

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 972 314**

51 Int. Cl.:

G01S 17/95 (2006.01)
G01S 17/58 (2006.01)
G01S 7/493 (2006.01)
G01S 17/88 (2006.01)
G01S 7/484 (2006.01)
G01S 7/4911 (2010.01)
G01S 7/487 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.09.2020** **PCT/FR2020/051591**
87 Fecha y número de publicación internacional: **25.03.2021** **WO21053290**
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.09.2020** **E 20785808 (5)**
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.12.2023** **EP 4031909**

54 Título: **Sistema LIDAR para mediciones anemométricas**

30 Prioridad:

20.09.2019 FR 1910390

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
12.06.2024

73 Titular/es:

**OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE
RECHERCHES AÉROSPATIALES (100.0%)
Chemin de la Hunière
91120 Palaiseau, FR**

72 Inventor/es:

**MICHEL, DAVID TOMLINE;
AUGERE, BÉATRICE y
VALLA, MATTHIEU**

74 Agente/Representante:

VEIGA SERRANO, Mikel

ES 2 972 314 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistema LIDAR para mediciones anemométricas

5 **Sector de la técnica**

La presente descripción se refiere a un sistema LIDAR adecuado para realizar mediciones anemométricas, así como a un procedimiento de medición que utiliza dicho sistema.

10 **Estado de la técnica**

Los sistemas LIDAR "Light Detection and Ranging" según sus siglas en inglés, son bien conocidos y se utilizan para muchas aplicaciones, entre ellas las mediciones anemométricas. En la medición anemométrica de la velocidad, el haz láser es retrodispersado por partículas suspendidas en el aire, como aerosoles o partículas sólidas, que son arrastradas por las corrientes de aire. Por tanto, la componente de la velocidad del viento que es paralela al haz láser se deduce del desplazamiento de frecuencia debido al efecto Doppler. Sin embargo, hay una serie de razones que limitan el rendimiento de los actuales sistemas LIDAR utilizados para las mediciones anemométricas de la velocidad. Entre estas razones, una de las más limitantes es el bajo valor de la relación CNR espectral "carrier to noise spectral ratio" según sus siglas en inglés, que se denomina CNR_{sp}, que es la relación entre la amplitud máxima del espectro de la señal retrodispersada y el ruido espectral, evaluándose este último como la desviación estándar de la amplitud espectral fuera de la señal retrodispersada. Esta relación CNR_{sp} es preferiblemente superior a 3, para permitir una determinación fiable del desplazamiento Doppler y, en consecuencia, de la velocidad anemométrica. Esta limitación del valor de la relación CNR_{sp} es particularmente severa para las mediciones efectuadas en altitud en la atmósfera, en particular para las mediciones efectuadas desde una aeronave, y especialmente a altitudes superiores a 2 o 3 km (kilómetro), debido a las bajas concentraciones de partículas retrodispersadas que existen a tales niveles de altitud.

El primer tipo de sistema LIDAR utilizado para las mediciones anemométricas se basa en fuentes láser continuas, como los diodos láser. En este caso, la parte de la atmósfera afectada por la medición se selecciona dando al haz láser emitido una forma de haz convergente. Así pues, el haz láser converge en una zona de enfoque y luego diverge, lo que puede describirse mediante una estructura de haz gaussiano. La zona de enfoque tiene una longitud medida paralelamente a la dirección central de propagación del haz láser, que es igual al doble de la longitud de Rayleigh, es decir, igual a $2\lambda/(\pi\theta^2)$, y un radio mínimo, denominado "waist" en inglés, que es igual a $\lambda/(\pi\theta)$, en donde λ es la longitud de onda del haz láser y θ es el semiángulo de divergencia, expresado en radianes, del haz láser más allá de la zona de enfoque, en el lado opuesto a la fuente de emisión láser. Normalmente, el semiángulo de divergencia θ es la media apertura angular del haz láser tal como existe 2 km más allá de la zona de enfoque. En estas condiciones, la parte del haz láser que se retrodispersa procede esencialmente de la zona de enfoque, por lo que el resultado de la medición LIDAR se refiere a la velocidad del viento tal como existe en la zona de enfoque. Pero el principio de selección de la zona de enfoque por la divergencia del haz láser establece una correlación entre el tamaño de esta zona de enfoque y la distancia que existe entre esta zona de enfoque y el sistema LIDAR. En la práctica, cuando la pupila de salida del sistema LIDAR tiene un radio de 0,10 m (metro), esta distancia entre la zona de enfoque y el sistema LIDAR puede ser de varios cientos de metros, por ejemplo 300 m para una longitud de zona de enfoque de aproximadamente 50 m.

Además, y también de manera conocida, el procesamiento de la señal de detección para dicho sistema LIDAR de emisión continua procede dividiendo la señal de detección en ventanas temporales sucesivas y separadas, por ejemplo con una duración de cada ventana temporal que puede ser igual a 1 μ s (microsegundo). Para mejorar el valor de la relación CNR_{sp} que se obtiene para cada ventana de división temporal, los valores de amplitud espectral que resultan por separado de N ventanas temporales sucesivas, siendo N un número entero positivo, se combinan en un valor medio que constituye el resultado de la medición. Sin embargo, dado que los valores de detección que se suman de este modo para obtener el resultado de la medición se derivan de señales de detección mutuamente incoherentes, la relación CNR_{sp} relativa al resultado de la medición se incrementa en un factor de $N^{1/2}$ con respecto al valor de la relación CNR_{sp} relativa a cada valor de detección. Por ejemplo, para 100 valores de detección combinados de esta manera, la ganancia en la relación CNR_{sp} es un factor de 10. Sin embargo, dicha ganancia puede ser insuficiente para las condiciones de medición anemométrica en las que la relación CNR_{sp} de un valor de detección es particularmente baja, por ejemplo a altitudes superiores a 2 o 3 km, en donde el coeficiente de retrodispersión del haz láser por las partículas suspendidas en el aire puede ser muy bajo. Alternativamente, la utilización de un valor muy grande para el número N impone un tiempo de medición efectivo largo, que puede ser incompatible con ciertas aplicaciones, como las mediciones anemométricas que deben realizarse en tiempo real desde un avión, por ejemplo.

En los sistemas LIDAR de un segundo tipo, la fuente de emisión láser es una fuente pulsada, y la radiación pulsada hacia la atmósfera tiene una estructura de haz colimado. La duración de cada impulso de emisión láser puede estar entre 0,15 μ s y 1 μ s, por ejemplo. Por tanto, la parte de la atmósfera afectada por cada medición es un cilindro cuyo diámetro es el del haz láser colimado, y cuya longitud en la dirección de propagación de los impulsos láser

corresponde a la duración de una ventana temporal de detección asociada a cada impulso de radiación retrodispersada, multiplicada por $C/2$, en donde C es la velocidad de propagación de la radiación en la atmósfera. Al mismo tiempo, la distancia entre la parte de atmósfera afectada por la medición y el sistema LIDAR se determina mediante un retardo controlado entre la emisión de un impulso y la ventana de tiempo de detección correspondiente.

