

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

①① N° de publication : **3 105 443**

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

②① N° d'enregistrement national : **19 15061**

⑤① Int Cl⁸ : **G 01 S 7/481 (2019.12), G 01 S 7/497**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ CALIBRATION D'UN SYSTEME LIDAR.

②② Date de dépôt : 20.12.19.

③⑦ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 25.06.21 Bulletin 21/25.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 18.03.22 Bulletin 22/11.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

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

⑦② Inventeur(s) : MICHEL David Tomline et GUSTAVE
François.

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

⑦④ Mandataire(s) : Plasseraud IP.

FR 3 105 443 - B1



Description

Titre de l'invention : CALIBRATION D'UN SYSTEME LIDAR

Domaine technique

[0001] La présente description concerne un procédé de calibration d'un système LIDAR, ainsi qu'un système LIDAR qui est adapté pour mettre en œuvre un tel procédé de calibration.

Technique antérieure

[0002] Les systèmes LIDAR sont utilisés pour de nombreuses applications, dont certaines consistent à mesurer une distance d'éloignement d'une cible. D'autres applications consistent à mesurer une grandeur extérieure pour au moins une valeur de distance d'éloignement d'un endroit auquel se rapporte la mesure, même si la mesure de cette distance d'éloignement ne constitue pas l'objectif principal de l'application considérée. Tel est le cas des mesures anémométriques, qui sont basées sur la détection d'une partie d'un faisceau laser qui est rétrodiffusée par des particules présentes en suspension dans l'air. L'intensité de la partie du faisceau laser qui est rétrodiffusée puis détectée par le système LIDAR est alors très faible. Une valeur de vitesse des particules est déduite d'une analyse spectrale de la partie rétrodiffusée du faisceau laser qui est détectée par le système LIDAR, puis d'un calcul d'effet Doppler qui est appliqué à un écart fréquentiel qui est identifié entre cette partie rétrodiffusée du faisceau laser et le faisceau laser tel qu'émis par le système LIDAR.

[0003] Or dans un système LIDAR monostatique, une réflexion résiduelle du faisceau laser qui est émis se produit sur les composants optiques qui sont communs aux voies d'émission et de détection du système LIDAR, même si ces composants sont munis de revêtements antireflets. Le rayonnement qui est ainsi réfléchi de façon interne au système LIDAR est alors détecté par la voie de détection. Ce signal de réflexion interne au système LIDAR est souvent appelé «narcisse». Il est couramment utilisé pour constituer une référence de distance nulle ou de faible valeur fixée, afin de calibrer le système pour des distances à mesurer, ou pour des distances qui interviennent lorsque d'autres grandeurs sont mesurées en utilisant le système LIDAR. Or l'intensité du faisceau laser qui est émis est importante, et la sensibilité de détection du système LIDAR peut être très élevée, notamment lorsqu'il est conçu pour détecter du rayonnement qui est rétrodiffusé par des particules de l'atmosphère. Le signal narcisse présente alors les caractéristiques suivantes :

- il est généré par des réflexions du faisceau laser sur plusieurs composants optiques communs aux voies d'émission et de détection du système LIDAR, de sorte qu'il ne correspond pas à une valeur unique de distance où se produit une réflexion ; et

- son intensité est très supérieure aux niveaux usuels d'intensité de rayonnements qui sont rétrodiffusés par des particules atmosphériques, de sorte qu'il provoque une saturation du détecteur d'un système LIDAR qui est conçu pour détecter des rayonnements tels que produits par des particules atmosphériques rétrodiffusantes. Pour ces raisons, le signal narcissique ne peut pas procurer une référence précise de distance. En outre, pour un système LIDAR monostatique, il empêche que soient détectés de façon satisfaisante des rayonnements qui résultent de rétroreflexions ou de rétrodiffusions sur des cibles situées à faibles distances du système LIDAR, typiquement situées à des distances comprises entre 20 m (mètre) et 150 m. La zone qui s'étend à partir de la sortie d'un système LIDAR monostatique jusqu'à la distance minimale pour laquelle une mesure peut être inhibée par le signal narcissique est alors couramment appelée zone aveugle, ou «blind zone» en anglais.

[0004] Une autre méthode de calibration en distance d'un système LIDAR consiste à disposer une cible rétro réfléchissante à distance connue en avant du système LIDAR, au-delà de la zone aveugle, puis à effectuer une séquence de mesure avec cette cible. Mais une telle méthode est fastidieuse à mettre en œuvre, et ne peut donc pas être répétée fréquemment. En outre, lorsque le système LIDAR est du type à impulsions, une telle calibration doit être effectuée avec des impulsions telles qu'utilisées pour des séquences de mesures utiles. Pour des impulsions qui sont longues, par exemple dont les durées individuelles sont supérieures à 0,5 μ s (microseconde), cela nécessite de disposer une cible à plus de 75 m (mètre) du système LIDAR, ce qui est très compliqué en pratique.

Problème technique

[0005] A partir de cette situation, un but de la présente invention est de permettre de calibrer en distance un système LIDAR, plus facilement et plus précisément qu'en utilisant les méthodes antérieures.

[0006] En particulier, pour un système LIDAR monostatique, l'invention a pour but de permettre une telle calibration en distance, qui ne soit pas gênée par le signal narcissique.

[0007] Un autre but de l'invention est de permettre qu'une telle calibration puisse être répétée à volonté, sans nécessiter qu'une cible soit placée à distance déterminée en avant du système LIDAR.

[0008] Un autre but encore de l'invention peut être de permettre de réaliser une calibration en distance à chaque fois qu'une séquence de mesure utile est réalisée, et si possible en même temps que cette séquence de mesure utile.

[0009] Un autre but encore de l'invention est qu'un dispositif annexe au système LIDAR, qui serait utile pour sa calibration en distance, puisse être partagé entre plusieurs unités de systèmes LIDAR, notamment par montage-démontage du dispositif de calibration alternativement sur chacune de ces unités de systèmes LIDAR.

Résumé de l'invention

[0010] Pour atteindre l'un au moins de ces buts ou un autre, un premier aspect de l'invention propose un nouveau procédé de calibration d'un système LIDAR, afin de fournir une valeur de référence de mesure qui corresponde à une valeur de référence de distance de propagation libre, ces valeurs de référence de mesure et de distance de propagation libre étant destinées à être utilisées comme calibration du système LIDAR pour évaluer une distance d'éloignement d'au moins une cible à caractériser en utilisant le système LIDAR. Le procédé de l'invention comprend les étapes suivantes :

/1/ coupler le système LIDAR à un chemin optique de référence qui est constitué à partir d'au moins une fibre optique efficace pour guider un rayonnement émis par le système LIDAR lors d'un fonctionnement de celui-ci, de sorte qu'une partie au moins du rayonnement parcourt le chemin optique de référence entre une voie d'émission et une voie de détection du système LIDAR, le chemin optique de référence ayant une longueur connue ;

/2/ réaliser une séquence de mesure de distance en utilisant le système LIDAR couplé au chemin optique de référence tel que résultant de l'étape /1/, pour obtenir une valeur de mesure qui est représentative d'une durée de propagation du rayonnement dans le chemin optique de référence, et qui est destinée à constituer la valeur de référence de mesure ; puis

/3/ convertir la longueur connue du chemin optique de référence en valeur de distance de propagation libre pour le rayonnement, selon un principe d'égalité de durée de propagation, pour former la valeur de référence de distance de propagation libre, et associer cette valeur de référence de distance de propagation libre à la valeur de référence de mesure afin de constituer la calibration du système LIDAR.

[0011] Ainsi, le procédé de l'invention utilise un chemin optique de référence à coupler au système LIDAR. Ce chemin optique de référence, qui est à base d'au moins une fibre optique, détermine matériellement la valeur de référence de distance de propagation libre. Ainsi, cette valeur de référence de distance de propagation libre est connue avec une précision élevée. Grâce à un tel procédé de calibration, des valeurs de distance d'éloignement qui sont déterminées à partir de fonctionnements du système LIDAR pour des cibles à caractériser, peuvent avoir des exactitudes améliorées et des précisions élevées.

[0012] De façon générale, le procédé de l'invention est compatible avec un système LIDAR de type monostatique ou de type bistatique. Dans le cadre de la présente invention, on entend par monostatique un système LIDAR pour lequel des ports optiques de sortie et de détection de ce système LIDAR sont confondus, contigus ou proches l'un de l'autre par rapport à la distance d'éloignement de la cible à caractériser. A l'inverse, on entend

par bistatique un système LIDAR pour lequel les ports optiques de sortie et de détection sont écartés spatialement.

[0013] De façon générale aussi, le système LIDAR peut être adapté pour caractériser une cible unique ou un ensemble diffus de cibles multiples qui sont réparties dans une zone d'espace, lors de chaque fonctionnement de mesure de ce système LIDAR. En particulier, l'invention peut être appliquée à un système LIDAR qui est conçu pour réaliser des mesures anémométriques, en mettant en œuvre un rayonnement laser qui est émis par le système LIDAR à chaque cycle de mesure, et dont une partie est rétro-diffusée par des particules présentes en suspension dans l'air. De telles particules peuvent être des aérosols, des poussières, des grains de glace, etc., qui sont en suspension dans l'air atmosphérique, et qui forment ensemble la cible à caractériser. La distance d'éloignement de la cible est alors celle d'une zone qui contient les particules, à laquelle se rapporte le résultat de mesure, par exemple de mesure anémométrique.

[0014] En fonction de la configuration du chemin optique de référence par rapport à la fibre optique qui est utilisée pour le constituer, la longueur de ce chemin optique de référence peut être liée à celle de la fibre optique, ou liée au double de la longueur de la fibre optique. En outre, à l'étape /3/, la conversion de la longueur du chemin optique de référence en distance de propagation libre pour le rayonnement tient compte d'une différence de vitesse de propagation du rayonnement émis par le système LIDAR, qui existe entre sa propagation sous forme guidée dans la fibre optique, et sa propagation en espace libre.

