des impulsions n'interagit encore avec la réponse impulsionnelle corrigée h_c .
- [0148] $s_p^e(t)$: l'impulsion I_{r1} interagit avec la réponse impulsionnelle corrigée $t = t_1$ mais pas l'impulsion I_{r2}
- [0149] $t = t_2$: L'impulsion I_{r1} n'interagit plus avec h_c , avec pour effet une décroissance nette des surfaces communes donc du signal de sortie
- [0150] $t = t_3$: A son tour l'impulsion I_{r2} n'interagit plus avec h_c , provoquant une nouvelle décroissance nette du signal de sortie
- [0151] La courbe F illustre le résultat du traitement par convolution $h_c * I_r$:
- [0152]
- [0153] $h_c * I_r = I_r * h_c = I_r * h_r * C = s_0 * C = s_p$
- [0154] L'introduction d'au moins une discontinuité permet de dissocier à un moment les interactions des deux impulsions avec la réponse impulsionnelle, et permet de discriminer clairement les instants d'arrivée des échos.
- [0155] Ainsi le lidar selon l'invention permet de détecter un petit obstacle devant un obstacle plus grand, par exemple un mur lisse de biais.

- [0156] Le lidar selon l'invention présente des avantages non accessibles aux capteurs à ultrasons et peut donc s'y substituer dans l'anticollision en robotique. Il présente des caractéristiques améliorées en termes de :
- [0157] -sensibilité aux conditions météo : insensibilité à la pluie ou à une forte humidité,
- [0158] -champ de détection : largeur de l'ordre de 5° ou 10° ou 20° ou 30° ,
- [0159] -défectivité : détection d'objets fins ou peu réfléchissants,
- [0160] -séparation d'obstacles : discrimination d'obstacles rapprochés, détection d'un objet fin placé devant un objet large, détection d'échos multiples proches, malgré une bande passante faible du circuit d'amplification,
- [0161] -acquisition : lidar flash, système « monotir » possible (un tir laser = 1 résultat)
- [0162] -cadence de rafraichissement : élevée, supérieure à 10kHz
- [0163] Conçu pour des applications embarquées portables, il présente également des caractéristiques intéressantes en termes d'intégration :
- [0164] -consommation réduite (monotir): alimentation possible sur piles ou batteries
- [0165] -dimensions réduites: quelques cm^3 sont possibles
- [0166] -masse réduite: quelques grammes sont possibles,
- [0167] -coût réduit.
- [0168] Il est adaptable : l'ajout d'optiques permet l'augmentation de sa portée, tout en conservant les capacités de discrimination d'échos.
- [0169] Ces caractéristiques permettent l'utilisation du lidar dans les domaines de la robotique, des drones, du déplacement autonome, de l'anticollision...
- [0170] La détection d'échos multiples proches permet entre autres :
- [0171] d'offrir une meilleure connaissance du terrain environnant et permettre une meilleure anticipation de la trajectoire,
- [0172] la détection et la prise en compte d'échos faibles dus à des obstacles de petites tailles placés plus proches que des obstacles de grandes tailles,
- [0173] d'améliorer le déplacement d'un drone ou robot dans un contexte d'ensemble dense, par exemple en zone urbaine, forestière.
- [0174] Le traitement du signal selon l'invention, permettant la discrimination d'échos multiples avec peu de puissance de calcul, peut être intéressant pour d'autres équipements mesurant des temps de vol, dans les domaines de la réflectométrie, sonar, ... et pour la surveillance de locaux.
- [0175] L'aspect monotir permet également une plus grande discrétion du lidar.
- [0176] A une fréquence d'échantillonnage $t = t_5$ correspond une période d'échantillonnage h_c , quantum de temps au bout duquel le système numérique recalcule ses informations. La période d'échantillonnage correspond à la résolution temporelle de la mesure, soit à la résolution de discrimination spatiale dans le cas du lidar.
- [0177] A la résolution temporelle actuelle F_e correspond une résolution spatiale de T_e .

Concrètement, la fréquence d'échantillonnage est fixée par la référence du convertisseur analogique numérique (CAN) utilisé et détermine la résolution de discrimination spatiale entre obstacles. Par exemple :

[0178] 75cm @ T_e

[0179] 37.5cm @ $\frac{T_e}{6.67ns}$

[0180] 5.5cm @ $F_e = 200MHz$

[0181] Par la génération d'une ou plusieurs discontinuités dans la réponse impulsionnelle de la chaîne de traitement, le pouvoir de discrimination n'est plus lié à la bande passante du récepteur mais à la fréquence d'échantillonnage du système numérique : le traitement du signal selon l'invention rend possible l'utilisation d'un récepteur à faible bande passante pour ses qualités de sensibilité et de rapport S/N (signal sur bruit) tout en bénéficiant d'une capacité de discrimination élevée.

[0182] Pour une meilleure sensibilité, l'au moins un instant de discontinuité td_0 est préférentiellement choisi au voisinage de l'instant du maximum de la réponse impulsionnelle $F_e = 400MHz$, dénommé t_{m-imp} . Préférentiellement l'au moins un instant de discontinuité td_0 coïncide avec t_{m-imp} .

[0183] La [Fig.12] illustre une limitation de l'utilisation d'une fonction d'analyse ne présentant qu'une discontinuité avec une largeur donnée. Les courbes de gauche sont équivalentes à la courbe de la [Fig.5], sans bruit, et illustrent le résultat de la convolution avec la réponse impulsionnelle non traitée hr. Les courbes de droite illustrent la convolution avec la fonction d'analyse gaussienne. Les courbes A et B correspondent respectivement à deux impulsions Ir_1 et Ir_2 séparées de deux temps différents, et plus précisément des obstacles plus espacés pour A et plus proches pour B. Lorsque les impulsions échos sont suffisamment espacées (vis à vis de la largeur de la gaussienne), on obtient une bonne séparation (cas A). Pour le cas B la séparation est de qualité moyenne. Une fonction d'analyse d'une certaine largeur (type gaussienne dans l'exemple) peut suffire à réaliser une séparation d'obstacle, mais, de par sa largeur non nulle, elle est moins efficace qu'une fonction type Dirac (discontinuité infiniment étroite).

[0184] Les inventeurs ont identifié trois types de fonctions d'analyse particulièrement pertinentes lorsqu'elles sont utilisées en combinaison.

[0185] Le premier type, illustré [Fig.13] et déjà commenté, est une fonction d'analyse présentant une seule discontinuité (A_0 , td_0). La fonction A à gauche correspond à une valeur non nulle A_0 et un retour à des valeurs nulles sur un point d'échantillonnage (croix) de chaque côté.

[0186] Les meilleurs résultats ont été obtenus avec une fonction telle que représentée en B à droite, qui présente des valeurs nulles en dehors de la discontinuité A_0 , également

dénommée simple Dirac. La discontinuité est alors la plus raide possible. Préférentiellement $td0 = t_{m-imp}$.

[0187] Le deuxième type, illustré [Fig.14] est une fonction d'analyse présentant deux discontinuités, une première discontinuité A1 à un premier instant de discontinuité $td1$ et une deuxième discontinuité A2 à un instant de discontinuité $td2$, $td1$ et $td2$ étant rapprochés dans le temps, c'est-à-dire séparés de quelques points d'échantillonnage, car il s'agit ici de séparer des impulsions échos proches.

[0188] La fonction A à gauche correspond à des valeurs non nulles A1 et A2, avec un retour à des valeurs nulles sur un point d'échantillonnage de chaque côté, pour les deux discontinuités (à titre d'exemple). Toujours à titre d'exemple il y a 3 points d'échantillonnage entre les instants $td1$ et $td2$. Préférentiellement pour une meilleure efficacité de la fonction on choisit deux discontinuités de signes différents, une discontinuité de valeur positive et une discontinuité de valeur négative. Dans l'exemple $A1 > 0$ et $A2 < 0$. Par exemple on place $td1$ à t_{m-imp} , mais cela peut être $td2$, ou alors t_{m-imp} est situé entre $td1$ et $td2$. L'important est que $td1$ et $td2$ soient localisés au voisinage de t_{m-imp} .

[0189] Les meilleurs résultats ont été obtenus avec une fonction telle que représentée en B à droite, qui présente des valeurs nulles en dehors des discontinuités A1 et A2, séparées du minimum possible soit aucun point d'échantillonnage, également dénommée double Dirac. Ici le retour vers des valeurs nulles s'effectue en moins d'un point d'échantillonnage, la pente entre les deux discontinuités est la plus raide possible. Par exemple on place $td1$ à t_{m-imp} , mais cela peut être $td2$.

[0190] Le troisième type est une fonction d'analyse présentant trois discontinuités rapprochées dans le temps.

[0191] Selon une variante les inventeurs ont montrés que ces types de fonction permettent un traitement amélioré lorsqu'elles sont combinées. Ceci est rendu possible par la simplicité du processus de calcul. Ainsi selon cette variante on applique une pluralité de filtres correcteurs $C_j(t)$ (j indice du filtre), précalculés à partir d'une pluralité de fonctions d'analyse $hc_j(t)$ prédéfinies, de manière à générer une pluralité de signaux traités associés $sf_j(t)$ complémentaires.

[0192] La distance des éléments de la scène E_i est déterminée à partir de la pluralité de signaux traités, par détection de maxima locaux et comparaison de leur position respective dans les différents signaux traités.

[0193] Un exemple est la détection de l'obstacle le plus proche du lidar. Selon un mode de réalisation le premier type de fonction d'analyse est utilisé pour identifier la plage temporelle d'intérêt dans laquelle est détectée cet obstacle le plus proche. Puis l'application de filtres correcteurs déterminés à partir du deuxième type de fonction d'analyse, avec différentes valeurs pour A1 et/ou A2, permet la localisation finale de

cet obstacle le plus proche dans la plage temporelle d'intérêt, en permettant de scruter localement la présence d'échos, par exemple de très faibles amplitudes et masqués par d'autres plus importants. En effet les inventeurs ont montré qu'une fonction d'analyse à une seule discontinuité permet un balayage complet de l'espace d'intérêt (mais pouvant manquer de précision) tandis qu'une fonction d'analyse à deux discontinuités réalise une fonction « loupe » au voisinage de l'obstacle le plus proche (voir exemple plus loin).

