

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

①1 N° de publication : **3 150 871**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **23 07264**

⑤1 Int Cl⁸ : **G 01 S 17/58** (2023.01), G 01 S 17/88, G 01 S 7/48,
G 01 B 9/02

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 SYSTEME LIDAR A DETECTION DIRECTE.

②2 Date de dépôt : 07.07.23.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public
de la demande : 10.01.25 Bulletin 25/02.

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 20.06.25 Bulletin 25/25.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *Office National d'Etudes et de
Recherches Aérospatiales Etablissement public à
caractère industriel et commercial — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : LOMBARD Laurent et MICHEL David
Tomline.

⑦3 Titulaire(s) : Office National d'Etudes et de
Recherches Aérospatiales Etablissement public à
caractère industriel et commercial.

⑦4 Mandataire(s) : IPAZ.

FR 3 150 871 - B1



Description

Titre de l'invention : SYSTEME LIDAR A DETECTION DIRECTE

Domaine technique

[0001] La présente description concerne un système LIDAR à détection directe, l'acronyme LIDAR signifiant «Light Detection And Ranging» en anglais ou système de détection et de mesure de distance par la lumière».

[0002] En fonction des applications pour lesquelles ils sont conçus, les systèmes LIDAR utilisent soit une détection directe soit une détection hétérodyne. Pour une détection hétérodyne, la partie du rayonnement qui a été rétrodiffusée par la cible puis collectée est mélangée avec du rayonnement qui provient directement de la source, et une intensité lumineuse de ce mélange de rayonnements est mesurée. Pour une détection directe, aucun mélange de la partie du rayonnement qui a été rétrodiffusée par la cible puis collectée n'est effectué avec du rayonnement qui proviendrait directement de la source. A la place d'un tel mélange, la partie du rayonnement qui a été rétrodiffusée par la cible puis collectée est injectée dans un interféromètre, et au moins une intensité du rayonnement qui est transmise en sortie par cet interféromètre est mesurée. Lorsqu'un tel système LIDAR à détection directe est utilisé pour mesurer la vitesse d'une cible, une valeur du décalage Doppler qui est produit par le déplacement de la cible est déduite de la valeur d'intensité de rayonnement qui est mesurée à la sortie de l'interféromètre. La présente description ne concerne que des systèmes LIDAR à détection directe.

Technique antérieure

[0003] Il est connu d'utiliser divers types d'interféromètres dans les systèmes LIDAR à détection directe pour caractériser la partie du rayonnement qui a été rétrodiffusée par la cible puis collectée. En particulier, il est connu d'utiliser un interféromètre de Mach-Zehnder ou un interféromètre de Michelson qui est combiné avec une lame de phase quart-d'onde, et de mesurer des intensités respectives de parties du rayonnement collecté qui sont transmises à quatre sorties optiques séparées d'un tel interféromètre. Une précision supérieure est ainsi obtenue dans la valeur qui est mesurée pour le décalage Doppler, et des ambiguïtés qui peuvent exister entre plusieurs valeurs possibles pour le décalage Doppler lorsqu'une seule intensité de rayonnement est mesurée à la sortie de l'interféromètre, sont supprimées.

[0004] Il est aussi connu d'utiliser de tels systèmes LIDAR pour effectuer des mesures aéronautiques, c'est-à-dire des mesures de vitesse de vent dans l'atmosphère terrestre. De telles mesures peuvent être effectuées à partir de porteurs variés du système LIDAR,

tels qu'un satellite, un aéronef, un navire, un véhicule terrestre ou un support terrestre fixe. Pour ces mesures de vitesse de vent, la cible est constituée par des particules et/ou des molécules qui sont en suspension dans l'air à l'intérieur d'une portion d'atmosphère qui est visée avec le système LIDAR. Dans ce cas, la partie du rayonnement qui est rétrodiffusée puis collectée pour effectuer une mesure possède une intensité très faible. Il est alors essentiel que la source du rayonnement dans le système LIDAR possède une puissance élevée. Cette exigence de forte puissance de rayonnement constitue une limitation des systèmes actuels.

[0005] Pour obtenir des valeurs instantanées de puissance de rayonnement qui soient supérieures, il est encore connu d'utiliser des sources de rayonnement de type sources laser impulsionnelles. Le rayonnement qui est émis par le système LIDAR en direction de la cible est alors constitué par une succession d'impulsions séparées de rayonnement laser. Chaque impulsion peut ainsi avoir une valeur de puissance-crête qui est élevée.

[0006] A ce jour, les sources de rayonnement les plus puissantes qui sont disponibles sont du type sources laser injectées. Elles présentent alors les inconvénients suivants :

- /i/ elles sont volumineuses et lourdes ;
- /ii/ elles nécessitent des alignements optiques précis, notamment pour réaliser l'injection de rayonnement dans la cavité amplificatrice, et à cause de cela elles sont très sensibles à des accélérations, des vibrations et des variations de température qui sont susceptibles de perturber les alignements optiques ; et
- /iii/ elles possèdent plusieurs modes de rayonnement laser qui sont effectifs simultanément, de sorte que la partie du rayonnement qui a été rétrodiffusée par la cible, collectée puis mesurée est une superposition de plusieurs contributions qui correspondent aux modes de la source de rayonnement laser.

[0007] L'inconvénient /iii/ est pénalisant lorsque l'interféromètre qui est utilisé dans le système LIDAR à détection directe possède des valeurs de fonction de transfert qui sont différentes d'un mode de rayonnement laser à l'autre. En fait, l'existence de plusieurs modes n'est pas compatible en général avec une fonction de transfert qui présente une sensibilité spectrale élevée, comme cela est nécessaire pour mesurer le décalage Doppler avec une précision suffisante. Mais le document FR 2 962 553 B1 fournit un réglage de l'interféromètre qui lui procure une valeur de fonction de transfert qui est la même pour tous les modes de rayonnement laser de la source de rayonnement qui est utilisée le système LIDAR à détection directe. Ce réglage consiste à adopter une valeur pour l'écart de longueur de trajet optique dans l'interféromètre qui est égale à la célérité de la lumière divisée par l'écart fréquentiel qui existe entre deux modes de rayonnement laser qui sont successifs spectralement. Cet écart fréquentiel entre les modes successifs de rayonnement laser de la source utilisée est désigné par

l'acronyme ISIP, pour intervalle spectral inter-pics. Le réglage d'interféromètre qui est fourni par le document FR 2 962 553 B1 est combiné avantageusement avec l'utilisation d'un interféromètre à deux chemins optiques dans l'un desquels est insérée une lame de phase quart-d'onde, et avec l'utilisation de quatre détecteurs optiques séparés qui sont situés aux quatre sorties optiques de l'interféromètre.

[0008] Par ailleurs, les inconvénients /i/ et /ii/ sont particulièrement pénalisants pour des systèmes LIDAR qui sont destinés à être utilisés à bord de satellites ou d'aéronefs.

[0009] Or il est connu de réaliser des sources de rayonnement laser en utilisant des technologies de fibres optiques et de circuits optiques intégrés. Les sources qui sont réalisées ainsi sont peu encombrantes, légères et peu sensibles aux pertes d'alignement optique. Mais la diffusion stimulée par effet Brillouin, ou SBS pour «Stimulated Brillouin Scattering» en anglais, qui se produit dans les guides d'ondes limite les valeurs maximales de puissance-crête qui peuvent être atteintes pour du rayonnement produit par de telles sources. Et à ce jour, à cause de cette diffusion stimulée par effet Brillouin, les valeurs de puissance-crête de rayonnement qui sont accessibles en utilisant des technologies de guides d'ondes, sont insuffisantes pour concevoir des systèmes LIDAR à détection directe qui soient adaptés pour des applications de mesure de vitesse aéronautique.

Problème technique

[0010] A partir de cette situation, un but de la présente invention est de proposer un nouveau système LIDAR à détection directe qui ne présente pas les inconvénients précités.

[0011] Plus particulièrement, l'invention a pour but de proposer un système LIDAR à détection directe qui soit moins encombrant, plus léger, moins sensible à des pertes d'alignement optique, et moins onéreux que les systèmes de l'art antérieur.

[0012] Notamment, l'invention a pour but de proposer un tel système LIDAR à détection directe qui soit adapté pour des applications de mesure de vitesse de vent. Pour cela, une puissance élevée est recherchée pour le rayonnement qui est émis en direction de la cible.

[0013] Enfin, un but complémentaire de l'invention est de proposer un tel système LIDAR à détection directe pour lequel le rayonnement qui est émis en direction de la cible possède une valeur de longueur d'onde qui est inférieure à 2 μm (micromètre). Autrement dit, ce rayonnement appartient à l'un des domaines spectraux ultraviolet, visible et proche infrarouge.

Résumé de l'invention

[0014] Pour atteindre l'un au moins de ces buts ou un autre, un premier aspect de l'invention propose un nouveau système LIDAR qui comprend :

- un ensemble de source de rayonnement, adapté pour produire en sortie du

rayonnement laser constitué par plusieurs composantes spectrales séparées par un intervalle spectral inter-pics qui est identique entre paires de composantes spectrales voisines spectralement ;

- une optique d'émission et de collecte de rayonnement, agencée pour transmettre le rayonnement laser en direction d'un volume-cible pendant une utilisation du système LIDAR, et adaptée pour collecter une partie du rayonnement laser qui a été diffusée par des molécules ou particules situées dans le volume-cible, appelée rayonnement collecté ;

- un interféromètre, agencé pour recevoir en entrée le rayonnement collecté, et pour transmettre, pendant l'utilisation du système LIDAR, des parties de ce rayonnement collecté simultanément par au moins deux chemins optiques jusqu'à au moins une zone de superposition des chemins optiques, de façon à créer une interférence de rayonnement dans chaque zone de superposition, avec un écart de longueur de trajet optique qui existe entre les chemins optiques ; et

- au moins un détecteur optique, agencé pour mesurer au moins une intensité de rayonnement qui existe dans chaque zone de superposition.

[0015] En outre, le système LIDAR de l'invention est agencé de sorte que le produit de la valeur de l'intervalle spectral inter-pics exprimé en hertz par la valeur de l'écart de longueur de trajet optique soit égal à la valeur de célérité de la lumière dans le vide.

[0016] Par conséquent, le système LIDAR de l'invention est du type à détection directe, avec un ensemble de source de rayonnement qui est adapté pour produire le rayonnement laser avec plusieurs composantes spectrales en forme de pics séparés. L'interféromètre est adapté pour posséder des valeurs de fonction de transfert qui sont identiques pour toutes les composantes spectrales en pics. De cette façon, toutes les composantes spectrales en pics du rayonnement collecté contribuent au signal de mesure qui est délivré par chaque détecteur optique et qui est utilisé pour obtenir la valeur de vitesse du contenu du volume-cible. Un rapport signal-sur-bruit qui est effectif pour chaque signal de mesure est ainsi augmenté.

[0017] Selon l'invention, l'ensemble de source de rayonnement comprend une source laser et au moins un modulateur agencé pour moduler un rayonnement initial qui est produit par la source laser, conformément à un signal électrique de modulation qui est reçu par le modulateur lors de l'utilisation du système LIDAR, de façon à produire les composantes spectrales multiples du rayonnement laser qui est transmis en direction du volume-cible. De plus, le système LIDAR comprend en outre un générateur qui est adapté pour produire le signal électrique de modulation, et qui est connecté pour transmettre ce signal électrique de modulation au modulateur, le signal électrique de modulation étant périodique avec une fréquence de composante fondamentale qui détermine l'intervalle spectral inter-pics.