[0015] De façon avantageuse, la fibre optique peut posséder une longueur telle que la distance de propagation libre qui correspond à la longueur du chemin optique de référence, soit supérieure à une éventuelle zone aveugle du système LIDAR, lorsque celui-ci est de type monostatique. Pour cela, le procédé de l'invention peut comprendre en outre l'étape préliminaire suivante, à effectuer avant l'étape /1/ lorsque le système LIDAR est de type monostatique pour lequel des ports optiques de sortie et de détection du système LIDAR sont confondus :

/0/ déterminer une valeur limite de distance telle que des parties du rayonnement émis par le système LIDAR qui sont réfléchies par des composants internes à ce système LIDAR, correspondent à des durées entre émission et détection qui sont équivalentes à celles de cibles situées à moins de cette valeur limite de distance en avant d'un port optique de sortie du système LIDAR.

Les composants internes au système LIDAR qui sont susceptibles de réfléchir partiellement le rayonnement émis, c'est-à-dire de produire du signal narcisse, peuvent être un hublot de sortie, des composants de contrôle de polarisation, une ou plusieurs lentille(s) de focalisation, etc. La plus petite valeur limite de distance qui peut ainsi être déterminée est la longueur de la zone aveugle. La longueur du chemin optique de

référence peut alors être sélectionnée, de préférence, telle que la valeur de distance de propagation libre soit supérieure à la valeur limite de distance qui a été déterminée à l'étape /0/.

Par exemple, la longueur de la fibre optique peut être telle que la valeur de référence de distance de propagation libre soit supérieure à 150 m.

[0016] Le chemin optique de référence qui est constitué à partir de l'au moins une fibre optique peut être adapté pour être couplé réversiblement au système LIDAR à l'étape /1/, de façon à pouvoir en être découplé optiquement lors de séquences de mesures utiles pour caractériser des cibles. Notamment, il peut être amovible ou non par rapport à un ensemble d'émission-réception du système LIDAR, ou incorporé à l'intérieur du système LIDAR. Lorsqu'il n'est pas amovible de façon à pouvoir être séparé du système LIDAR, il peut éventuellement être découplé optiquement du port optique de sortie du système LIDAR, et possiblement découplé optiquement aussi du port optique de détection du système LIDAR.

[0017] Avantageusement, la fibre optique qui est utilisée pour le chemin optique de référence peut être disposée sous forme d'une bobine. Le chemin optique de référence peut ainsi être léger, peu encombrant et facile à manipuler, notamment lorsqu'il est destiné à être couplé temporairement et alternativement à plusieurs unités de systèmes LIDAR. En outre, pour ces mêmes raisons de légèreté et de faible encombrement du chemin optique de référence, celui-ci peut être incorporé facilement à un système LIDAR qui est destiné à être embarqué à bord d'un porteur tel qu'un aéronef, par exemple pour effectuer des mesures anémométriques. Dans ce cas, le chemin optique de référence peut être couplé réversiblement et temporairement au système LIDAR, pour la durée du procédé de calibration, par un composant de couplage optique commandé, puis découplé éventuellement pour des séquences de mesures utiles.

[0018] Le procédé de l'invention peut comprendre en outre les étapes supplémentaires suivantes, qui constituent une séquence de mesure utile effectuée à partir du procédé de calibration :

/4/ effectuer une mesure relative à l'au moins une cible à caractériser en dirigeant une ligne de visée du système LIDAR vers cette au moins une cible indépendamment du chemin optique de référence, de façon à recueillir une autre valeur de mesure qui est représentative de la distance d'éloignement de l'au moins une cible ; puis

/5/ calculer une valeur pour cette distance d'éloignement en combinant la ainsi-nommée autre valeur de mesure avec la valeur de référence de mesure et la valeur de référence de distance de propagation libre qui correspond à la longueur du chemin optique de référence.

[0019] Le système LIDAR auquel est appliqué le procédé de l'invention peut être adapté pour réaliser des mesures selon des principes quelconques, y compris des mesures de

temps de vol et des mesures basées sur des niveaux d'absorption du rayonnement, etc. Toutefois, le système LIDAR peut être adapté de préférence pour effectuer des mesures selon un principe de détection hétérodyne, y compris pour fournir à l'étape /2/ la valeur de référence de mesure, et le cas échéant, pour fournir aussi à l'étape /4/ l'autre valeur de mesure qui est représentative de la distance d'éloignement de l'au moins une cible à caractériser.

[0020] Selon une première configuration qui est possible pour le chemin optique de référence, une première extrémité de la fibre optique peut être couplée à l'étape /1/ à la voie d'émission du système LIDAR, et une seconde extrémité de cette fibre optique, qui est opposée à sa première extrémité, peut être couplée à la voie de détection du système LIDAR. Ainsi, une partie au moins du rayonnement qui est émis par le système LIDAR pénètre dans la fibre optique par sa première extrémité, puis ressort par sa seconde extrémité en étant transmise à la voie de détection du système LIDAR. Une telle configuration du chemin optique de référence est compatible avec des systèmes LIDAR des deux types monostatique et bistatique. Pour une telle première configuration du chemin optique de référence, la valeur de référence de distance de propagation libre est liée à une fois la longueur de la fibre optique.

[0021] Selon une autre configuration possible du chemin optique de référence qui est compatible avec des systèmes LIDAR monostatiques, la fibre optique du chemin optique de référence peut posséder une première extrémité et une seconde extrémité, cette dernière étant opposée à la première extrémité et munie d'un réflecteur. Ainsi, du rayonnement qui se propage dans la fibre optique à partir de la première extrémité est rétro-réfléchi par le réflecteur au niveau de la seconde extrémité, à l'intérieur de la fibre optique en direction de la première extrémité. L'étape /1/ comprend alors de coupler le système LIDAR à la fibre optique de sorte qu'une partie au moins du rayonnement qui est émis par le système LIDAR pénètre dans la fibre optique par sa première extrémité, et une partie au moins du rayonnement rétro-réfléchi qui ressort par cette même première extrémité soit transmise à la voie de détection du système LIDAR. Pour une telle autre configuration du chemin optique de référence, la valeur de référence de distance de propagation libre est liée au double de la longueur de la fibre optique.

[0022] Lorsque que le système LIDAR est monostatique, et que le chemin optique de référence n'est couplé à ce système LIDAR que par la première extrémité de la fibre optique, la seconde extrémité étant munie d'un réflecteur, la première extrémité de la fibre optique peut être couplée optiquement à un port optique d'entrée-sortie d'un circulateur optique du système LIDAR, ce circulateur optique couplant par ailleurs les voies d'émission et de détection du système LIDAR à un port optique de sortie de ce système LIDAR. Ainsi, le circulateur optique transmet lors de l'étape /2/ le rayonnement du système LIDAR à la fibre optique via le port optique d'entrée-sortie

du circulateur optique, et transmet aussi lors de la même étape /2/ à la voie de détection du système LIDAR le rayonnement qui est reçu par ce même port optique d'entrée-sortie du circulateur optique en provenance de la fibre optique. Dans ce cas, le chemin optique de référence peut en outre être adapté, ou pourvu de moyens de contrôle d'une polarisation du rayonnement, de sorte que le circulateur optique soit efficace lors de l'étape /2/. Alternativement, de tels moyens de contrôle de polarisation peuvent être intégrés au circulateur optique. Le port d'entrée-sortie du circulateur optique qui est utilisé pour coupler la première extrémité de la fibre optique aux étapes /1/ et /2/, peut aussi être utilisé, ou non, à l'étape /4/ pour le rayonnement qui est mis en œuvre lors de cette séquence de mesure utile. Lorsque le chemin optique de référence est couplé à un port optique d'entrée-sortie du circulateur optique qui est différent de celui utilisé pour émettre le rayonnement vers la cible à caractériser lors d'une séquence de mesure utile, une nouvelle calibration en distance du système LIDAR peut être effectuée en même temps que chaque séquence de mesure utile. En particulier, un tel mode de mise en œuvre de l'invention peut être obtenu en couplant l'une à l'autre les voies d'émission et de détection du système LIDAR monostatique en utilisant un circulateur optique qui est à base d'un cube polariseur. Dans ce cas, deux ports optiques d'entrée-sortie du circulateur optique qui sont constitués par deux faces différentes du cube polariseur peuvent être dédiés l'un à transmettre une partie principale du rayonnement en direction de la cible à caractériser, et l'autre à transmettre simultanément une partie secondaire du rayonnement au chemin optique de référence.

[0023] De préférence, le chemin optique de référence peut être couplé à la voie d'émission du système LIDAR en aval d'un amplificateur optique qui fait partie de cette voie d'émission, selon le sens de propagation du rayonnement dans cette voie d'émission. De cette façon, des déformations qui affectent des impulsions de rayonnement utilisées lors de chaque séquence de mesure, et qui sont causées par cet amplificateur optique, sont identiques entre le rayonnement qui parcourt le chemin optique de référence et du rayonnement qui est rétro-réfléchi ou rétrodiffusé par la cible à caractériser. Ces déformations sont ainsi prises en compte efficacement dans le procédé de l'invention, pour réduire une erreur qu'elles pourraient causer sur un résultat de mesure de distance d'éloignement obtenu pour la cible à caractériser.

[0024] Selon un perfectionnement optionnel de l'invention, qui peut encore améliorer la précision de la calibration en distance du système LIDAR, la valeur de référence de distance de propagation libre peut être établie conformément à un bilan différentiel de délais de transmission, de détection et/ou de traitement du signal qui sont effectifs pour le rayonnement du système LIDAR, entre des chemins d'émission et de détection de ce rayonnement qui sont utilisés lors de l'étape /2/, et d'autres chemins d'émission et de

détection du rayonnement qui sont utilisés pour caractériser l'au moins une cible, c'est-à-dire qui sont utilisés à l'étape /4/.

[0025] Un procédé qui est conforme à l'invention peut notamment être utilisé avantageusement pour un système LIDAR du type à impulsions de rayonnement séparées. Pour un tel système LIDAR impulsif, la distance d'éloignement de l'au moins une cible à caractériser est évaluée conformément à une durée entre une émission d'une impulsion de rayonnement en direction de cette (ces) cible(s), et une détection d'une partie de cette impulsion de rayonnement qui a été réfléchi(e) ou rétrodiffusée par la (les) cible(s).