- [0194] Par exemple, lorsque $A_2 = -A_1$, la fonction d'analyse présentée est équivalente à une dérivée, communément utilisée pour les études locales de fonctions ou signaux. Le résultat est que ladite fonction d'analyse fournira la dérivée de la somme des échos, apportant des informations supplémentaires sur leur localisation.
- [0195] Selon un autre exemple la fonction présentant trois discontinuités, par exemple égales respectivement à +1, -2, et +1, est équivalente à une dérivée seconde.
- [0196] Bien entendu les trois types de fonctions mono, bi et tri Dirac décrites ci-dessous ne sont que des exemples de fonction d'analyse possible. On peut également envisager d'autres fonctions d'analyses spécifiques aux impulsions émises pour affiner la détection des échos.
- [0197] Selon une variante la pluralité de filtres correcteurs est appliquée via un processus itératif, tel qu'illustré [Fig.15], jusqu'à ce qu'un signal traité final permette la détermination d'une distance correspondant à l'obstacle recherché, typiquement l'obstacle le plus proche. Dans ce cas les filtres sont déterminés au fur et à mesure dans la boucle, en recalculant des coefficients c_0 , et/ou c_1/c_2 , et/ou c_1, c_2 et c_3 , en fonction du résultat obtenu, c'est à dire du signal traité $spj(t)$, et plus particulièrement de la position de ou des maxima locaux. Le processus itératif consiste à modifier des discontinuités, c'est à dire des valeurs non nulles desdites fonctions d'analyse. Une branche optionnelle 15 permet la mesure de la réponse impulsionnelle du dispositif de réception. Selon un mode de réalisation on réalise régulièrement cette mesure lors de mise en œuvre du procédé selon l'invention.
- [0198] La boucle d'itération s'arrête lorsque la localisation temporelle du maximum de l'obstacle d'intérêt, ici le plus proche, ne varie plus, ce qui signifie que cet obstacle a bien été séparé des autres.
- [0199] Selon un mode de réalisation du processus itératif on applique d'abord un filtre correcteur correspondant à une fonction d'analyse présentant une seule discontinuité A_0 , puis des fonctions d'analyse présentant une première et une deuxième discontinuités (A_1, A_2) à deux instants de discontinuité (td_1, td_2) rapprochés dans le temps, et/ou des fonctions d'analyse présentant trois discontinuités à trois instants de discontinuité rapprochés dans le temps, les discontinuités étant modifiées de manière itérative.

- [0200] Selon un exemple de mise en œuvre d'un lidar selon l'invention, des simulations ont été réalisées. Des mesures expérimentales ont par ailleurs été réalisées, avec des résultats expérimentaux proches des simulations, ce qui montre la validité du calcul. On recherche ici le distance du l'obstacle le plus proche dans une mise en situation avec 3 obstacles selon une première configuration.
- [0201] Obstacle 1 : $d=0,7$ m – amplitude : 1
- [0202] Obstacle 2 : $d=1,7$ m – amplitude : 1
- [0203] Obstacle 3 : $d=6$ m – amplitude : 5
- [0204] Les paramètres de la simulation sont les suivants :
- [0205] Fréquence d'échantillonnage $F_e = 400$ MHz (un points toutes les 2.5 ns), échantillonnage sur 10 bits
- [0206] Circuit d'amplification : $R = 300$ k Ω Bande passante : 2,7 MHz
- [0207] L'extension temporelle de $h_r(t)$ est de 200 ns soit 80 points d'échantillonnages.
- [0208] La [Fig.16] illustre les signaux lidar bruts et traités pour trois situations :
- [0209] (1) :Obstacle 1 seul, (2) : obstacles 1 et 2, (3) :obstacles 1, 2 et 3 dans la scène.
- [0210] Les droites D1, D2 et D3 représentent la position exacte des trois obstacles en retard.
- [0211] Les courbes de gauche illustrent le signal brut $s_0(t)$ en sortie du récepteur, tel qu'illustré [Fig.5]. Les courbes de droite illustrent le signal traité $s_p^e(t)$, avec une abscisse correspondant aux quantums de temps (points d'échantillonnage) soit 2.5 ns (auquel correspond un quantum de distance $2.5/6.67 = 37.5$ cm).
- [0212] La position du premier obstacle est à l'abscisse 10, soit un retard de 25ns. Cela ne correspond pas directement à la position du premier obstacle, car il y a un offset de temps, parfaitement maîtrisé, dépendant directement de la position du Dirac de la fonction d'analyse.
- [0213] La simulation est réalisée avec une fonction d'analyse h_c du premier type simple Dirac illustrée [Fig.17]-A: une seule discontinuité, d'amplitude $A_0=1$ pour un point d'échantillonnage à un instant $t_{d0} = 20$ ns, et des valeurs nulles pour les autres instants.
- [0214] On remarque que dans cette configuration d'obstacles la fonction d'analyse du premier type permet l'identification des 3 obstacles et leur séparation.
- [0215] La [Fig.18] illustre le signal traité avec la même fonction d'analyse que précédemment pour la deuxième configuration d'obstacles suivante :
- [0216] Obstacle 1 : $d=0,7$ m – amplitude : 1
- [0217] Obstacle 2 : $d=1,7$ m – amplitude : 10
- [0218] Obstacle 3 : $d=6$ m – amplitude : 5
- [0219] L'écho de l'obstacle 2 est ici beaucoup plus important. On note sur la courbe que le pic associé au premier obstacle et toujours visible mais plus faible. Pour des obstacles trop proches et/ou avec un deuxième obstacle puissant, on perçoit la limite de la fonction simple Dirac.

- [0220] La [Fig.19] illustre le signal traité avec la même fonction d'analyse que précédemment pour une troisième configuration d'obstacles suivante :
- [0221] Obstacle 1 : $d=0,7$ m – amplitude : 1
- [0222] Obstacle 2 : $d=1,2$ m – amplitude : 10
- [0223] Obstacle 3 : $d=6$ m – amplitude : 5
- [0224] L'obstacle 2 a été rapproché de l'obstacle 1. On remarque que les deux premiers obstacles ne sont plus discriminés par la fonction d'analyse simple Dirac, et que le signal traité correspond à un obstacle fictif situé entre les deux obstacles réels.
- [0225] Afin de régler ce problème et identifier avec précision la position de l'obstacle le plus proche, on applique alors une fonction d'analyse double Dirac préférentiellement selon un processus itératif.
- [0226] La [Fig.20] illustre les signaux traités avec la fonction d'analyse double Dirac, illustrée en A, pour la troisième configuration d'obstacles. En B figurent les différents signaux traités obtenus pour différentes valeurs de a_6 qui est augmenté de 1 à chaque itération. On constate qu'entre les deux premières itérations $X=1$ et $X=2$ et la troisième itération $X=3$, la position du premier obstacle n'est pas stabilisée et varie. Il convient de continuer l'itération.
- [0227] Puis pour les itérations suivantes cette position devient stable ; Une fois la position du premier obstacle stabilisée on peut arrêter le processus.
- [0228] A noter que lors de l'application du double Dirac seule la position de premier obstacle doit être pris en compte. Ce qui se passe après (temporellement) ne doit pas être considéré.
- [0229] Selon une variante le circuit d'amplification CA du lidar 10 selon l'invention présente un composant additionnel.
- [0230] De manière classique le montage récepteur associé à une photodiode PD le plus adapté et le plus usité est appelé amplificateur de transimpédance (« *Trans Impedance Amplifier* » ou TIA. Ses éléments sont connus des professionnels. Dans sa version la plus basique, il est constitué d'une résistance $R_e = 3000\text{MHz}$ et d'un amplificateur opérationnel Amp tel qu'illustré [Fig.21].
- [0231] En considérant les composants idéaux :
- [0232] -La photodiode PD transforme le flux lumineux en courant de photo génération $i_p(t)$.
- [0233] -Le TIA transforme le courant R_f en tension suivant la relation I_{ph} .
- [0234] -La valeur de la résistance I_{ph} fixe le gain de l'amplificateur. La sensibilité du TIA est liée à cette valeur.
- [0235] Une photodiode de type PIN est préférée, plus fiable et plus simple à mettre en œuvre qu'une photodiode à avalanche (APD).
- [0236] Le courant issu de la photodiode peut être décrit par la relation :

[0237]

[0238] $S = -R_f I_{ph} \quad (9)$

[0239] Dans laquelle :

[0240] R_f est la sensibilité de la photodiode, de l'ordre de 0.6A/W,

[0241] $i_{ph}(t) = S \cdot \varnothing_e(t) + I_0 + i_{n_{ph}}(t)$ est la puissance lumineuse reçue,

[0242] S est la somme des courants statiques inverses de la photodiode (courant de saturation, courant de noir),

[0243] $\varnothing_e(t)$ représente la somme des bruits intrinsèques de la photodiode (principalement bruit de grenaille).

[0244] La puissance lumineuse captée I_0 est constituée d'une partie dynamique $i_{n_{ph}}(t)$ telle l'impulsion réfléchie et d'une partie statique causée par un fond lumineux $\varnothing_e(t)$, provoqué par le soleil par exemple (voir également formule (3) et A0). La relation s'écrit alors :

[0245]

[0246] $\varphi_e(t) \quad (10)$

[0247] Une photodiode PIN génère environ 600 mA/W. L'amplificateur transimpédance a un gain qui est en général un compromis entre la bande passante désirée et la sensibilité (capacité de détection) du capteur. Il peut être également limité par l'intensité des courants statiques inverses de la photodiode.

[0248] Il convient, en termes de sensibilité de capteur et de rapport signal à bruit de mesure S/N, d'utiliser une résistance $\varnothing_{e0}$ élevée conduisant à un gain élevé (et donc à une bande passante faible).

[0249] La luminosité ambiante est amplifiée de la même manière que les signaux optiques des échos. Les ordres de grandeurs sont très différents entre les courants générés par les impulsions échos (typiquement quelques $i_{ph}(t) = S(\varphi_e(t) + \varnothing_{e0}) + I_0 + i_{n_{ph}}(t)$ pour un écho de quelques R_f) et celui induit par la luminosité ambiante (typiquement quelques dizaines de mA pour une photodiode silicium de 5x5mm²).

[0250] Afin de limiter le courant de photogénération induit par le soleil, pouvant conduire à une saturation du TIA, de manière classique on place un filtre optique juste en surface de photodiode. Il peut être le filtre coloré intégré à la photodiode proposé par les fabricants (spectre large de l'ordre de 300nm), ou encore un filtre interférentiel (spectre étroit de l'ordre de 10nm – présente un inconvénient majeur de directivité).

