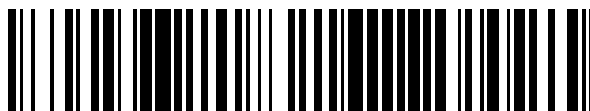


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 866 027**

51 Int. Cl.:

G01N 15/02 (2006.01)

G01W 1/14 (2006.01)

G01N 15/00 (2006.01)

G01N 15/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.05.2016 E 16290084 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.01.2021 EP 3246692**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de medición del diámetro equivalente de una gota de agua**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.10.2021

73 Titular/es:

**ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES
(100.0%)
6 et 8 avenue Blaise Pascal Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77455 Marne La Vallée Cedex 2, FR**

72 Inventor/es:

**GIRES, AUGUSTE;
SCHERTZER, DANIEL y
TCHIGUIRINSKAIA, IOULIA**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 866 027 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

Procedimiento y dispositivo de medición del diámetro equivalente de una gota de agua

5 **Antecedentes de la invención**

La invención se refiere al campo general de la hidrometeorología. Se refiere más precisamente a un dispositivo de medición del tamaño de partícula de las gotas de lluvia (es decir, la distribución del diámetro de las gotas).

10 La medición del diámetro de las gotas de lluvia se efectúa con mayor frecuencia por disdrómetros ópticos con el objetivo de evaluar las tasas de precipitación, que luego se utilizan, por ejemplo, para la calibración de radares hidrometeorológicos o para la modelización hidrológica.

15 De forma conocida, existen, por ejemplo, disdrómetros ópticos compuestos por una fuente láser y dos receptores ópticos que permiten medir el diámetro equivalente de una gota de agua, siendo el diámetro equivalente de una gota de agua definido como el diámetro que tendría una gota esférica del mismo volumen. Asimismo, el diámetro equivalente de un elipsoide se define como el diámetro que tendría una esfera del mismo volumen.

20 Esta medición se basa en el análisis de la intensidad de luminosa de las señales refractadas recibidas por los receptores ópticos cuando una gota de agua pasa a través del haz o de los haces láser generado(s) por la fuente láser.

Tal disdrómetro de este tipo lo comercializa, por ejemplo, la empresa Campbell Scientific con la referencia comercial PWS100.

25 El documento US 2013/205890 A1 divulga un procedimiento de medición del diámetro de una gota de agua, comprendiendo dicho procedimiento:

- 30 - una etapa de obtención de una primera señal de intensidad luminosa según un ángulo determinado en un plano horizontal definido por el eje de una fuente láser y una etapa de obtención de una segunda señal de intensidad luminosa según un ángulo determinado en un plano vertical definido por dicho eje de dicha fuente láser, estando dichas intensidades luminosas moduladas por el paso de dicha gota de agua a través de al menos dos haces láser emitidos por dicha fuente láser de manera que dichos al menos dos haces sean horizontales, paralelos y espaciados verticalmente a una distancia predeterminada, siendo adquiridas dichas señales de intensidad por receptores ópticos;
- 35 - una etapa de medición de un primer desfase temporal entre las dos mayores intensidades máximas de una de dichas señales de intensidad. Los documentos US 4 781 460 y US 2008/221711 A1 se refieren a un aparato y un procedimiento para medir la distribución de tamaño de partículas dispersas en una muestra de fluido. ANTON KRUGER Y COL.: "Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description", JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY, vol. 19, n. ° 5, 1 de mayo de 2002 (01-05-2002), páginas 602-617, divulga un disdrómetro bidimensional para la medición in situ de la distribución del tamaño de las gotas de las precipitaciones. El documento EP 1 083 423 A2 se refiere a un disdrómetro pluviométrico.

45 Sin embargo, los inventores han demostrado que los disdrómetros ópticos basados en este principio tienen un sesgo creciente con el tamaño de las gotas de agua y son sensibles a partir del orden de un milímetro, falseando de este modo las mediciones posteriores de las tasas de precipitación.

50 Por lo tanto, existe una necesidad de una solución simple y eficaz que permita corregir este sesgo y de este modo mejorar la precisión de las mediciones del diámetro equivalente de las gotas de agua realizadas por estos disdrómetros.

Objetivo y resumen de la invención

55 La presente invención responde en particular a esta necesidad proponiendo un procedimiento de medición del diámetro equivalente de una gota de agua. Este procedimiento comprende:

- 60 - una etapa de obtención de una primera señal de intensidad luminosa según un ángulo determinado en un plano horizontal definido por el eje de una fuente láser y una etapa de obtención de una segunda señal de intensidad luminosa según el mismo ángulo determinado en un plano vertical definido por dicho eje de dicha fuente láser, estando las intensidades luminosas moduladas por el paso de la gota de agua a través de al menos dos haces láser emitidos por dicha fuente láser de manera que los haces láser sean horizontales, paralelos y espaciados verticalmente a una distancia predeterminada, siendo las señales de intensidad adquiridas por receptores ópticos colocados de modo que los ángulos formados por el eje de dichos receptores ópticos y el eje de dicha fuente láser sean iguales a dicho ángulo determinado;
- 65 - una etapa de medición de un primer desfase temporal entre las dos mayores intensidades máximas de una de

las señales de intensidad;

- una etapa de medición de un segundo desfase temporal entre la primera y la segunda señal de intensidad;
- 5 - una etapa de cálculo del diámetro equivalente de la gota de agua a partir de un modelo elipsoidal de la gota de agua en forma de elipsoide cuyo eje mayor es paralelo al plano de emisión horizontal de dichos al menos dos haces láser, una ley que relaciona la relación de los dos ejes del modelo elipsoidal con el diámetro equivalente de dicho modelo elipsoidal, no asociando dicha ley una constante con dicha relación independientemente de dicho diámetro equivalente de dicho modelo elipsoidal, de dicho primer y de dicho segundo desfase temporal.
- 10 Correlativamente, la invención también tiene como objeto un dispositivo de medición del diámetro equivalente de una gota de agua. Este dispositivo comprende:
 - un módulo de obtención de una primera señal de intensidad luminosa según un ángulo determinado en un plano horizontal definido por el eje de una fuente láser y un módulo de obtención de una segunda señal de intensidad luminosa según el mismo ángulo determinado en un plano vertical definido por dicho eje de dicha fuente láser, estando las intensidades luminosas moduladas por el paso de dicha gota de agua a través de al menos dos haces láser emitidos por la fuente láser de manera que los haces láser sean horizontales, paralelos y espaciados verticalmente a una distancia predeterminada, siendo las señales de intensidad adquiridas por receptores ópticos colocados de modo que los ángulos formados por el eje de dichos receptores ópticos y el eje de dicha fuente láser sean iguales a dicho ángulo determinado;
 - 15 - un módulo de medición de un primer desfase temporal entre las dos mayores intensidades máximas de una de las señales de intensidad;
 - 20 - un módulo de medición de un segundo desfase temporal entre dicha primera y la segunda señal de intensidad;
 - un módulo de cálculo del diámetro equivalente de la gota de agua a partir de un modelo elipsoidal de la gota de agua en forma de elipsoide cuyo eje mayor es paralelo al plano de emisión horizontal de dichos al menos dos haces láser, una ley que relaciona la relación de los dos ejes del modelo elipsoidal con el diámetro equivalente del modelo elipsoidal, no asociando dicha ley una constante con dicha relación independientemente de dicho diámetro equivalente de dicho modelo elipsoidal de dicho primer y de dicho segundo desfase temporal.
 - 30

En el estado de la técnica, las partículas de agua líquida se consideran como esféricas. Ahora bien, estas gotas de agua tienen más forma de alubia abultada debido a las fuerzas de fricción ejercidas por el aire que empuja la gota hacia arriba y deforman su base.

De este modo, la invención propone tener mejor en cuenta la geometría de las gotas de agua representándolas en forma de elipsoide en lugar de en forma de esfera.