[0026] Dans un tel cas de système LIDAR impulsif, le procédé de l'invention peut comprendre en outre d'effectuer au moins l'une parmi :

- une caractérisation d'enveloppe d'impulsion, relative à une impulsion de rayonnement qui a été émise puis détectée par le système LIDAR ;
- une caractérisation d'un décalage fréquentiel, tel qu'apparaissant entre l'impulsion de rayonnement telle qu'émise par le système LIDAR, et la même impulsion de rayonnement telle que détectée ensuite par le système LIDAR ; et
- une caractérisation d'une déformation d'enveloppe d'impulsion de rayonnement, cette déformation étant causée par une saturation de la voie de détection du système LIDAR.

Cette ou ces caractérisation(s) additionnelle(s) peut (peuvent) être effectuée(s) à partir d'un signal de détection qui est produit par le système LIDAR lors de l'étape /2/, pour une ou plusieurs exécutions successives de cette étape /2/. Le procédé de calibration de l'invention peut ainsi être complété pour constituer un test de bon fonctionnement du système LIDAR, et pour calibrer le système LIDAR aussi en décalage fréquentiel. Une telle calibration en décalage fréquentiel permet de mesurer des vitesses de cibles de façon plus exacte, notamment pour des mesures anémométriques.

[0027] De façon générale pour l'invention, le chemin optique de référence peut être pourvu d'un atténuateur d'intensité, qui est agencé pour atténuer une intensité du rayonnement qui est transmis par la fibre optique à la voie de détection du système LIDAR. Un tel atténuateur d'intensité est de préférence variable. Il peut notamment comprendre un iris qui est agencé à une extrémité de la fibre optique.

[0028] Encore de façon générale pour l'invention, le système LIDAR peut être adapté pour l'une au moins des applications suivantes :

- des mesures météorologiques, par exemple des mesures de turbulences atmosphériques ;
- des mesures de diffusion de polluants atmosphériques ;
- des mesures de cisaillement d'un écoulement atmosphérique, par exemple au niveau d'un aéroport ;

- des mesures de position et de durée de vie d'au moins un vortex qui est présent dans un écoulement de fluide, en particulier des mesures de positions de cœurs de vortex ;
- des mesures anémométriques qui sont effectuées à partir d'un aéronef en vol, notamment à partir d'un dirigeable ou d'un drone ;
- des mesures anémométriques qui sont effectuées pour optimiser un fonctionnement d'éolienne ; et
- des mesures anémométriques qui sont effectuées pour ajuster un vol d'aéronef en formation, ou pour ajuster un vol de drone.

[0029] Enfin, lorsque le système LIDAR est monostatique et adapté pour focaliser le rayonnement qui est émis à chaque séquence de mesure à une distance de focalisation en avant du port optique de sortie de ce système LIDAR, une séquence de mesure de cette distance de focalisation peut comprendre les étapes suivantes :

- contrôler le système LIDAR pour émettre au moins une impulsion de rayonnement, puis collecter un signal de détection qui est produit par la voie de détection du système LIDAR, correspondant à des parties du rayonnement émis qui ont été rétrodiffusées à des distances variables;
- déterminer un instant de détection qui correspond à un maximum d'un rapport signal-sur-bruit pour le signal de détection collecté ; puis
- calculer une valeur de distance d'éloignement qui est associée à l'instant de détection déterminé, en utilisant la valeur de référence de distance de propagation libre qui correspond à la longueur du chemin optique de référence, et attribuer la valeur de distance d'éloignement calculée à la distance de focalisation.

Pour augmenter la précision de la valeur qui est ainsi déterminée pour la distance de focalisation, une (des) impulsion(s) courte(s) peut (peuvent) être utilisée(s) de préférence.

[0030] Un second aspect de l'invention concerne un système LIDAR qui est muni d'un chemin optique de référence constitué à partir d'au moins une fibre optique efficace pour guider un rayonnement émis par ce système LIDAR lors d'un fonctionnement de celui-ci. Ainsi, une partie au moins du rayonnement parcourt le chemin optique de référence entre une voie d'émission et une voie de détection du système LIDAR. Le système LIDAR est en outre adapté pour mettre en œuvre un procédé de calibration qui est conforme au premier aspect de l'invention, possiblement avec les perfectionnements cités et caractéristiques supplémentaires optionnelles. Avantagusement, le chemin optique de référence qui est constitué à partir de l'au moins une fibre optique peut être amovible par rapport à un ensemble d'émission-réception du système LIDAR.

[0031] En particulier, un système LIDAR qui est conforme au second aspect de l'invention peut avoir l'une au moins des caractéristiques suivantes :

- il peut être adapté pour mettre en œuvre un mode de détection hétérodyne ;
- il peut être d'un type à impulsions de rayonnement séparées, pour lequel la distance d'éloignement de la (les) cible(s) à caractériser est évaluée à partir d'une durée entre une émission d'une impulsion de rayonnement en direction de cette (ces) cible(s), et une détection d'une partie de l'impulsion de rayonnement qui a été réfléchi(e) ou rétro-diffusée par la (les) cible(s) ;
- il peut comprendre une source laser, pour produire le rayonnement qui est émis en direction de la (les) cible(s) à caractériser ; et
- il peut être adapté pour mesurer au moins une grandeur atmosphérique, notamment une vitesse de vent, à partir d'une partie du rayonnement qui est émis par le système LIDAR, cette partie de rayonnement étant rétrodiffusée par des particules en suspension dans l'air atmosphérique, puis détectée par le système LIDAR.

Brève description des figures

- [0032] Les caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement dans la description détaillée ci-après d'exemples de mises en œuvre non-limitatives, en référence aux figures annexées parmi lesquelles :
- [0033] [fig.1a] est un schéma synoptique d'un premier type de système LIDAR auquel l'invention peut être appliquée ;
- [0034] [fig.1b] correspond à [fig.1a] pour un second type de système LIDAR auquel l'invention peut aussi être appliquée ;
- [0035] [fig.2] illustre une utilisation possible d'un type de circulateur optique au sein d'un système LIDAR pour mettre en œuvre l'invention ;
- [0036] [fig.3a] à [fig.3d] sont quatre schémas de montages optiques qui peuvent être utilisés pour un perfectionnement de l'invention ; et
- [0037] [fig.4] est un schéma synoptique du procédé de l'invention.

Description détaillée de l'invention

- [0038] 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, les éléments qui sont représentés ne le sont que symboliquement, étant entendu que des composants qui ne sont pas concernés directement par l'invention, ou qui peuvent être adaptés de façon spontanée par l'Homme du métier, ne sont pas représentés ni décrits. Enfin, des références identiques qui sont indiquées dans des figures différentes désignent des éléments identiques ou qui ont des fonctions identiques.
- [0039] L'invention est maintenant décrite, à titre d'exemple, pour un système LIDAR monostatique de type impulsif à détection hétérodyne. Toutefois, l'invention peut être transposée facilement, à partir de la description qui suit, à d'autres types de systèmes

LIDAR, notamment des systèmes LIDAR à émission continue, et à des modes de détection autres que la détection hétérodyne. De façon générale, l'invention concerne la conversion en valeurs de distance, de valeurs de mesure qui sont délivrées par un système LIDAR. Chaque valeur de mesure est représentative d'une durée qui est mesurée par le système LIDAR, entre l'émission d'un rayonnement par ce système et sa détection consécutive. Toutefois, cette valeur de mesure peut être un décalage temporel, une tension électrique, un écart de fréquence, etc., en fonction du mode de détection et du type de traitement du signal qui sont utilisés dans chaque système LIDAR. En outre, à titre d'exemples, les systèmes LIDAR qui sont décrits ci-dessous, sont adaptés pour réaliser des mesures anémométriques, en utilisant une rétrodiffusion de rayonnement laser qui est produite par des particules présentes en suspension dans l'air. Ces particules rétrodiffusantes, qui constituent la cible à caractériser, sont désignées par la référence 100 dans [fig.2].

[0040] Conformément à [fig.1a], le système LIDAR 10 comprend une voie d'émission 10E et une voie de détection 10D. La voie d'émission 10E comprend une source laser 1, qui produit un rayonnement monochromatique pouvant avoir une longueur d'onde égale à 1545 nm (nanomètre) lorsque ce rayonnement se propage dans l'air, au moins un modulateur acousto-optique 2, noté MAO et contrôlé pour former des impulsions successives à partir du rayonnement laser qui est produit par la source 1, et un amplificateur optique 3, noté AMPL. Le modulateur acousto-optique 2 produit en outre un décalage en fréquence du rayonnement laser qui est émis par le système LIDAR 10 vers une cible par rapport au rayonnement laser tel que produit par la source 1. De cette façon, un signal de détection hétérodyne qui est délivré par la voie de détection 10D possède une fréquence de battement non-nulle lorsque le rayonnement est rétro-réfléchi par une cible qui est immobile. La voie de détection 10D comprend un détecteur 7, noté DETECT, et une carte d'acquisition 8, notée ACQ. La carte d'acquisition 8 est connectée pour recevoir un signal électrique de détection hétérodyne qui est produit par le détecteur 7, appliquer un traitement à ce signal pour en déduire une valeur de mesure qui est représentative de la durée entre l'émission d'une impulsion de rayonnement laser par la voie d'émission 10E et la détection d'une partie de cette impulsion telle que reçue par la voie de détection 10D, puis pour convertir cette valeur de mesure en une valeur D de distance d'éloignement des particules qui ont rétrodiffusé le rayonnement laser. Possiblement, un amplificateur de signal électrique, non représenté, peut être utilisé sur la liaison de transmission du signal électrique entre le détecteur 7 et la carte d'acquisition 8. Conformément au mode de détection hétérodyne, le détecteur 7 reçoit en entrée un mélange de la partie de chaque impulsion qui a été reçue par la voie de détection 10D, avec une partie du rayonnement laser d'émission qui est prélevée entre la source 1 et le modulateur acousto-optique 2.

De façon connue, la partie du rayonnement laser d'émission qui est transmise au détecteur 7 à partir de la voie d'émission 10E peut subir diverses transformations intermédiaires, entre son prélèvement dans la voie d'émission 10E et le détecteur 7. Le modulateur acousto-optique 2 et la carte d'acquisition 8 sont commandés par un contrôleur 9, qui est noté CTRL et procure au système son fonctionnement LIDAR.