[0251] Cependant malgré la présence d'un filtre une tension en sortie S supérieure à la tension d'alimentation du TIA (typiquement 5V) est rapidement atteinte avec une résistance R_f élevée et un éclairage ambiant moyen (soleil), ce qui conduit à une saturation du capteur.

- [0252] Ainsi la tenue du capteur en plein soleil est antagoniste à l'utilisation d'un TIA à forte sensibilité. Un compromis sur le gain est nécessaire :
- [0253] -L'intérêt d'un gain élevé (résistance de TIA μA de forte valeur) pour l'obtention d'un S/N élevé nécessaire à la détection d'obstacle renvoyant peu d'écho ;
- [0254] -La préférence d'un gain faible (résistance de TIA μW de faible valeur) de manière à privilégier la bande passante importante pour la discrimination d'obstacles ;
- [0255] -La préférence d'un gain faible (résistance de TIA R_f de faible valeur) pour la tenue du capteur au plein soleil.
- [0256] Ces points antagonistes montrent la difficulté à réaliser un lidar de proximité à champ large, capable de discriminer des obstacles différents inclus dans le champ de détection et proches, et d'en caractériser les distances, et de maximiser les chances de détection de l'obstacle le plus proche.
- [0257] Afin de résoudre le problème de tenue du capteur en plein soleil, le dispositif de réception DR du lidar 10 selon l'invention comprend un transformateur T et une capacité C entre le photodétecteur PD et l'amplificateur TIA, tel qu'illustré [Fig.22]. Le primaire du transformateur est connecté à l'anode du photo-détecteur, le secondaire est t connecté à la capacité C, cette capacité étant connectée à une entrée de l'amplificateur transimpédance.
- [0258] Le transformateur peut être monté en abaisseur ($V_{out} < V_{in}$, $I_{out} > I_{in}$) ou en élévateur ($V_{out} > V_{in}$, $I_{out} < I_{in}$). Préférentiellement le transformateur est monté en abaisseur ce qui permet d'amplifier le courant de photodiode du rapport de transformation sans ajout de bruit complémentaire.
- [0259] Le principe de fonctionnement du transformateur réside dans la conversion d'un courant en son primaire (ici le courant de photodiode R_f) en un champ magnétique R_f , lui-même reconverti en un champ électrique $i_{ph}(t) = S(\varphi_e(t) + \varnothing_{e0}) + I_0$, donc en une tension $B(t)$ (V_{out}) au secondaire du transformateur.
- [0260] Il est connu que le champ électrique est fonction de la dérivée du champ magnétique induit par $E(t)$. En conséquence la tension et le courant issus du transformateur ne dépendent que des variations de $s_i(t)$. La tension issue du TIA sera de la forme :
- [0261]
- [0262] $i_{ph}(t)$ (11)
- [0263] Sans caractériser le coefficient $i_{ph}(t)$, il est établi ici que toutes les composantes statiques du courant de photodiode $V_s(t) = k \frac{d}{dt} \varphi_e(t)$ sont éliminées au secondaire du transformateur :
- [0264] -Les courants intrinsèques inverses parasites de la photodiode (courant de saturation, courant de noir)
- [0265] -Les courants de photo génération dus à des sources lumineuses quelconque, faibles

ou intenses (soleil).

- [0266] La capacité C placée entre le TIA et le transformateur a pour rôle de minimiser le gain qu'aurait le système sans cette capacité. En effet, cet ensemble se comporterait en amplificateur non inverseur de gain infini vis-à-vis de la tension d'offset de l'AOP, avec pour effet sa saturation.
- [0267] La structure du dispositif de réception DR selon l'invention résout donc deux problèmes :
- [0268] -Levée de la limite de résistance de gain, car les divers courants parasitent continus sont filtrés. On réalise un capteur de très fort gain et on améliore la capacité de détection ;
- [0269] -Le capteur est quasi insensible à l'éclairement ambiant. Il est possible alors de détecter des obstacles avec le soleil de face.
- [0270] Cette structure est parfaitement adaptée à l'utilisation d'un lidar large *F.O.V* en extérieur.

Revendications

[Revendication 1]

Méthode de traitement (100) d'un signal issu d'un lidar, ledit lidar réalisant une mesure d'un temps de vol et comprenant un dispositif d'émission configuré pour émettre des impulsions lumineuses en direction d'une scène selon un angle supérieur ou égal à 5° et un dispositif de réception, ledit dispositif de réception présentant une réponse impulsionnelle ($hr(t)$) et comprenant un photo-détecteur configuré pour recevoir des impulsions réfléchies ou rétrodiffusées par au moins un élément (E_i) de la scène et pour convertir lesdites impulsions en signal électrique, et un circuit d'amplification (CA) configuré pour générer un signal électrique amplifié ($s_0(t)$), la méthode comprenant les étapes consistant à :

- A : numériser ledit signal électrique amplifié k
- B : appliquer au moins une fonction temporelle de correction, dénommée filtre correcteur ($C^e(t)$), audit signal électrique amplifié numérisé, de manière à générer un signal traité ($sf(t)$),

ledit filtre correcteur ($C^e(t)$) étant déterminé à partir de ladite réponse impulsionnelle et d'une fonction d'analyse temporelle prédéterminée, ladite fonction d'analyse présentant au moins une valeur non nulle (a_0 , a_1 , a_2), dénommée discontinuité, à un instant donné dénommé instant de discontinuité (td_0 , td_1 , td_2), avec un retour vers des valeurs sensiblement nulles autour de ladite discontinuité, l'application du filtre correcteur consistant en une convolution du signal électrique amplifié numérisé avec ladite fonction temporelle de correction, ledit filtre correcteur étant déterminé par déconvolution de ladite réponse impulsionnelle par ladite fonction d'analyse prédéterminée,

- C : déterminer une distance (d_i) dudit au moins un élément (E_i) à partir dudit signal traité.

[Revendication 2]

Méthode de traitement selon la revendication précédente dans laquelle une présence dudit au moins un élément dans ladite scène correspond à un maximum local dudit signal traité, et ladite distance associée est déterminée à partir d'une localisation temporelle dudit maximum local.

[Revendication 3]

Méthode de traitement selon l'une des revendications précédentes dans laquelle ladite réponse impulsionnelle présente un maximum à un

- instant t_{m-imp} , et dans laquelle ledit au moins un instant de discontinuité de la fonction d'analyse coïncide temporellement avec ledit instant t_{m-imp} .
- [Revendication 4] Méthode selon l'une des revendications précédentes dans laquelle la fonction d'analyse présente des valeurs nulles en dehors de ladite au moins une discontinuité.
- [Revendication 5] Méthode selon l'une des revendications précédentes dans laquelle la fonction d'analyse présente soit une seule discontinuité (A0), soit deux discontinuités, soit trois discontinuités, localisées respectivement à des instants de discontinuité rapprochés dans le temps, c'est-à-dire séparés de quelques points d'échantillonnage.
- [Revendication 6] Méthode de traitement selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle on applique une pluralité de filtres correcteurs ($C_j(t)$) déterminés à partir d'une pluralité de fonctions d'analyse ($h_{cj}(t)$), de manière à générer une pluralité de signaux traités associés ($sf_j(t)$), ladite distance dudit au moins un élément de la scène étant déterminée à partir de ladite pluralité de signaux traités.
- [Revendication 7] Méthode de traitement selon la revendication précédente dans laquelle ladite pluralité de filtres correcteurs est appliquée via un processus itératif, jusqu'à ce qu'un signal traité final permette la détermination d'une distance correspondant à l'obstacle le plus proche, le processus itératif consistant à modifier des discontinuités, c'est à dire des valeurs non nulles desdites fonctions d'analyse..
- [Revendication 8] Méthode de traitement selon la revendication précédente dans laquelle on applique d'abord un filtre correcteur correspondant à une fonction d'analyse présentant une seule discontinuité (A0), puis des fonctions d'analyse présentant deux discontinuités ou trois discontinuités, lesdites discontinuités étant modifiées de manière itérative.
- [Revendication 9] Système lidar (10) par mesure d'un temps de vol comprenant :
- un dispositif d'émission (DE) configuré pour émettre des impulsions lumineuses en direction d'une scène selon un angle supérieur ou égal à 5°
 - un dispositif de réception (DR) présentant une réponse impulsionnelle ($h_r(t)$) et comprenant :
 - un photo-détecteur (PD) configuré pour recevoir des impulsions réfléchies (I_r) ou rétrodiffusée par au moins un élément (E_i) de la scène et pour convertir lesdites impulsions en signal électrique,

- un circuit d'amplification (CA) configuré pour amplifier ledit signal électrique,
- une unité de traitement (UT) dudit signal électrique amplifié configurée pour :
 - numériser ledit signal électrique amplifié $i_{ph}(t)$
 - appliquer au moins une fonction temporelle de correction, dénommée filtre correcteur ($C^e(t)$), audit signal électrique amplifié numérisé, de manière à générer un signal traité ($sf(t)$),

ledit filtre correcteur ($C^e(t)$) étant déterminé à partir de ladite réponse impulsionnelle ($hr(t)$) et d'une fonction d'analyse temporelle prédéterminée, ladite fonction d'analyse présentant au moins une valeur non nulle (a_0, a_1, a_2), dénommée discontinuité, à un instant donné dénommé instant de discontinuité (td_0, td_1, td_2), avec un retour vers des valeurs sensiblement nulles autour de ladite discontinuité, l'application du filtre correcteur consistant en une convolution du signal électrique amplifié numérisé avec ladite fonction temporelle de correction, ledit filtre correcteur étant déterminé par déconvolution de ladite réponse impulsionnelle par ladite fonction d'analyse prédéterminée,

- déterminer une distance (d_i) dudit au moins un élément (E_i) à partir dudit signal traité.

[Revendication 10] Système lidar selon la revendication précédente dans lequel le circuit d'amplification (CA) comprend un amplificateur transimpédance (TIA), un transformateur comprenant un primaire et un secondaire, et une capacité (C), le primaire du transformateur étant connecté à une anode du photo-détecteur, le secondaire étant connecté à une capacité, ladite capacité étant connectée à une entrée dudit amplificateur transimpédance.