- [0018] Dans le cadre de la présente invention, on entend par intervalle spectral inter-pics une distance spectrale qui existe entre des composantes spectrales d'un signal ou d'un rayonnement dont le spectre est constitué de pics séparés. L'intensité spectrale de ce signal ou rayonnement entre les pics est nulle ou presque nulle, ou très inférieure à ses valeurs dans les pics. Une telle définition de l'intervalle spectral inter-pics est compatible avec une largeur spectrale de chaque pic qui n'est pas nulle, mais qui est inférieure à l'intervalle spectral inter-pics. L'intervalle spectral inter-pics qui est utilisé dans l'invention, pour un rayonnement qui possède un spectre en forme de peigne, est une généralisation de l'intervalle spectral libre tel que défini communément une source laser à plusieurs modes de rayonnement laser qui sont effectifs simultanément. Pour un rayonnement, l'intervalle spectral inter-pics peut être exprimé de façon équivalente en termes de fréquence optique de ce rayonnement, c'est-à-dire en hertz, ou en termes de longueur d'onde du rayonnement, c'est-à-dire en mètres, compte tenu de la relation $ISIP(\text{en mètres}) = (\lambda/f) \bullet ISIP(\text{en hertz})$, où ISIP désigne l'intervalle spectral inter-pics, f est la fréquence optique du rayonnement exprimée en hertz, λ est sa longueur d'onde dans le vide exprimée en mètres avec $\lambda = C/f$, où C est la célérité de la lumière dans le vide. Dans le cadre de la présente invention, la valeur de l'intervalle spectral inter-pics du rayonnement exprimé en hertz est très inférieure à sa valeur de fréquence optique. La valeur d'intervalle spectral inter-pics du même rayonnement exprimée en mètres est de même très inférieure à sa valeur de longueur d'onde.
- [0019] En particulier, lorsqu'aucun convertisseur de fréquence optique n'est présent en aval du modulateur dans le système LIDAR de l'invention, la fréquence du signal électrique de modulation est égale à l'intervalle spectral inter-pics du rayonnement qui est transmis en direction du volume-cible, exprimé en hertz.
- [0020] Ainsi, selon l'invention, la pluralité des composantes spectrales en pics séparés du rayonnement qui est transmis en direction du volume-cible est générée volontairement, par modulation du rayonnement laser au sein de l'ensemble de source de rayonnement. La valeur de l'intervalle spectral inter-pics est ainsi contrôlée électriquement. Il est alors facile d'ajuster l'une par rapport à l'autre la valeur de cet intervalle spectral inter-pics et celle de l'écart de longueur de trajet optique qui existe à l'intérieur de l'interféromètre, pour que toutes les composantes spectrales en pics séparés du rayonnement collecté contribuent à augmenter l'intensité de rayonnement qui est mesurée par chaque détecteur optique et utilisée pour chaque détermination de vitesse de cible.
- [0021] Le système LIDAR à détection directe de l'invention peut notamment être adapté pour une application aéronautique. Dans ce cas, lorsque le volume-cible est une portion d'atmosphère pendant l'utilisation du système LIDAR, ce système LIDAR délivre une valeur de vitesse de vent qui existe dans la portion d'atmosphère, en tant que résultat

de mesure.

- [0022] L'ensemble de source de rayonnement du système LIDAR à détection directe de l'invention peut être adapté en outre pour produire le rayonnement laser qui est transmis en direction du volume-cible sous forme d'une série d'impulsions successives. Des valeurs élevées de puissance-crête peuvent ainsi être obtenues pour ce rayonnement. Chaque impulsion du rayonnement laser possède alors individuellement un spectre qui est constitué par les composantes spectrales multiples en forme de pics séparés par l'intervalle spectral inter-pics.
- [0023] De façon préférée, l'ensemble de source de rayonnement peut être à base de fibres optiques ou d'une combinaison de fibres optiques et d'au moins un circuit optique intégré. L'ensemble de source de rayonnement peut ainsi être peu encombrant, léger et peu sensible à des pertes d'alignement optique. En outre, grâce à la multiplicité des composantes spectrales en pics du rayonnement qui est produit par l'ensemble de source de rayonnement, la puissance de ce rayonnement peut être supérieure, voire très supérieure, à la limite qui résulte de la diffusion stimulée par effet Brillouin, alors que la puissance de chaque composante spectrale en pic est individuellement inférieure à cette limite.
- [0024] Dans des premiers modes de réalisation de l'invention, la modulation peut être appliquée au niveau d'une source d'alimentation électrique de l'ensemble de source de rayonnement. Dans ce cas, la source laser peut comprendre une diode laser, de préférence du type DFB pour «Distributed FeedBack» en anglais ou diode laser à rétroaction répartie, et une source électrique qui est connectée pour fournir un courant d'alimentation électrique à cette diode laser. Le modulateur est alors adapté pour varier le courant d'alimentation électrique qui est fourni par la source électrique conformément au signal électrique de modulation. D'une façon pratique, un tel modulateur peut être intégré à la source électrique.
- [0025] Dans des seconds modes de réalisation de l'invention, la modulation peut être appliquée au rayonnement à l'intérieur de l'ensemble de source de rayonnement. Dans cet autre cas, le modulateur peut être un modulateur électro-optique disposé entre la source laser et une sortie optique de l'ensemble de source de rayonnement qui est reliée optiquement à l'optique d'émission et de collecte de rayonnement. Un tel modulateur électro-optique est adapté pour appliquer au rayonnement initial produit par la source laser un déphasage optique qui varie conformément au signal électrique de modulation. Dans la pratique, le modulateur électro-optique peut être incorporé dans un circuit optique intégré.
- [0026] Ces premiers et seconds modes de réalisation peuvent être combinés chacun avec tous les perfectionnements, préférences et caractéristiques optionnelles qui sont cités dans la suite.

[0027] En particulier, le générateur peut être adapté pour produire le signal électrique de modulation de sorte qu'il possède au moins deux composantes harmoniques. La limite de puissance qui est due à l'effet Brillouin peut ainsi être dépassée dans une mesure d'autant plus grande que le signal électrique de modulation contient un plus grand nombre de composantes harmoniques. Préférentiellement, le signal électrique de modulation peut posséder moins de dix-neuf composantes harmoniques.

[0028] Dans des modes préférés de réalisation de l'invention, le système LIDAR à détection directe peut permettre d'ajuster ou d'asservir l'intervalle spectral inter-pics à la valeur réelle de l'écart de longueur de trajet optique. Pour cela, l'au moins un détecteur optique peut être adapté pour mesurer simultanément plusieurs intensités de rayonnement qui existent dans l'au moins une zone de superposition, correspondant à des valeurs différentes de l'écart de longueur de trajet optique qui existe entre les chemins optiques. Le système LIDAR à détection directe peut alors comprendre en outre :

- un système d'ajustement ou d'asservissement qui est connecté à une entrée de commande du générateur, et qui est adapté pour ajuster la fréquence de la composante fondamentale du signal électrique de modulation qui détermine l'intervalle spectral inter-pics, de façon à maximiser un contraste qui existe entre les intensités mesurées simultanément, faisant ainsi que le produit de la valeur de l'intervalle spectral inter-pics exprimé en hertz par la valeur de l'écart de longueur de trajet optique soit égal à la valeur de célérité de la lumière dans le vide.

Un tel ajustement ou asservissement de l'intervalle spectral inter-pics peut être effectué au cours d'une mission, notamment automatiquement. Un asservissement automatique peut être réalisé en générant une variation automatique de la fréquence du signal électrique de modulation, puis en utilisant un algorithme de détermination de maximum pour sélectionner celle des valeurs générées pour la fréquence du signal électrique de modulation qui maximise le contraste entre les intensités mesurées simultanément. Cette valeur qui produit la maximisation du contraste est alors adoptée pour effectuer des mesures utiles relatives aux molécules ou particules situées dans le volume-cible.

[0029] De façon générale pour l'invention, l'interféromètre peut avantageusement être d'un type à quatre sorties optiques qui sont en quadrature les unes par rapport aux autres. Pour cela, l'interféromètre peut comprendre :

- un diviseur de faisceau, qui est agencé pour séparer les deux chemins optiques à partir d'une entrée optique de l'interféromètre ;
- une lame de phase quart-d'onde, qui est disposée dans l'un des deux chemins optiques ;
- un dispositif de regroupement de faisceaux, qui est agencé pour regrouper les deux

chemins optiques, et adapté pour créer deux zones de superposition de rayonnements ;
et

- deux séparateurs de polarisations linéaires qui sont situés dans l'une et l'autre des deux zones de superposition de rayonnements créées par le dispositif de regroupement de faisceaux, et qui sont orientés de sorte que des directions de polarisation de chacun des séparateurs de polarisations linéaires soient parallèles une-à-une à un axe lent et à un axe rapide de la lame de phase quart-d'onde.

Dans ce cas, le système LIDAR à détection directe peut comprendre quatre détecteurs optiques qui sont situés un-à-un à des sorties optiques séparées des deux séparateurs de polarisations linéaires. Une telle constitution permet de lever des ambiguïtés entre plusieurs valeurs pour le décalage Doppler qui seraient compatibles avec une même valeur d'intensité de rayonnement mesurée par un seul détecteur optique. Cette constitution à quatre détecteurs optiques améliore aussi la précision de chaque valeur de décalage Doppler qui est déterminée.

[0030] Alternativement, l'interféromètre peut être adapté pour produire une figure d'interférence dans la zone de superposition des chemins optiques. Dans ce cas, l'au moins un détecteur optique peut comprendre un détecteur d'image qui est agencé pour saisir en image la figure d'interférence, chaque intensité de rayonnement mesurée correspondant à un point respectif dans la figure d'interférence.

[0031] Le système d'ajustement ou d'asservissement qui a été cité plus haut pour ajuster la fréquence de la composante fondamentale du signal électrique de modulation peut être utilisé aussi bien avec un type d'interféromètre à quatre sorties optiques qui sont en quadrature les unes par rapport aux autres qu'avec un type d'interféromètre qui produit une figure d'interférence. La formule utilisée pour calculer le contraste est alors adaptée alternativement au cas de quatre sorties optiques ou au cas de figure d'interférence.

[0032] Possiblement, le système LIDAR à détection directe de l'invention peut comprendre en outre l'un au moins des composants additionnels suivants :

- une unité d'analyse, configurée pour déduire une valeur du décalage Doppler qui est produit par la vitesse d'un contenu du volume-cible, ou pour déduire une valeur de cette vitesse, en utilisant au moins un signal de mesure respectif qui est délivré par chaque détecteur optique.

- au moins un préamplificateur ou amplificateur optique, qui est situé sur un trajet du rayonnement laser entre la source laser et l'optique d'émission et de collecte de rayonnement, et qui est adapté pour augmenter une puissance du rayonnement laser ; et

- un convertisseur de fréquence optique, qui est situé sur un trajet du rayonnement laser entre la source laser et l'optique d'émission et de collecte de rayonnement. En particulier, un tel convertisseur de fréquence optique peut être adapté pour doubler ou

tripler une fréquence optique respective de chaque composante spectrale du rayonnement laser.