Si la duración de cada impulso láser es corta, por ejemplo del orden de $0,15 \mu s$, la resolución espacial es buena, pero el valor de la relación CNR_{sp} es entonces bajo y provoca, por ensanchamiento espectral, una incertidumbre en el resultado de la medición de la componente de la velocidad anemométrica que es paralela a la dirección de propagación de los impulsos láser. Por otra parte, si cada impulso de radiación láser es demasiado largo, por ejemplo del orden de $1 \mu s$, la relación CNR_{sp} aumenta, el ensanchamiento espectral se reduce, pero la resolución espacial se degrada. El resultado es por tanto un difícil compromiso entre la resolución espacial, el valor de la relación CNR_{sp} y la precisión de la velocidad anemométrica medida.

En los sistemas LIDAR del segundo tipo, la relación CNR_{sp} también puede aumentarse promediando N mediciones elementales separadas, cada una de las cuales es el resultado de un impulso láser distinto y de la detección de la radiación retrodispersada que corresponde a este impulso láser. Sin embargo, como las mediciones elementales combinadas de este modo se derivan de señales que son independientes entre sí, la relación CNR_{sp} del resultado promediado solo aumenta de nuevo en un factor de $N^{1/2}$.

Otras limitaciones en el rendimiento de los sistemas LIDAR para mediciones anemométricas pueden ser, dependiendo de la naturaleza del sistema LIDAR utilizado: la duración de una medición, el peso y el volumen ocupado del sistema, la sensibilidad para valores bajos de velocidad anemométrica, etc.

En particular, el documento EP 2 282 216 A2 describe un posible uso de un sistema LIDAR del primer tipo descrito anteriormente.

El documento FR 2 952 722 A1 describe una mejora para un sistema LIDAR todavía del primer tipo, que consiste en añadir una modulación de una característica de fase del haz láser emitido, consistiendo esta modulación en desplazamientos de la característica de fase variables entre franjas horarias sucesivas.

Problema técnico

Dada esta situación, un objetivo de la presente invención es hacer posible la realización de medidas anemométricas que tengan valores de relación CNR_{sp} superiores a los de los sistemas anteriores, manteniendo una buena resolución espacial.

Un objetivo secundario de la invención es permitir tales mediciones, que también proporcionan una buena precisión de los valores de velocidad anemométrica que componen los resultados de la medición.

Otro objetivo secundario de la invención es permitir que las mediciones se realicen con un tiempo de medición que no sea demasiado largo.

Por último, otros objetivos secundarios de la invención son requerir un sistema LIDAR que no sea muy pesado o voluminoso, preferiblemente no muy costoso, y que tenga una buena sensibilidad para valores bajos de velocidad anemométrica.

Objeto de la invención

Para lograr al menos uno de estos objetivos u otro, un primer aspecto de la invención propone un nuevo sistema LIDAR que es adecuado para realizar mediciones anemométricas, y que comprende:

- una fuente de emisión láser, capaz de producir un haz láser hacia una parte de atmósfera externa al sistema LIDAR, de manera que el haz láser es convergente en una pupila de salida de la fuente de emisión láser, y presente una sección transversal del haz que sea mínima a mitad de la longitud de una zona de enfoque del haz láser, teniendo esta zona de enfoque una longitud igual a $2 \cdot \lambda / (\pi \cdot \theta^2)$, medida paralelamente a una dirección central de propagación del haz láser, en donde λ es una longitud de onda del haz láser y θ es un semiángulo de divergencia del haz láser más allá de la zona de enfoque en un lado opuesto a la fuente de emisión láser, expresado en radianes, denominándose $\lambda / (\pi \cdot \theta^2) / 2$ longitud de Rayleigh;

- un conjunto de detección heterodino, dispuesto para recibir una parte del haz láser retrodispersado por partículas contenidas en la zona de enfoque; y

- un módulo de cálculo Doppler, adaptado para deducir un valor de velocidad de las partículas a partir de una señal de batido producida por el conjunto de detección heterodino.

En otras palabras, el sistema LIDAR de la invención es similar al tipo basado en una fuente láser de emisión

continua, tal como se ha presentado anteriormente. En particular, la parte de la atmósfera objeto de la medición anemométrica es la zona de enfoque determinada por la estructura convergente del haz láser en la pupila de salida de la fuente de emisión láser.

El semiángulo θ de divergencia del haz láser es el ángulo en el que aparece un punto en el que la intensidad del haz es igual a $1/e^2$ veces un valor máximo de intensidad del haz, dentro de un plano de caracterización perpendicular a la dirección central de propagación del haz láser y situado a 2 km aguas abajo de un plano de constricción en el que el haz láser tiene un tamaño de sección transversal mínimo con respecto a la dirección de propagación del haz láser. Además, el semiángulo θ se mide con respecto a la dirección central de propagación, teniendo como vértice el punto de intersección entre esta dirección central de propagación y el plano de constricción.

Las partículas que retrodispersan parte del haz láser pueden ser cualesquiera, en particular partículas sólidas o aerosoles suspendidos en el aire, como polvo, microgranos, microcristales de hielo, gotitas de agua, etc.

Según la invención, el sistema LIDAR comprende además:

- un dispositivo de control temporal del haz láser, que está adaptado para poner este haz láser en forma de impulsos láser sucesivos, y que está asociado a la fuente de emisión láser para que los impulsos láser atraviesen la zona de enfoque, siendo una parte de cada impulso láser retrodispersada por las partículas. Este dispositivo de control temporal está adaptado además para que cada impulso láser tenga una duración individual superior o igual a dos veces la longitud de Rayleigh dividida entre la velocidad de propagación de los impulsos láser en la atmósfera, e inferior a $20 \mu s$, preferiblemente inferior a $10 \mu s$.

La duración individual de un impulso láser es el tiempo transcurrido entre un primer instante en el que la potencia del haz láser aumenta hasta la mitad de un valor de potencia máxima que se alcanza durante el impulso láser, y un segundo instante en el que la potencia del haz láser vuelve a disminuir hasta la mitad del valor de potencia máxima. En otras palabras, la duración individual de un impulso láser se define como su anchura a media altura, en términos de duración y potencia de radiación instantánea.

Mediante el dispositivo de control temporal del haz láser, la duración de cada impulso del haz láser se ajusta de modo que el conjunto de detección heterodino reciba radiación retrodispersada de toda la zona de enfoque, a la manera de un sistema LIDAR de emisión continua. De este modo, puede maximizarse la intensidad de la señal de detección afectada por el efecto Doppler.