- [0041] Lorsque le système LIDAR 10 est du type monostatique, les voies d'émission 10E et de détection 10D peuvent être couplées par un circulateur optique 4 à un port optique 5, ce dernier faisant office à la fois de port optique de sortie pour la voie d'émission 10E et de port optique de détection pour la voie de détection 10D. Alors, la voie d'émission 10E est couplée optiquement à un port optique d'entrée 41 du circulateur optique 4, la voie de détection 10D est couplée optiquement à un port optique de sortie 42 du circulateur optique 4, et le port optique 5 du système LIDAR 10 est couplé optiquement à un port optique mixte d'entrée-sortie 43 du circulateur optique 4.
- [0042] Dans une configuration alternative du système 10, qui est illustrée par [fig.1b], le port optique de sortie 5a de la voie d'émission 10E et le port optique de détection 5b de la voie de détection 10D peuvent être séparés. Aucun circulateur optique n'est alors utilisé entre les voies d'émission 10E et de détection 10D. Lorsque les ports optiques 5a et 5b sont contigus ou suffisamment rapprochés l'un de l'autre, le système LIDAR 10 est encore du type monostatique.
- [0043] L'invention objet de la présente description concerne la conversion qui est effectuée au sein de la carte d'acquisition 8, d'une valeur de mesure qui est représentative de la durée entre l'émission d'une impulsion et sa détection après rétrodiffusion, en une valeur D de la distance d'éloignement des particules qui ont produit la rétrodiffusion. Cette conversion nécessite une étape de calibration, qui est réalisée selon l'invention en couplant un chemin optique de référence au système LIDAR 10. Ce chemin optique de référence comprend une fibre optique 20 de longueur connue, notée L, et peut avoir plusieurs configurations.
- [0044] Selon une première configuration possible du chemin optique de référence, qui est représentée dans [fig.1a], la fibre optique 20 est couplée au système LIDAR 10 par une première extrémité de cette fibre optique, désignée par la référence 21. L'extrémité opposée de la fibre optique 20, qui est désignée par la référence 22, peut être munie d'un réflecteur 23 efficace pour la longueur d'onde du rayonnement émis par le système LIDAR 10. Dans ce cas, la longueur du chemin optique de référence correspond à un aller-retour du rayonnement dans la fibre optique 20. Elle est notée D_{ref} et est égale à $2 \cdot L \cdot n_{eff}$, où n_{eff} désigne l'indice effectif de la fibre optique 20 pour la longueur d'onde du rayonnement émis par le système LIDAR 10. Autrement dit, la vitesse de propagation du rayonnement qui est émis par le système LIDAR 10 dans la fibre optique 20 est C/n_{eff} , où C est la vitesse de propagation libre du rayonnement dans

l'air. Dans la partie générale de la présente description, D_{ref} a été appelée valeur de référence de distance de propagation libre, «propagation libre» désignant une propagation du rayonnement dans l'air, par opposition à la propagation guidée du rayonnement à l'intérieur de la fibre optique 20. La longueur d'onde d'un rayonnement désigne sa période spatiale lorsqu'il se propage de façon libre dans l'air.

- [0045] Selon une seconde configuration possible du chemin optique de référence, représentée dans [fig.1b], la fibre optique 20 est couplée au système LIDAR 10 par ses deux extrémités 21 et 22, sans utiliser de réflecteur 23. L'extrémité 21 réalise la transmission du rayonnement à partir de la voie d'émission 10E du système LIDAR 10 à la fibre optique 20, et l'extrémité 22 réalise la transmission en retour du rayonnement de la fibre optique 20 à la voie de réception 10R du système LIDAR 10. Pour cela, l'extrémité 21 est couplée au port optique de sortie 5a, et l'extrémité 22 est couplée au port optique de détection 5b. Pour cette seconde configuration, $D_{\text{ref}} = L \cdot n_{\text{eff}}$, en reprenant les notations précédentes.
- [0046] Lorsque le chemin optique de référence comprend des composants additionnels, des longueurs supplémentaires de propagation qui sont provoquées par ces composants additionnels peuvent être prises en compte en adaptant les expressions précédentes de la valeur de référence de distance de propagation libre D_{ref} , pour obtenir une calibration encore plus précise. L'Homme du métier saura spontanément adapter les expressions précédentes de D_{ref} dans ce but.
- [0047] Pour les deux configurations qui viennent d'être décrites, relatives à des systèmes LIDAR monostatiques, la longueur L de la fibre optique 20 est choisie de préférence pour que la valeur correspondante de distance de propagation libre D_{ref} soit supérieure à 150 m. De cette façon, la partie du rayonnement qui est retransmise par la fibre optique 20 à la voie de détection 10D du système LIDAR 10 est séparée temporellement d'un éventuel signal narcissique.
- [0048] La fibre optique 20 est de préférence agencée sous forme d'une bobine peu encombrante, et telle que ses extrémités 21 et 22 soient facilement accessibles.
- [0049] Encore pour les deux configurations qui viennent d'être décrites, le chemin optique de référence peut être pourvu d'un atténuateur d'intensité 24, afin d'éviter que le rayonnement utilisé pour la calibration, qui se propage dans le chemin optique de référence au lieu d'être rétrodiffusé par les particules en suspension dans l'air, ne provoque une saturation de la voie de détection 10D. L'atténuateur 24 peut être constitué de multiples façons, et être à niveau variable d'atténuation. Par exemple, ce peut être un iris ajustable en ouverture. Pour de tels couplages au(x) port(s) optique(s) du système LIDAR 10, un mode de couplage amovible ou réversible peut être prévu, de sorte que le système LIDAR 10 soit opérationnel pour des mesures utiles qui sont effectuées sur les particules présentes en suspension dans l'air, après que la calibration

a été effectuée.

[0050] En outre, il n'est pas nécessaire que le chemin optique de référence qui est utilisé pour calibrer le système LIDAR 10 en distance, soit couplé au(x) même(s) port(s) optique(s) que celui (ceux) utile(s) pour une (des) cible(s) à caractériser. Par exemple, dans une configuration de système LIDAR monostatique telle que représentée dans [fig.1a], le circulateur optique 4 peut avoir un port optique supplémentaire, qui est désigné par la référence 44. Ce port optique supplémentaire 44, qui est de type mixte d'entrée-sortie, n'est pas utilisé pour des mesures utiles qui sont effectuées sur des cibles à caractériser. Alors, l'extrémité 21 de la fibre optique 20 du chemin optique de référence, lorsque ce chemin est constitué par un aller-retour du rayonnement dans la fibre optique 20, peut être connectée au port optique supplémentaire 44 du circulateur optique 4. Lorsqu'une telle configuration est utilisée pour le chemin optique de référence et pour son couplage au système LIDAR 10, le chemin optique de référence peut comporter en outre des moyens de contrôle de la polarisation du rayonnement. Ces moyens de contrôle de polarisation (non-représentés) assurent que du rayonnement qui rentre dans ce circulateur optique 4 par le port optique 41 ressorte par le port optique supplémentaire 44, et que du rayonnement qui rentre par ce port optique supplémentaire 44 ressorte par le port optique 42, lorsque le port optique 43 est inhibé momentanément. De façon connue, de tels moyens de contrôle de polarisation peuvent alternativement être intégrés dans le circulateur optique 4, plutôt que dans le chemin optique de référence.

[0051] Par ailleurs, il peut être préférable de coupler optiquement l'extrémité 21 de la fibre optique 20 à la voie d'émission 10E en aval de l'amplificateur optique 3, pour que des déformations que pourrait produire l'amplificateur optique 3 affectent identiquement des impulsions de rayonnement qui sont transmises à la fibre optique 20 et d'autres impulsions qui sont émises en direction d'une cible à caractériser.

[0052] [fig.2] montre une réalisation possible du circulateur optique 4 qui est utilisé dans un système LIDAR 10 conforme à [fig.1a]. Elle montre aussi une mise en œuvre possible de ce circulateur optique 4 suivant laquelle la fibre optique 20 est couplée de façon permanente au port optique supplémentaire 44. Le circulateur optique 4 comprend un cube polariseur à quatre faces qui constituent les ports optiques 41-44, respectivement. Le rayonnement à émettre par le système LIDAR 10 provient de l'amplificateur optique 3. Il comporte une composante principale C1 qui possède une polarisation linéaire verticale, et qui est destinée à être transmise en direction de la cible à caractériser, désignée par la référence 100. Il comporte en outre une composante secondaire C2 qui possède une polarisation linéaire horizontale, et qui est destinée à être transmise au chemin optique de référence. De façon connue, un rapport d'intensité entre les composantes C1 et C2 peut être ajusté en tournant le cube polariseur par

rapport à une direction de polarisation linéaire du rayonnement laser tel que provenant de l'amplificateur optique 3, ou par rapport à un polariseur linéaire (non représenté) qui peut être situé entre l'amplificateur optique 3 et le circulateur optique 4. Les deux composantes C1 et C2 pénètrent dans le cube polariseur par celle de ses faces qui constitue le port optique 41. La composante principale C1, à polarisation linéaire verticale, est transmise sans déviation à travers la face opposée du cube polariseur, qui constitue le port optique 43. Une lame quart-d'onde 45, qui est située entre le port optique 43 du cube polariseur et le port optique 5 du système LIDAR 10, transforme la polarisation linéaire verticale de cette composante principale C1 en une polarisation circulaire gauche. Après rétro réflexion ou rétrodiffusion sur la cible 100, une partie du rayonnement de la composante principale C1 possède une polarisation circulaire droite, qui est transformée en polarisation linéaire horizontale par la lame quart d'onde 45, et qui pénètre à nouveau dans le cube polariseur par le port optique 43. Elle est alors réfléchi au sein du cube polariseur pour ressortir par celle de ses faces qui constitue le port optique 42, en direction du détecteur 7. Simultanément, la composante secondaire C2, à polarisation linéaire horizontale, après avoir aussi pénétré dans le cube polariseur par sa face qui constitue le port optique 41 du circulateur optique 4, est réfléchi au sein du cube polariseur pour ressortir par celle de ses faces qui constitue le port optique supplémentaire 44. L'extrémité 21 de la fibre optique 20 du chemin optique de référence est couplée à ce port optique 44, et son extrémité opposée 22 est couplée à l'entrée optique de la voie de détection 10D, en direction du détecteur 7. La composante secondaire C2 se propage ainsi sélectivement dans le chemin optique de référence. Dans ces conditions, lorsque la distance à laquelle se trouve la cible 100 est différente de la longueur de distance de propagation libre D_{ref} du chemin optique de référence, le signal de détection hétérodyne qui est délivré par le détecteur 7 possède deux contributions séparées : une première contribution qui est produite par la composante principale C1 et qui permet de caractériser la cible 100, lors d'une séquence de mesure utile, et une seconde contribution qui est produite par la composante secondaire C2 et qui permet d'appliquer le procédé de calibration de l'invention en même temps que la séquence de mesure utile est réalisée.