[0033] Un second aspect de l'invention propose un procédé de mesure d'une vitesse de vent, comprenant de diriger une ligne de visée d'un système LIDAR à détection directe qui est conforme au premier aspect de l'invention, vers une portion d'atmosphère qui constitue le volume-cible, et de déduire une valeur de la vitesse du vent qui existe dans la portion d'atmosphère en utilisant au moins un signal de mesure respectif qui est délivré par chaque détecteur optique. Dans ce procédé, le système LIDAR peut être embarqué à bord d'un satellite ou d'un aéronef, notamment à bord d'un avion, d'un hélicoptère, d'un drone ou d'une station stratosphérique.

Brève description des figures

[0034] Les caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement dans la description détaillée ci-après d'exemples de réalisation non-limitatifs, en référence aux figures annexées parmi lesquelles :

[0035] [Fig.1] est un diagramme synoptique d'un système LIDAR à détection directe qui est conforme à l'invention ;

[0036] [Fig.2] est un diagramme temporel d'émission qui illustre une composition spectrale d'un rayonnement qui est émis par le système LIDAR à détection directe de [Fig.1] ;

[0037] [Fig.3] est un diagramme synoptique d'un interféromètre de Mach-Zehnder qui peut être utilisé dans le système LIDAR à détection directe de [Fig.1] ;

[0038] [Fig.4] est un diagramme composite qui illustre des variations spectrales de fonctions de transfert de l'interféromètre de [Fig.3], lorsque cet interféromètre est utilisé dans le système LIDAR à détection directe de [Fig.1] ;

[0039] [Fig.5] correspond à [Fig.1] pour une autre réalisation d'un système LIDAR à détection directe qui est conforme à l'invention et qui utilise un interféromètre de Fabry-Pérot ;

[0040] [Fig.6] correspond à [Fig.5] pour encore une autre réalisation d'un système LIDAR à détection directe qui est conforme à l'invention et qui utilise un interféromètre de Michelson ; et

[0041] [Fig.7] correspond à [Fig.1] pour encore une autre réalisation d'un système LIDAR à détection directe qui est conforme à l'invention et qui utilise une source laser de type diode laser.

Description détaillée de l'invention

[0042] Pour raison de clarté, les dimensions des éléments qui sont représentés dans ces figures ne correspondent ni à des dimensions réelles, ni à des rapports de dimensions réels. En outre, tous les composants représentés ne le sont que symboliquement.

[0043] En référence à [Fig.1], un système LIDAR à détection directe 100 comprend un

ensemble de source de rayonnement 1, une optique d'émission et de collecte de rayonnement 2, un interféromètre 3, quatre détecteurs optiques $4_1, 4_2, 4_3, 4_4$ et une unité d'analyse 5.

[0044] L'ensemble de source de rayonnement 1 comprend une source laser à émission continue 10, par exemple avec une valeur de longueur d'onde d'émission qui peut être sensiblement égale à $1,03 \mu\text{m}$, dans le domaine proche-infrarouge, et qui est notée λ_0 dans la suite. La valeur de fréquence optique associée est $f_0 = 283 \text{ THz}$ (térahertz). De façon connue, une telle source laser à émission continue peut être constituée à partir d'une fibre optique dopée à l'ytterbium (Yb). L'ensemble de source de rayonnement 1 comprend en outre un modulateur acousto-optique 11 qui est noté MAO et commandé pour découper en impulsions successives le rayonnement d'émission de la source laser 10. Chaque impulsion de rayonnement qui est ainsi formée est monochromatique avec une durée individuelle d'impulsion qui peut être sensiblement égale à 20 ns (nanoseconde), et une fréquence de répétition de ces impulsions peut être sensiblement égale à 10 kHz (kilohertz).

[0045] Selon l'invention, l'ensemble de source de rayonnement 1 comprend en outre un autre modulateur 12, et un générateur électrique 13 qui est noté GENE. Le modulateur 12 peut être du type électro-optique, noté MEO, et réalisé par exemple sous forme d'un circuit optique intégré à partir d'un substrat de niobate de lithium (LiNbO_3). Le générateur électrique 13 peut être d'un type couramment désigné par AWG, pour «Arbitrary Waveform Generator» en anglais. Une sortie électrique de ce générateur 13 est connectée à une entrée de commande du modulateur 12 pour transmettre à ce dernier un signal électrique de modulation noté S_{mod} . Selon une caractéristique de l'invention, ce signal de modulation S_{mod} est périodique avec une fréquence notée $f(S_{\text{mod}})$. Il comprend donc une composante fondamentale, de fréquence $f(S_{\text{mod}})$, et au moins une composante harmonique dont la fréquence est multiple de $f(S_{\text{mod}})$. Ainsi, le modulateur 12 confère à chaque impulsion de rayonnement monochromatique telle que transmise par le modulateur 11, un spectre en forme de peigne qui possède un nombre de composantes spectrales déterminé par celui des composantes spectrales du signal modulation S_{mod} . Chaque composante spectrale des impulsions de rayonnement possède une forme de pic séparé le long d'un axe de fréquence optique. La fréquence $f(S_{\text{mod}})$ apparaît alors comme un intervalle spectral inter-pics entre deux composantes spectrales de chaque impulsion de rayonnement telle qu'issue du modulateur 12, qui sont successives sur l'axe de fréquence optique. Par exemple, le spectre de chaque impulsion de rayonnement à la sortie du modulateur 12 peut être composé de dix-sept composantes spectrales en pics séparés, avec l'intervalle spectral inter-pics qui peut être sensiblement égal à 3,33 GHz (gigahertz). En outre, le choix des amplitudes individuelles des composantes spectrales dans le signal de modulation S_{mod} permet

d'ajuster les amplitudes des composantes spectrales dans les impulsions de rayonnement. De cette façon, les composantes spectrales des impulsions de rayonnement peuvent posséder des valeurs de puissance respectives qui sont ajustées à volonté par paires symétriquement par rapport à la fréquence optique f_0 de la source laser 10. Possiblement, lors de la synthèse du signal électrique de modulation S_{mod} par le générateur 13, une amplitude nulle peut être conférée à la composante fondamentale de ce signal S_{mod} , ou une amplitude de composante spectrale pour la composante fondamentale du signal S_{mod} qui est très inférieure à celle d'au moins une de ses composantes harmoniques.

- [0046] De façon équivalente, le modulateur 12 à fonction de génération de peigne spectral peut être déplacé entre la source laser à émission continue 10 et le modulateur 11 à fonction de découpage en impulsions. Le modulateur 12 à fonction de génération de peigne spectral est introduit pour l'invention dans l'ensemble de source de rayonnement 1, à l'intérieur du système LIDAR à détection directe 100.
- [0047] Possiblement, l'ensemble de source de rayonnement 1 peut comprendre en outre un préamplificateur optique 14, noté PREAMP., un premier amplificateur optique 15, noté BOOST., et un second amplificateur optique 16 en tant que dernier étage d'amplification optique. Le second amplificateur optique 16 peut être du type à cristal de grenat d'aluminium et d'yttrium dopé à l'ytterbium, noté Yb:YAG, pompé par une diode laser à émission à $0,98 \mu\text{m}$. Les impulsions de rayonnement avec spectre en peigne traversent alors le préamplificateur optique 14, le premier amplificateur optique 15, puis sont injectées dans la cavité du second amplificateur optique 16. Toutefois chacun des préamplificateur et amplificateurs 14-16 est optionnel par rapport au principe de l'invention.
- [0048] Optionnellement encore, l'ensemble de source de rayonnement 1 peut comprendre en outre un convertisseur de fréquence optique qui est disposé sur le trajet des impulsions de rayonnement en aval des composants déjà décrits. Un tel convertisseur de fréquence optique est connu de l'Homme du métier, si bien que ce composant n'est pas décrit de nouveau en détail ici. Dans le mode de réalisation de l'invention qui est représenté dans [Fig.1], un tripleur de fréquence optique 17, noté FCx3, est disposé en aval du second amplificateur 16. La valeur de longueur d'onde centrale des impulsions de rayonnement est ainsi convertie d'environ $1,03 \mu\text{m}$ à environ $0,34 \mu\text{m}$, et l'intervalle spectral inter-pics exprimé en termes de longueur d'onde est simultanément divisé par trois. Lorsqu'il est exprimé en termes de fréquence, l'intervalle spectral inter-pics pour les impulsions de rayonnement à la sortie de l'ensemble de source de rayonnement 1 est $\text{ISIP} = 3 \bullet f(S_{\text{mod}}) = 10 \text{ GHz}$.
- [0049] [Fig.2] illustre l'émission de rayonnement qui est produite ainsi par l'ensemble de source de rayonnement 1 de [Fig.1]. Dans ce diagramme, l'axe horizontal repère le

temps noté t , et l'axe vertical repère les valeurs de la fréquence optique notée f . Le rayonnement émis est constitué par une succession d'impulsions identiques notées I , chacune d'une durée individuelle de 20 ns, et chacune constituée d'une composante centrale I_0 et de plusieurs composantes harmoniques I_h . La valeur de fréquence optique de la composante centrale I_0 est $3 \cdot f_0 = 849$ THz (térahertz), et l'intervalle spectral inter-pics ISIP entre deux composantes voisines spectralement est de 10 GHz (gigahertz), lorsqu'il est exprimé en termes de fréquence. La durée entre deux impulsions de rayonnement successives I est d'environ 0,1 ms (milliseconde).

[0050] Dans un mode de réalisation de l'ensemble de source de rayonnement 1 où la source laser 10, le préamplificateur 14 et le premier amplificateur 15 sont réalisés à base de fibres optiques, et connectés entre eux aussi par des fibres optiques, et où les deux modulateurs 11 et 12 sont réalisés sous forme d'un ou deux circuit(s) optique(s) intégré(s), et le second amplificateur 16 est aussi utilisé, tel que décrit plus haut, les impulsions de rayonnement I qui sont produites par cet ensemble de source de rayonnement 1 peuvent avoir une valeur de puissance-crête supérieure à 1000 W (watt), voire supérieure à 3000 W, correspondant à une puissance moyenne d'environ 10 W en tenant compte des durées de séparation entre impulsions successives. Ces valeurs de puissance-crête et de puissance moyenne sont sommées sur toutes les composantes spectrales des impulsions de rayonnement, générées selon l'invention. La valeur limite de puissance-crête qui est due à la diffusion stimulée par effet Brillouin dans les fibres optiques peut être d'environ 500 W, à titre d'exemple. Par conséquent, l'utilisation du modulateur 12 pour conférer une forme en peigne au spectre des impulsions de rayonnement I permet de dépasser dans une large mesure la limite de puissance qui résulte de l'utilisation de guides d'ondes, i.e. fibres optiques et/ou circuits optiques intégrés, au sein de l'ensemble de source de rayonnement 1.