Además, el dispositivo de control temporal del haz láser, que determina los impulsos láser sucesivos, permite suprimir las contribuciones de retrodispersión que se producirían con desplazamientos temporales superiores al tiempo de coherencia atmosférica. Dicho tiempo de coherencia atmosférica se debe, en particular, a desplazamientos locales de la atmósfera.

Además, gracias en particular al valor máximo de $20 \mu s$, el dispositivo de control temporal del haz láser que determina los impulsos láser sucesivos permite suprimir las contribuciones a la retrodispersión que producirían las nubes situadas en el fondo de la zona de enfoque, en las que las partículas retrodispersadas estarían en una concentración mucho mayor que en la zona de enfoque. De este modo, el uso de un haz láser pulsado garantiza que la señal de detección proceda de la zona de enfoque.

Por último, la implementación de impulsos láser permite acceder a valores de potencia de radiación, dentro de cada impulso, superiores a los valores de potencia disponibles para la radiación láser continua. Como resultado, la relación CNR_{sp} , que es proporcional a la intensidad de la radiación retrodispersada y recogida por el conjunto de detección heterodino, puede tener un valor superior. Por esta razón, el sistema LIDAR de la invención puede implementarse en condiciones en las que el coeficiente de retrodispersión atmosférica es bajo o muy bajo, en particular desde una aeronave a una altitud de 2 km o más.

Por la misma razón, un sistema LIDAR según la invención hace que sea opcional realizar un promedio de varios resultados de medición obtenidos a partir de impulsos láser independientes, o permite que una operación de promedio de este tipo se realice en un pequeño número de impulsos, de modo que el tiempo necesario para obtener un resultado de medición final puede ser particularmente corto.

Además, el sistema LIDAR en cuestión no requiere un compromiso entre la resolución espacial y la precisión de los valores de velocidad anemométrica medidos, a diferencia de los sistemas LIDAR de impulsos en los que la selectividad espacial es función de la duración del impulso.

Preferiblemente, el dispositivo de control temporal del haz láser puede adaptarse de modo que cada impulso láser tenga una duración individual que sea igual a tres veces la longitud Rayleigh dividida entre la velocidad de propagación de los impulsos láser en la atmósfera.

En particular, el dispositivo de control temporal del haz láser puede adaptarse de modo que la duración individual de

cada impulso láser esté comprendida entre 0,2 μ s y 5 μ s, preferiblemente entre 0,5 μ s y 1,2 μ s. Tal duración del impulso láser es de hecho adecuada cuando la duración de la coherencia atmosférica es sustancialmente igual a 1 μ s.

- 5 En determinadas realizaciones de la invención, puede reproducirse opcionalmente al menos una de las siguientes características adicionales, sola o en combinación con varias de las mismas:
- el dispositivo de control temporal del haz láser puede comprender al menos un componente seleccionado entre un modulador acústico-óptico, un modulador electroóptico, un amplificador óptico semiconductor, un sistema para encender y apagar la fuente de emisión láser y un sistema para seleccionar un modo adecuado de una cavidad de amplificación láser. No obstante, puede utilizarse alternativamente cualquier otro dispositivo de control temporal del haz láser, como, por ejemplo, un sistema de conmutación óptico, electrónico o electroóptico;
 - el dispositivo de control temporal del haz láser puede estar integrado en la fuente de emisión láser, o estar dispuesto para actuar sobre una entrada de control de la fuente de emisión láser, o incluso estar dispuesto aguas abajo de la fuente de emisión láser con respecto a una dirección de propagación de la radiación, para modificar al menos una característica de distribución temporal del haz láser después de que este haz láser se haya producido por la fuente de emisión láser;
 - la fuente de emisión láser puede ser del tipo de emisión continua y el dispositivo de control temporal del haz láser puede entonces estar adaptado para cortar este haz láser en impulsos láser sucesivos. Alternativamente, la fuente de emisión láser puede ser del tipo que emite impulsos láser sucesivos, y el dispositivo de control temporal del haz láser puede entonces estar adaptado para modificar, en particular aumentar, la duración de cada impulso láser. También pueden realizarse alternativamente otras combinaciones del tipo de fuente de emisión láser y del tipo de dispositivo de control temporal del haz láser emitido por la fuente en cuestión;
 - el sistema puede adaptarse además para proporcionar un desfase de frecuencia entre cada impulso láser y una señal láser de referencia utilizada por el conjunto de detección heterodino, de forma que una velocidad cero de las partículas contenidas en la zona de enfoque, en relación con el sistema LIDAR, corresponde a una frecuencia distinta de cero para la señal de batido producida por el conjunto de detección heterodino. Tal mejora es particularmente ventajosa para medir velocidades anemométricas que son bajas, por ejemplo para aplicaciones en tierra tales como la optimización del funcionamiento de turbinas eólicas, o para mediciones tomadas desde aeronaves que pueden permanecer en vuelo estacionario o casi estacionario;
 - la fuente de emisión láser puede ser del tipo de fibra óptica, y estar adaptada para que cada impulso láser tenga una potencia media comprendida entre 100 W (vatio) y $5 \cdot 10^5$ W, preferiblemente de entre 200 W y 2000 W. Estas fuentes de emisión láser de fibra óptica no son muy pesadas ni voluminosas, por lo que el sistema LIDAR puede transportarse fácilmente a bordo de una aeronave;
 - la longitud de onda de la fuente de emisión láser puede estar comprendida entre 1,5 μ m y 1,7 μ m, dentro de una gama espectral de transparencia de la atmósfera, y posiblemente también dentro de una gama espectral de transparencia de las fibras ópticas utilizadas en el sistema LIDAR. Esta longitud de onda tiene la ventaja de limitar los riesgos oculares;
 - el dispositivo de control temporal del haz láser puede adaptarse de modo que dos impulsos láser sucesivos estén separados por una duración comprendida entre 3 μ s y 500 μ s, preferiblemente inferior a 100 μ s. Esto permite obtener valores de potencia de impulso láser más elevados;
 - el sistema LIDAR puede estar dispuesto para emitir impulsos láser simultáneamente en una pluralidad de direcciones de medición que se distribuyen alrededor de una dirección central, con un ángulo de cada dirección de medición con respecto a la dirección central que es inferior a 30°, para obtener valores respectivos de tres coordenadas de velocidad de las partículas. De este modo, es posible caracterizar las componentes de la velocidad del viento simultáneamente según tres ejes ortogonales de coordenadas espaciales, es decir, en tres dimensiones; y
 - la fuente de emisión láser puede comprender un dispositivo de enfoque variable, adaptado para variar una distancia de medición que existe entre la pupila de salida de esta fuente de emisión láser y un punto central de la zona de enfoque, por ejemplo entre 200 m y 1000 m.
- Un segundo aspecto de la invención propone una aeronave equipada con un sistema LIDAR según el primer aspecto de la invención, sistema LIDAR que transporta a bordo de la aeronave para realizar mediciones anemométricas durante el vuelo de esta aeronave. La aeronave puede ser en particular un avión, un helicóptero, un dron, independientemente del tipo de dron, en particular de tipo ala fija o de tipo multicoptero.
- Por último, un tercer aspecto de la invención se refiere a un procedimiento de medición anemométrica, que comprende las siguientes etapas:

