(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 529 604**

(21) Número de solicitud: 201331105

(51) Int. CI.:

G01S 17/88 (2006.01)

(12) PATENTE DE INVENCIÓN B1

(22) Fecha de presentación:

22.07.2013

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

23.02.2015

Fecha de la concesión:

25.11.2015

(45) Fecha de publicación de la concesión:

02.12.2015

(56) Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2014/070584

(73) Titular/es:

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA (100.0%)
Jordi Girona, 31
08034 Barcelona (Barcelona) ES

(72) Inventor/es:

ROCADENBOSCH BURILLO, Francisco;
TIANA I ALSINA, Jordi;
BERMEJO SÁNCHEZ, Sergio;
VALL-LLOSSERA FERRAN, Mercedes Magdalena y
CAMPS CARMONA, Adriano José

(54) Título: **SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN PARA LA COMPENSACIÓN DEL MOVIMIENTO ANGULAR EN PLATAFORMAS LIDAR MÓVILES**

(57) Resumen:

Sistema de estabilización para la compensación angular en plataformas LIDAR móviles que comprende, al menos, un LIDAR y un sistema óptico deflector que se caracteriza porque dicho sistema deflector comprende, al menos, un deflector móvil en sus ejes de pitch y roll; y donde dicho deflector está configurado para mantener el apuntamiento del LIDAR en una dirección dada mediante un mecanismo de compensación angular controlado electrónicamente.

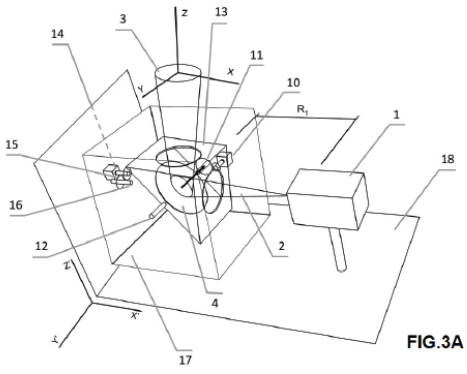

FIG.3A

ES 2 529 604 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP.

DESCRIPCIÓN

SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN PARA LA COMPENSACIÓN DEL MOVIMIENTO ANGULAR EN PLATAFORMAS LIDAR MÓVILES

El objeto de la presente invención es un sistema opto-electrónico para el mantenimiento del apuntamiento en una dirección dada de un sistema LIDAR embarcado en una plataforma móvil. La invención, por tanto, se enmarca en el sector de la teledetección óptica mediante LIDAR y geoestabilización aplicadas entre otros campos a la medida de la velocidad del viento desde plataformas móviles. Estas últimas pueden ser tanto plataformas marinas flotantes (barcos, boyas o plataformas) como aerotransportadas o satélites.

Estado de la técnica

Un sistema LIDAR (que es un acrónimo del inglés *Light Detection and Ranging*) es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. Al igual que ocurre con la tecnología radar, donde se utilizan ondas de radio en vez de luz, la distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.

Los sistemas de teledetección LIDAR para la medida de la velocidad del viento utilizan habitualmente el efecto Doppler resultante de la interacción del haz láser emitido en una dirección dada con los constituyentes atmosféricos (moléculas y aerosoles en suspensión) que actúan como trazadores de la velocidad del viento. Esta dirección es habitualmente la vertical (cénit o nadir), que se tomará como ejemplo no limitativo.

Actualmente, tanto los sistemas LIDAR de viento de tipo pulsado, como los de onda continua ("*continuous wave*" o CW) incorporan sistemas de barrido y capacidades de enfoque (caso de los CW) de forma que es posible estimar con precisión las tres componentes de la velocidad del viento. Dado que, habitualmente, estos sistemas LIDAR utilizan un mismo telescopio en emisión y recepción, y a efectos de facilitar la comprensión técnica, estos sistemas LIDAR pueden modelarse como emisores-

receptores de un haz de luz láser siguiendo las generatrices de un cono (en adelante, el cono LIDAR de sondeo), a partir del cual junto con la interacción con los constituyentes atmosféricos, se estima el vector velocidad a diferentes alturas del cono tal y como se describe en: [*T. Ando, S. Kameyama, Y. Hirano, "All-fiber coherente doppler LIDAR technologies at Mitsubishi Electric Corporation," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.,* ***1,*** *pp. 012011 (2008). Disponible en http://iopscience.iop.org/17551315/1/1/012011/pdf? (accedida 16 Oct. 2012)*] y [*J.P. Cariou, M. Boquet, "LeospherePulsed LIDAR Principles," LEOSPHERE. Contribution to UpWind WP6 on Remote Sensing Devices. 32 pp. Disponible en http://www.upwind.eu/media/576/D6.1.1.pdf (accedida 16 Oct. 2012)*].