[0051] De retour à [Fig.1], les impulsions de rayonnement I sont transmises en direction d'un volume-cible T par une optique 2, qui est notée OPT. et a été appelée optique d'émission et de collecte de rayonnement dans la partie générale de la présente description. Cette optique 2 peut être un télescope d'un modèle connu de l'Homme du métier. Un contenu du volume-cible T rétrodiffuse une partie des impulsions de rayonnement I , en direction de l'optique 2. Cette dernière collecte cette partie de rayonnement rétrodiffusée, notée RC pour rayonnement collecté, et la transmet ensuite à une entrée optique E d'un interféromètre 3, noté INTERF. Dans l'exemple représenté, l'interféromètre 3 possède quatre sorties optiques notées S_1 , S_2 , S_3 et S_4 , de sorte qu'il répartit la puissance du rayonnement collecté RC tel que reçu à son entrée E entre les quatre sorties optiques S_1 - S_4 selon quatre fonctions de transfert respectives. Chacune de ces fonctions de transfert varie en fonction de la fréquence optique f . Les détecteurs optiques 4₁-4₄, notés DETECT., sont disposés un-à-un aux quatre sorties

optiques S_1 - S_4 de l'interféromètre 3, pour mesurer la puissance de rayonnement qui est transmise par chaque sortie optique. Les détecteurs optiques 4_1 - 4_4 peuvent être constitués chacun à partir d'une photodiode respective, par exemple. Les signaux de mesure de puissance de rayonnement qui sont produits respectivement par les quatre détecteurs optiques 4_1 - 4_4 sont transmis à l'unité d'analyse 5. Cette dernière peut être constituée à partir d'une unité de calcul notée CPU, et est configurée pour déduire une valeur de vitesse axiale du contenu du volume-cible T, par l'intermédiaire du décalage Doppler associé. La vitesse axiale du contenu du volume-cible T est notée V_T , et est parallèle à la direction de propagation des impulsions de rayonnement I entre l'optique 2 et le volume-cible T. Elle est comptée positivement pour un rapprochement du contenu du volume-cible T vers l'optique 2. De façon équivalente, l'unité d'analyse 5 peut délivrer en sortie une valeur du décalage Doppler, noté $\Delta f_{\text{Doppler}}$, qui est égal pour le mode de réalisation décrit à $6 \cdot f_0 \cdot V_T / C$, en tenant compte du tripleur de fréquence optique 17 et C désignant encore la célérité de la lumière dans le vide.

[0052] Le rayonnement collecté RC possède une composition spectrale qui est similaire à celle du rayonnement émis par l'ensemble de source 1 : il possède une structure en peigne dont les pics correspondent un-à-un à ceux de la structure spectrale des impulsions de rayonnement I, mais en étant décalés spectralement de la valeur du décalage Doppler $\Delta f_{\text{Doppler}}$ qui est produit par la vitesse V_T du contenu du volume-cible T. Etant donné que l'intervalle spectral inter-pics ISIP des impulsions de rayonnement I est beaucoup plus petit que la valeur de fréquence optique centrale de ces impulsions, la valeur du décalage Doppler qui affecte chaque pic est sensiblement la même pour tous les pics. P_{RC} désigne la puissance du rayonnement collecté RC, intégrée sur l'ensemble des pics.

[0053] Pour une application anémométrique, c'est-à-dire de mesure de vitesse de vent, le volume-cible T est une portion d'atmosphère, dont le contenu comprend des molécules diffusantes élastiquement, i.e. selon la diffusion dite de Rayleigh, et/ou des particules diffusantes, i.e. selon la diffusion dite de Mie. Les particules diffusantes peuvent être des aérosols, des poussières ou des cristaux de glace présents en suspension dans l'atmosphère. Ces molécules et/ou particules sont désignées par la lettre P dans [Fig.1], et elles rétrodiffusent les impulsions de rayonnement I pendant une utilisation du système LIDAR à détection directe 100. La valeur de vitesse V_T qui est délivrée par l'unité d'analyse 5 est la valeur de la composante axiale du vent tel qu'existant dans la portion d'atmosphère. Une telle mesure anémométrique peut être réalisée avec le système LIDAR à détection directe 100 qui est installé sur Terre, ou bien qui est embarqué à bord d'un véhicule porteur tel d'un satellite, un aéronef, notamment un avion, un hélicoptère, un drone ou une station stratosphérique, couramment désignée par l'acronyme HAPS pour «High-Altitude platform station» en anglais ou station-

plateforme à haute altitude.

[0054] L'interféromètre 3 peut être du type Mach-Zehnder tel que représenté dans [Fig.3]. Il comprend deux chemins optiques CH1 et CH2, qui s'étendent séparément entre deux diviseurs de faisceaux 31 et 35. Ces diviseurs de faisceaux 31 et 35 peuvent être du type séparateur de faisceaux par division d'amplitude. Le diviseur de faisceau 31 est situé à l'entrée E de l'interféromètre 3, et sépare l'un de l'autre les deux chemins optiques CH1 et CH2. Le diviseur de faisceau 35 est utilisé en tant que dispositif de regroupement de parties du rayonnement collecté RC qui se sont propagées respectivement par les deux chemins optiques CH1 et CH2. Les deux chemins optiques CH1 et CH2 peuvent être définis par des miroirs intermédiaires, par exemple les miroirs plans 32 et 34 dans le chemin optique CH1. Le diviseur de faisceau 35 produit en aval deux zones de superposition de rayonnements. Pour avoir une structure à quatre sorties optiques, l'interféromètre 3 comprend en outre une lame de phase quart-d'onde, ou «quaterwave phase plate» en anglais, qui est désignée par la référence 33 et est disposée dans l'un des deux chemins optiques, par exemple CH1. L'interféromètre 3 comprend alors en outre deux séparateurs de polarisations linéaires 36 et 37, qui sont situés en aval du diviseur de faisceau 35, un-à-un dans chacune des deux zones de superposition de rayonnements qui sont produites par ce diviseur de faisceau 35. Chaque zone de superposition de rayonnements telle que produite par le diviseur de faisceau 35 est ainsi redivisée en deux sous-zones par l'un et l'autre des séparateurs de polarisations linéaires 36 et 37, aboutissant à quatre zones de superposition qui constituent les quatre sorties optiques S_1 - S_4 . La puissance de chaque partie du rayonnement collecté RC qui est transmise par l'une des sorties optiques S_1 - S_4 résulte d'un état d'interférence optique respectif. Chacun des deux séparateurs de polarisations linéaires 36 et 37 peut être un cube polariseur tel que disponible commercialement. Il est orienté dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement de sorte que ses directions de polarisation soient parallèles respectivement à un axe lent et à un axe rapide de la lame de phase quart-d'onde 33. Le fonctionnement d'un tel interféromètre 3 de Mach-Zehnder à quatre sorties optiques est connu de l'Homme du métier, notamment du document FR 2 962 553 B1, si bien qu'il n'est pas nécessaire de le répéter ici. Pour cela, le rayonnement des impulsions I est polarisé circulairement. Ce fonctionnement de l'interféromètre 3 est caractérisé par les quatre fonctions de transfert qui déterminent chacune la puissance de rayonnement qui est transmise entre l'entrée optique E et l'une des sorties optiques : $T_1(f)$ entre l'entrée optique E et la sortie optique S_1 , $T_2(f)$ entre l'entrée optique E et la sortie optique S_2 , $T_3(f)$ entre l'entrée optique E et la sortie optique S_3 , et $T_4(f)$ entre l'entrée optique E et la sortie optique S_4 . La valeur de chacune des fonctions de transfert $T_1(f)$ - $T_4(f)$ dépend de la fréquence optique de composante spectrale f , de sorte que la puissance de rayonnement

qui est mesurée par le détecteur 4_i situé à la sortie S_i est $P_i = \sum_j T_i(f_j) \bullet P_j$, où i est un indice entier de 1 à 4 qui numérote les sorties optiques de l'interféromètre 3 avec les détecteurs correspondants, et j est un autre indice entier qui numérote les composantes spectrales en pics séparés du rayonnement collecté RC. Ainsi, f_j est la valeur centrale de fréquence optique du pic j (voir [Fig.2]) et P_j est la puissance optique intégrée de ce pic j .

[0055] Selon une caractéristique supplémentaire qui est utilisée dans l'invention, un écart de longueur de trajet optique qui existe entre les deux chemins optiques CH1 et CH2 de l'interféromètre 3, noté δ , est tel que le produit de cet écart par l'intervalle spectral inter-pics du rayonnement qui est émis par le système 100 en direction du volume-cible T, et qui existe de même dans le rayonnement collecté RC, est égal à la célérité C de la lumière dans le vide. Autrement dit : $\delta \bullet \text{ISIP}(\text{exprimé en hertz}) = C$. Pour les valeurs numériques données plus haut : $\delta = 3$ cm (centimètre). Du fait de la combinaison de la lame quart-d'onde 33 avec les séparateurs de polarisations linéaires 36 et 37, les quatre fonctions de transfert $T_1(f)$ - $T_4(f)$ correspondent à des différences de marche égales à δ , $\delta + \lambda_0/12$, $\delta + \lambda_0/6$ et $\delta + \lambda_0/4$, respectivement, en tenant compte du tripleur de fréquence optique 17.

[0056] Etant donné que chaque fonction de transfert $T_i(f)$ de l'interféromètre 3 est périodique en fonction de la fréquence optique f avec une période égale à C/δ , cette fonction de transfert possède une même valeur pour toutes les composantes spectrales en pics du rayonnement collecté RC. En conséquence, la puissance de rayonnement qui est mesurée par le détecteur 4_i situé à la sortie optique S_i est $P_i = T_i(3 \bullet f_0 + \Delta f_{\text{Doppler}}) \bullet \sum_j P_j = T_i(3 \bullet f_0 + \Delta f_{\text{Doppler}}) \bullet P_{\text{RC}}$. Connaissant les fonctions de transfert $T_i(f)$ de l'interféromètre 3 qui est utilisé, la mesure par les détecteurs optiques 4_i des valeurs des puissances de rayonnement P_i permet de déterminer la valeur du décalage Doppler $\Delta f_{\text{Doppler}}$. Cette détermination est effectuée par l'unité d'analyse 5. Lorsque l'interféromètre 3 est du type Mach-Zehnder ou du type Michelson à miroirs parallèles, les fonctions de transfert $T_i(f)$ varient chacune sinusoidalement en fonction de la fréquence optique f , et sont décalées de l'une à l'autre de $C/(4 \bullet \delta)$. Dans ce cas, la valeur du décalage Doppler $\Delta f_{\text{Doppler}}$ peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$\Delta f_{\text{Doppler}} = \frac{\text{ISIP}(\text{exprimé en hertz})}{2\pi} \cdot \left[\text{Arctan}\left(\frac{S_2}{S_1}\right) - \text{Arctan}\left(\frac{S_{2,0}}{S_{1,0}}\right) \right]$$

$$\text{où : } S_1 = \frac{Q'_1 \cdot Q'_3}{Q'_1 + Q'_3} ; S_{1,0} = \frac{Q'_{1,0} \cdot Q'_{3,0}}{Q'_{1,0} + Q'_{3,0}} ; S_2 = \frac{Q'_4 \cdot Q'_2}{Q'_4 + Q'_2} ; S_{2,0} = \frac{Q'_{4,0} \cdot Q'_{2,0}}{Q'_{4,0} + Q'_{2,0}}$$

Arctan() désignant l'inverse de la fonction trigonométrique de tangente,

Q'_i désignant l'amplitude du signal de détection qui est délivré par le détecteur 4_i lors d'une mesure utile, correspondant à la puissance de rayonnement P_i et auquel un bruit de fond a été retiré, l'indice entier i ayant la même signification que plus haut, et

$Q'_{i,0}$ désignant l'amplitude du signal de détection qui est délivré par le détecteur 4_i lors d'une mesure de référence réalisée en l'absence d'effet Doppler, auquel le bruit de fond a aussi été retiré, une telle mesure de référence pouvant être réalisée par exemple en injectant directement dans l'interféromètre 3, par son entrée E de façon interne au système LIDAR à détection directe 100, une partie des impulsions I telles que produites par l'ensemble de source de rayonnement 1 sans que du rayonnement qui aurait été rétrodiffusé à l'extérieur du système 100 soit transmis simultanément à l'entrée E de l'interféromètre 3.