Los inventores han utilizado ventajosamente una relación empírica que relaciona el cociente de los dos ejes principales del elipsoide con el diámetro equivalente para reducir el número de variables de la modelización elipsoidal.

En una primera variante de realización de la invención, la etapa de cálculo comprende la evaluación en un punto de una función que relaciona el diámetro equivalente a un desfase vertical, este desfase vertical se define como la distancia entre el eje horizontal mayor del modelo elipsoidal de la gota de agua y el plano horizontal de emisión de los haces láser para los que los haces láser se refractan según el ángulo determinado en el plano vertical.

En un modo de realización particular de la primera variante de la invención, la función es un polinomio obtenido por aproximación polinomial de la curva teórica que relaciona el diámetro equivalente con el desfase vertical.

En un modo de realización particular de la primera variante de la invención, el punto es igual a $d * \frac{\Delta_2}{\Delta_1}$ y donde:

- 55 d es la distancia predeterminada entre los haces láser;
- Δ_1 es el primer desfase temporal; y
- Δ_2 es el segundo desfase temporal.

En una segunda variante de realización de la invención, la etapa de cálculo comprende:

- 60 - una etapa de cálculo del diámetro de la gota de agua a partir de un modelo esférico de esta gota de agua, del primer y del segundo desfase temporal;
- una etapa de cálculo del diámetro equivalente de dicha gota mediante corrección polinomial de dicho diámetro esférico.

Esta solución es particularmente simple y eficaz. Permite mejorar la precisión de los procedimientos de cálculo de un

diámetro equivalente de una gota de agua mediante una modelización esférica de la gota añadiendo una simple etapa de corrección de este diámetro equivalente por aplicación de una relación polinomial.

5 En un modo de realización particular, las diferentes etapas del procedimiento de medición del diámetro equivalente de una gota de agua se determinan por instrucciones de programas informáticos.

10 En consecuencia, la invención también se refiere a un programa informático en un soporte de informaciones, siendo este programa susceptible de ser implementado en un disdrómetro o más generalmente en un ordenador, constandingo este programa de instrucciones adaptadas a la implementación de las etapas de un procedimiento de medición del diámetro equivalente de una gota de agua tal como se ha descrito anteriormente.

15 Este programa puede utilizar cualquier lenguaje de programación y estar bajo la forma de códigos fuente, códigos objeto o de códigos intermedio entre código fuente y código objeto, tal como en una forma parcialmente compilada o en cualquier otra forma deseable.

La invención también tiene como propósito un soporte de informaciones legible por un ordenador y que consta de unas instrucciones de un programa informático, tal como se han mencionado más arriba.

20 El soporte de informaciones puede ser cualquier entidad o dispositivo capaz de almacenar el programa. Por ejemplo, el soporte puede incluir un medio de almacenamiento, tal como una ROM, por ejemplo, un CD ROM o una ROM de circuito microelectrónico o también un medio de grabación magnética, por ejemplo, un disquete (floppy disc) o un disco duro.

25 Por otra parte, el soporte de informaciones puede ser un soporte transmisible, tal como una señal eléctrica u óptica, que puede enrutarse mediante un cable eléctrico u óptico, por radio o por otros medios. El programa según la invención se puede descargar, en particular, en una red de tipo Internet.

30 Como alternativa, el soporte de informaciones puede ser un circuito integrado en donde está incorporado el programa, estando el circuito adaptado para ejecutar o para ser utilizado en la ejecución del procedimiento en cuestión.

Breve descripción de los dibujos

35 Las características y ventajas particulares de la presente invención se desprenderán de la descripción detallada que se da en las figuras en donde:

- la figura 1 representa una vista esquemática en sección vertical de un disdrómetro de acuerdo con un primer modo de realización de la invención;
- la figura 2 representa una vista superior de la posición relativa de una fuente láser y de los receptores ópticos pertenecientes a un disdrómetro según un primer modo de realización de la invención.
- la figura 3 ilustra un ejemplo de la arquitectura de hardware de un dispositivo de medición del diámetro equivalente de una gota de agua según un primer modo de realización de la invención;
- la figura 4 representa, en forma de organigrama, las etapas principales de un procedimiento de medición del diámetro equivalente de una gota de agua de acuerdo con la invención en un primer modo de realización;
- la figura 5 ilustra la refracción de un haz láser al paso de una gota de agua modelizada en forma de elipsoide con un eje menor B y un eje mayor A;
- la figura 6 ilustra la relación $\alpha = f(D_{eq}, h)$ existente entre el ángulo α y el desfase h para un diámetro equivalente D_{eq} 3,5 mm en el caso de un modelo elipsoidal de gota de agua;
- la figura 7 ilustra, en el caso de un modelo elipsoidal, la curva teórica (trazo continuo) que relaciona el diámetro equivalente D_{eq} con el desfase h_{θ} así como una aproximación lineal (trazo discontinuo) de esta curva teórica;
- la figura 8 representa, en forma esquemática, las relaciones temporales que existen entre las señales SIG₁ y SIG₂ recibidas por los receptores ópticos de un disdrómetro, así como la correlación cruzada entre estas dos señales según un primer modo de realización de la invención;
- la figura 9 representa una vista esquemática en sección vertical de un disdrómetro de acuerdo con un segundo modo de realización de la invención;
- la figura 10 ilustra un ejemplo de la arquitectura de hardware de un dispositivo de medición del diámetro equivalente de una gota de agua según un segundo modo de realización de la invención;
- la figura 11 representa, en forma de organigrama, las etapas principales de un procedimiento de medición del diámetro equivalente de una gota de agua de acuerdo con la invención en un segundo modo de realización;
- la figura 12 representa, en forma esquemática, las relaciones temporales que existen entre las señales SIG₁' y SIG₂' recibidas por los receptores ópticos de un disdrómetro, así como la correlación cruzada entre estas dos señales según un segundo modo de realización de la invención;
- la figura 13 ilustra la refracción de un rayo láser al paso de una gota de agua modelizada en forma de esfera de diámetro D;
- la figura 14 ilustra la relación que relaciona D_{eq} a D_{sph} .

Descripción detallada de la invención

La **figura 1** representa una vista esquemática en sección vertical de un disdrómetro 1 de acuerdo con la invención en un primer modo de realización.

- 5 El disdrómetro 1 comprende:
- una fuente láser 2 apta para emitir dos haces láser f_1 y f_2 horizontales, paralelos y espaciados verticalmente en una distancia predeterminada d ;
 - 10 - un receptor óptico 3 colocado en el plano horizontal definido por el eje D_L de la fuente láser 2, el receptor óptico 3 está colocado además en el lado de emisión de la fuente láser 2 de modo que el eje DO_1 del receptor óptico 3 está en un ángulo θ determinado con el eje D_L de la fuente láser 2;
 - un receptor óptico 4 colocado en el lado de emisión de la fuente láser 2 en el plano vertical, es decir, ortogonal al plano horizontal y que contiene el eje D_L , de modo que el ángulo formado por el eje DO_2 del receptor óptico 4 y el eje D_L sea igual al ángulo determinado θ ;
 - 15 - un dispositivo 5 de medición del diámetro equivalente D_{eq} de una gota de agua de acuerdo con la invención.

La figura 2 representa una vista superior de la posición relativa de la fuente 2 y de los receptores ópticos 3 y 4.

- 20 El ángulo determinado θ se elige para que sea distinto de cero e inferior o igual a 45° de modo que los fenómenos de reflexión y de difracción sean despreciables en comparación con el fenómeno de refracción. En el ejemplo descrito aquí, el ángulo determinado θ tiene por valor 20° .

- 25 La distancia predeterminada se elige para que sea distinta de cero e inferior a 5 mm. De forma preferente, esta distancia d se toma en el intervalo que va de 0,4 mm a 1,2 mm. En el ejemplo descrito aquí, la distancia predeterminada tiene por valor 0,8 mm.