- disponer un sistema LIDAR que responda al primer aspecto de la invención, de modo que la zona de enfoque esté contenida en una parte de atmósfera en la que deba medirse una velocidad anemométrica;

- adoptar una duración de impulso láser individual que sea mayor o igual a dos veces la longitud Rayleigh dividida entre la velocidad de propagación del impulso láser en la atmósfera, y menor de 20 μ s, preferiblemente menor de 10 μ s; y

- activar el sistema LIDAR para obtener un valor de la velocidad de las partículas contenidas en la zona de enfoque.

Preferiblemente, el dispositivo de control temporal del haz láser puede ajustarse de modo que la duración individual de cada impulso láser esté comprendida entre 0,2 y 5 veces, preferiblemente entre 0,5 y 1,2 veces, la duración de coherencia de la atmósfera que es efectiva en la zona de enfoque.

Descripción de las figuras

Las características y ventajas de la presente invención quedarán más claras en la siguiente descripción detallada de ejemplos no limitativos de realizaciones, con referencia a las figuras adjuntas, entre las que:

La [figura 1] es un diagrama de bloques de un sistema LIDAR según la invención;

la [figura 2] muestra diferentes parámetros geométricos de un haz láser producido por el sistema LIDAR de la [figura 1];

la [figura 3] es un diagrama temporal que compara una posible emisión láser para el sistema LIDAR de la [figura 1] con emisiones láser de sistemas LIDAR conocidos en la técnica anterior;

la [figura 4] ilustra una posible aplicación del sistema LIDAR de la [figura 1]; y

la [figura 5] ilustra una mejora de la invención, para realizar mediciones anemométricas tridimensionales.

Descripción detallada de la invención

En aras de la claridad, las dimensiones de los elementos mostrados en estas figuras no corresponden ni a dimensiones reales ni a proporciones de tamaño reales. Además, algunos de estos elementos se muestran solo simbólicamente, y las referencias idénticas mostradas en diferentes figuras designan elementos que son idénticos o tienen funciones idénticas.

El sistema LIDAR según la invención mostrado en la [figura 1] puede basarse en un sistema LIDAR de emisión continua. Comprende una fuente 10 de emisión láser, un conjunto 20 de detección heterodino y un módulo 30 de cálculo Doppler.

La fuente 10 de emisión láser puede comprender una fuente 11 láser inicial, denominada FUENTE, un amplificador 13 óptico, denominado AO, y una óptica 14 de salida. De este modo, la fuente 10 de emisión láser está diseñada para producir un haz F láser que tiene una estructura de haz convergente en una región del espacio después de la óptica 14 de salida. De este modo, el haz F, de eje óptico AA, tiene secciones transversales que disminuyen entre la óptica 14 de salida y una zona de enfoque denominada ZF, y luego aumentan en forma de haz divergente más allá de esta zona ZF de enfoque. De manera conocida, la zona ZF de enfoque puede asimilarse a un cilindro con eje A-A, con radio $w_0 = \lambda/(\pi \cdot \theta)$, comúnmente llamado "waist", y longitud $2 \cdot l_R$, en donde l_R es la longitud de Rayleigh igual a $\lambda/(\pi \cdot \theta^2)$, siendo θ el semiángulo de divergencia del haz F láser más allá de la zona ZF de enfoque, expresado en radianes. Normalmente, la distancia entre la óptica 14 de salida y la zona ZF de enfoque puede ser de unos cientos de metros a más de 1 km, la longitud Rayleigh puede ser de unos metros a 200 metros y el radio w_0 del orden de centímetros. La longitud de onda de la fuente 10 de emisión láser puede ser del orden de 1,55 μ m (micrómetro), por ejemplo. En términos generales, el semiángulo de divergencia θ del haz F láser puede evaluarse aguas abajo de la zona ZF de enfoque en la dirección de propagación del haz, a una distancia D de un centro O de la zona ZF de enfoque que es igual a 2 km. Más precisamente, dentro del plano P de sección transversal del haz F que se encuentra a la distancia D del centro O, en el lado opuesto de la óptica 14 de salida, θ es el semiángulo en el vértice del cono de vértice O que comprende los puntos M del plano P en donde la intensidad de la radiación láser se reduce en un factor de $1/e^2$ con respecto a su valor en el punto Z de intersección entre el plano P y el eje A-A, siendo e la base del logaritmo neperiano. La [figura 2] muestra estos parámetros del haz F láser producido por la fuente 10. El eje óptico A-A constituye la dirección central de propagación del haz F. La óptica 14 de salida puede estar formada, en particular, por una lente convergente, y determinar el tamaño de la pupila de salida de la fuente 10 de emisión láser. Por ejemplo, esta pupila de salida puede tener un radio de aproximadamente 0,07 m.

El conjunto 20 de detección heterodino puede comprender un fotodetector 22, denominado PD, acopladores 15, 16 y

21 ópticos, denominados CO, y una placa 17 de cuarto de onda, denominada $\lambda/4$, que están dispuestos para combinar una parte retrodispersada del haz F láser con una parte F_{REF} del haz láser tal como se produce por la fuente 11 láser inicial. Esta parte F_{REF} del haz láser, tal como se produce por la fuente 11 láser inicial, actúa como señal láser de referencia, tal como se ha mencionado en la parte general de esta descripción. De manera conocida, la parte retrodispersada del haz F láser que se detecta de este modo procede esencialmente de la zona ZF de enfoque, y se produce por partículas retrodispersadas que se encuentran en esta zona.

Por último, el módulo 30 de cálculo Doppler puede consistir en una unidad informática denominada PC que aloja un programa adecuado para el tratamiento de las señales emitidas por el fotodetector 22. Su salida es una evaluación de la componente de velocidad de las partículas retrodispersadas en la zona ZF de enfoque, siendo esta componente paralela al eje A-A y denominándose V_{A-A} .