[0057] [Fig.4] illustre le principe d'addition des puissances respectives de tous les pics spectraux du rayonnement collecté PC pour constituer les puissances de rayonnement qui sont mesurées respectivement par les détecteurs optiques 4_i . La partie supérieure de cette figure montre les variations de chacune des fonctions de transfert T_i en fonction de la fréquence optique f . La partie inférieure de la figure est un diagramme spectral du rayonnement collecté RC, avec l'axe vertical qui repère la puissance spectrale notée $P(f)$. Les composantes spectrales en pics séparés du spectre du rayonnement collecté RC sont désignées par I_{0_RC} pour la composante qui est centrée sur la valeur de fréquence optique $3 \bullet f_0 + \Delta f_{Doppler}$, et par I_{h_RC} pour les autres composantes qui sont centrées sur les valeurs de fréquence optique $3 \bullet f_0 + \Delta f_{Doppler} + n \bullet ISIP$ (exprimé en hertz), où n est un nombre entier non-nul, positif ou négatif. La correspondance entre les parties inférieure et supérieure de [Fig.4] montre que toutes les composantes spectrales en pics du rayonnement collecté RC correspondent à une même valeur de fonction de transfert pour chacune des fonctions de transfert T_i .

[0058] Une modification ou une dérive de la valeur de l'écart de longueur de trajet optique δ par rapport à la valeur $C/ISIP$ correspond à une dilatation ou à une contraction des courbes $T_i(f)$ dans [Fig.4] parallèlement à l'axe horizontal. Lorsqu'une telle modification ou dérive survient, par exemple à cause de variations de température qui affectent l'interféromètre 3, les composantes spectrales en pics du rayonnement collecté RC ne correspondent plus à une même valeur de chacune des fonctions de transfert T_i . Il est alors avantageux de réajuster l'intervalle spectral inter-pics ISIP en agissant sur le générateur 13. Une façon simple de révéler un éventuel désaccord entre l'intervalle spectral inter-pics ISIP et l'écart de longueur de trajet optique δ par rapport à la formule $ISIP \bullet \delta = C$ peut consister à calculer une valeur de contraste entre les quatre valeurs qui sont mesurées par les détecteurs optiques 4_1-4_4 , et vérifier si la valeur en cours de la fréquence du signal électrique de modulation S_{mod} correspond à un maximum du contraste. Pour cela, à partir de la valeur en cours de la fréquence du signal électrique de modulation S_{mod} , des valeurs d'essais sont utilisées successivement pour la fréquence du signal électrique de modulation S_{mod} , qui appartiennent à un intervalle d'exploration autour de la valeur en cours, par exemple avec

une variation maximale de +/-1% autour de la valeur en cours. Des mesures sont effectuées en utilisant les quatre détecteurs optiques 4₁-4₄ pour chaque valeur d'essai, en calculant à chaque fois leur contraste. A l'issue d'une telle procédure, la valeur à utiliser pour la fréquence du signal électrique de modulation S_{mod} est celle pour laquelle la valeur maximale de contraste a été obtenue. Les valeurs de contraste peuvent être calculées par l'unité d'analyse 5, et transmises à un contrôleur 30 qui sélectionne celle des valeurs essayées pour la fréquence du signal électrique de modulation S_{mod} qui correspond au contraste maximal. Le contrôleur 30 transmet ensuite la valeur sélectionnée au générateur 13 afin qu'elle soit appliquée dans le signal électrique de modulation S_{mod}. Un tel asservissement, qui consiste à ajuster la fréquence du signal électrique de modulation transmis au modulateur 12, est particulièrement simple à mettre en œuvre. Le contrôleur 30 constitue le système d'asservissement qui a été introduit dans la partie générale de la présente description. Pour un tel asservissement, le contraste des quatre valeurs mesurées par les détecteurs optiques 4₁-4₄ peut être calculé en appliquant la formule suivante : $CT = [(u_1 - u_3)^2 + (u_4 - u_2)^2]^{1/2}$, où CT est le contraste, et u_i est la valeur qui est mesurée par le détecteur optique 4_i divisée par la moyenne des quatre valeurs mesurées simultanément par les quatre détecteurs optiques, i étant encore l'indice entier variant de 1 à 4. Cette procédure d'ajustement de l'intervalle spectral inter-pics ISIP peut être exécutée automatiquement, et répétée après des durées d'utilisation prédéterminées du système LIDAR 100, ou bien déclenchée lorsque des variations d'environnement sont détectées qui sont susceptibles d'altérer l'écart de longueur de trajet optique δ de l'interféromètre 3.

[0059] [Fig.5] et [Fig.6] montrent deux modes de réalisation alternatifs de l'invention, pour lesquels une figure d'interférence est saisie par un détecteur optique du type capteur d'image. Ce capteur d'image est désigné par la référence 4. Il peut être constitué par une matrice d'éléments photosensibles qui sont juxtaposés en lignes et colonnes, de façon usuelle. Dans ces deux figures, le rayonnement collecté RC est transmis à partir de l'optique 2 à l'interféromètre 3 par une fibre optique 23. L'extrémité de sortie de la fibre optique 23 constitue alors l'entrée E de l'interféromètre 3.

[0060] Dans le mode de réalisation de [Fig.5], l'interféromètre 3 est du type Fabry-Pérot, comprenant deux lames semi-transparentes 3₁ et 3₂ parallèles. Un tel interféromètre de Fabry-Pérot est connu de l'Homme du métier, si bien qu'il n'est pas nécessaire d'en expliquer le fonctionnement ici. La référence L₁ désigne une lentille de collimation, et la référence L₂ désigne une lentille de sortie qui permet de conjuguer la surface photosensible du capteur d'image 4 avec l'extrémité de sortie de la fibre optique 23. Cette fibre optique possède une section de sortie suffisamment large pour procurer la variation d'angle d'incidence du rayonnement à l'intérieur de l'interféromètre de Fabry-Pérot 3, qui est nécessaire à l'obtention de la figure d'interférence. Dans cette

figure, f_1 et f_2 désignent les longueurs focales respectives des lentilles convergentes L_1 et L_2 .

[0061] Dans le mode de réalisation de [Fig.6], l'interféromètre 3 est du type Michelson, comprenant deux miroirs plans $3_1'$ et $3_2'$ en configuration de coin d'air. Un tel interféromètre de Michelson est connu aussi de l'Homme du métier. La référence 3_0 désigne une lame semi-réfléchissante qui sépare le rayonnement collecté RC en deux parties qui sont dirigées une-à-une vers l'un et l'autre des deux miroirs $3_1'$ et $3_2'$, et θ désigne l'angle d'inclinaison qui est effectif entre ces deux miroirs. La lentille L_1 possède encore une fonction de collimation, et les lentilles L_2 et L_3 sont agencées pour conjuguer sensiblement les deux miroirs $3_1'$ et $3_2'$ avec la surface photosensible du capteur d'image 4. Dans cette autre figure, f_3 est la longueur focale de la lentille L_3 , et f_1 et f_2 ont les mêmes significations que dans [Fig.5].

[0062] Le perfectionnement qui permet d'ajuster l'intervalle spectral inter-pics ISIP en fonction de l'écart réel de longueur de trajet optique δ de l'interféromètre 3 peut aussi être mis en œuvre pour les modes de réalisation de [Fig.5] et [Fig.6]. Pour cela, la formule de contraste qui a été donnée précédemment dans le cas de quatre valeurs mesurées est remplacée par une formule de calcul de contraste d'image, adaptée lorsque l'image est constituée par une figure d'interférence.

[0063] Dans le mode de réalisation de l'invention qui est montré dans [Fig.7], la source laser 10 est constituée par une diode laser qui est alimentée en courant par une source électrique 10'. La diode laser est préférablement du type DFB, auquel cas sa cavité contient un réseau de Bragg. La source électrique 10' est notée ALIM. dans la figure et couramment appelée «driver» par l'Homme du métier. $I_{\text{alim}}(t)$ désigne le courant d'alimentation électrique qui est produit par la source électrique 10' et qui traverse la diode laser 10. La source électrique 10' incorpore un modulateur électrique qui applique une variation temporelle au courant $I_{\text{alim}}(t)$ conformément au signal électrique de modulation $S_{\text{mod}}(t)$. Pour cela, la sortie du générateur électrique 13 est connectée à une entrée de modulation de la source électrique 10'. Le modulateur électrique qui est intégré à la source électrique 10' possède ainsi la même fonction que le modulateur électro-optique 12 dans les modes de réalisation décrits antérieurement. Plus précisément, la variation du courant d'alimentation électrique $I_{\text{alim}}(t)$ produit une variation de l'indice de réfraction qui est effectif dans la cavité de la diode laser DFB, si bien que c'est la combinaison du modulateur électrique intégré à la source électrique 10' avec le fonctionnement de la diode laser DFB qui est équivalente au modulateur électro-optique 12.

[0064] Bien qu'un tel mode de réalisation de l'invention qui met en œuvre une modulation du courant électrique d'alimentation d'une diode laser, soit représenté dans [Fig.7] en combinaison avec un interféromètre à quatre sorties optiques en quadrature, il peut être

combiné alternativement avec un interféromètre qui produit une figure d'interférence tel que représenté dans [Fig.5] ou [Fig.6].

- [0065] Il est entendu que l'invention peut être reproduite en modifiant des aspects secondaires des modes de réalisation qui ont été décrits en détail ci-dessus, tout en conservant certains au moins des avantages cités. Notamment, certains composants optiques utilisés dans ces modes de réalisation peuvent être remplacés par d'autres à fonctions équivalentes.
- [0066] En outre, l'invention n'est pas limitée à des systèmes LIDAR à détection directe qui sont destinés à des mesures aérauliques, mais elle peut aussi être utilisée pour d'autres applications.
- [0067] Enfin, toutes les valeurs numériques qui ont été citées ne l'ont été qu'à titre d'illustration, et peuvent être changées en fonction de l'application considérée.