También debe tenerse en cuenta:

- 30 • que la intersección de los ejes ópticos DO_1 , DO_2 y D_L se encuentran en la zona de medición S,
- que la disposición relativa del receptor óptico 3 y de la fuente láser 2 permite que el receptor óptico 3 reciba la luz refractada en el plano horizontal y en la dirección determinada por el ángulo θ cuando una gota de agua atraviesa la superficie de medición S, y
- 35 • que la posición relativa del receptor óptico 4 y de la fuente láser 2 permite que el receptor óptico 4 reciba la luz refractada en el plano vertical y en la dirección determinada por el ángulo θ cuando una gota de agua atraviesa la superficie de medición S.

En el ejemplo descrito aquí, los receptores ópticos 3 y 4 son fotodiodos.

- 40 De conformidad con la invención, las señales de intensidad luminosa adquiridas por los receptores 3 y 4 son procesadas por el dispositivo 5 incluido en el disdrómetro 1.

- 45 En el modo de realización descrito en este documento, el dispositivo 5 de medición del diámetro equivalente de una gota de agua tiene la arquitectura de hardware de un ordenador, tal como se ilustra esquemáticamente en la figura 3.

De este modo, el dispositivo 5 consta, en particular, de un procesador 5A, una memoria de solo lectura 5B, una memoria de acceso aleatorio 5C, una memoria no volátil 5D. El procesador 5A, las memorias 5B-5D se pueden compartir eventualmente con medios correspondientes del disdrómetro 1.

- 50 La memoria de solo lectura 5B del dispositivo 5 constituye un medio de grabación legible por el procesador 5A y en donde se graba un programa informático de acuerdo con la invención, que consta de instrucciones para la ejecución de las etapas de un procedimiento de medición del diámetro equivalente de una gota de agua de acuerdo con la invención, siendo las etapas de este procedimiento de medición descritas más adelante.

- 55 Este programa informático define de manera equivalente módulos funcionales del dispositivo 5, tales como, en particular, un módulo 5B1 de obtención de una primera señal de intensidad luminosa según el ángulo determinado θ en el plano horizontal, un módulo 5B2 de obtención de una segunda señal de intensidad luminosa según el ángulo determinado θ en el plano vertical, un módulo 5B3 de medición de un primer desfase temporal entre las dos mayores intensidades máximas de una de las dos señales de intensidad, un módulo 5B4 de medición de un segundo desfase temporal entre la primera y la segunda señal de intensidad y un módulo 5B5 de cálculo del diámetro equivalente de la gota de agua. Sus funciones se describen con más detalle con referencia a las etapas del procedimiento de medición del diámetro equivalente ilustradas en la **figura 4** en un modo de realización particular de la invención.

- 65 A continuación, describiremos un primer modo de realización de la invención.

La **figura 5** representa una modelización elipsoidal de una gota de agua representada en forma de elipsoide con un eje menor B y cuyo eje mayor A es paralelo al plano horizontal de emisión de los haces láser por la fuente 2.

El diámetro equivalente de una gota de agua elipsoidal satisface por definición las ecuaciones $A = \frac{1}{2} D_{eq} a^{-\frac{1}{3}}$ y $B = \frac{1}{2} D_{eq} a^{\frac{2}{3}}$ con $a = \frac{B}{A}$.

El parámetro también puede estar relacionado con el diámetro equivalente D_{eq} por relaciones empíricas.

En el ejemplo descrito aquí, el parámetro a y el diámetro equivalente D_{eq} satisface la siguiente relación empírica:

$$a = \begin{cases} 1 & D_{eq} < 1 \text{ mm} \\ 1,075 - 0,075 D_{eq} & 1 \text{ mm} \leq D_{eq} \leq 5 \text{ mm} \\ 0,7 & 5 \text{ mm} < D_{eq} \end{cases}$$

Esta relación se describe en el documento Battaglia et col., "PARSIVEL Snow Observations: A Critical Assessment", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(2), 333-344.

Como variante, el parámetro a y el diámetro equivalente D_{eq} puede satisfacer la relación empírica $a = 1,012 - 0,01445 D_{eq} - 0,01028 D_{eq}^2$ (descrita en Andsager et col., "Laboratory Measurements of Axis Ratios for Large Raindrops", Journal of the Atmospheric Sciences, 1999. 56 (15): pág. 2673-2683) o cualquier otra relación empírica pertinente.

El uso de una relación empírica entre a y D_{eq} permite definir completamente los parámetros A y B del modelo elipsoidal para un diámetro equivalente D_{eq} dado.

Cuando el eje principal A de la gota de agua está desfasado verticalmente por una distancia h desde el plano horizontal de emisión de un rayo láser, el rayo refractado forma un ángulo α con este plano horizontal.

La relación teórica entre el ángulo α y el desfase h se puede obtener utilizando las relaciones de refracción de Snell-Descartes de óptica geométrica (durante la entrada del rayo láser en la gota y su salida) para todos los modelos elipsoidales posibles (es decir, para todos los posibles valores de D_{eq}). Estas relaciones, conocidas por el experto en la materia, permiten describir el cambio en la dirección de un rayo luminoso en la interfaz entre dos medios de diferente índice de refracción. En este documento, los resultados numéricos se obtuvieron con un índice de refracción de 1 para el aire atmosférico y 1,33 para gota de agua.

La **figura 6** de este modo presenta la curva $\alpha = f(D_{eq}, h)$ que relaciona α con h para un valor dado del diámetro equivalente $D_{eq} = 3,5$ mm.

Sobre la base de esta curva, el valor h_{θ} de h correspondiente al ángulo predeterminado θ se calcula para el valor particular de $D_{eq} = 3,5$ mm.

Reiterando las etapas anteriores para diferente valor de D_{eq} se obtiene una curva teórica que relaciona D_{eq} con h_{θ} .

Esta curva teórica representada en la **figura 7** puede aproximarse mediante una interpolación polinómica, por ejemplo, mediante el método de mínimos cuadrados conocido por los expertos en la materia. A modo de ejemplo, utilizando un paso de 0,2 mm para la variable h_{θ} y para un diámetro equivalente comprendido entre 0,1 mm y 5 mm, se obtuvieron los siguientes polinomios:

$$D_{eq} = 3,912 h_{\theta} - 0,144$$

$$D_{eq} = 0,375 h_{\theta}^2 + 3,416 h_{\theta} - 0,032$$

Esta interpolación polinomial permite de este modo calcular el diámetro equivalente de la gota de agua D_{eq} a partir de la medición experimental del desfase h_{θ} .

Ahora se describirá, con referencia a la figura 4, las etapas principales de un procedimiento para medir el diámetro equivalente de una gota de agua según la invención en el primer modo de realización implementado por el dispositivo 5.

Durante una etapa E100, el dispositivo de medición 5 obtiene, utilizando el receptor óptico 3 del disdrómetro 1, una señal SIG₁ que representa la intensidad luminosa recibida a lo largo del tiempo por el receptor óptico 3.

Asimismo, durante una etapa E200, el dispositivo de medición 5 obtiene, utilizando el receptor óptico 4 del

disdrómetro 1, una señal SIG₂ que representa la intensidad luminosa recibida a lo largo del tiempo por el receptor óptico 4.

5 A modo de ejemplo, la **figura 8a)** presenta un ejemplo esquemático (en forma de triángulos) de señales SIG₁ y SIG₂ obtenido por el dispositivo de medición 5 y adquirido por los receptores ópticos 3 y 4.

Cuando una gota de agua atraviesa la superficie de medición S, una parte de los dos haces láser es refractada por la gota de agua. Los receptores ópticos 3 y 4 miden y transforman en señales de intensidad luminosa SIG₁ y SIG₂ la proporción de haces láser refractados en los planos horizontal y vertical según el ángulo predeterminado θ .