El funcionamiento de un sistema LIDAR de este tipo es bien conocido por los expertos en la técnica, por lo que no es necesario repetirlo en este caso. Del mismo modo, también es bien conocido el uso de este sistema LIDAR para realizar mediciones anemométricas de velocidad. En este caso, la fuente 10 de emisión láser se orienta de forma que la zona ZF de enfoque se encuentre en una parte de la atmósfera en la que se desea caracterizar la velocidad del viento, y las partículas que retrodispersan el haz F láser son polvos, microcristales o gotitas de aerosol que se encuentran suspendidas en la atmósfera dentro de la zona ZF de enfoque.

Según la invención, se añade al sistema LIDAR que acaba de describirse un dispositivo 40 de control temporal del haz F láser, por ejemplo dentro de la fuente 10 de emisión láser, entre la fuente 11 láser inicial y el amplificador 13 óptico, para cortar el haz F láser en impulsos láser sucesivos. Por ejemplo, el dispositivo 40 puede consistir en un modulador acústico-óptico, denominado MAO, con una unidad de control apropiada. Alternativamente, el dispositivo 40 de control temporal del haz F láser puede basarse en un modulador electro-óptico, un amplificador óptico semiconductor, comúnmente denominado SOA, para "semiconductor optical amplifier" en inglés, o un sistema para encender y apagar la fuente 10 de emisión láser. En realizaciones alternativas, el dispositivo 40 de control temporal puede estar integrado en la fuente 10 de emisión láser. Por ejemplo, la fuente 10 de emisión láser puede comprender una cavidad de amplificación láser multimodo, uno de cuyos modos puede seleccionarse por una fuente de excitación que inyecta radiación inicial en esta cavidad de amplificación láser. En este caso, la fuente de excitación puede ser a su vez una fuente láser pulsada ajustable. El haz F láser que emerge de la cavidad de amplificación láser se compone entonces de impulsos sucesivos, que corresponden uno a uno a los impulsos de la fuente de excitación.

En general, en un sistema LIDAR según la invención, los impulsos láser controlados por el dispositivo 40 tienen una duración individual inferior a 20 μ s. Este valor máximo garantiza que una parte de atmósfera situada en el eje A-A en el fondo de la zona ZF de enfoque, a gran distancia de la misma, y que tiene una potencia de retrodispersión significativa, como una nube por ejemplo, no produce una contribución a la señal detectada que se superpondría a la de la zona ZF de enfoque.

En el contexto de la invención, la duración de un impulso láser se define en relación con su valor de potencia instantánea máxima, como el tiempo que separa un instante al comienzo del impulso en el que el valor de potencia instantánea supera la mitad del valor de potencia instantánea máxima, y un instante al final del impulso en el que el valor de potencia instantánea vuelve a caer por debajo de la mitad del valor de potencia instantánea máxima.

Además, según la invención, los impulsos láser controlados por el dispositivo 40 tienen una duración individual que es mayor o igual a dos veces la longitud l_R de Rayleigh dividida entre la velocidad de propagación de los impulsos láser en la atmósfera. De este modo, la selectividad espacial de la parte de atmósfera para la que se realiza la medición de la velocidad anemométrica sigue estando determinada por la zona ZF de enfoque, del mismo modo que se ha descrito anteriormente para un sistema LIDAR de emisión continua. Cuando la longitud l_R de Rayleigh es igual a 50 m, la duración individual de los impulsos láser debe ser, por tanto, superior a 0,33 μ s. Por ejemplo, la duración individual de cada impulso láser puede ser igual a tres veces la longitud l_R de Rayleigh dividida entre la velocidad de propagación de los impulsos láser en la atmósfera, es decir, 1 μ s para $l_R = 50$ m.

Al mismo tiempo, y para optimizar la utilización de un sistema LIDAR de este tipo con el fin de efectuar mediciones de velocidad anemométrica, la duración de cada impulso también puede seleccionarse de forma que esté comprendida entre 0,2 y 5 veces, preferiblemente entre 0,5 y 1,2 veces, una duración de coherencia de la atmósfera que sea efectiva en la zona ZF de enfoque. Este tiempo de coherencia depende en particular de los desplazamientos de las partículas que producen la retrodispersión de la radiación láser. Si esta duración de coherencia de la atmósfera es sustancialmente igual a 1 μ s, entonces la duración individual de cada impulso láser se selecciona preferiblemente entre 0,2 μ s y 5 μ s, y aún más preferiblemente entre 0,5 μ s y 1,2 μ s.

Una operación de emisión pulsada de este tipo puede permitir la utilización de valores de potencia instantánea del haz láser, dentro de cada impulso con perfil rectangular, comprendidos entre 100 W y $5 \cdot 10^5$ W, por ejemplo iguales a 500 W. Tales valores no son accesibles para la radiación láser continua, habida cuenta de los componentes de amplificación óptica disponibles o compatibles con las aplicaciones previstas.

El diagrama de la [figura 3] compara la emisión láser pulsada del sistema LIDAR para mediciones de velocidad anemométrica que acaban de describirse, que se ajusta a la invención, con otros dos sistemas conocidos en la técnica anterior. El eje horizontal marca el tiempo, denominado t , y el eje vertical marca los valores de potencia instantánea de emisión, denominados $P_{\text{instantánea}}$. Los impulsos denominados INV corresponden a una emisión láser a la atmósfera posible para el sistema de la invención: consiste en impulsos rectangulares sucesivos de anchuras individuales iguales a $1 \mu\text{s}$, y de potencia instantánea igual a 500 W , con un nuevo impulso cada $71,4 \mu\text{s}$. Este tipo de operación de emisión corresponde a una potencia continua media de unos 7 W . El valor de la relación CNR_{sp} que se obtiene con tal sistema LIDAR según la invención, enfocado a 300 m (metro) de la óptica 14 de salida, y con un radio del haz F láser de 5 cm (centímetro) al nivel de esta óptica de salida, es de $8,6$ para un coeficiente β de retrodispersión de la atmósfera en la zona de enfoque del haz F láser igual a $2 \cdot 10^{-10} \text{ str}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (str por estereorradián). Estas condiciones corresponden a una resolución espacial igual a dos veces la longitud l_R de Rayleigh de aproximadamente 40 m , y el valor de $8,6$ para la relación CNR_{sp} se obtiene integrando la señal sobre $0,1 \text{ s}$ (segundo), es decir, combinando $N=1400$ impulsos sucesivos.