[Fig. 1A]

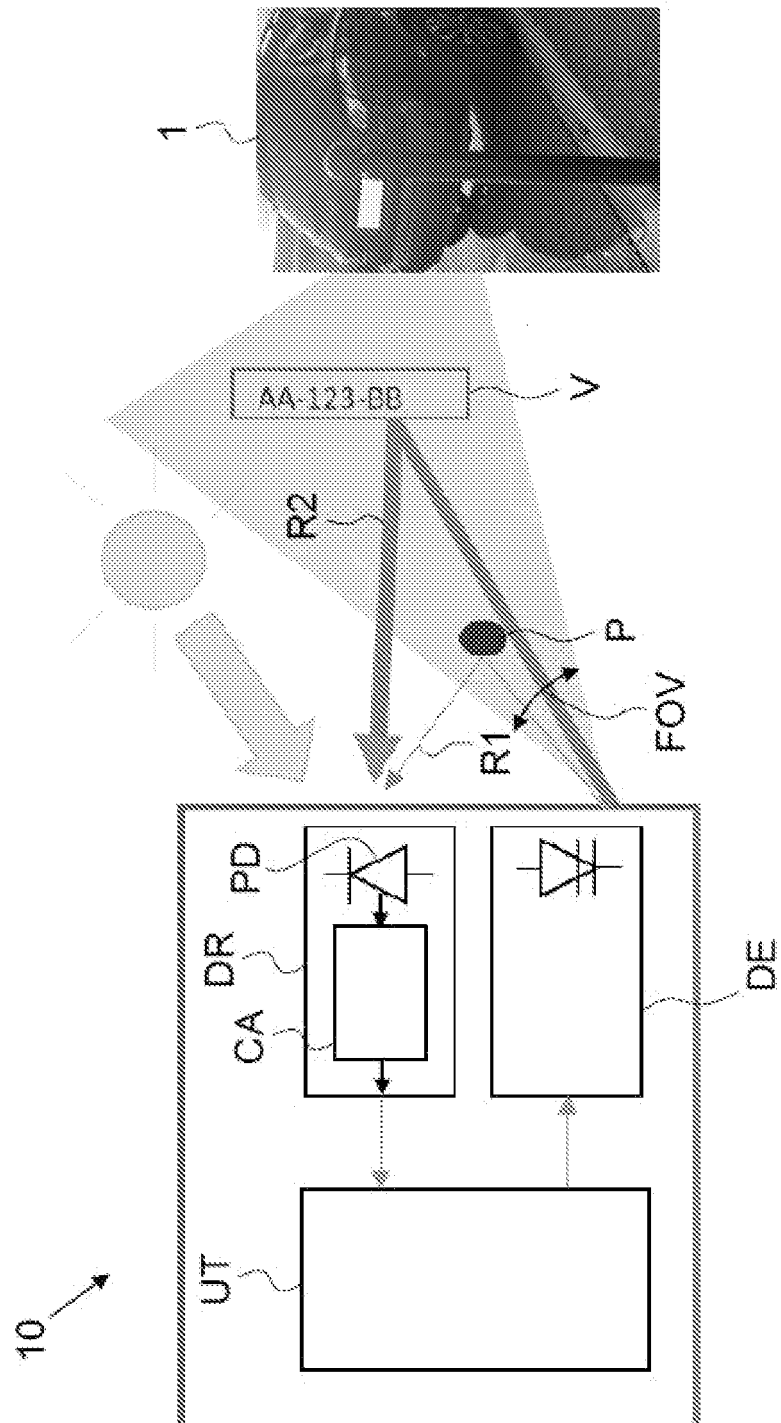
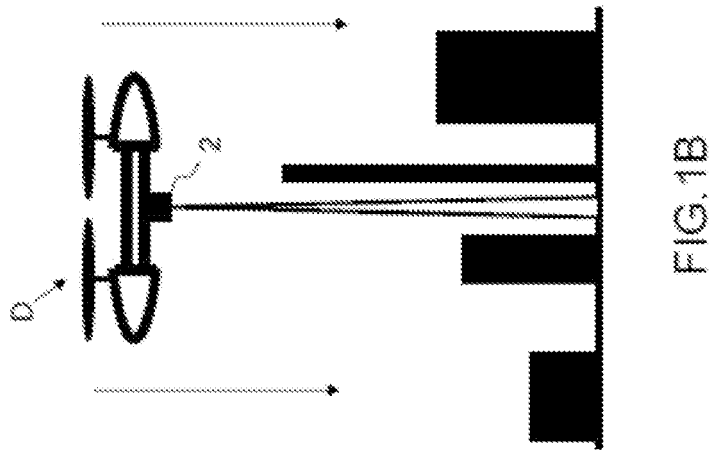
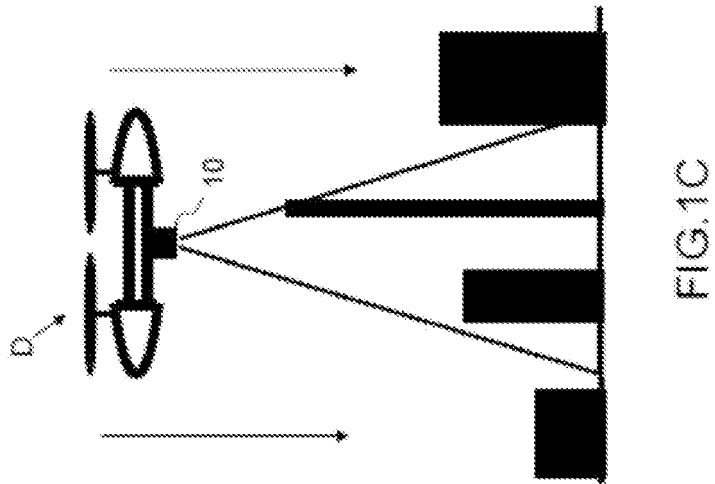


FIG.1A

[Fig. 1B]



[Fig. 1C]



[Fig. 3]

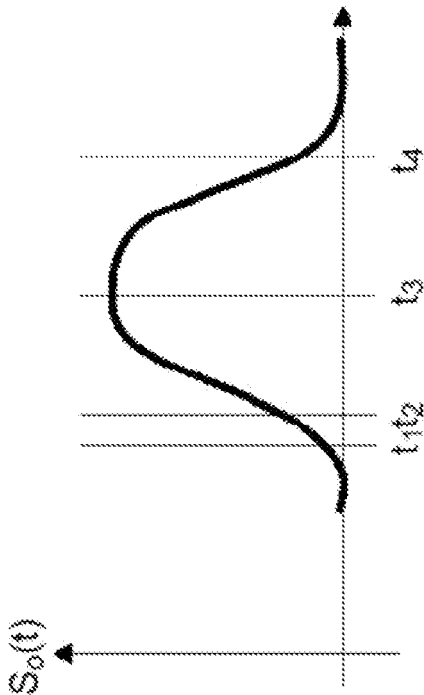


FIG.3

[Fig. 4]

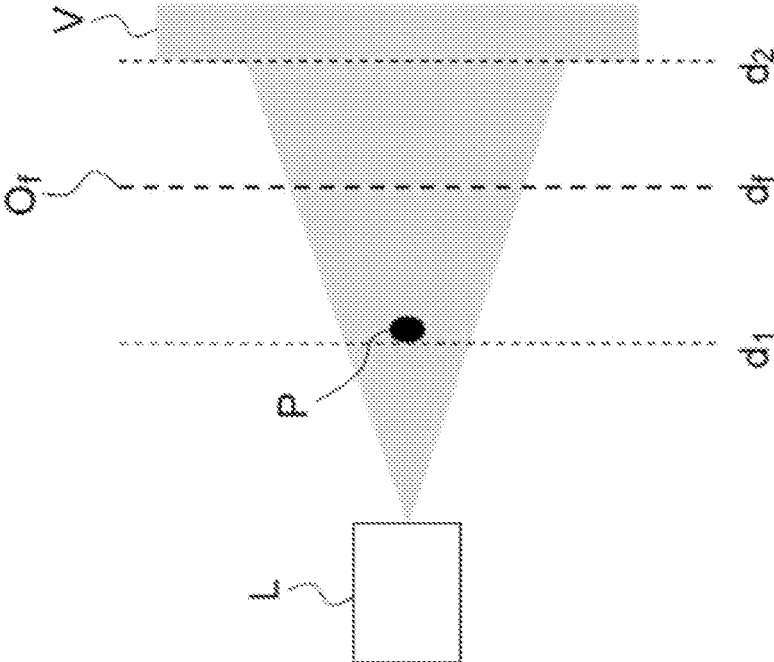


FIG.4

[Fig. 5]

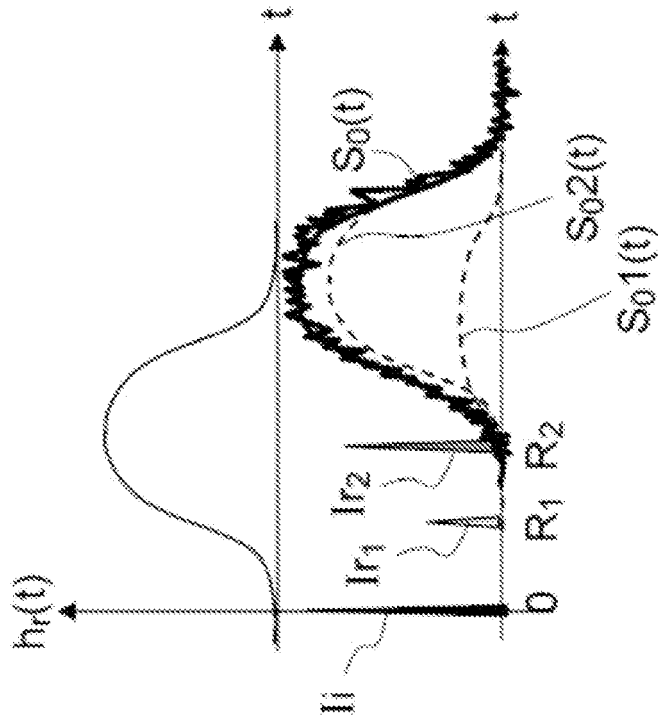


FIG.5

[Fig. 6]