10 La relación teórica entre el ángulo α y el desfase h obtenida mediante el uso de las relaciones de refracción de Snell-Descartes de la óptica geométrica (durante la entrada del rayo láser en la gota y su salida) muestra que se obtiene un pico en la señal recibida para $h=0$ con respecto a un rayo luminoso en el plano horizontal y para un valor distinto de cero h_θ en el plano vertical, el dado por la relación $\alpha = \theta$.

15 Por consiguiente, el receptor óptico 4 situado en el plano vertical recibe los haces refractados por la gota de agua ante el receptor óptico 3 situado en el plano horizontal. Por esta razón, las señales SIG₁ y SIG₂ están desfasadas en el tiempo y este desfase temporal se denota Δ_2 .

20 Cuando la gota de agua pasa sucesivamente a través de los haces láser horizontales f_1 y f_2 emitidos por la fuente 2 y espaciados verticalmente por la distancia predeterminada d , los receptores ópticos 3 y 4 reciben sucesivamente los haces refractados correspondientes a cada uno de estos haces láser.

25 De este modo, las señales SIG₁ y SIG₂ tienen dos picos consecutivos, cada uno de los cuales corresponde a la refracción de uno de los haces láser emitidos por la fuente 2.

La separación temporal Δ_1 entre estos picos, idéntica para ambas señales SIG₁ y SIG₂, se mide durante una etapa E300 por el dispositivo 5. Esta diferencia temporal Δ_1 permite calcular la velocidad de caída v de la gota de agua que se expresa en la forma $v = \frac{d}{\Delta_1}$.

30 Luego, durante una etapa E400, el dispositivo 5 mide el desfase temporal Δ_2 entre la señal SIG₁ y la señal SIG₂.

35 Como se ha ilustrado en la **figura 8b)**, los desfases temporales Δ_1 y Δ_2 se pueden medir a partir de la evaluación de la correlación cruzada entre las dos señales SIG₁ y SIG₂ por métodos conocidos por los expertos en la materia. Este método consiste en desfasar en un cierto intervalo de tiempo una señal en comparación con la otra, luego en calcular la correlación entre estas señales desfasadas. Esta operación se repite para diferentes pasos de tiempo. El pico principal en la correlación cruzada se obtiene para un desfase Δ_2 entre las señales que asegura una superposición de los dos picos SIG₁ y SIG₂. Los dos picos secundarios en la correlación cruzada se obtienen para los desfases que garantizan la superposición de un solo pico de SIG₁ y SIG₂.

40 Cabe señalar que este desfase temporal Δ_2 está relacionado con la distancia h_θ por la relación $\Delta_2 = \frac{h_\theta}{v}$.

Durante la etapa E500, el dispositivo 5 calcula el diámetro equivalente D_{eq} de la esfera.

45 Este cálculo se realiza calculando primero el valor de la distancia h_θ usando la relación $h_\theta = \frac{d\Delta_2}{\Delta_1}$ entonces el diámetro equivalente D_{eq} utilizando la interpolación polinomial de la curva teórica que relaciona D_{eq} con h_θ .

En el ejemplo que se presenta aquí, esta relación polinomial es la siguiente:

50
$$D_{eq} = 3,912h_\theta - 0,144$$

Como variante, el cálculo del diámetro equivalente se realiza en una sola etapa, sin pasar por el cálculo intermedio de h_θ . En el ejemplo que se presenta aquí, la relación que da el diámetro equivalente es entonces la siguiente:

55
$$D_{eq} = 3,912 \frac{d\Delta_2}{\Delta_1} - 0,144$$

Ahora describiremos un segundo modo de realización de la invención implementada por un disdrómetro 1' ilustrado en la **figura 9** en sección vertical. En interés de simplificación, en esta figura se dan idénticas referencias a los elementos comunes con el primer modo de realización ilustrado en la figura 1.

60 El disdrómetro 1' comprende:

- una fuente láser 2' apta para emitir tres haces láser f_1 , f_2 y f_3 horizontales, paralelos y espaciados verticalmente en una distancia predeterminada d ;
- un receptor óptico 3 colocado en el plano horizontal definido por el eje D_L de la fuente láser 2', el receptor óptico 3 está colocado además en el lado de emisión de la fuente láser 2' de modo que el eje DO_1 del receptor óptico 3 está en un ángulo θ determinado con el eje D_L de la fuente láser 2';
- un receptor óptico 4 colocado en el lado de emisión de la fuente láser 2' en el plano vertical, es decir, ortogonal al plano horizontal y que contiene el eje D_L , de modo que el ángulo formado por el eje DO_2 del receptor óptico 4 y el eje D_L sea igual al ángulo determinado θ ;
- un dispositivo 5' de medición del diámetro equivalente D_{eq} de una gota de agua de acuerdo con la invención.

Por las mismas razones que las explicadas en el primer modo de realización:

- el ángulo determinado θ se elige distinto de cero e inferior o igual a 45° . En el ejemplo descrito aquí, el ángulo determinado θ tiene por valor 20° y
- la distancia predeterminada se elige para que sea distinta de cero e inferior a 5 mm. De forma preferente, esta distancia d se toma en el intervalo que va de 0,4 mm a 1,2 mm. En el ejemplo descrito aquí, la distancia predeterminada tiene por valor 0,8 mm.

En el modo de realización descrito en este documento, el dispositivo 5' de medición del diámetro equivalente de una gota de agua tiene la arquitectura de hardware de un ordenador, tal como se ilustra esquemáticamente en la **figura 10**. El dispositivo 5' se diferencia del dispositivo 5 descrito en la figura 3 solo por su módulo 5'B5 para calcular el diámetro equivalente de la gota de agua, cuya función se describe con más detalle con referencia a las etapas del procedimiento de medición del diámetro equivalente mostrado en **figura 11** en este segundo modo particular de realización de la invención.

Ahora se describirá, con referencia a la figura 11, las etapas principales de un procedimiento para medir el diámetro equivalente de una gota de agua según la invención en el segundo modo de realización implementado por el dispositivo 5'.

Durante una etapa F100, el dispositivo de medición 5 obtiene, utilizando el receptor óptico 3 del disdrómetro 1', una señal SIG_1' que representa la intensidad luminosa recibida a lo largo del tiempo por el receptor óptico 3.

Asimismo, durante una etapa F200, el dispositivo de medición 5' obtiene, utilizando el receptor óptico 4 del disdrómetro 1', una señal SIG_2' que representa la intensidad luminosa recibida a lo largo del tiempo por el receptor óptico 4.

A modo de ejemplo, la **figura 12 a)** presenta un ejemplo teórico ilustrativo de señales SIG_1' y SIG_2' obtenidas por el dispositivo de medición 5' y adquiridas por los receptores ópticos 3 y 4

Cuando una gota de agua atraviesa la superficie de medición S, una parte de los tres haces láser es refractada por la gota de agua. Los receptores ópticos 3 y 4 miden y transforman en señales de intensidad luminosa SIG_1' y SIG_2' la proporción de haces láser refractados en los planos horizontal y vertical según el ángulo predeterminado θ .

La **figura 13** representa una modelización de una gota de agua en forma de esfera de diámetro D_{sph} .

Cuando el diámetro de la gota de agua está desfasado verticalmente por una distancia h desde el plano horizontal de emisión de un rayo láser, el rayo refractado forma un ángulo α con este plano horizontal.

La relación teórica entre el ángulo α y el desfase h se puede obtener utilizando las relaciones de refracción de Snell-Descartes de óptica geométrica (durante la entrada del rayo láser en la gota y su salida).

Esta relación teórica se expresa en forma analítica $h = \frac{D_{sph} n \sin(\alpha/2)}{2\sqrt{(1+n^2-2n \cos(\alpha/2))}}$ donde n es el índice de refracción del agua en la gota (normalmente $n=1,33$).

Esta relación teórica entre el ángulo α y el desfase h muestra que el pico de las señales recibidas se obtiene para $h=0$ en el plano horizontal y para un valor distinto de cero h_θ en el plano vertical, el dado por la relación $\alpha = \theta$.