[0053] De façon générale, le couplage de l'une au moins des extrémités 21 et 22 de la fibre optique 20 au système LIDAR 10 pour sa calibration en distance, peut être amovible pour retirer la fibre optique 20 de l'ensemble d'émission-réception du système LIDAR. Lorsque les deux extrémités 21 et 22 sont ainsi détachables, le chemin optique de référence peut être un composant optique séparé, apte à être couplé alternativement et successivement avec des unités distinctes de systèmes LIDAR, afin de calibrer chacune d'elles successivement. Alternativement, le chemin optique de référence peut être intégré dans le système LIDAR 10. Dans ce dernier cas, si nécessaire, le chemin

optique de référence peut être conçu pour être couplé ou découplé optiquement aux voies d'émission 10E et de détection 10D du système LIDAR 10, réversiblement en fonction d'une commande appropriée pour commuter entre une séquence de calibration et une séquence de mesure utile pour le système LIDAR. Alternativement, lorsque la fibre optique 20 est couplée aux voies d'émission 10E et de détection 10R du système LIDAR 10 en parallèle du chemin optique en direction et en provenance de la cible 100, son couplage peut être permanent si bien qu'il est possible de répéter le procédé de calibration à chaque séquence de mesure utile pour caractériser la cible.

[0054] La séquence de calibration du système LIDAR 10 consiste à obtenir une valeur de mesure pour la durée entre émission et détection d'une impulsion qui se propage dans le chemin optique de référence. Elle peut être constituée par une séquence de fonctionnement du système LIDAR 10, qui est identique à une séquence de fonctionnement telle que mise en œuvre pour une mesure utile sur cible à caractériser. Le résultat de la séquence de calibration est une valeur de durée mesurée ΔT_{ref} , qui est associée à la valeur de référence de distance de propagation libre D_{ref} , telle que définie plus haut en fonction de la configuration du chemin optique de référence. Ainsi, lorsqu'une fibre optique 20 est utilisée pour la séquence de calibration, dont la longueur de fibre L correspond à une valeur 38 m pour la valeur de référence de distance de propagation libre D_{ref} , une valeur proche de 254 ns (nanoseconde) est obtenue pour la durée mesurée ΔT_{ref} . Le procédé de calibration permet de prendre en compte pour des mesures utiles ultérieures, la différence qui existe entre ΔT_{ref} et le résultat du quotient de D_{ref} par C . La valeur de mesure qui est représentative de la durée ΔT_{ref} a été appelée valeur de référence de mesure dans la partie générale de la présente description.

[0055] Une séquence de mesure utile qui est effectuée pour caractériser une cible, par exemple pour mesurer la vitesse de déplacement d'un ensemble diffus de particules en suspension dans l'air, fournit une autre valeur de durée mesurée ΔT_{mes} . Cette dernière a été appelée valeur de mesure dans la partie générale de la présente description, et est obtenue à l'étape /4/. La séquence de mesure utile est effectuée en découplant si nécessaire le chemin optique de référence du système LIDAR 10, de sorte que chaque impulsion laser qui est émise par le LIDAR 10 soit rétrodiffusée par les particules, puis détectée en retour par le système LIDAR 10. Alors, une valeur D peut être obtenue à l'étape /5/ pour la distance d'éloignement de l'ensemble de particules par rapport au système LIDAR 10, en combinant les valeurs de durées mesurées ΔT_{mes} et ΔT_{ref} avec la valeur de référence de distance de propagation libre D_{ref} de la façon suivante : $D = D_{ref} + (\Delta T_{mes} - \Delta T_{ref}) \cdot C/2$. Une erreur résiduelle, qui a été déterminée égale à 0,02 m pour un système LIDAR utilisé comme exemple, peut affecter la calibration en distance du système LIDAR 10, lorsque cette calibration est effectuée puis utilisée pour des séquences de mesures utiles de la façon qui vient d'être décrite.

[0056] L'erreur résiduelle du procédé de calibration qui vient d'être décrit peut en partie résulter du fait que le chemin optique qui est suivi par le rayonnement à l'intérieur du système LIDAR 10 ne soit pas le même entre la séquence de calibration et la séquence de mesure utile, et/ou que la valeur de distance de propagation libre ne puisse pas être déterminée de façon suffisamment précise par calcul à partir de la longueur de la fibre optique 20. Tel est le cas, par exemple, lorsque le chemin optique de référence qui possède la configuration représentée dans [fig.1a] est couplé au port optique supplémentaire 44 du circulateur optique 4, alors que le rayonnement est transmis par le port optique d'entrée-sortie 43 du circulateur optique 4 et par le port optique 5 lors d'une séquence de mesure utile. Pour prendre en compte cette source d'erreur, les quatre montages de [fig.3a]-[fig.3d] peuvent être réalisés et utilisés pour mesurer des écarts temporels Δt_1 - Δt_4 . Dans ces figures, la référence 11 désigne une source laser qui peut posséder de préférence une même valeur de longueur d'onde que la source 1 du système LIDAR 10, et la référence 12 désigne un coupleur optique, par exemple du type coupleur 50%-50% à ondes évanescentes. La source 11 est connectée à une entrée du coupleur optique 12, et l'autre entrée du coupleur optique 12 n'est pas utilisée. Le chemin optique de référence, qui peut notamment être constitué par les composants 20, 23 et 24, et des composants supplémentaires éventuels, est le même que celui utilisé pour l'étape /2/ avec le système LIDAR 10 de [fig.1a]. D1 et D2 sont deux photodétecteurs qui, par comparaison entre les signaux de détection qu'ils produisent respectivement, fournissent des mesures d'écarts temporels qui séparent un instant de détection qui est relatif au photodétecteur D2 par rapport à un instant de détection qui est relatif au photodétecteur D1, pour des parties de rayonnement qui parviennent respectivement à ces photodétecteurs. Par exemple, les photodétecteurs D1 et D2 sont des photodiodes rapides ou ultrarapides qui sont connectées à des entrées d'un oscilloscope. Le port optique 42 du circulateur optique 4 n'est jamais utilisé dans ces montages, et le photodétecteur D1 est toujours couplé optiquement à une même première sortie du coupleur optique 12.

[0057] [fig.3a] : pour ce premier montage, le port optique d'entrée 41 du circulateur optique 4 est couplé à une seconde sortie du coupleur optique 12, et le chemin optique de référence est couplé optiquement au port optique 43 du circulateur optique 4. Le photodétecteur D2 est couplé optiquement au port optique supplémentaire 44 du circulateur optique 4. Le port optique 42 du circulateur optique 4 est inhibé. L'écart temporel Δt_1 qui est ainsi mesuré, prend en compte la durée de propagation du rayonnement dans le chemin optique de référence.

[0058] [fig.3b] : pour ce deuxième montage, les deux photodétecteurs D1 et D2 sont directement couplés optiquement, un-à-une, aux deux sorties du coupleur optique 12. L'écart temporel Δt_2 est ainsi mesuré. Ce second montage permet de prendre en

compte une dissymétrie qui pourrait exister entre les deux sorties du coupleur optique 12.

- [0059] [fig.3c] : ce troisième montage reprend le couplage du circulateur optique 4 au coupleur optique 12 tel que mis en œuvre pour le premier montage, mais le chemin optique de référence est supprimé et remplacé par le photodétecteur D2 au port optique 43 du circulateur optique 4. Les ports optiques 42 et 44 du circulateur optique 4 sont inhibés. L'écart temporel Δt_3 est ainsi mesuré.
- [0060] [fig.3d] : pour ce quatrième montage, le circulateur optique 4 est retourné, à partir du troisième montage, puis couplé par son port optique d'entrée-sortie 43 à la seconde sortie du coupleur optique 12. Le photodétecteur D2 est couplé optiquement au port optique supplémentaire 44 du circulateur optique 4, et les ports optiques 41 et 42 de ce dernier sont inhibés. L'écart temporel Δt_4 est ainsi mesuré.
- [0061] La valeur de référence de distance de propagation libre D_{ref} à associer à la valeur de référence de mesure ΔT_{ref} pour constituer la calibration du système LIDAR 10 est alors $D_{ref} = C \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2 - \Delta t_3 - \Delta t_4)$. Cette calibration est à utiliser pour calculer la distance d'éloignement D lors d'une séquence de mesure utile, à la place du résultat d'un calcul de D_{ref} à partir de la longueur L de la fibre optique 20 tel que mentionné plus haut. Il s'applique lorsque la configuration de [fig.1a] est utilisée avec le chemin optique de référence qui est couplé au port optique d'entrée-sortie supplémentaire 44 du circulateur optique 4 pour la séquence de calibration, et le port optique de sortie 5 du système LIDAR 10 qui est couplé au port optique d'entrée-sortie 43 du circulateur optique 4 pour la séquence de mesure utile. La correction qui est ainsi apportée sur la valeur de référence de distance de propagation libre D_{ref} est d'environ 0,02 ns, correspondant à un écart de distance de propagation libre d'environ 4 mm (millimètre).
- [0062] Par ailleurs, le signal de détection hétérodyne qui est obtenu lors d'une séquence de calibration exécutée selon l'invention en couplant le chemin optique de référence au système LIDAR 10, constitue une image temporelle de la forme de l'impulsion de rayonnement, telle que cette impulsion est reçue après propagation dans le chemin optique de référence. Sa forme d'enveloppe d'impulsion peut être caractérisée par exemple par une valeur de largeur à mi-hauteur, désignée par FWHM pour «full width at half maximum» en anglais, et une largeur à -30 dB (décibel), notée l_{30} . Les valeurs $FWHM=75$ ns et $l_{30}=120$ ns ont ainsi été obtenues, pour une impulsion de rayonnement qui s'étend en propagation libre sur environ 22,5 m en considérant sa largeur à mi-hauteur, et sur environ 36 m à -30 dB (décibel). En supposant que le chemin optique de référence n'introduit pas de distorsion significative de chaque impulsion, une telle caractérisation de la forme d'enveloppe des impulsions permet de vérifier si le fonctionnement du système LIDAR 10 est correct.
- [0063] Le signal de détection hétérodyne qui est obtenu lors d'une séquence de calibration