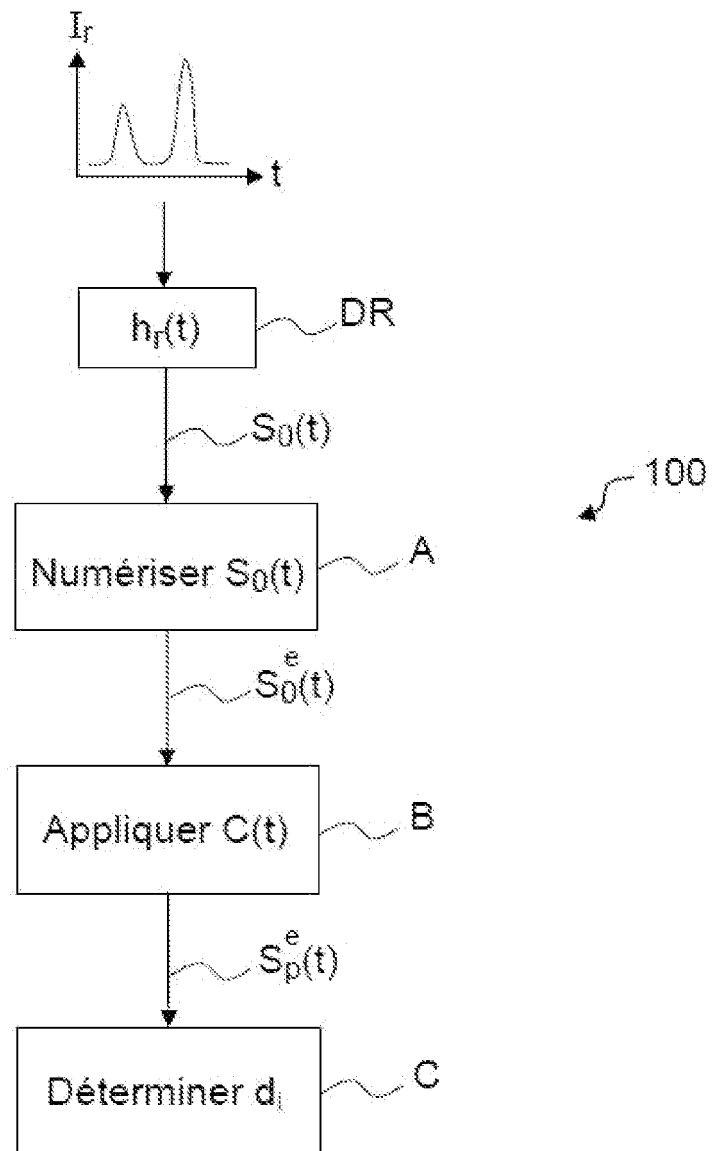


FIG.6

[Fig. 7]

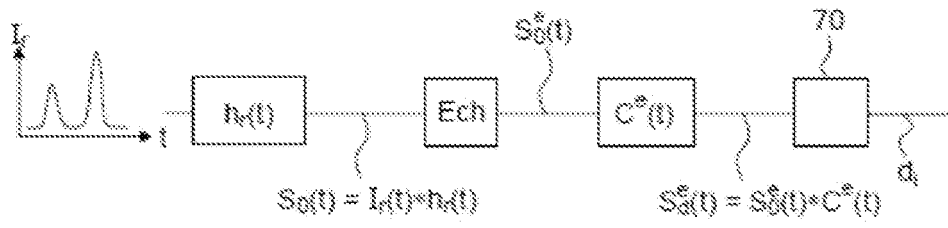


FIG.7

[Fig. 8]

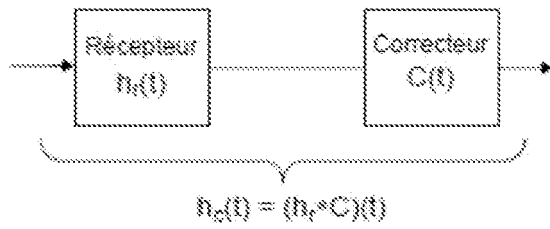


FIG.8

[Fig. 9]

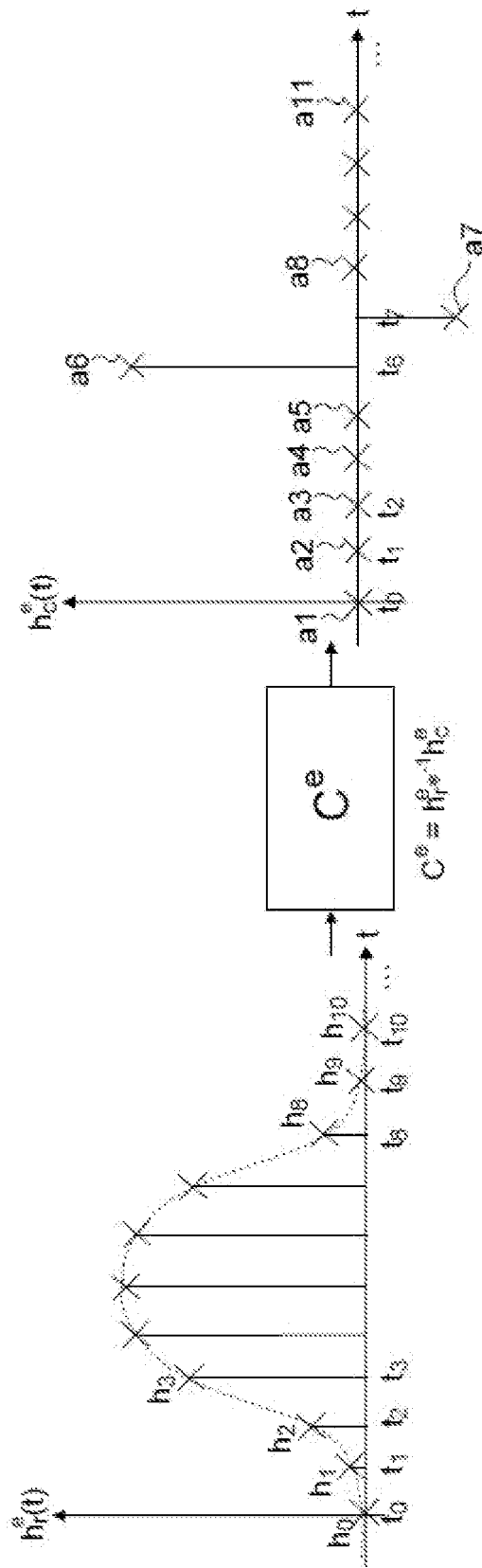


FIG.9

[Fig. 10]

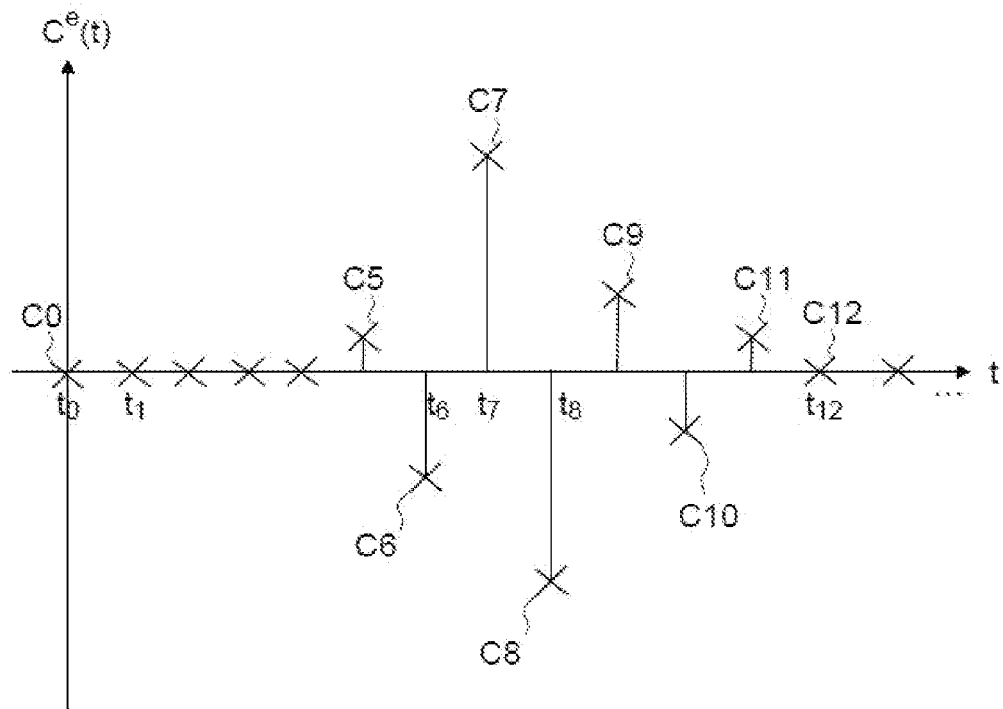


FIG.10

[Fig. 11]