Revendications

[Revendication 1]

Système LIDAR à détection directe (100) comprenant :

- un ensemble de source de rayonnement (1), adapté pour produire en sortie du rayonnement laser constitué par plusieurs composantes spectrales séparées par un intervalle spectral inter-pics qui est identique entre paires de composantes spectrales voisines spectralement ;
 - une optique (2) d'émission et de collecte de rayonnement, agencée pour transmettre le rayonnement laser en direction d'un volume-cible (T) pendant une utilisation du système LIDAR à détection directe (100), et adaptée pour collecter une partie du rayonnement laser qui a été diffusée par des molécules ou particules (P) situées dans le volume-cible, appelée rayonnement collecté (RC) ;
 - un interféromètre (3), agencé pour recevoir en entrée le rayonnement collecté (RC), et pour transmettre, pendant l'utilisation du système LIDAR à détection directe (100), des parties dudit rayonnement collecté simultanément par au moins deux chemins optiques (CH1, CH2) jusqu'à au moins une zone de superposition desdits chemins optiques, de façon à créer une interférence de rayonnement dans ladite zone de superposition, avec un écart de longueur de trajet optique qui existe entre les chemins optiques ; et
 - au moins un détecteur optique (4₁-4₄ ; 4), agencé pour mesurer au moins une intensité de rayonnement qui existe dans chaque zone de superposition,
- dans lequel un produit d'une valeur de l'intervalle spectral inter-pics exprimé en hertz par une valeur de l'écart de longueur de trajet optique est égal à une valeur de célérité de la lumière dans le vide,
- le système LIDAR à détection directe (100) étant caractérisé en ce que l'ensemble de source de rayonnement (1) comprend une source laser (10) et au moins un modulateur (12) agencé pour moduler un rayonnement initial qui est produit par la source laser, conformément à un signal électrique de modulation (S_{mod}) qui est reçu par le modulateur lors de l'utilisation du système LIDAR à détection directe, de façon à produire les composantes spectrales multiples du rayonnement laser qui est transmis en direction du volume-cible,
- et en ce que le système LIDAR à détection directe (100) comprend en outre un générateur (13) adapté pour produire le signal électrique de modulation (S_{mod}), et connecté pour transmettre ledit signal électrique de

- modulation au modulateur (12), le signal électrique de modulation étant périodique avec une fréquence de composante fondamentale dudit signal électrique de modulation qui détermine l'intervalle spectral inter-pics.
- [Revendication 2] Système LIDAR à détection directe (100) selon la revendication 1, dans lequel la source laser (10) comprend une diode laser et une source électrique (10') qui est connectée pour fournir un courant d'alimentation électrique à la diode laser, et dans lequel le modulateur est adapté pour varier le courant d'alimentation électrique qui est fourni par la source électrique conformément au signal électrique de modulation (S_{mod}).
- [Revendication 3] Système LIDAR à détection directe (100) selon la revendication 1, dans lequel le modulateur (12) est un modulateur électro-optique disposé entre la source laser (10) et une sortie optique de l'ensemble de source de rayonnement (1) qui est reliée optiquement à l'optique (2) d'émission et de collecte de rayonnement, ledit modulateur électro-optique étant adapté pour appliquer au rayonnement initial produit par la source laser un déphasage optique qui varie conformément au signal électrique de modulation (S_{mod}).
- [Revendication 4] Système LIDAR à détection directe (100) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le générateur (13) est adapté pour produire le signal électrique de modulation (S_{mod}) de sorte que ledit signal électrique de modulation possède au moins deux composantes harmoniques.
- [Revendication 5] Système LIDAR à détection directe (100) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'au moins un détecteur optique (4_1-4_4 ; 4) est adapté pour mesurer simultanément plusieurs intensités de rayonnement qui existent dans l'au moins une zone de superposition, correspondant à des valeurs différentes de l'écart de longueur de trajet optique qui existe entre les chemins optiques, et le système LIDAR à détection directe comprend en outre :
- un système d'ajustement ou d'asservissement (30) connecté à une entrée de commande du générateur (13) et adapté pour ajuster la fréquence de la composante fondamentale du signal électrique de modulation (S_{mod}) qui détermine l'intervalle spectral inter-pics, afin de maximiser un contraste qui existe entre les intensités mesurées simultanément, faisant ainsi que le produit de la valeur dudit intervalle spectral inter-pics exprimé en hertz par la valeur de l'écart de longueur de trajet optique soit égal à la valeur de célérité de la lumière dans le vide.

- [Revendication 6] Système LIDAR à détection directe (100) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel l'interféromètre (3) comprend :
- un diviseur de faisceau (31), qui est agencé pour séparer les deux chemins optiques (CH1, CH2) à partir d'une entrée optique (E) de l'interféromètre (3) ;
 - une lame de phase quart-d'onde (33), qui est disposée dans l'un des deux chemins optiques (CH1, CH2) ;
 - un dispositif de regroupement de faisceaux (35), qui agencé pour regrouper des parties de rayonnement qui se sont propagées respectivement par les deux chemins optiques (CH1, CH2), et adapté pour créer deux zones de superposition de rayonnements ; et
 - deux séparateurs de polarisations linéaires (36, 37) qui sont situés dans l'une et l'autre des deux zones de superposition de rayonnements créées par le dispositif de regroupement de faisceaux, et qui sont orientés de sorte que des directions de polarisation de chacun des séparateurs de polarisations linéaires soient parallèles une-à-une à un axe lent et à un axe rapide de la lame de phase quart-d'onde (33),
- le système LIDAR à détection directe (100) comprenant quatre détecteurs optiques (4₁-4₄) qui sont situés un-à-un à des sorties optiques (S₁-S₄) séparées des deux séparateurs de polarisations linéaires (36, 37).
- [Revendication 7] Système LIDAR à détection directe (100) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel l'interféromètre (3) est adapté pour produire une figure d'interférence dans la zone de superposition des chemins optiques, et l'au moins un détecteur optique comprend un détecteur d'image (4) qui est agencé pour saisir en image la figure d'interférence, chaque intensité de rayonnement mesurée correspondant à un point respectif dans la figure d'interférence.
- [Revendication 8] Système LIDAR à détection directe (100) selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant en outre :
- une unité d'analyse (5), configurée pour déduire une valeur d'un décalage Doppler qui est produit par une vitesse d'un contenu du volume-cible (T), ou pour déduire une valeur de ladite vitesse, en utilisant au moins un signal de mesure respectif qui est délivré par chaque détecteur optique (4₁-4₄ ; 4).
- [Revendication 9] Procédé de mesure d'une vitesse de vent, comprenant de diriger une ligne de visée d'un système LIDAR à détection directe (100) selon l'une quelconque des revendications précédentes, vers une portion d'atmosphère qui constitue le volume-cible (T), et de déduire une valeur

de la vitesse du vent qui existe dans la portion d'atmosphère, en utilisant au moins un signal de mesure respectif qui est délivré par chaque détecteur optique (4₁-4₄; 4),
le système LIDAR à détection directe (100) étant embarqué à bord d'un satellite ou d'un aéronef, notamment à bord d'un avion, d'un hélicoptère, d'un drone ou d'une station stratosphérique.

[Fig. 1]

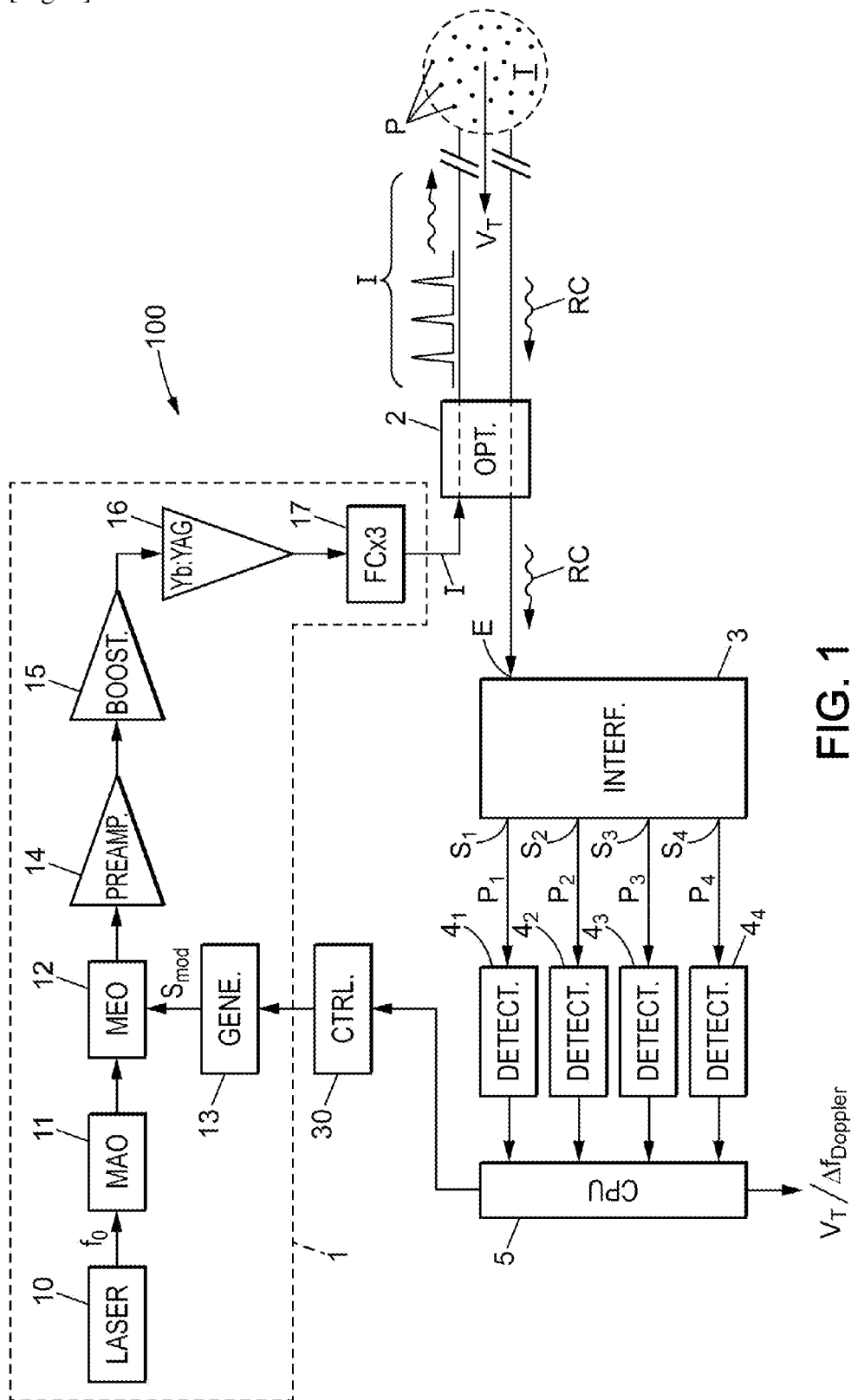
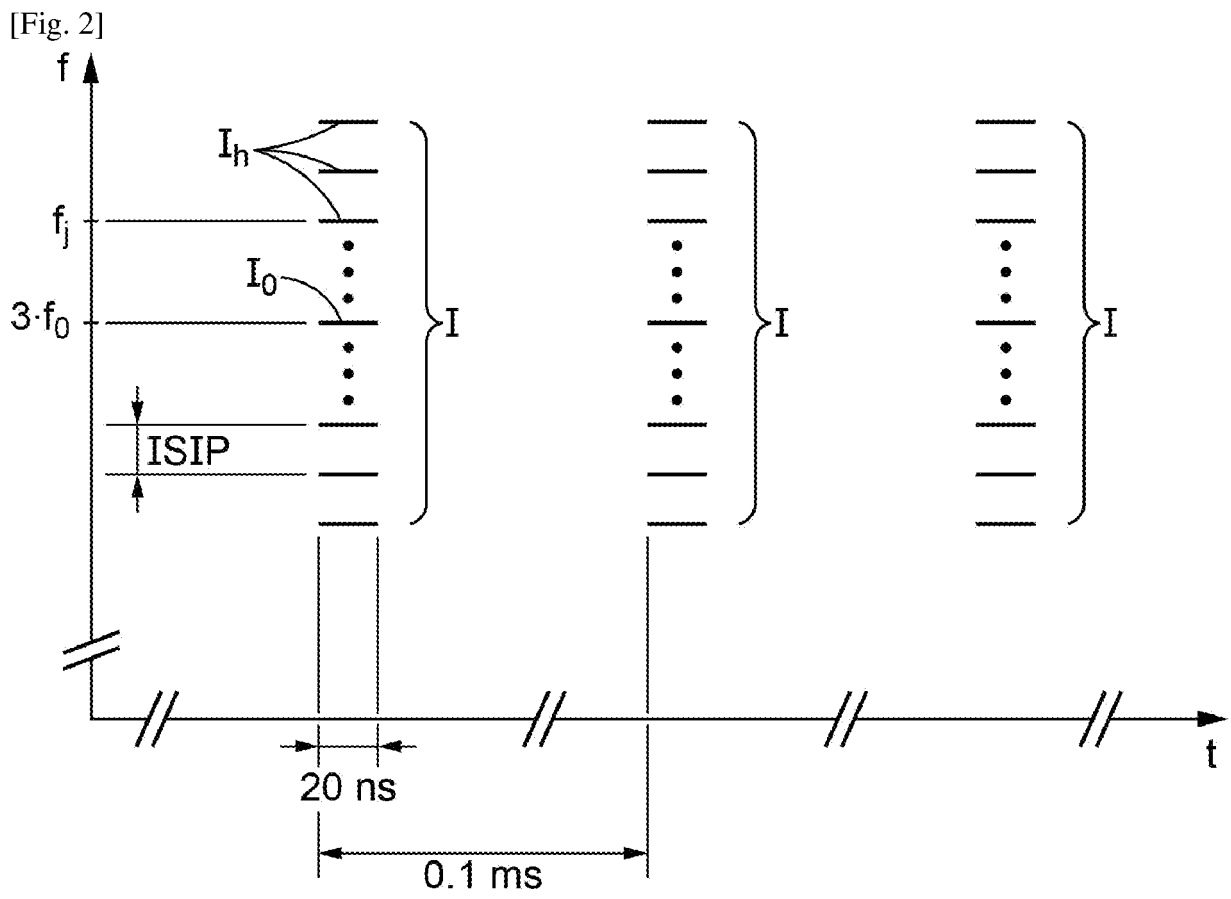