Por consiguiente, el receptor óptico 4 situado en el plano vertical recibe los haces refractados por la gota de agua ante el receptor óptico 3 situado en el plano horizontal. Por esta razón, las señales SIG_1' y SIG_2' están desfasadas en el tiempo y este desfase temporal se denota Δ_2 .

Cuando la gota de agua pasa sucesivamente a través de los haces láser horizontales f_1 , f_2 y f_3 emitidos por la fuente 2' y espaciados verticalmente por la distancia predeterminada d , los receptores ópticos 3 y 4 reciben sucesivamente los haces refractados correspondientes a cada uno de estos haces láser.

De este modo, las señales SIG₁' y SIG₂' tienen tres picos consecutivos, cada uno de los cuales corresponde a la refracción de uno de los haces láser emitidos por la fuente 2'.

- 5 La separación temporal Δ₁ entre estos picos, idéntica para ambas señales SIG₁' y SIG₂', se mide durante una etapa F300 por el dispositivo 5'. Esta diferencia temporal Δ₁ permite calcular la velocidad de caída v de la gota de agua que se expresa en la forma $v = \frac{d}{\Delta_1}$.

Luego, durante una etapa F400, el dispositivo 5' mide el desfase temporal Δ₂ entre la señal SIG₁' y la señal SIG₂'.

- 10 Como se ha ilustrado en la **figura 12 b)**, los desfases temporales Δ₁ y Δ₂ se pueden medir a partir de la evaluación de la correlación cruzada entre las dos señales SIG₁' y SIG₂' por métodos conocidos por los expertos en la materia. Este método consiste en desfasar en un cierto intervalo de tiempo una señal en comparación con la otra, luego en calcular la correlación entre estas señales desfasadas. Esta operación se repite para diferentes pasos de tiempo. El
15 pico principal en la correlación cruzada se obtiene para un desfase Δ₂ entre las señales que asegura una superposición de los tres picos SIG₁' y SIG₂'. Los dos primeros picos secundarios en la correlación cruzada se obtienen para los desfases que garantizan la superposición de dos picos de SIG₁' y SIG₂'. Los picos más pequeños en la correlación cruzada se obtienen para los desfases de tiempo asegurando una superposición de uno de los
20 picos en SIG₁' y SIG₂'.

Cabe señalar que este desfase temporal Δ₂ está relacionado con la distancia h_θ por la relación $\Delta_2 = \frac{h_\theta}{v}$.

Durante la etapa F500, el dispositivo 5' calcula el diámetro esférico D_{sph} de la gota de agua usando la relación:

25
$$D_{sph} = 2h_\theta \frac{\sqrt{(1 + n^2 - 2n \cos(\theta/2))}}{n \sin(\theta/2)} = 2d \frac{\Delta_2 \sqrt{(1 + n^2 - 2n \cos(\theta/2))}}{\Delta_1 n \sin(\theta/2)}$$

Durante la etapa F600, el dispositivo de 5' calcula el diámetro equivalente D_{eq} de la gota de agua representada por un modelo elipsoidal utilizando la interpolación polinomial de la curva teórica que relaciona D_{eq} con D_{sph}. El cálculo de esta interpolación polinomial se presenta a continuación en relación con la **figura 13**.

- 30 En el ejemplo que se presenta aquí, esta relación polinomial es la siguiente:

$$D_{eq} = 1,192D_{sph} - 0,226$$

- 35 A continuación, describiremos el procedimiento que permite obtener la interpolación polinomial de la curva teórica que relaciona D_{eq} con D_{sph} utilizada en la etapa F600.

Por cada valor de D_{eq} correspondiente a una modelización particular de la gota de agua en forma de modelo elipsoidal, existe una curva α = f(D_{eq}, h) (para la memoria, la figura 6 representa tal curva de para D_{eq} = 3,5 mm).

- 40 Para todos los valores posibles de D_{eq}, se efectúan las siguientes dos etapas:

- el valor de h_θ correspondiente al ángulo predeterminado θ se calcula utilizando la curva α = f(D_{eq}, h) y la relación α = θ; y
- el valor de D_{sph} correspondiente al valor de h_θ determinado en la etapa anterior se calcula utilizando la relación

$$D_{sph} = 2h_\theta \frac{\sqrt{(1+n^2-2n \cos(\theta/2))}}{n \sin(\theta/2)}.$$

- 50 De este modo obtenemos una curva teórica que relaciona D_{eq} con D_{sph}. En otros términos, se obtiene una curva teórica que relaciona el diámetro equivalente del modelo elipsoidal con el diámetro del modelo esférico. Esta curva teórica que puede aproximarse mediante una interpolación polinomial, por ejemplo, mediante el método de mínimos cuadrados conocido por los expertos en la materia.

- 55 La figura 14 presenta la curva teórica (en trazo continuo) relacionando D_{eq} con D_{sph} así como su interpolación lineal (en trazo discontinuo).

A modo de ejemplo, utilizando un paso de 0,2 mm para la variable h y para un diámetro equivalente comprendido entre 1 mm y 6 mm, se obtuvieron los siguientes polinomios:

ES 2 866 027 T3

$$D_{eq} = 1,192D_{sph} - 0,226$$

$$D_{eq} = 0,00692D_{sph}^2 + 1,235D_{sph} - 0,283$$

5

$$D_{eq} = -0,0136 D_{sph}^3 + 0,120D_{sph}^2 + 0,875D_{sph} + 0,00990$$

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de medición del diámetro equivalente (D_{eq}) de una gota de agua, comprendiendo dicho procedimiento:

- 5 - una etapa (E100, F100) de obtención de una primera señal de intensidad luminosa (SIG_1, SIG_1') según un ángulo determinado (θ) en un plano horizontal definido por el eje (D_L) de una fuente láser (2) y una etapa (E200, F200) de obtención de una segunda señal de intensidad luminosa (SIG_2, SIG_2') según dicho ángulo determinado (θ) en un plano vertical definido por dicho eje de dicha fuente láser (2), estando dichas intensidades luminosas moduladas por el paso de dicha gota de agua a través de al menos dos haces láser (f_1, f_2) emitidos por dicha fuente de láser (2) de modo que dichos al menos dos haces sean horizontales, paralelos y estén espaciados verticalmente a una distancia predeterminada (d), siendo dichas señales de intensidad adquiridas por receptores ópticos (3, 4) posicionados de manera que los ángulos formados por el eje (DO_1, DO_2) de dichos receptores ópticos y el eje de dicha fuente láser (D_L) sean iguales a dicho ángulo determinado (θ);
- 10 - una etapa (E300, F300) de medición de un primer desfase temporal (Δ_1) entre las dos mayores intensidades máximas de una de dichas señales de intensidad;
- 15 - una etapa (E400, F400) de medición de un segundo desfase temporal (Δ_2) entre dicha primera (SIG_1, SIG_1') y dicha segunda (SIG_2, SIG_2') señal de intensidad;
- 20 - una etapa (E500, F500-F600) de cálculo del diámetro equivalente (D^{eq}) de dicha gota de agua a partir de un modelo elipsoidal de dicha gota de agua en forma de un elipsoide cuyo eje mayor (A) es paralelo al plano de emisión horizontal de dichos al menos dos haces láser, de una ley que relaciona la relación (a) de los dos ejes (A, B) de dicho modelo elipsoidal con el diámetro equivalente de dicho modelo elipsoidal, no asociando dicha ley una constante a dicha relación (a) independientemente de cuál sea dicho diámetro equivalente de dicho modelo elipsoidal, de dicho primer (Δ_1) y de dicho segundo (Δ_2) desfase temporal.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de cálculo (E500) comprende la evaluación en un punto de una función que relaciona el diámetro equivalente con un desfase vertical (h^θ), estando dicho desfase vertical definido como la distancia entre el eje horizontal mayor (A) de dicho modelo elipsoidal de dicha gota de agua y el plano horizontal de emisión de dichos haces láser (f_1, f_2) para la que dichos haces láser se refractan según dicho ángulo determinado (θ) en dicho plano vertical.