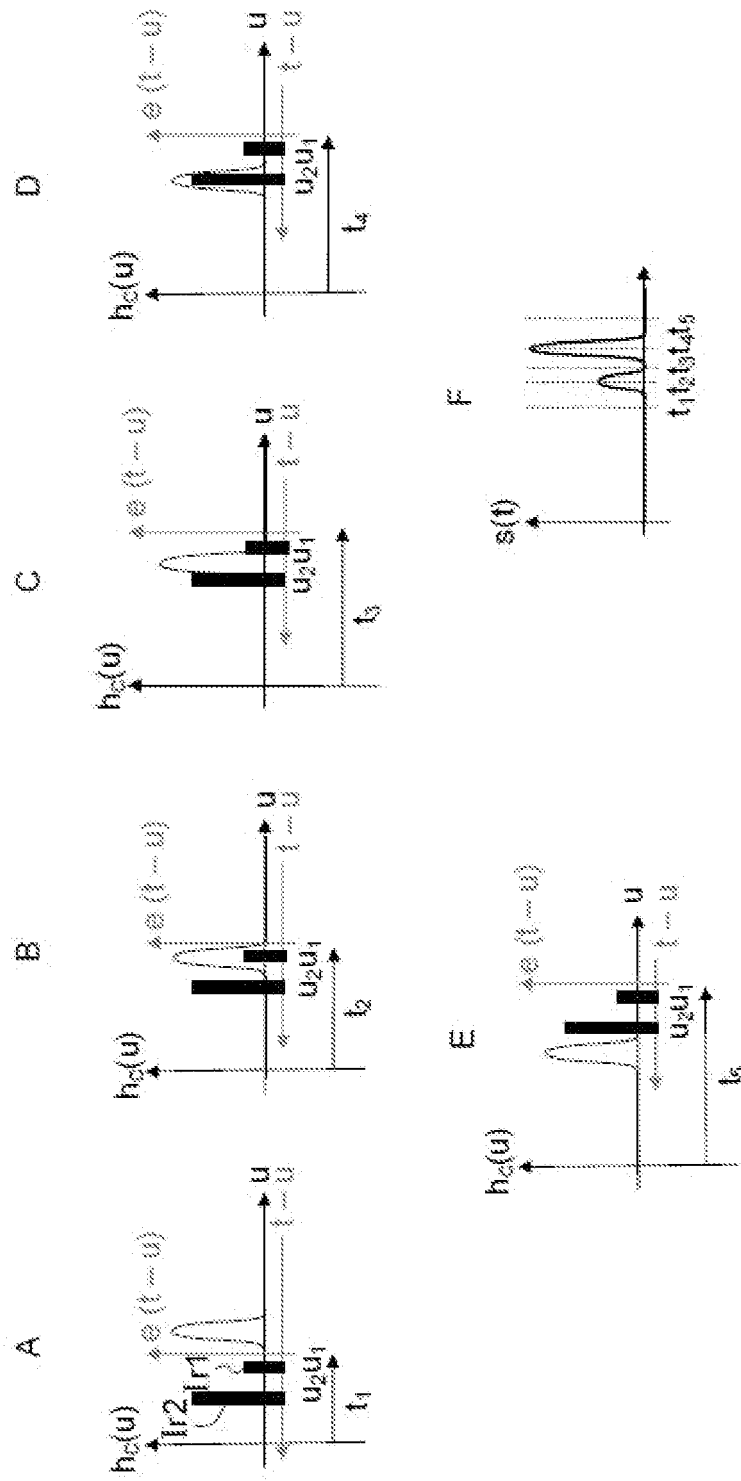


FIG. 11

[Fig. 12]

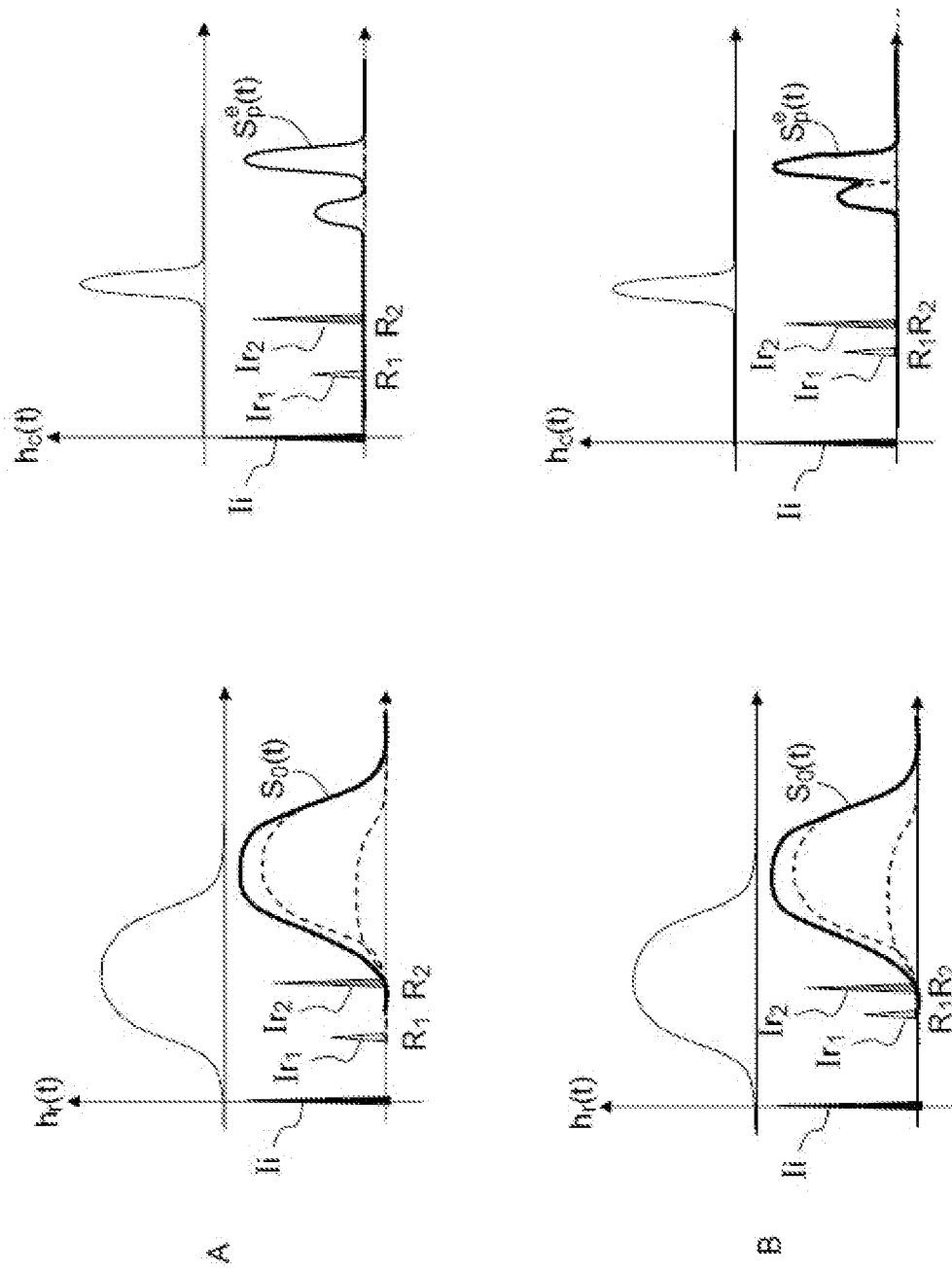


FIG.12

[Fig. 13]

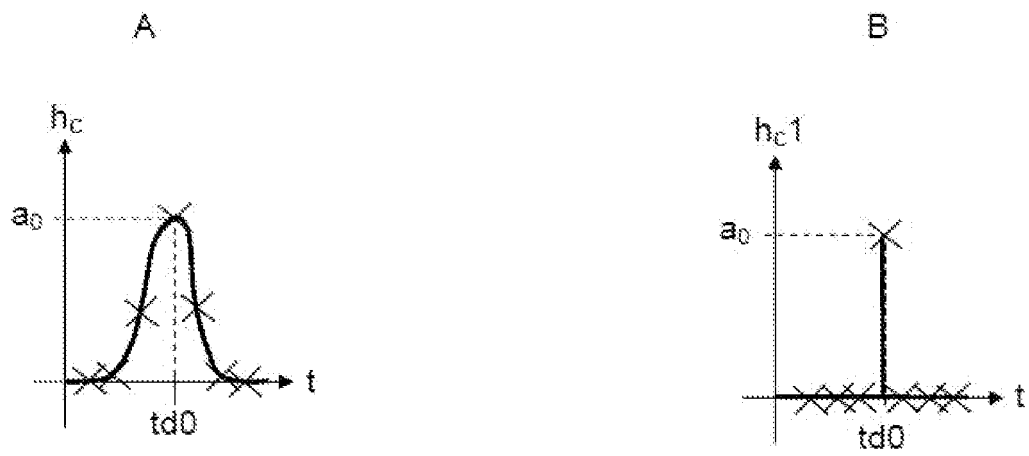


FIG.13

[Fig. 14]

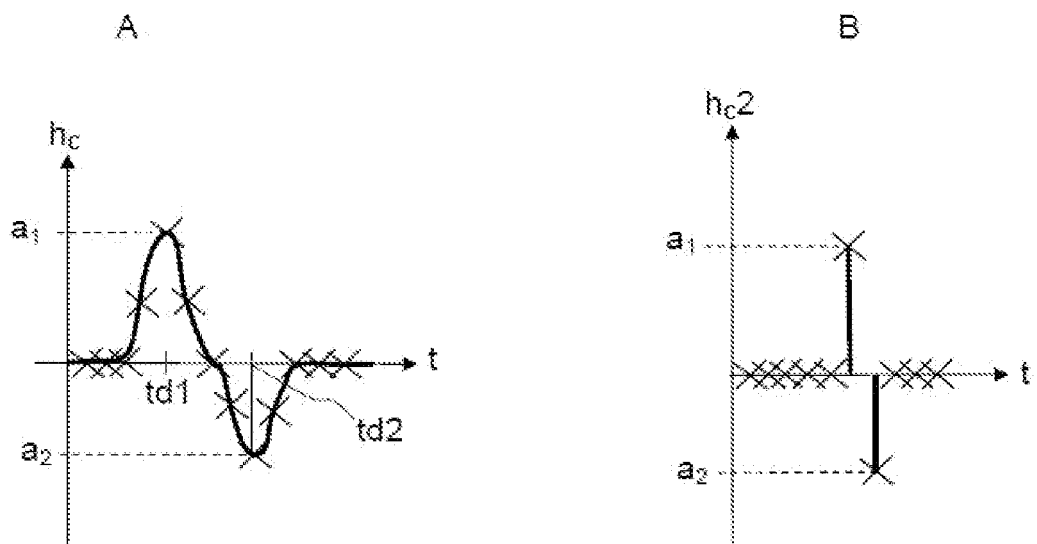


FIG.14

[Fig. 15]

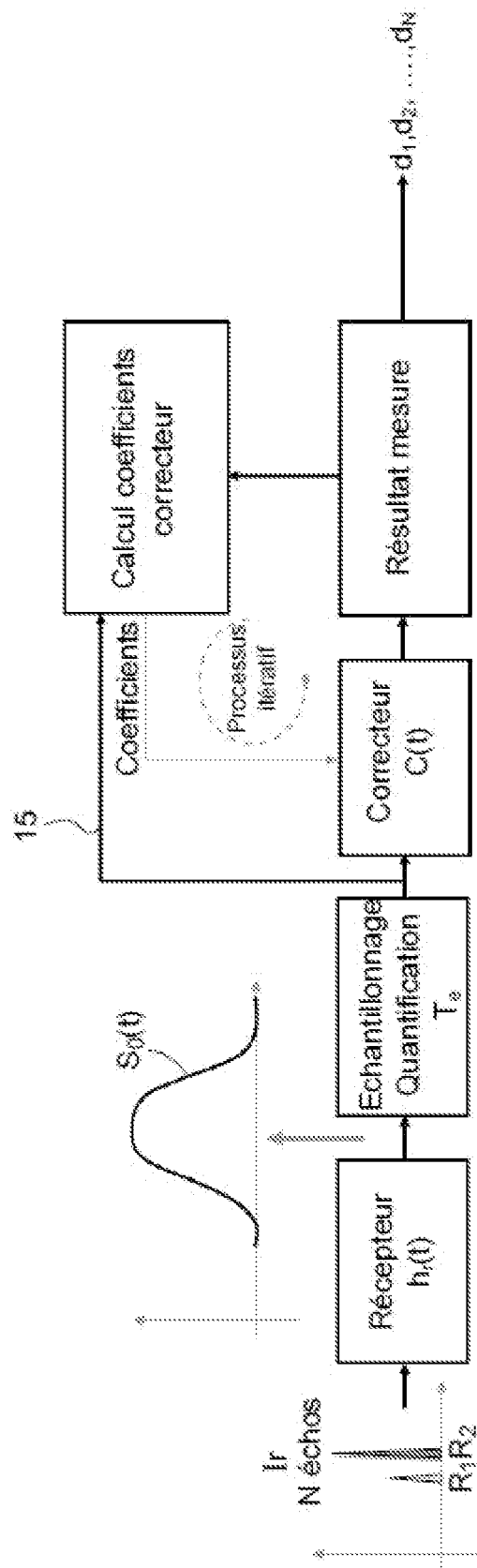


FIG.15

[Fig. 16]