exécutée selon l'invention en couplant le chemin optique de référence au système LIDAR 10, permet aussi de caractériser un décalage fréquentiel de l'impulsion telle que détectée après propagation dans le chemin optique de référence, par rapport à l'impulsion telle que produite par la voie d'émission du système LIDAR 10. Un décalage fréquentiel de 3 MHz (mégahertz) a ainsi été mesuré à titre d'exemple, pour une valeur de longueur d'onde du rayonnement qui est égale à 1545 nm. Un tel décalage fréquentiel peut être causé par un ou plusieurs composant(s) du système LIDAR 10 qui aurait (auraient) un comportement variable en fonction de la longueur d'onde, et altérerait (altéreraient) ainsi la forme des impulsions, y compris en modifiant leur valeur centrale de longueur d'onde. Une telle calibration en décalage fréquentiel est particulièrement utile pour des mesures anémométriques, pour séparer la contribution d'effet Doppler de la contribution interne au système LIDAR 10 dans les décalages fréquentiels mesurés.

[0064] Enfin, lorsque le chemin optique de référence est pourvu d'un atténuateur 24 qui est variable, la caractérisation de la forme d'enveloppe de l'impulsion de rayonnement peut être répétée pour des ajustements successifs de l'atténuateur 24 qui correspondent à des niveaux d'atténuation d'intensité qui sont de plus en plus faibles. Lorsque le niveau d'atténuation est suffisamment élevé, aucune saturation de la voie de détection 10D du système LIDAR 10 n'intervient, de sorte que de telles saturations potentielles n'altèrent pas un résultat de mesure qui concerne une caractéristique de la cible visée qui pourrait dépendre de la forme d'enveloppe. Par contre, lorsque le niveau d'atténuation est diminué, progressivement et dans une mesure suffisante, les saturations causées par divers composants de la voie de détection 10D du système LIDAR 10 modifient la forme de l'enveloppe de l'impulsion telle que détectée. Cette modification de forme d'enveloppe peut altérer des résultats de mesure de certaines caractéristiques de la cible, tels que produits par le système LIDAR 10. Par exemple, une modification de forme d'enveloppe peut altérer un résultat de mesure de vitesse de la cible, lorsque ce résultat est déduit d'une analyse fréquentielle du signal de détection hétérodyne, combinée avec un calcul d'effet Doppler. La connaissance de la déformation d'enveloppe qui est causée par la voie de détection du système LIDAR, lorsque l'intensité de la partie du rayonnement qui est rétro-réfléchi ou rétrodiffusé par la cible est trop élevée, permet de corriger au moins partiellement une telle erreur dans le résultat de la mesure de vitesse de la cible. En outre, une telle caractérisation du fonctionnement de la voie de détection 10D peut être utilisée avantageusement pour fournir une limite maximale pour l'intensité du signal optique qui est reçu par le détecteur 7, en deçà de laquelle une saturation est évitée.

[0065] Ces caractérisations de forme d'enveloppe, de décalage fréquentiel et de déformation d'enveloppe, permettent de vérifier un fonctionnement du système LIDAR à partir de

l'étape de calibration, telle que proposée par l'invention, d'une façon qui est particulièrement aisée, rapide et économique par rapport à une session de contrôle du système LIDAR qui serait réalisée en atelier.

[0066] [fig.4] récapitule le principe de l'invention. La fourniture du chemin optique de référence avec la fibre optique 20 de longueur L procure la valeur de référence de distance de propagation libre D_{ref} , soit par calcul, soit en utilisant des montages optiques qui sont similaires à ceux des figures [fig.3a]-[fig.3d]. Cette obtention de la valeur de référence D_{ref} est l'étape /3/ du procédé de calibration de l'invention. Par ailleurs, la valeur de référence de mesure ΔT_{ref} est obtenue lors d'une exécution d'une séquence de fonctionnement du système LIDAR 10 qui est dédiée à sa calibration, avec le chemin optique de référence qui est couplé optiquement au système LIDAR 10. Cette obtention de la valeur de référence ΔT_{ref} , qui est indépendante de l'obtention de D_{ref} , constitue les étapes /1/ et /2/ du procédé de calibration de l'invention. Enfin, l'exécution d'une séquence de fonctionnement du système LIDAR 10 en le pointant vers une cible sans utiliser le chemin optique de référence, constitue une mesure utile MES. Cette séquence de mesure utile fournit la valeur de mesure ΔT_{mes} , et correspond à l'étape /4/. Enfin, la combinaison de la valeur ΔT_{mes} avec les valeurs de référence ΔT_{ref} et D_{ref} fournit le résultat pour la valeur de distance d'éloignement D de la cible, correspondant à l'étape /5/ introduite dans la partie générale de la présente description.

[0067] Il est entendu que l'invention peut être reproduite en modifiant des aspects secondaires des modes de mise en œuvre qui ont été décrits ci-dessus, tout en conservant certains au moins des avantages cités. Notamment, bien que l'invention ait été décrite en détail pour des systèmes LIDAR monostatiques, elle peut aussi être appliquée à des systèmes LIDAR bistatiques. En outre, 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]

Procédé de calibration d'un système LIDAR (10), afin de fournir une valeur de référence de mesure (ΔT_{ref}) qui corresponde à une valeur de référence de distance de propagation libre (D_{ref}), lesdites valeurs de référence de mesure et de distance de propagation libre étant destinées à être utilisées comme calibration du système LIDAR pour évaluer une distance d'éloignement (D) d'au moins une cible (100) à caractériser en utilisant ledit système LIDAR, le procédé comprenant les étapes suivantes :

/1/ coupler le système LIDAR (10) à un chemin optique de référence qui est constitué à partir d'au moins une fibre optique (20) efficace pour guider un rayonnement émis par le système LIDAR lors d'un fonctionnement dudit système LIDAR, de sorte qu'une partie au moins du rayonnement parcourt le chemin optique de référence entre une voie d'émission (10E) et une voie de détection (10D) du système LIDAR, le chemin optique de référence ayant une longueur connue ;

/2/ réaliser une séquence de mesure de distance en utilisant le système LIDAR (10) couplé au chemin optique de référence tel que résultant de l'étape /1/, pour obtenir une valeur de mesure qui est représentative d'une durée de propagation du rayonnement dans le chemin optique de référence, et qui est destinée à constituer la valeur de référence de mesure (ΔT_{ref}) ; puis

/3/ convertir la longueur connue du chemin optique de référence en valeur de distance de propagation libre pour le rayonnement, selon un principe d'égalité de durée de propagation, pour former la valeur de référence de distance de propagation libre (D_{ref}), et associer ladite valeur de référence de distance de propagation libre à la valeur de référence de mesure (ΔT_{ref}) afin de constituer la calibration du système LIDAR (10), le procédé étant caractérisé en ce que le chemin optique de référence qui est constitué à partir de l'au moins une fibre optique (20) est incorporé à l'intérieur du système LIDAR.

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication 1, suivant lequel le système LIDAR (10) est d'un type monostatique, pour lequel des ports optiques de sortie et de détection (5) du système LIDAR sont confondus, et le procédé comprend en outre l'étape préliminaire suivante, à effectuer avant l'étape /1/ :

/0/ déterminer une valeur limite de distance telle que des parties du

rayonnement émis par le système LIDAR (10) qui sont réfléchies par des composants internes audit système LIDAR, correspondent à des durées entre émission et détection qui sont équivalentes à celles de cibles situées à moins de cette valeur limite de distance en avant d'un port optique de sortie (5 ; 5a) du système LIDAR,

la longueur du chemin optique de référence étant sélectionnée telle que la valeur de distance de propagation libre (D_{ref}) soit supérieure à la valeur limite de distance qui a été déterminée à l'étape /0/.

[Revendication 3]

Procédé selon la revendication 1 ou 2, comprenant en outre les étapes suivantes :

/4/ effectuer une mesure relative à ladite au moins une cible (100) à caractériser en dirigeant une ligne de visée du système LIDAR (10) vers ladite au moins une cible indépendamment du chemin optique de référence, de façon à recueillir une autre valeur de mesure (ΔT_{mes}), ladite autre valeur de mesure étant représentative de la distance d'éloignement (D) de ladite au moins une cible ; puis

/5/ calculer une valeur pour la distance d'éloignement (D) de ladite au moins une cible (100) en combinant ladite autre valeur de mesure (ΔT_{mes}) avec la valeur de référence de mesure (ΔT_{ref}) et la valeur de référence de distance de propagation libre (D_{ref}) qui correspond à la longueur du chemin optique de référence.

[Revendication 4]

Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, suivant lequel le système LIDAR (10) est adapté pour effectuer des mesures selon un principe de détection hétérodyne, y compris pour fournir à l'étape /2/ la valeur de référence de mesure (ΔT_{ref}), et le cas échéant, pour fournir à l'étape /4/ ladite autre valeur de mesure (ΔT_{mes}) qui est représentative de la distance d'éloignement (D) de ladite au moins une cible (100) à caractériser.