La línea denominada AA1 en la [figura 3] corresponde a un sistema LIDAR de emisión continua con una potencia de 14 W . Para obtener un valor de la relación CNR equivalente al del sistema según la invención (impulsos INV), deben combinarse las mediciones realizadas para $N=1.764.000$ ventanas sucesivas de corte temporal, lo que corresponde a un aumento de la relación CNR_{sp} proporcional a la raíz cuadrada del número de mediciones N , en comparación con el valor de la relación CNR_{sp} relativo a cada medición individual. De este modo, si cada ventana de corte temporal tiene una duración individual de $1 \mu\text{s}$, la duración de un ciclo de medición correspondiente a $\text{CNR}_{\text{sp}} = 8,6$ es de $1,764 \text{ s}$. Presentado de otro modo, para la misma duración de un ciclo de medición, el sistema de la invención permite aumentar la relación CNR_{sp} en un factor de multiplicación que es sustancialmente igual a $4,2$, en comparación con un sistema LIDAR de emisión continua.

Los impulsos denominados AA2 en la [figura 3] corresponden a un sistema LIDAR pulsado, cuya emisión está constituida por impulsos rectangulares sucesivos, con anchuras individuales iguales a $0,17 \mu\text{s}$ y potencia instantánea igual a 500 W , con un nuevo impulso cada $12,2 \mu\text{s}$. Esta operación de emisión corresponde a una potencia media continua de 7 W y a una resolución espacial de 40 m , es decir, valores de potencia media continua y de resolución espacial idénticos a los del sistema LIDAR de la invención con impulsos INV. El radio del haz láser en la óptica de salida, para el sistema LIDAR pulsado considerado, es de $4,1 \text{ cm}$. Para obtener el mismo valor de la relación CNR_{sp} que este sistema de la invención, es necesario combinar las mediciones efectuadas por separado para $N=524.800$ impulsos AA2 sucesivos, lo que corresponde de nuevo a un aumento de la relación CNR_{sp} proporcional a la raíz cuadrada del número de mediciones N . Así pues, la duración de un ciclo de medición correspondiente a $\text{CNR}_{\text{sp}} = 8,6$ para un sistema LIDAR pulsado de este tipo es de $6,4 \text{ s}$. Además, el uso de impulsos cortos ensancha el espectro medido, lo que reduce la precisión del valor de velocidad medida. Para mantener una precisión del valor de velocidad equivalente al del sistema LIDAR de la invención, sería necesario combinar las mediciones realizadas por separado para $N=20.500.000$ impulsos AA2 sucesivos, lo que corresponde a una duración de medición de 250 s .

Por tanto, la invención permite reducir la duración efectiva de una medición en comparación con los sistemas anteriores, con valores iguales de la relación CNR_{sp} .

Un sistema LIDAR según la invención, especialmente adecuado para efectuar mediciones de velocidad anemométrica, puede utilizarse en numerosas aplicaciones, entre las que se incluyen, sin limitación:

- aplicaciones a bordo de aeronaves, para las que el volumen ocupado y el peso reducidos del sistema LIDAR constituyen ventajas importantes. En este caso, el sistema 10 de emisión láser, el conjunto 20 de detección heterodino y el dispositivo 40 de control temporal pueden estar fabricados total o parcialmente con fibras ópticas. La [figura 4] muestra un avión 100 que está equipado con un sistema LIDAR de este tipo para realizar mediciones de velocidad anemométrica según la invención. El sistema se instala preferiblemente a bordo del avión de forma que la óptica 14 de salida se sitúa hacia el morro del avión 100, y se orienta en la dirección del semiespacio en la parte delantera del avión. La [figura 4] muestra la disposición de la dirección central de propagación A-A y la zona ZF de enfoque resultante;

- aplicaciones en las que la velocidad anemométrica que debe medirse puede ser baja, como las mediciones a nivel del suelo o a baja altitud, por ejemplo para optimizar el funcionamiento de turbinas eólicas, o incluso mediciones desde aeronaves que pueden estar en vuelo estacionario. En este caso, el modulador 40 acústico-óptico puede generar adicionalmente un desplazamiento de frecuencia que se aplica al haz F láser, sin aplicarse a la parte F_{REF} de haz láser que se toma de la fuente inicial 11 mediante el acoplador 15 óptico, y que se utiliza como señal láser de referencia para la detección heterodina. De este modo, un valor bajo de velocidad anemométrica corresponde a una frecuencia de batido heterodino cercana a un valor fijo distinto de cero, de modo que se mejora la precisión de la medición sin necesidad de implementar un tiempo de muestreo excesivamente largo;

- aplicaciones en las que la distancia de medición entre la óptica 14 de salida y la zona ZF de enfoque debe ser

variable. Para ello, la óptica 14 de salida puede adaptarse para variar la convergencia del haz F láser a medida que sale a través de esta óptica. Por ejemplo, cuando el haz F láser emerge de un extremo de una fibra óptica, la óptica 14 de salida puede ser una lente convergente montada sobre un soporte desplazable en traslación en paralelo al eje A-A, para desplazar el foco objeto de la lente con respecto al extremo de la fibra óptica. De este modo, el punto O central de la zona ZF de enfoque puede situarse a una distancia controlable de la óptica 14 de salida, por ejemplo entre 200 m y 1000 m. En particular, cuando esta distancia es igual a 200 m y el radio del haz F láser en la pupila de salida es igual a 0,08 m, la longitud de Rayleigh puede ser del orden de 6 m, y cuando la distancia de medición entre la óptica 14 de salida y el punto O central de la zona ZF de enfoque es igual a 1000 m, la longitud de Rayleigh puede ser del orden de 150 m, incluso para un radio de 8 cm para el haz F láser en la pupila de salida;

- aplicaciones en las que se requieren mediciones de tres componentes de la velocidad del viento. Para ello, el haz F láser puede dividirse en al menos tres subhaces que tienen diferentes direcciones centrales de propagación. Los impulsos láser emitidos según la invención a partir del haz F se dividen por tanto también secuencial o simultáneamente según al menos tres trayectorias de emisión dirigidas cada una hacia zonas de enfoque separadas. El por cálculo inverso de efecto Doppler de las partes de radiación que se retrodispersan desde las diferentes zonas de enfoque proporciona una medición de componentes de velocidad anemométrica que son paralelas a las direcciones centrales de propagación. Suponiendo entonces que la velocidad del viento, como cantidad vectorial, es la misma en todas las zonas de enfoque, es fácil deducir las evaluaciones de las componentes de la velocidad del viento según tres ejes de marco de referencia ortogonal. Un experto en la técnica sabe cómo realizar un cálculo de este tipo para cambiar los ejes de las coordenadas de la velocidad vectorial. Por ejemplo, con referencia a la [figura 5], el haz F láser del eje A-A se divide en seis subhaces láser que se distribuyen angularmente sobre la superficie de un cono de semiángulo de apertura en el vértice α , por ejemplo igual a 15 ° (grado). Las direcciones centrales de propagación respectivas de los seis subhaces láser se denominan A1-A6, y las zonas de enfoque correspondientes se denominan ZF1-ZF6. Las direcciones A1-A6 son entonces las direcciones de medición de las componentes de la velocidad del viento, y se distribuyen alrededor de la dirección central constituida por el eje A-A.