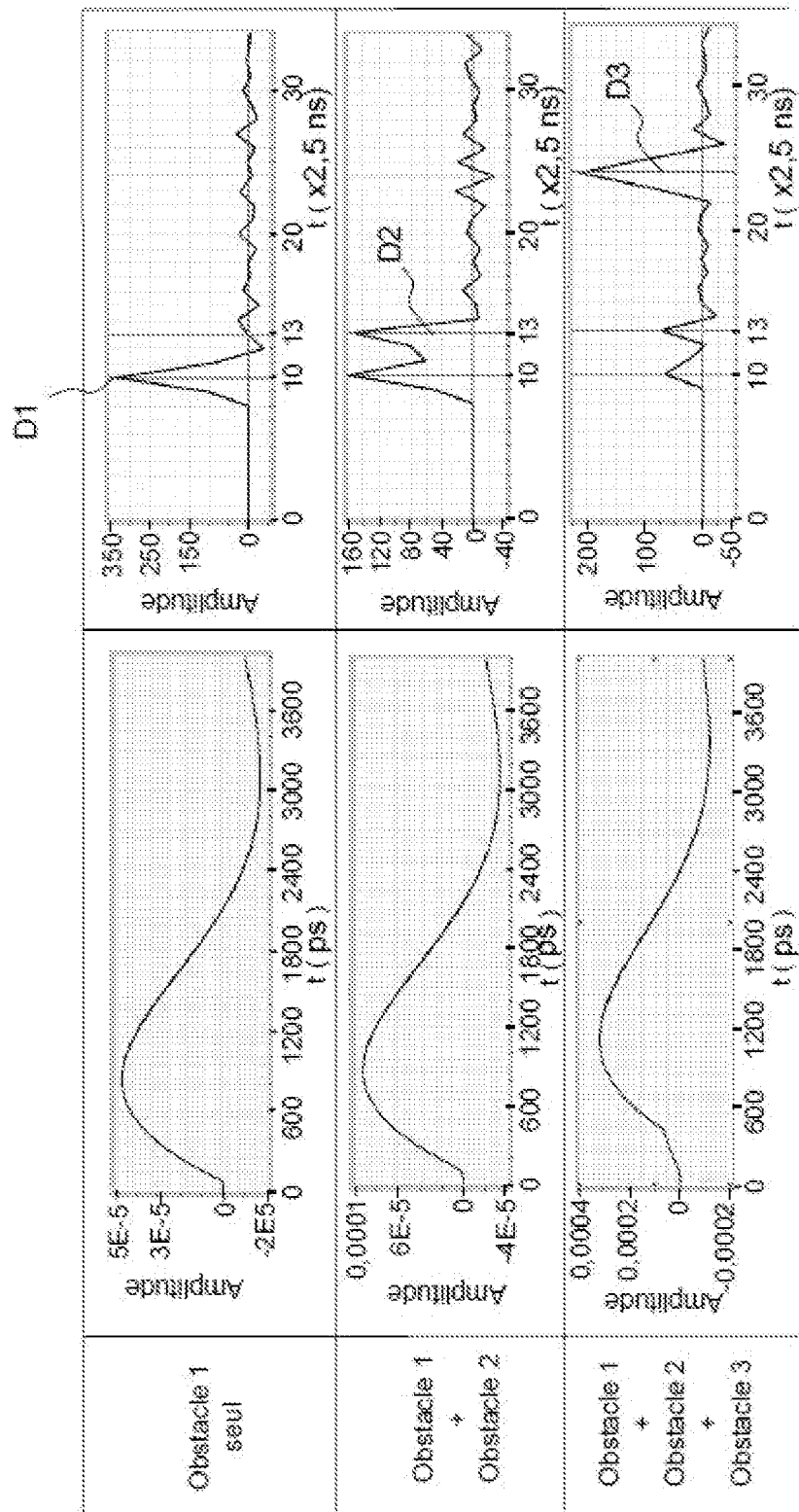
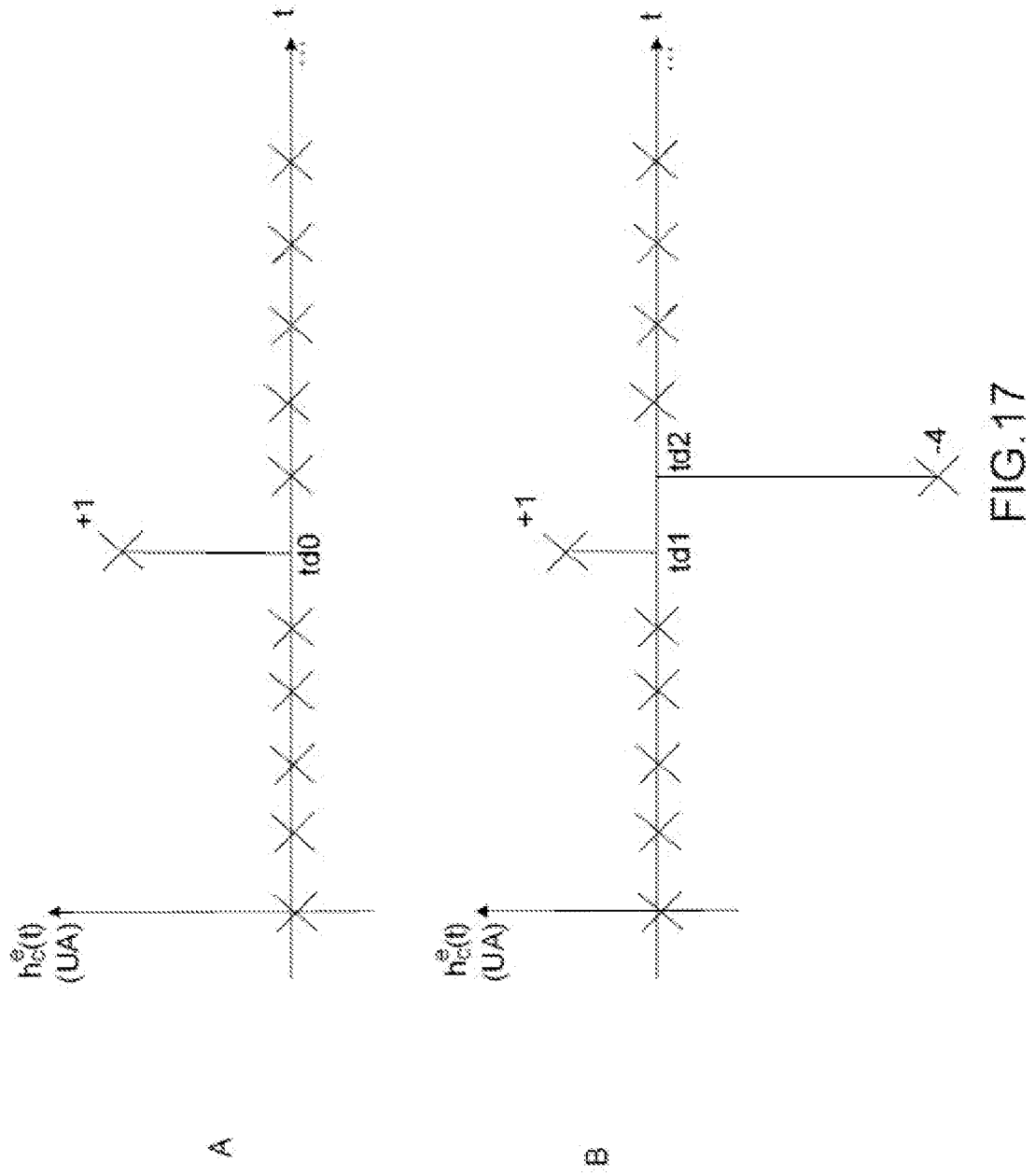
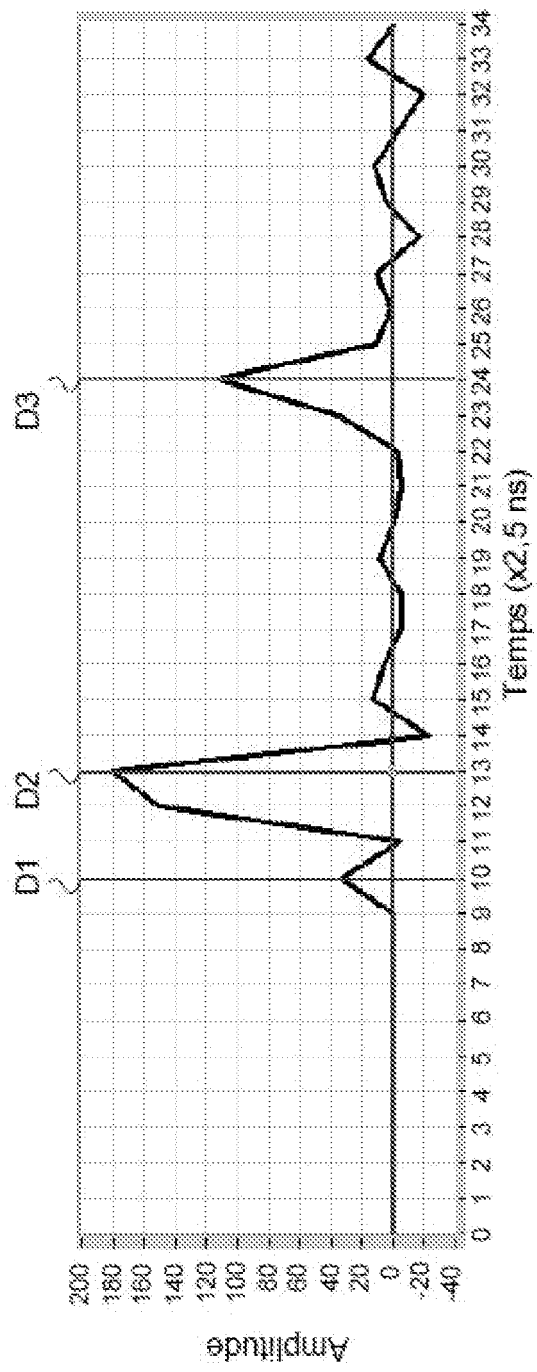