[Revendication 5]

Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, suivant lequel, à l'étape /1/, une première extrémité (21) de la fibre optique (20) du chemin optique de référence est couplée à la voie d'émission (10E) du système LIDAR (10), et une seconde extrémité (22) de ladite fibre optique, opposée à ladite première extrémité, est couplée à la voie de détection (10D) du système LIDAR, de sorte qu'une partie au moins du rayonnement émis par le système LIDAR pénètre dans la fibre optique par ladite première extrémité, puis ressort par ladite seconde extrémité en étant transmise à la voie de détection du système LIDAR.

[Revendication 6]

Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, suivant lequel

le système LIDAR (10) est d'un type monostatique ; et
 la fibre optique (20) possède une première extrémité (21) et une seconde extrémité (22), ladite seconde extrémité étant opposée à ladite première extrémité et munie d'un réflecteur (23), de sorte que du rayonnement qui se propage dans la fibre optique à partir de la première extrémité soit rétro-réfléchi par le réflecteur au niveau de la seconde extrémité, à l'intérieur de ladite fibre optique en direction de la première extrémité ;
 et

l'étape /1/ comprend de coupler le système LIDAR (10) à la fibre optique (20) de sorte qu'une partie au moins du rayonnement émis par ledit système LIDAR (10) pénètre dans ladite fibre optique par la première extrémité (21), et une partie au moins du rayonnement rétro-réfléchi qui ressort par ladite première extrémité soit transmise à la voie de détection (10D) du système LIDAR.

[Revendication 7]

Procédé selon la revendication 6, suivant lequel les voies d'émission (10E) et de détection (10D) du système LIDAR (10) sont couplées à un port optique de sortie (5) dudit système LIDAR par un circulateur optique (4),

et suivant lequel la première extrémité (21) de la fibre optique (20) du chemin optique de référence est couplée optiquement à un port optique d'entrée-sortie (43 ; 44) du circulateur optique (4), ledit circulateur optique transmettant lors de l'étape /2/ le rayonnement du système LIDAR à la fibre optique via le port optique d'entrée-sortie du circulateur optique, et transmettant aussi lors de l'étape /2/ à la voie de détection (10D) du système LIDAR, le rayonnement reçu par ledit port optique d'entrée-sortie du circulateur optique en provenance de la fibre optique.

[Revendication 8]

Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, suivant lequel la valeur de référence de distance de propagation libre (D_{ref}) est établie conformément à un bilan différentiel de délais de transmission, de détection et/ou de traitement de signal qui sont effectifs pour le rayonnement du système LIDAR (10), entre des chemins d'émission et de détection dudit rayonnement qui sont utilisés lors de l'étape /2/, et d'autres chemins d'émission et de détection du rayonnement qui sont utilisés pour caractériser ladite au moins une cible (100).

[Revendication 9]

Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, suivant lequel le système LIDAR (10) est d'un type à impulsions de rayonnement séparées, pour lequel la distance d'éloignement de ladite

au moins une cible (100) à caractériser est évaluée conformément à une durée entre une émission d'une impulsion de rayonnement en direction de ladite au moins une cible à caractériser, et une détection d'une partie de l'impulsion de rayonnement qui a été réfléchié ou rétrodiffusée par ladite au moins une cible à caractériser.

- [Revendication 10] Procédé selon la revendication 9, comprenant en outre d'effectuer au moins l'une parmi :
- une caractérisation d'enveloppe d'impulsion, relative à une impulsion de rayonnement qui a été émise puis détectée par le système LIDAR (10) ;
 - une caractérisation d'un décalage fréquentiel, tel qu'apparaissant entre l'impulsion de rayonnement telle qu'émise par le système LIDAR (10), et ladite impulsion de rayonnement telle que détectée ensuite par ledit système LIDAR ; et
 - une caractérisation d'une déformation d'enveloppe d'impulsion de rayonnement, ladite déformation étant causée par une saturation de la voie de détection (10D) du système LIDAR (10),
- chacune desdites caractérisations étant effectuée à partir d'un signal de détection produit par le système LIDAR (10) lors de l'étape /2/, pour une ou plusieurs exécutions successives de ladite étape /2/.
- [Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, suivant lequel le chemin optique de référence est pourvu d'un atténuateur d'intensité (24), de préférence un atténuateur variable, agencé pour atténuer une intensité du rayonnement qui est transmis par la fibre optique (20) à la voie de détection (10D) du système LIDAR (10).
- [Revendication 12] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, suivant lequel le chemin optique de référence qui est constitué à partir de ladite au moins une fibre optique (20) est adapté pour être couplé réversiblement au système LIDAR (10) à l'étape /1/, de façon à pouvoir être découplé optiquement dudit système LIDAR lors de séquences de mesures utiles pour caractériser des cibles.
- [Revendication 13] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, suivant lequel le système LIDAR (10) est adapté pour l'une au moins des applications suivantes :
- des mesures météorologiques, par exemple des mesures de turbulences atmosphériques ;
 - des mesures de diffusion de polluants atmosphériques ;
 - des mesures de cisaillement d'un écoulement atmosphérique, par

exemple au niveau d'un aéroport ;

- des mesures de position et de durée de vie d'au moins un vortex qui est présent dans un écoulement de fluide ;

- des mesures anémométriques qui sont effectuées à partir d'un aéronef en vol, notamment à partir d'un dirigeable ou d'un drone ;

- des mesures anémométriques qui sont effectuées pour optimiser un fonctionnement d'éolienne ; et

- des mesures anémométriques qui sont effectuées pour ajuster un vol d'aéronef en formation, ou pour ajuster un vol de drone.

[Revendication 14]

Système LIDAR (10), muni d'un chemin optique de référence qui est constitué à partir d'au moins une fibre optique (20) efficace pour guider un rayonnement émis par le système LIDAR lors d'un fonctionnement dudit système LIDAR, de sorte qu'une partie au moins du rayonnement parcourt le chemin optique de référence entre une voie d'émission (10E) et une voie de détection (10D) du système LIDAR, le système LIDAR étant adapté pour mettre en œuvre un procédé de calibration qui est conforme à l'une quelconque des revendications précédentes, le système LIDAR (10) étant caractérisé en ce que le chemin optique de référence qui est constitué à partir de l'au moins une fibre optique (20) est incorporé à l'intérieur dudit système LIDAR.

[Revendication 15]

Système LIDAR (10) selon la revendication 14, ayant l'une au moins des caractéristiques suivantes :

- ledit système LIDAR (10) est adapté pour mettre en œuvre un mode de détection hétérodyne ;

- ledit système LIDAR (10) est d'un type à impulsions de rayonnement séparées, pour lequel la distance d'éloignement (D) de ladite au moins une cible (100) à caractériser est évaluée à partir d'une durée entre une émission d'une impulsion de rayonnement en direction de ladite au moins une cible à caractériser, et une détection d'une partie de l'impulsion de rayonnement qui a été réfléchié ou rétrodiffusé par ladite au moins une cible à caractériser ;

- ledit système LIDAR (10) comprend une source laser (1), pour produire le rayonnement qui est émis en direction de ladite au moins une cible (100) à caractériser ; et

- ledit système LIDAR (10) est adapté pour mesurer au moins une grandeur atmosphérique, notamment une vitesse de vent, à partir d'une partie du rayonnement qui est émis par le système LIDAR, cette partie de rayonnement étant rétrodiffusé par des particules en suspension

dans de l'air, puis détectée par le système LIDAR.

[Fig. 1a]

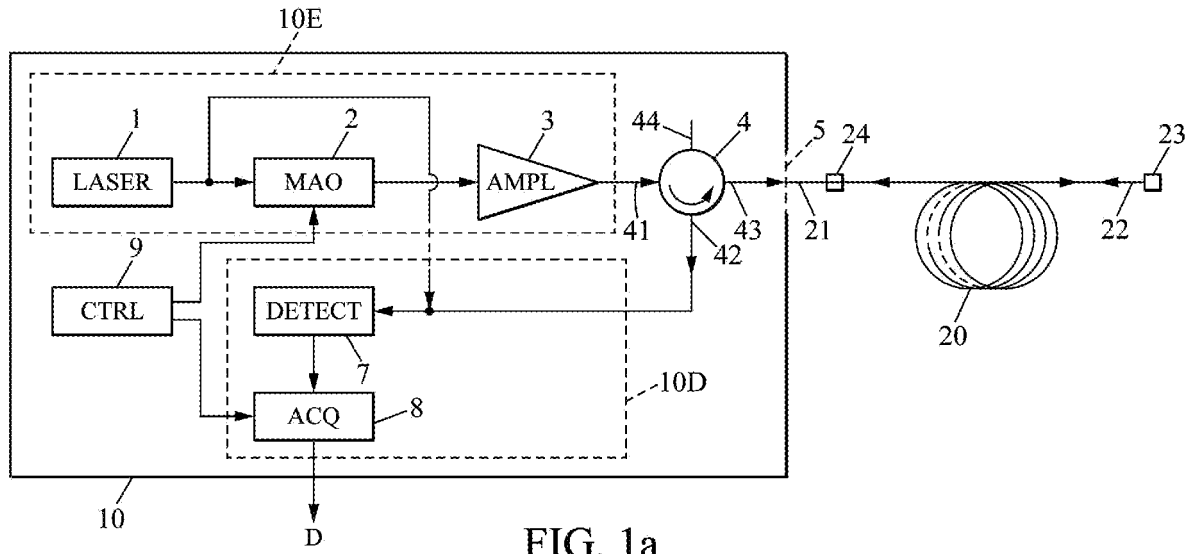


FIG. 1a

[Fig. 1b]