Se entiende que la invención puede reproducirse modificando aspectos secundarios de realizaciones que se han descrito en detalle anteriormente, conservando al menos algunas de las ventajas mencionadas. En particular, los valores numéricos mencionados son meramente ilustrativos y pueden modificarse en función de la aplicación en cuestión.

REIVINDICACIONES

1. Sistema LIDAR adaptado para realizar mediciones anemométricas, que comprende:

- una fuente (10) de emisión láser, capaz de producir un haz (F) láser hacia una parte de atmósfera exterior al sistema LIDAR, de forma que dicho haz láser es convergente en una pupila de salida de la fuente de emisión láser, y tiene una sección transversal del haz que es mínima a mitad de la longitud de una zona (ZF) de enfoque de dicho haz láser, teniendo dicha zona de enfoque una longitud igual a $2 \cdot \lambda / (\pi \cdot \theta^2)$, medida en paralelo a una dirección (A-A) central de propagación del haz láser, en donde λ es una longitud de onda del haz láser y θ es un semiángulo de divergencia de dicho haz láser más allá de la zona de enfoque en un lado opuesto a la fuente de emisión láser, expresado en radianes, denominándose $\lambda / (\pi \cdot \theta^2)$ longitud (l_R) de Rayleigh;

- un conjunto (20) de detección heterodino, dispuesto para recibir una parte del haz (F) láser que se retrodispersa por partículas contenidas en la zona (ZF) de enfoque; y

- un módulo (30) de cálculo Doppler, adaptado para deducir un valor de velocidad de las partículas a partir de una señal de batido que se produce por el conjunto (20) de detección heterodino,

caracterizado por que el sistema LIDAR comprende además:

- un dispositivo (40) de control temporal del haz láser, que está adaptado para poner dicho haz láser en forma de impulsos láser sucesivos, y que está asociado con la fuente (10) de emisión láser para que los impulsos láser atraviesen la zona (ZF) de enfoque, siendo una parte de cada impulso láser retrodispersada por las partículas, estando el dispositivo de control temporal adaptado además para que cada impulso láser tenga una duración individual mayor o igual a dos veces la longitud (l_R) de Rayleigh dividida entre una velocidad de propagación de impulsos láser en la atmósfera, e inferior a 20 μ s.

2. Sistema LIDAR según la reivindicación 1, en el que el dispositivo (40) de control temporal está adaptado para que cada impulso láser tenga una duración individual que sea igual a tres veces la longitud (l_R) de Rayleigh dividida entre la velocidad de propagación de los impulsos láser en la atmósfera.

3. Sistema LIDAR según la reivindicación 1 o 2, en el que el dispositivo (40) de control temporal del haz láser está adaptado de modo que la duración individual de cada impulso láser esté comprendida entre 0,2 μ s y 5 μ s, preferiblemente entre 0,5 μ s y 1,2 μ s.

4. Sistema LIDAR según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el dispositivo (40) de control temporal del haz láser comprende al menos un componente seleccionado entre un modulador acústico-óptico, un modulador electro-óptico, un amplificador óptico semiconductor, un sistema para encender y apagar la fuente de emisión láser y un sistema de selección de un modo adecuado de una cavidad de amplificación láser.

5. Sistema LIDAR según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, adaptado además para aplicar un desplazamiento de frecuencia entre cada impulso láser y una señal láser de referencia que se utiliza por el conjunto (20) de detección heterodino, de modo que una velocidad cero de las partículas contenidas en la zona (ZF) de enfoque, con respecto al sistema LIDAR, corresponda a una frecuencia distinta de cero para la señal de batido producida por dicho conjunto de detección heterodino.

6. Sistema LIDAR según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la fuente (10) de emisión láser es del tipo de fibra óptica, y está adaptada para que cada impulso láser tenga una potencia media comprendida entre 100 W y $5 \cdot 10^5$ W, preferiblemente entre 200 W y 2000 W.

7. Sistema LIDAR según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el dispositivo (40) de control temporal del haz láser está adaptado para que dos impulsos láser sucesivos estén separados por una duración comprendida entre 3 μ s y 500 μ s, preferiblemente inferior a 100 μ s.

8. Sistema LIDAR según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, dispuesto para emitir simultáneamente impulsos láser en varias direcciones (A1-A6) de medición que se distribuyen alrededor de una dirección central, con un ángulo (α) de cada dirección de medición con respecto a la dirección central inferior a 30 °, para obtener valores respectivos de tres coordenadas de la velocidad de partículas.

9. Sistema LIDAR según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la fuente (10) de emisión láser comprende un dispositivo de enfoque variable, adaptado para variar una distancia de medición que existe entre la pupila de salida de dicha fuente de emisión láser y un punto (O) central de la zona (ZF) de enfoque, por ejemplo entre 200 m y 1000 m.

10. Aeronave (100), equipada con un sistema LIDAR según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, estando

dicho sistema LIDAR integrado a bordo de la aeronave para realizar mediciones anemométricas durante un vuelo de dicha aeronave.

11. Procedimiento de medición anemométrica, que comprende las siguientes etapas:

5

- disponer un sistema LIDAR según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, de modo que la zona (ZF) de enfoque esté contenida en una parte de atmósfera en la que deba medirse una velocidad anemométrica;