FIG. 1

**FIG. 2**

[Fig. 3]

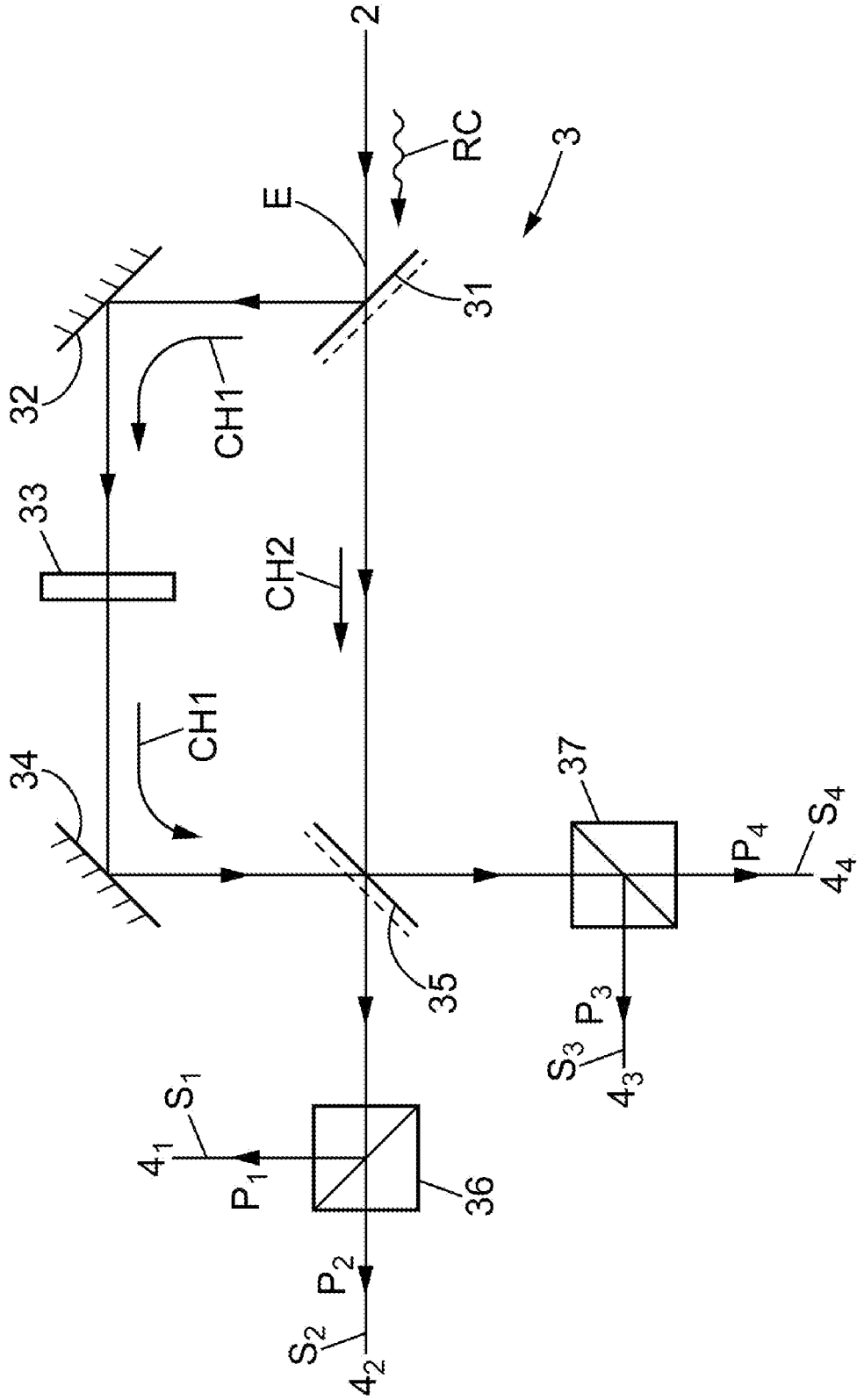


FIG. 3

[Fig. 4]

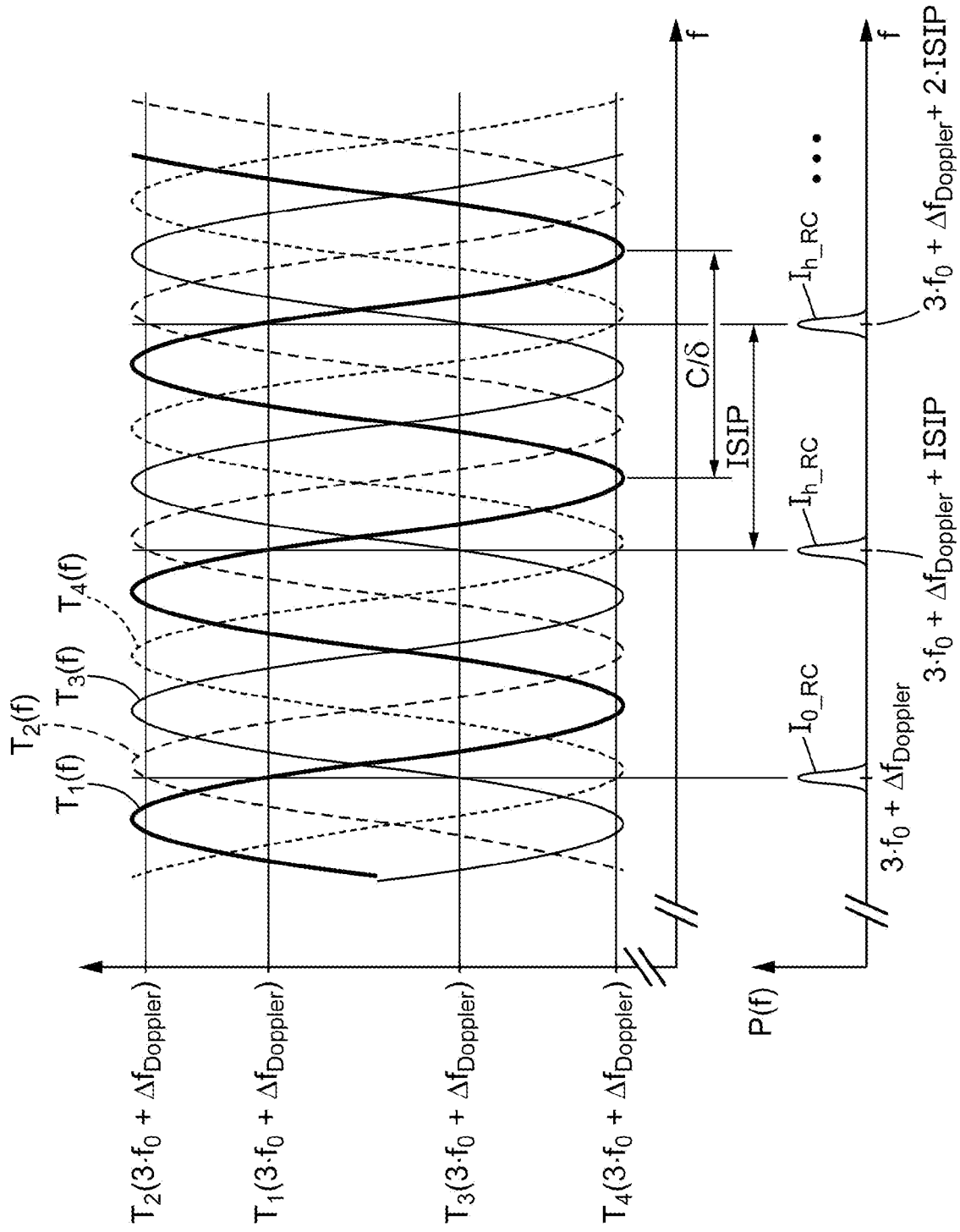


FIG. 4

[Fig. 5]