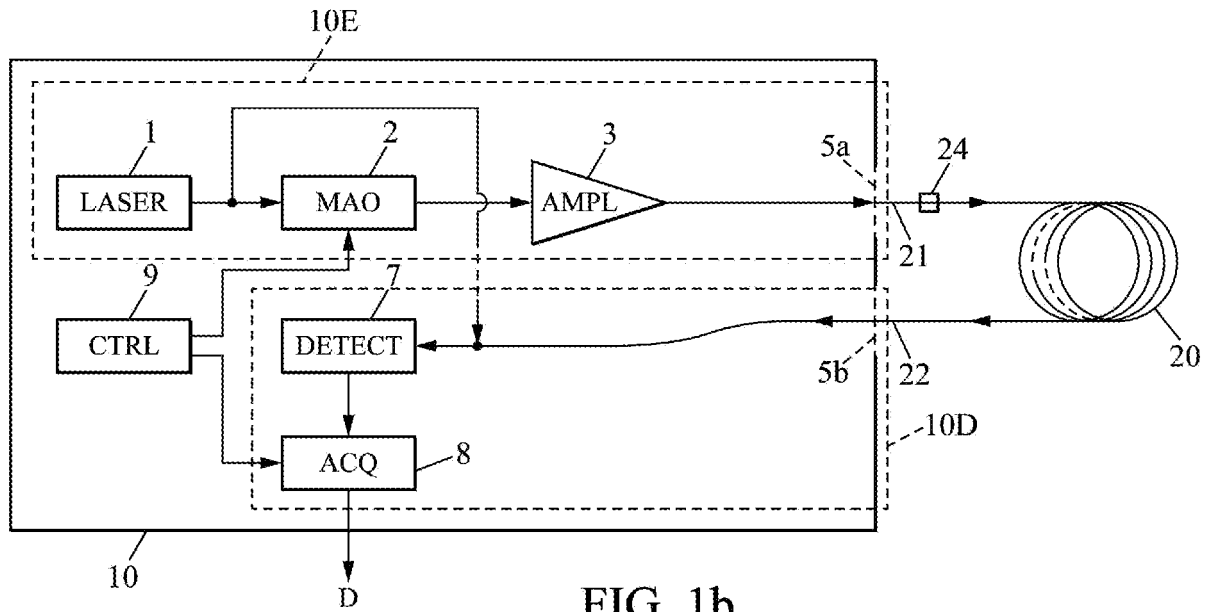


FIG. 1b

[Fig. 2]

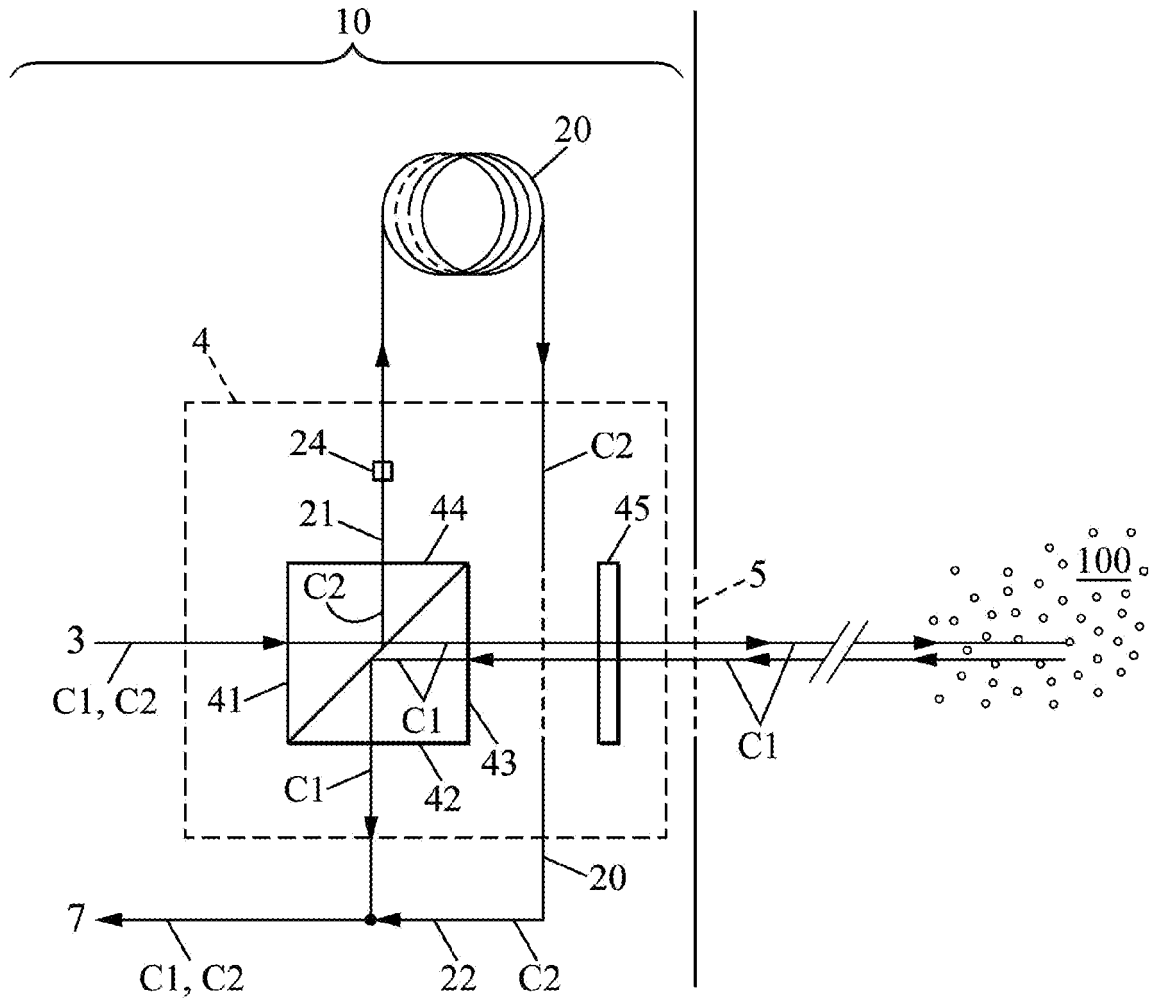


FIG. 2

[Fig. 3a]

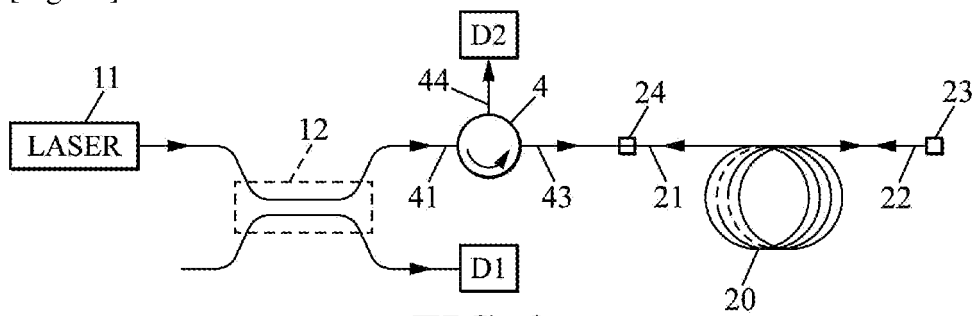


FIG. 3a

[Fig. 3b]

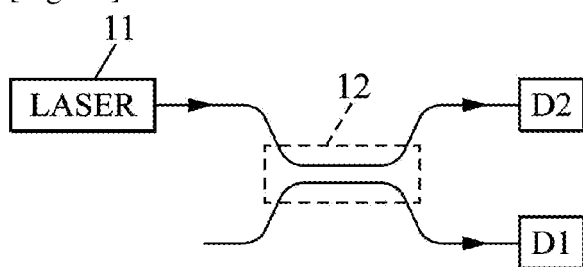


FIG. 3b

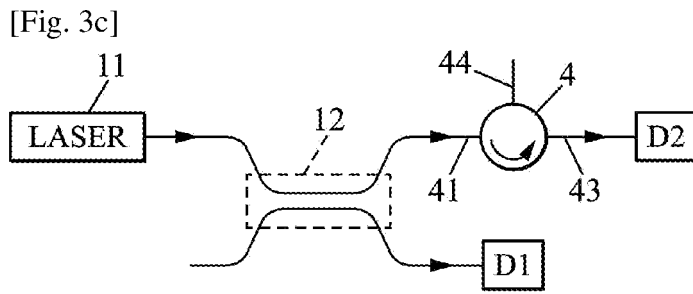


FIG. 3c

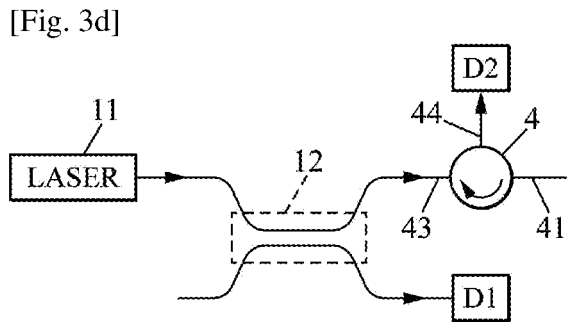


FIG. 3d

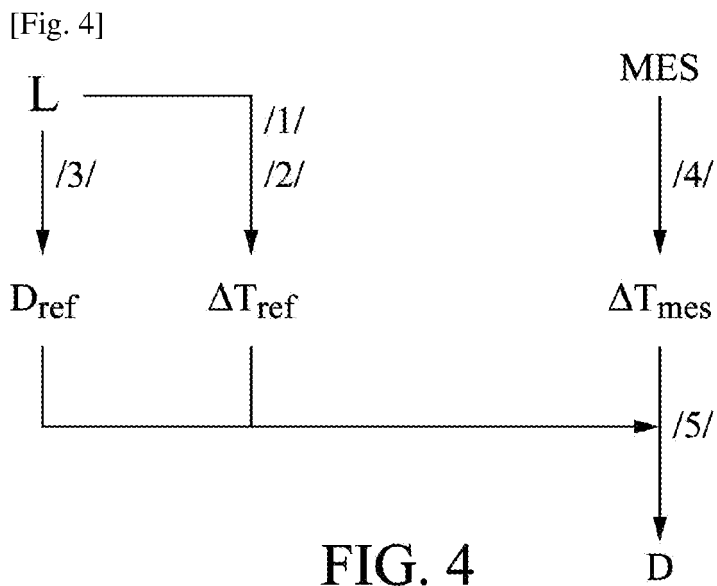


FIG. 4

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**

US 5 825 464 A (FEICHTNER JOHN D [US])
20 octobre 1998 (1998-10-20)

US 2012/274937 A1 (HAYS PAUL BYRON [US] ET
AL) 1 novembre 2012 (2012-11-01)

US 2012/050750 A1 (HAYS PAUL BYRON [US] ET
AL) 1 mars 2012 (2012-03-01)

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

NEANT

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

NEANT