3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que dicha función es un polinomio obtenido por aproximación polinomial de la curva teórica que relaciona el diámetro equivalente con dicho desfase vertical (h^θ).

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 2 a 3, en el que dicho punto es igual a

$$d * \frac{\Delta_2}{\Delta_1}$$

y donde:

- d es dicha distancia predeterminada entre dichos al menos dos haces láser;
- Δ_1 es dicho primer desfase temporal; y
- Δ_2 es dicho segundo desfase temporal.

5. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de cálculo (F500-F600) comprende:

- una etapa (F500) de cálculo del diámetro esférico de dicha gota de agua a partir de un modelo esférico de dicha gota de agua, de dicho primer y de dicho segundo desfase temporal;
- una etapa (F600) de cálculo del diámetro equivalente de dicha gota mediante corrección polinomial de dicho diámetro esférico.

6. Programa informático que consta de instrucciones para la ejecución de las etapas del procedimiento de medición del diámetro equivalente de una gota de agua según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5 cuando dicho programa es ejecutado por un ordenador.

7. Soporte de grabación legible por ordenador en el que se graba un programa informático que comprende instrucciones para la ejecución de las etapas del procedimiento de medición del diámetro equivalente de una gota de agua según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5.

8. Dispositivo de medición del diámetro equivalente de una gota de agua, comprendiendo dicho dispositivo:

- un módulo (5B1) de obtención de una primera señal de intensidad luminosa (SIG_1) según un ángulo determinado (θ) en un plano horizontal definido por el eje (D_L) de una fuente láser (2) y un módulo (5B2) de obtención de una segunda señal de intensidad luminosa (SIG_2) según dicho ángulo determinado (θ) en un plano

5 vertical definido por dicho eje de dicha fuente láser (2), estando dichas intensidades luminosas moduladas por el paso de dicha gota de agua a través de al menos dos haces láser emitidos por dicha fuente láser (2) de manera que dichos al menos dos haces sean horizontales, paralelos y estén espaciados verticalmente a una distancia predeterminada (d), siendo dichas señales de intensidad adquiridas por receptores ópticos (3, 4) posicionados de manera que los ángulos formados por el eje (DO_1 , DO_2) de dichos receptores ópticos y el eje de dicha fuente láser (D_L) sean iguales a dicho ángulo determinado (θ);

10 - un módulo (5B3) de medición de un primer desfase temporal (Δ_1) entre las dos mayores intensidades máximas de una de dichas señales de intensidad;

- un módulo (5B4) de medición de un segundo desfase temporal (Δ_2) entre dicha primera y dicha segunda señal de intensidad;

15 - un módulo (5B5, 5'B5) de cálculo del diámetro equivalente de dicha gota de agua a partir de un modelo elipsoidal de dicha gota de agua en forma de un elipsoide cuyo eje mayor (A) es paralelo al plano horizontal de emisión de dichos al menos dos haces láser, una ley que relaciona la relación de los dos ejes de dicho modelo elipsoidal con el diámetro equivalente de dicho modelo elipsoidal, no asociando dicha ley una constante con dicha relación (a) independientemente de cuál sea dicho diámetro equivalente de dicho modelo elipsoidal, de dicho primer y de dicho segundo desfase temporal.

20 9. Disdrómetro que comprende un dispositivo de medición del diámetro equivalente de una gota de agua según la reivindicación 8.