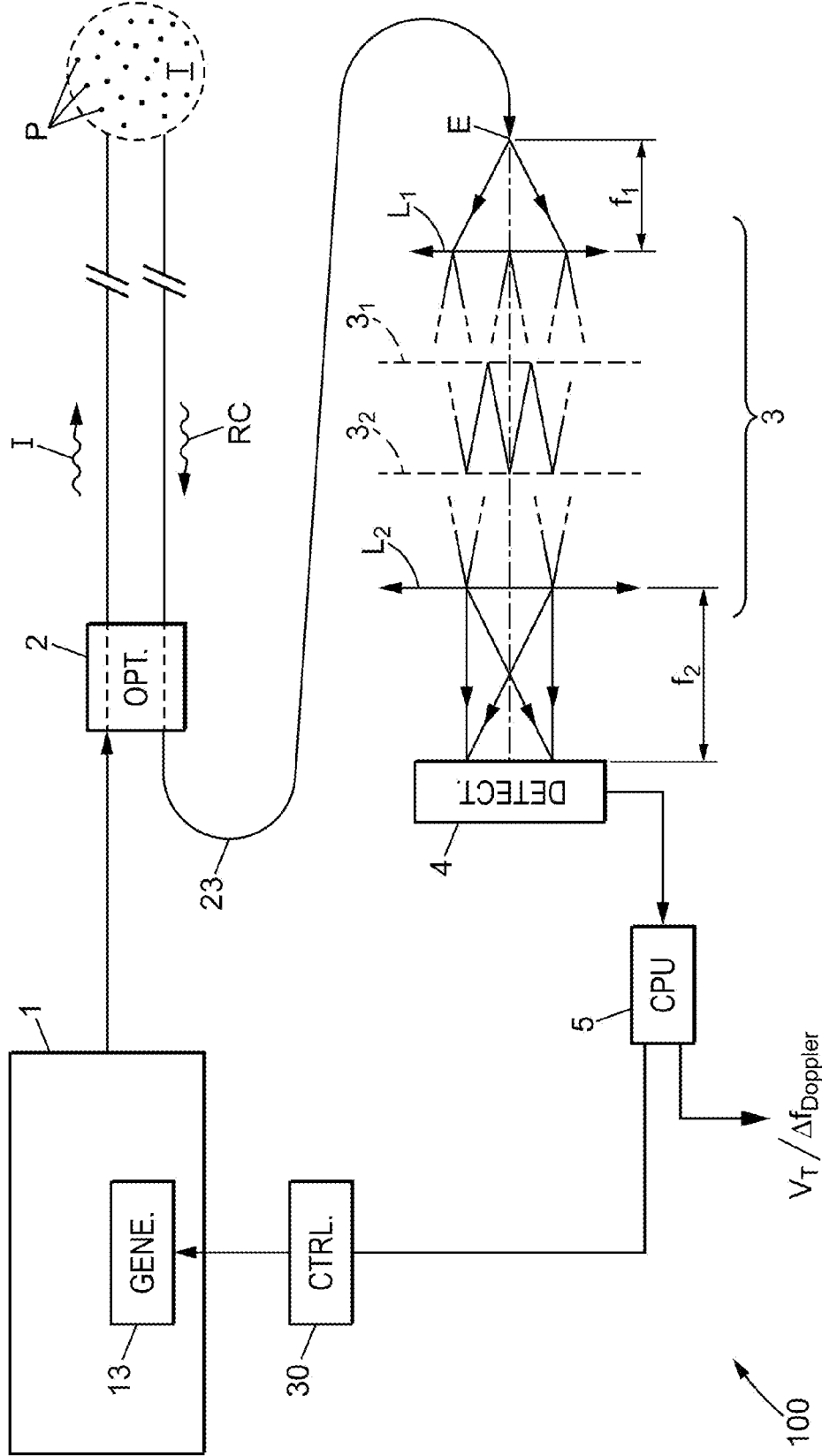


FIG. 5

[Fig. 6]

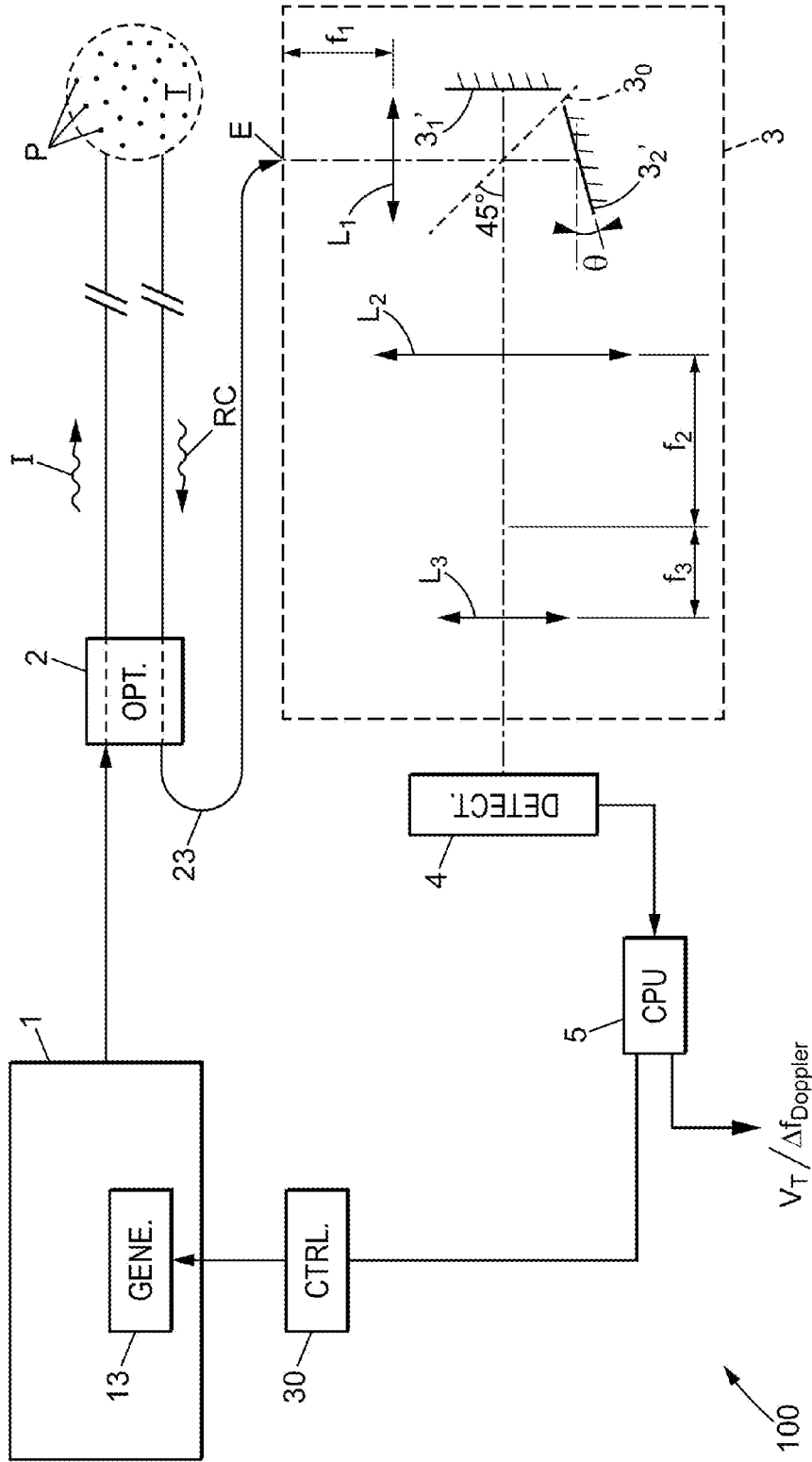


FIG. 6

[Fig. 7]

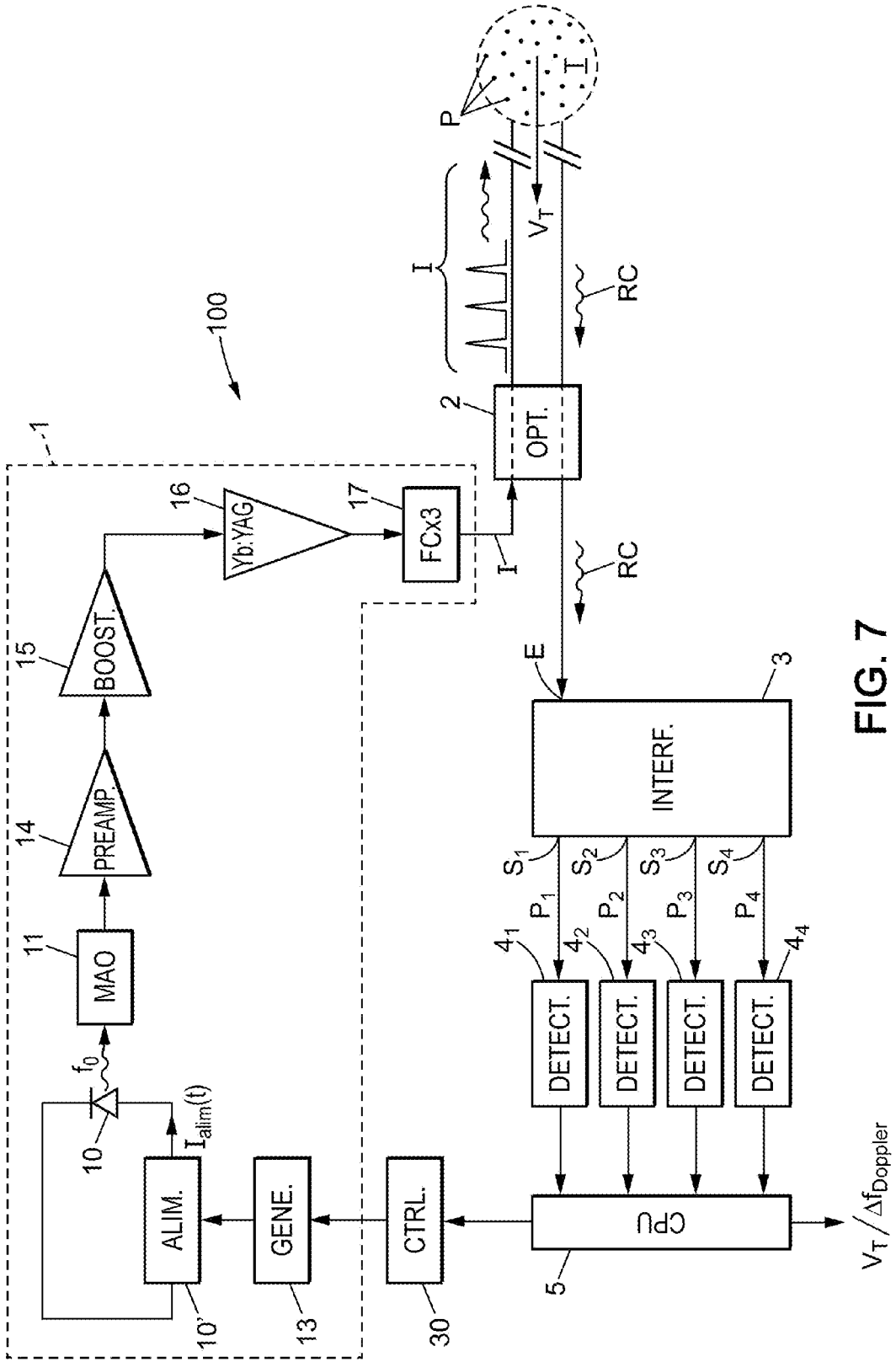


FIG. 7

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

FR 2 962 553 A1 (CENTRE NAT ETD SPATIALES
[FR]) 13 janvier 2012 (2012-01-13)

DIDIER BRUNEAU ET AL: "Direct-detection
wind lidar operating with a multimode
laser",
APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF
AMERICA, WASHINGTON, DC, US,
vol. 52, no. 20,
10 juillet 2013 (2013-07-10), pages
4941-4949, XP001583488,
ISSN: 0003-6935, DOI:
[HTTP://DX.DOI.ORG/10.1364/AO.52.004941](http://dx.doi.org/10.1364/AO.52.004941)

US 2004/263826 A1 (LANGDON ROGER MARTIN
[GB]) 30 décembre 2004 (2004-12-30)

US 2007/171397 A1 (HALLDORSSON THORSTEINN
[DE] ET AL) 26 juillet 2007 (2007-07-26)

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

NEANT