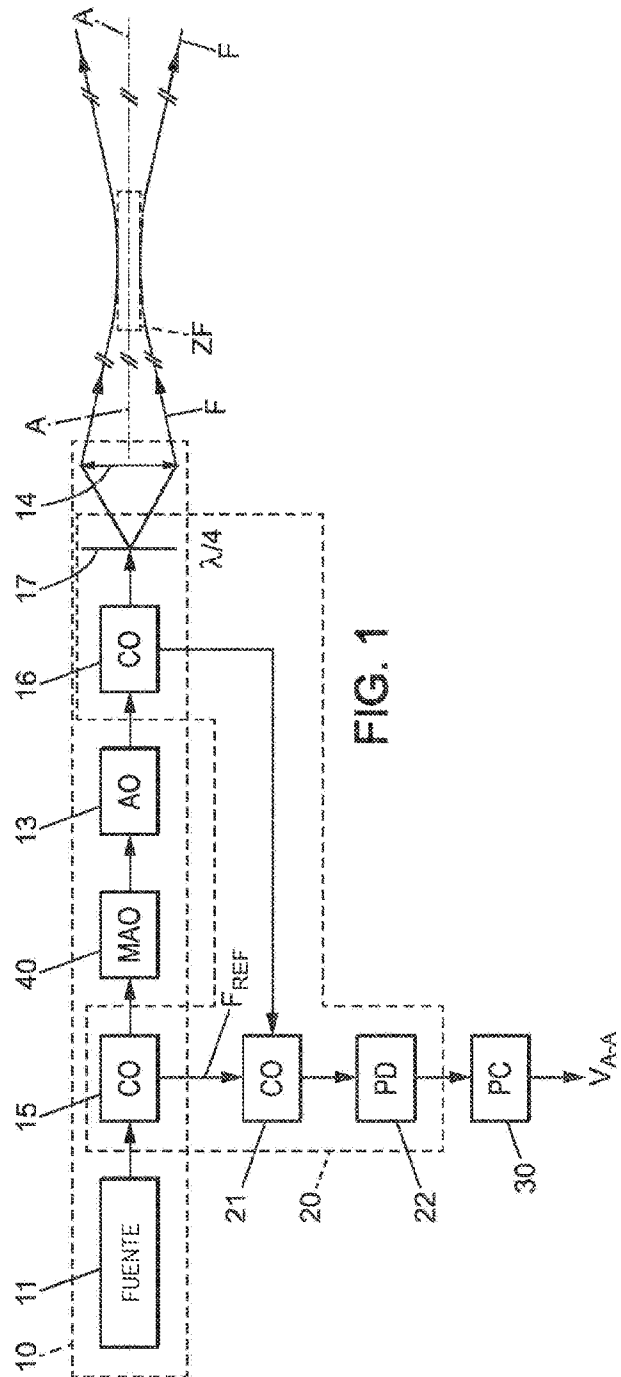
10

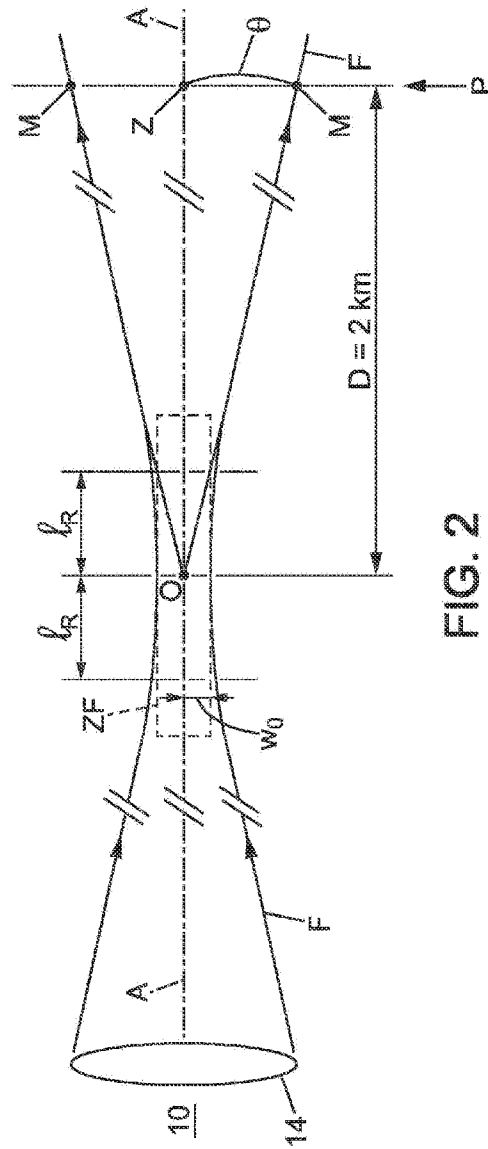
- adoptar una duración de impulso láser individual que sea mayor o igual a dos veces la longitud (l_R) de Rayleigh dividida entre la velocidad de propagación de los impulsos láser en la atmósfera, e inferior a 20 μ s; y

- activar el sistema LIDAR para obtener un valor de velocidad de las partículas contenidas en la zona (ZF) de enfoque.

15

12. Procedimiento de medición anemométrica según la reivindicación 11, según el cual el dispositivo (40) de control temporal del haz láser se ajusta de modo que la duración individual de cada impulso láser esté comprendida entre 0,2 y 5 veces, preferiblemente entre 0,5 y 1,2 veces, una duración de coherencia de la atmósfera que es efectiva en la zona (ZF) de enfoque.





2016

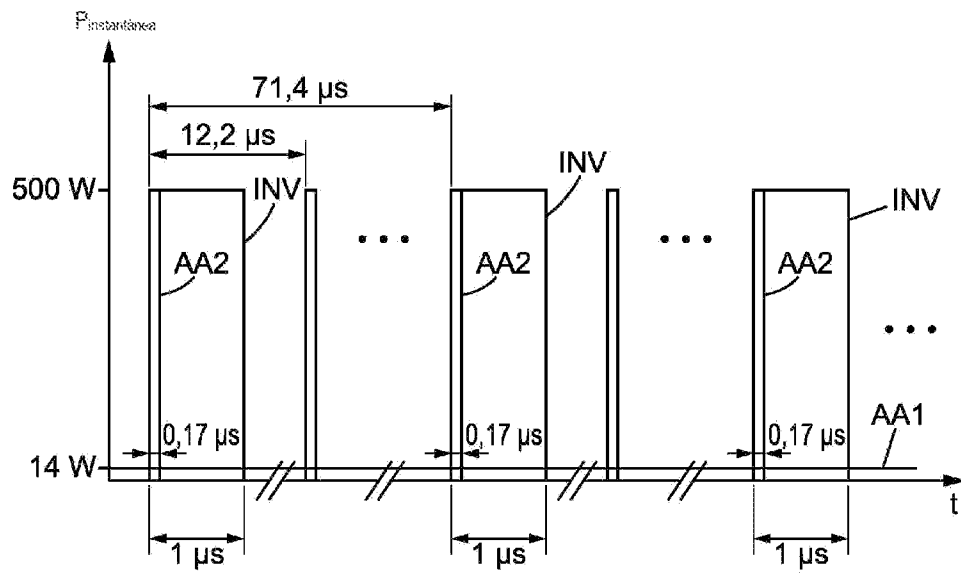


FIG. 3

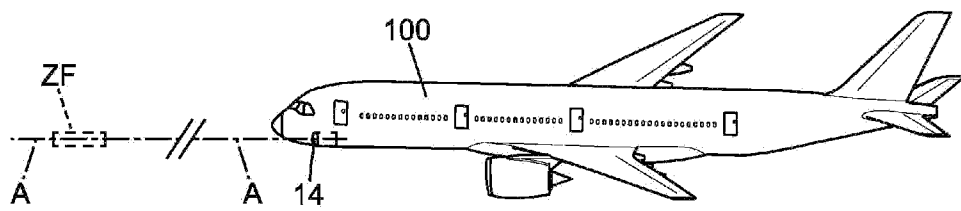


FIG. 4