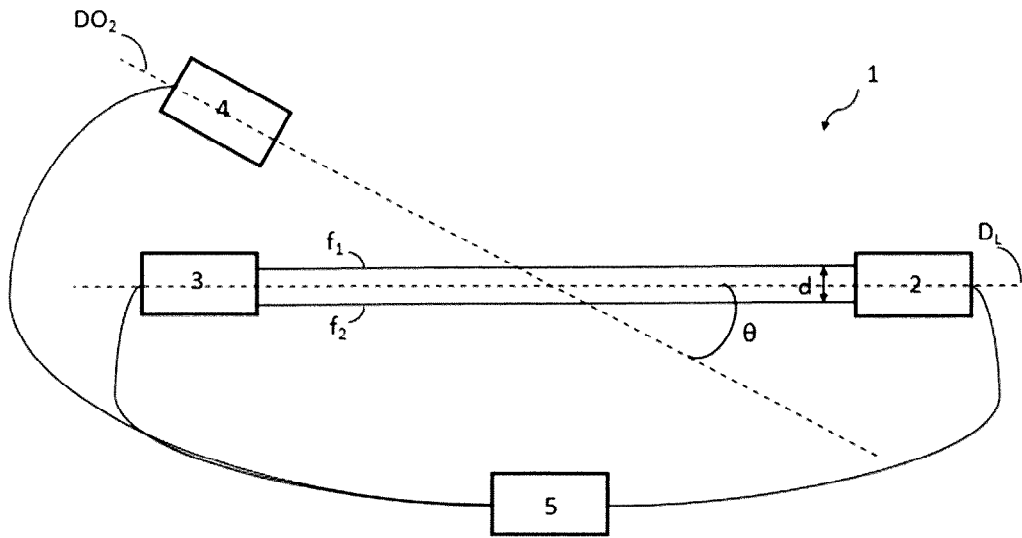


Fig. 1

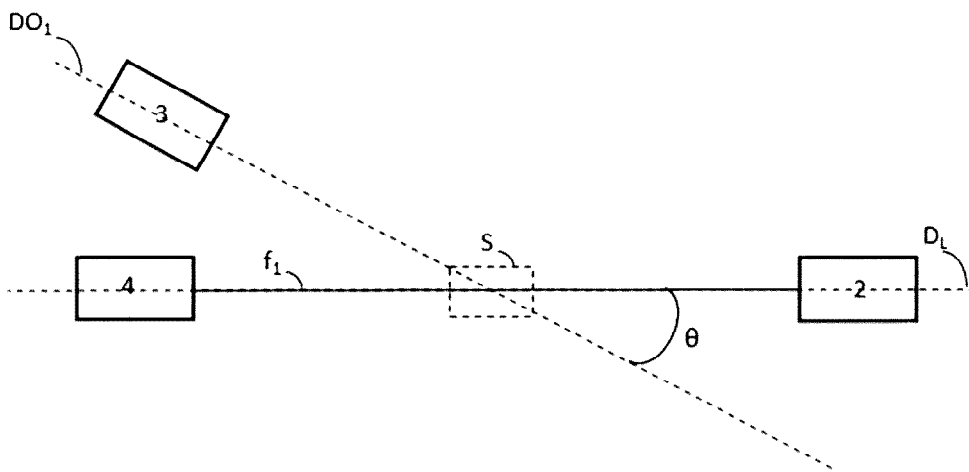


Fig. 2

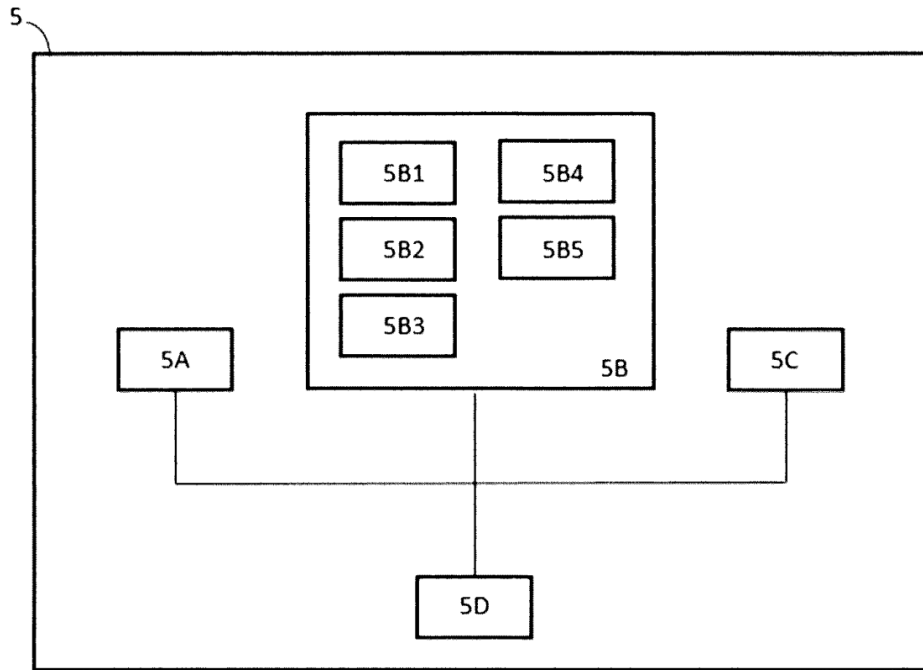


Fig. 3

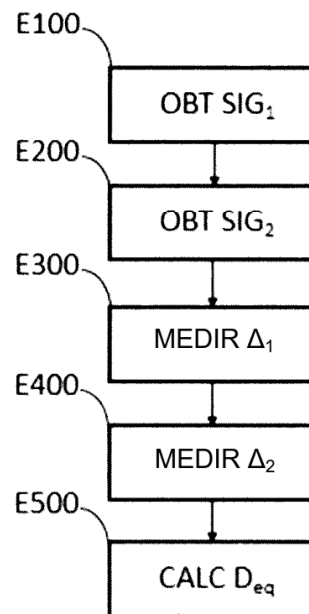


Fig. 4

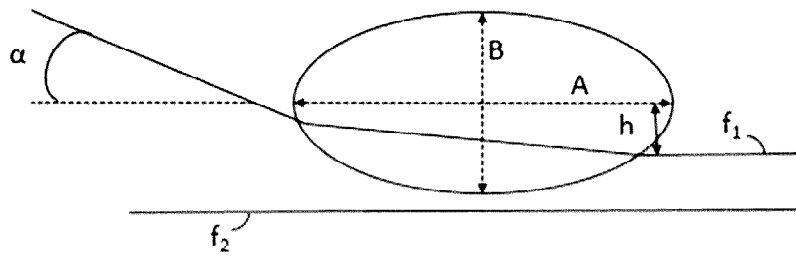


Fig. 5

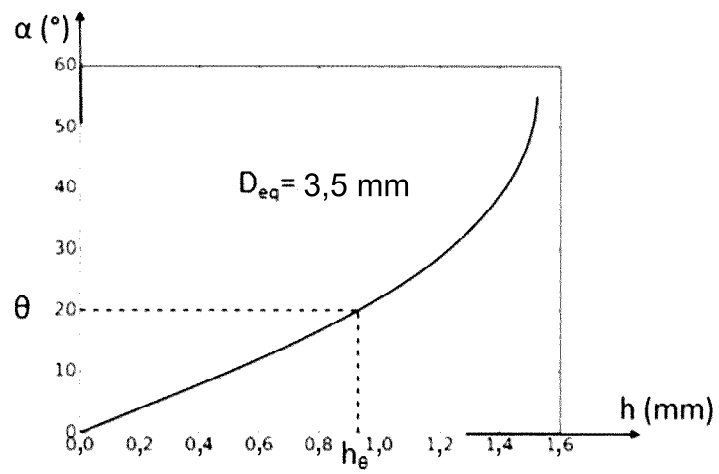


Fig. 6

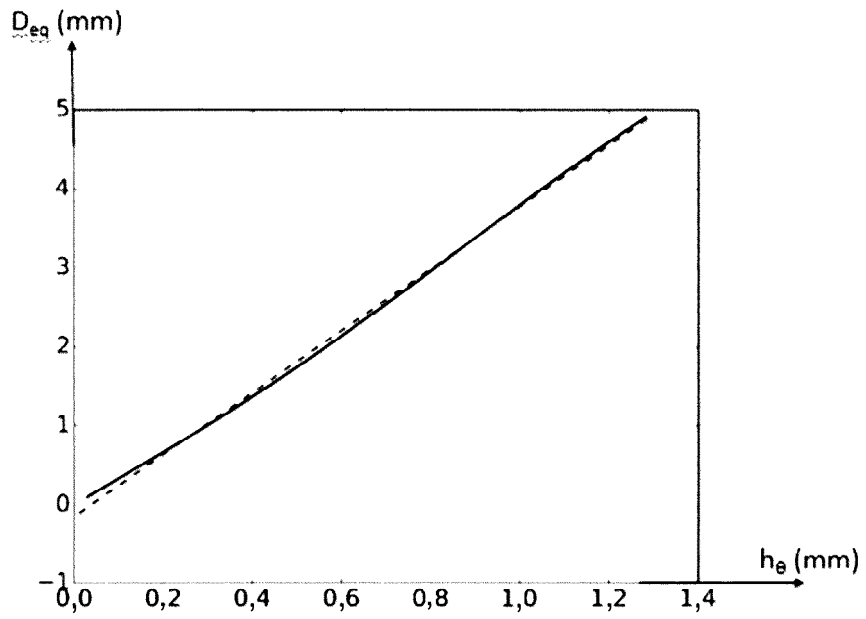


Fig. 7