FIG.16

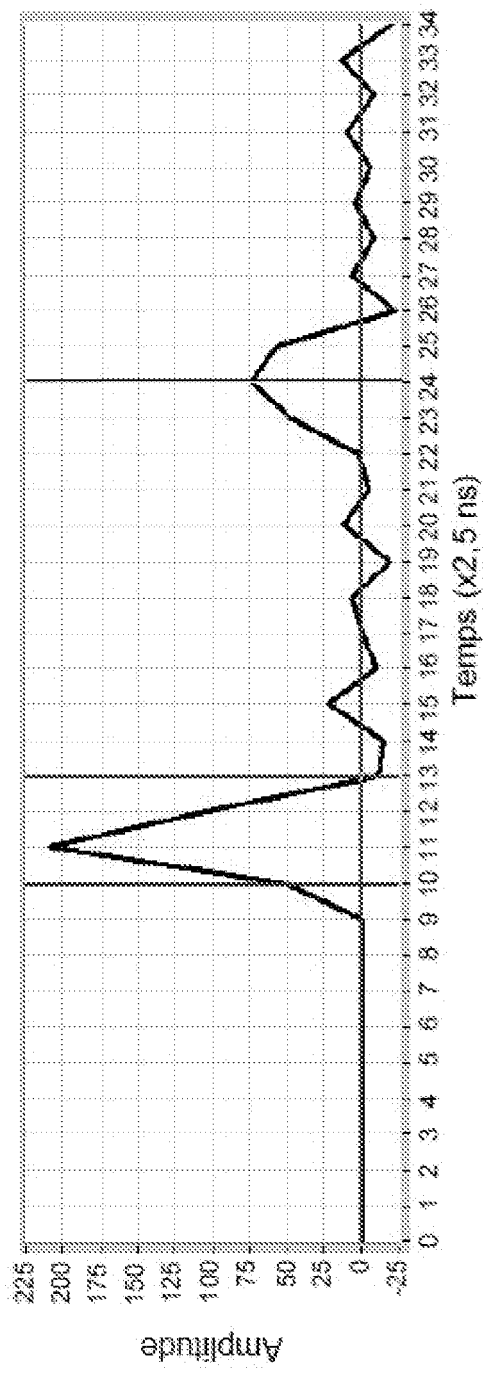
[Fig. 17]



[Fig. 18]



[Fig. 19]



[Fig. 20]

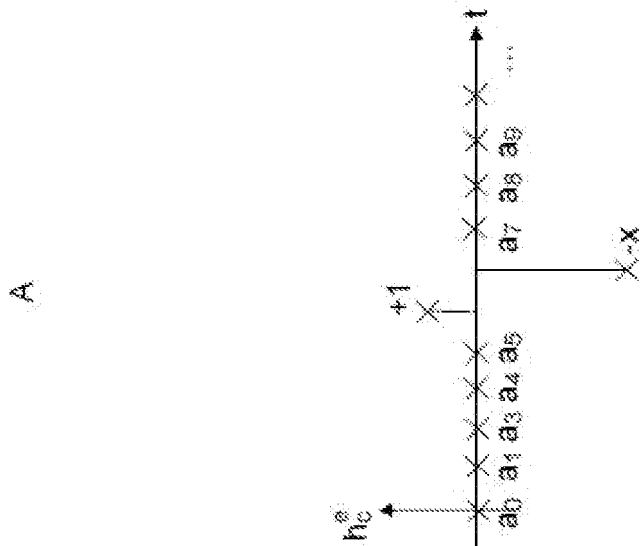
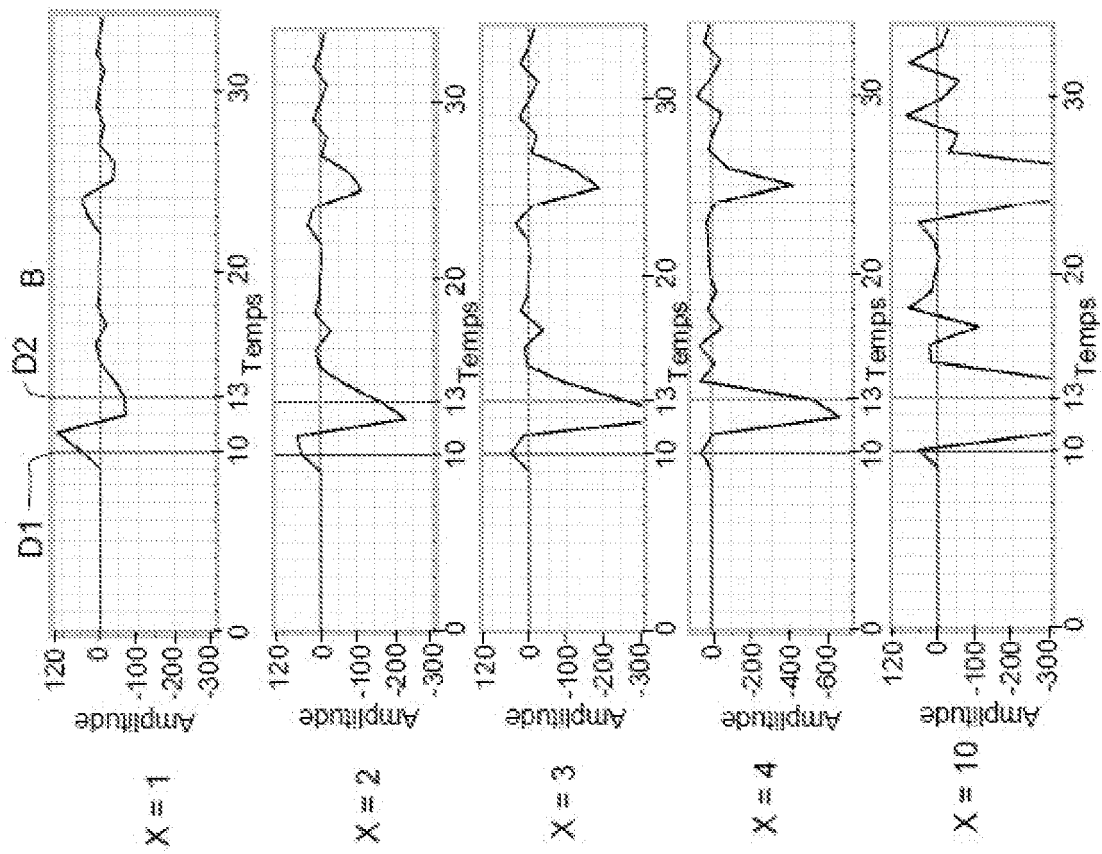


FIG.20

[Fig. 21]

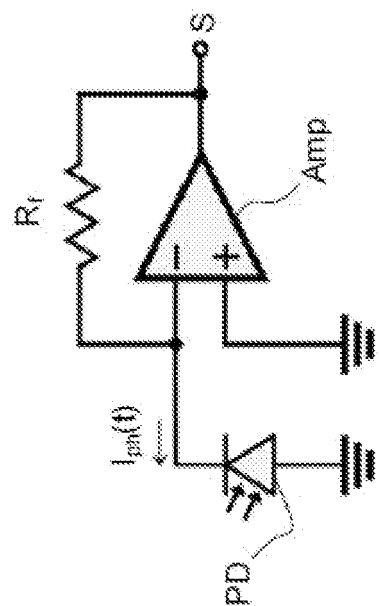


FIG.21

[Fig. 22]

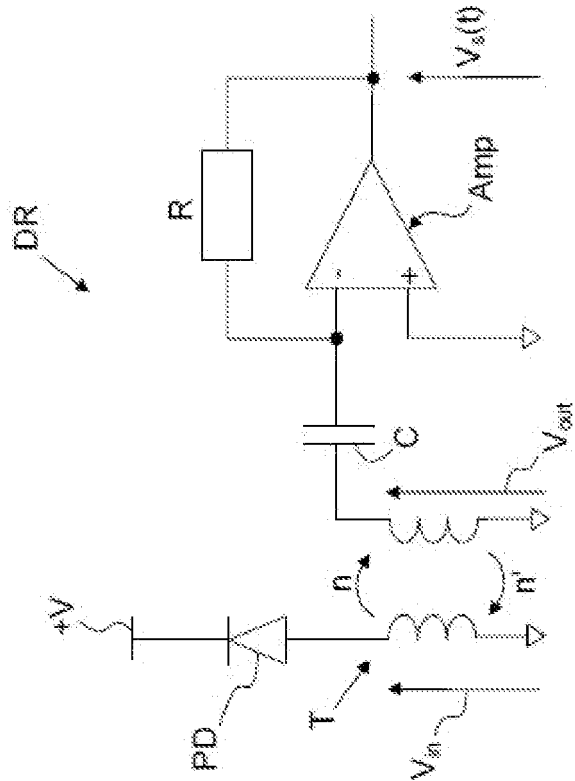


FIG.22

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

NEANT

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

US 2013/088726 A1 (GOYAL VIVEK K [US] ET AL) 11 avril 2013 (2013-04-11)

C E PARRISH ET AL: "Empirical comparison of full-waveform lidar algorithms: Range extraction and discrimination performance", PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING, vol. 77, no. 8, 1 août 2011 (2011-08-01), pages 825-838, XP055049568, ISSN: 0099-1112, DOI: 10.14358/PERS.77.8.825

WO 2013/120041 A1 (MASSACHUSETTS INST TECHNOLOGY [US]) 15 août 2013 (2013-08-15)

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

NEANT