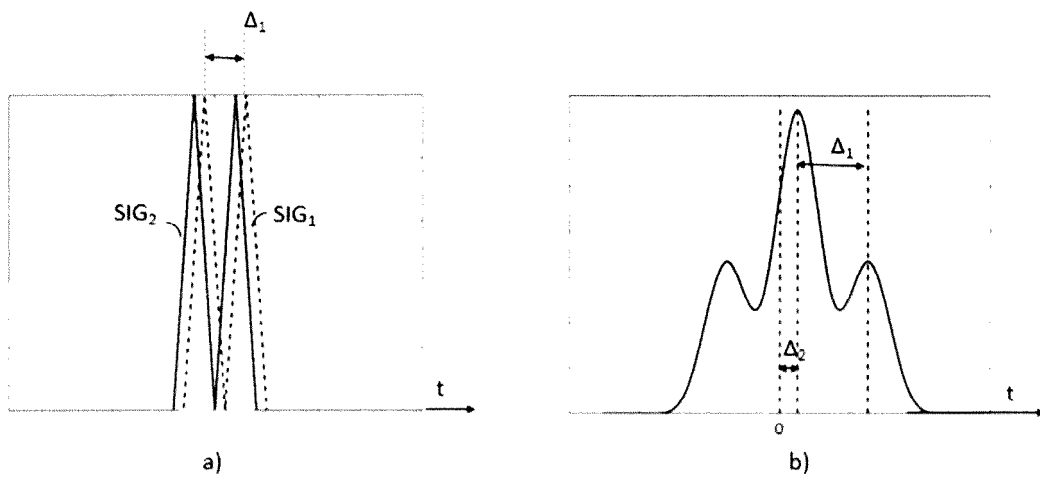


Fig. 8

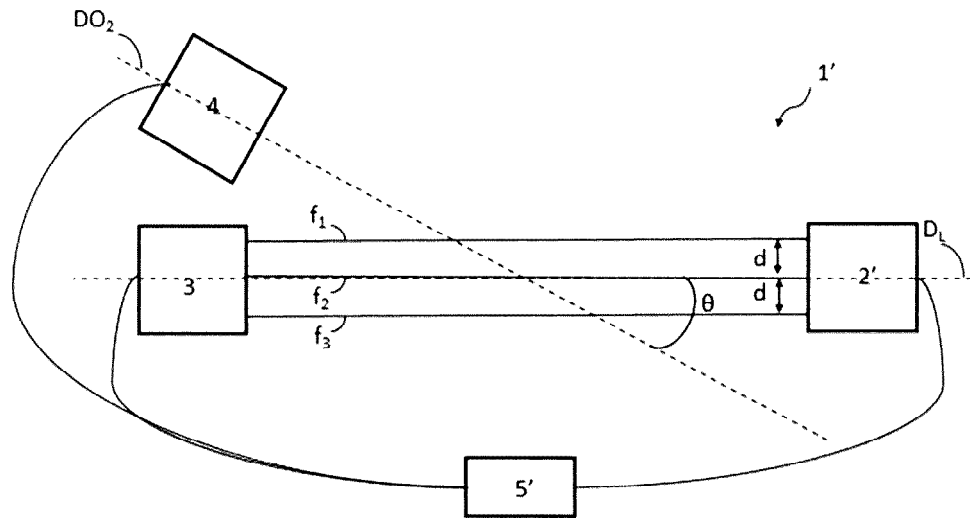


Fig. 9

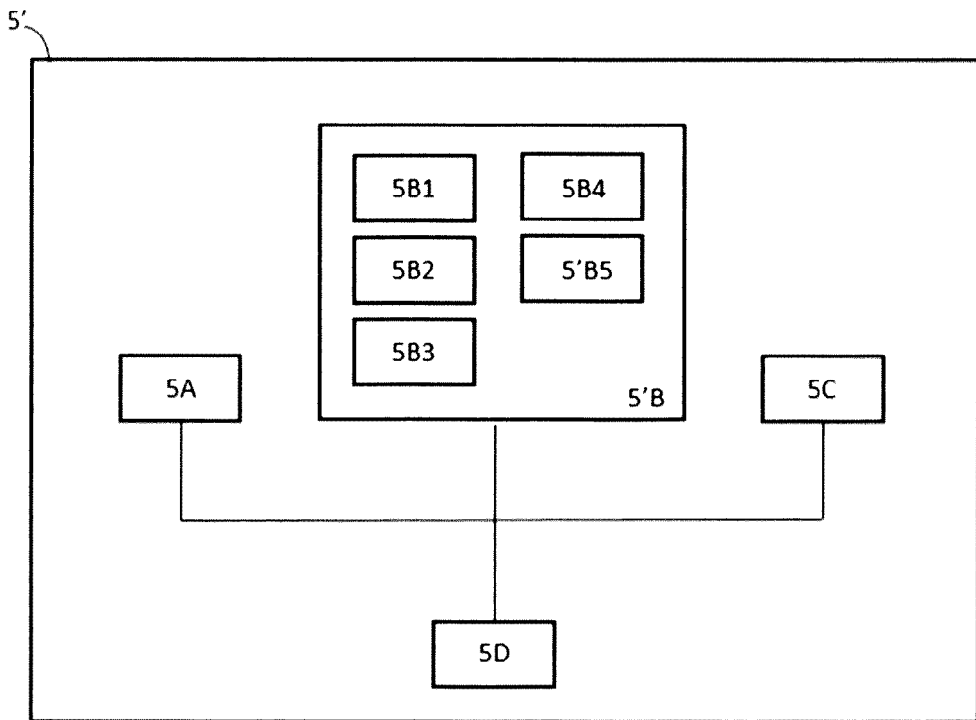


Fig. 10

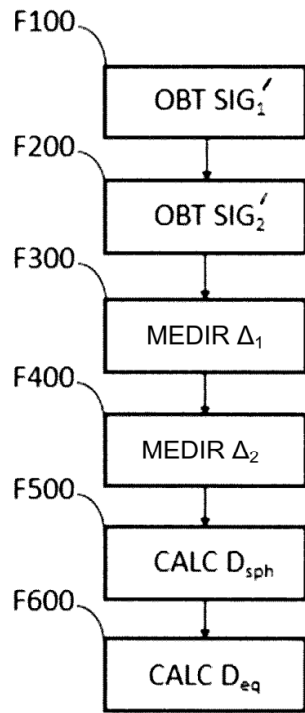


Fig. 11

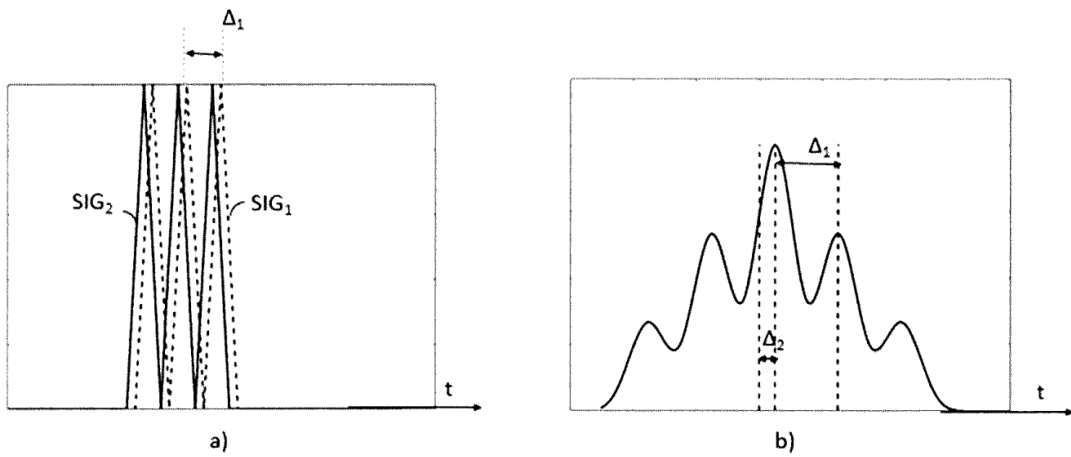


Fig. 12

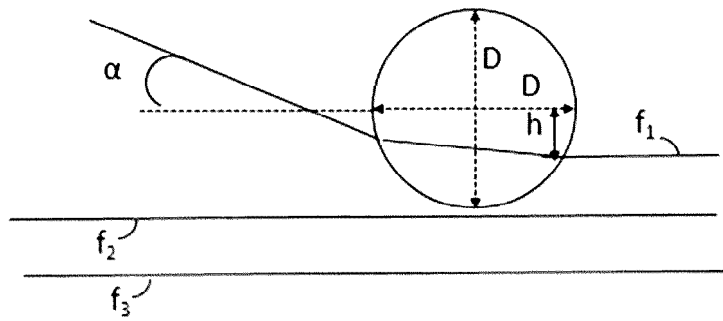


Fig. 13

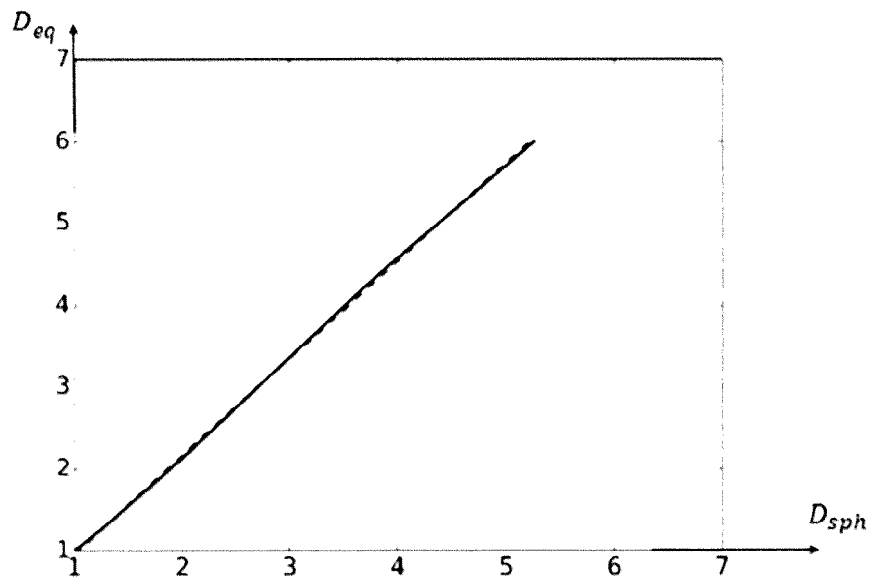


Fig. 14