Así, por ejemplo, en los sistemas LIDAR pulsados, la medida de la componente de velocidad a lo largo de la línea de visión del instrumento viene siempre resuelta en distancia, quedando dicha distancia determinada a partir del retardo o tiempo de vuelo ("time of flight") entre el pulso emitido y el recibido. La línea de visión se mueve según un patrón cónico de barrido (cono LIDAR de sondeo) que permite recuperar las tres componentes de la velocidad del viento a partir de medidas intermedias realizadas en diferentes puntos del cono. En los sistemas LIDAR CW se mantiene igualmente un patrón cónico de barrido, pero el subsistema óptico de emisión/recepción enfoca sucesivamente a distintas alturas o planos de observación para determinar la velocidad del viento.

Actualmente, las medidas de viento sobre la superficie terrestre utilizando sistemas LIDAR están bien caracterizadas y cumplen con estándares de calibración merced a comparar las medidas de viento proporcionadas por los sistemas LIDAR con las proporcionadas por anemómetros de precisión en mástiles fijos. Por el contrario, cuando estos mismos sistemas LIDAR miden en la superficie marina en apuntamiento cenital embarcados en plataformas flotantes (por ejemplo, boyas meteo-oceánicas para la estimación del recurso eólico en parques eólicos "off-shore") o desde aviones (apuntamiento nadir), los movimientos angulares (alabeo o "roll", cabeceo o "pitch", y guiñada de rumbo o "yaw") y de traslación (movimiento de longitudinal de avance/retroceso o "surge", movimiento lateral de deriva o "sway", y movimiento

vertical o “heave”) de éstas a lo largo del tiempo (en total 6 grados de libertad) causan medidas erróneas de la velocidad del viento [*T. Rogers, M. Young, K. Briggs, G. Randall, H. Hughes, “Remote Sensig on Moving Offshore Platforms,” EWEA Offshore (Nov. 29-Dec. 1, 2011, Amsterdam, The Netherlands)], [J.O. Hellevang, “Effect of wave motion on wind LIDAR measurements – Comparison testing with controlled motion applied,” Remote Sensing Measurement for Renewable Energy (May 22, 2012, DTU Riso, Denmark)*].

En la figura 1 se muestran los seis posibles movimientos (tres de translación y tres de rotación) que puede sufrir un LIDAR cuando éste se coloca, por ejemplo, encima de una plataforma off-shore flotante. En adelante se hace referencia al movimiento longitudinal de avance/retroceso como “surge” (eje X), al movimiento lateral de deriva como “sway” (eje Y), y al movimiento vertical como “heave” (eje Z). Los movimientos angulares de “roll”, “pitch”, y “yaw” atienden a las rotaciones en los ejes X, Y, y Z, respectivamente.

Recientemente, se ha presentado una simulación de los errores en la estimación de la velocidad del viento mediante sistemas LIDAR embarcados en plataformas flotantes:[*G. Wolken-Möhlmann, H. Lilov, B. Lange, “Simulation of motion induced measurement errors for wind measurement susing LIDAR on floating platforms,” 15th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing (ISARS), Paris, France, 28-30 June 2010, http://www.isars2010.uvsq.fr/images/stories/PosterExtAbstracts/P_WIN08_WolkenMohlmann.pdf*].

De estos seis grados de libertad, los de más difícil corrección son los movimientos angulares en “pitch” y “roll” ya que salvo para ángulos muy pequeños (unos pocos grados) no es posible corregirlos “a posteriori” de la fase de medida (por ejemplo, mediante software) y requieren, por tanto, un sistema propio de compensación del movimiento de la plataforma.

Los movimientos en “pitch” y “roll” son típicamente rápidos, implican un

desapuntamiento del LIDAR respecto de la vertical, conllevan una fuerte variación de la altura de medida y se traducen en una disminución de la velocidad medida (sesgo o bias). Así, las traslaciones de la plataforma en X y en Y son irrelevantes, ya que los sistemas LIDAR de medida de vientos presuponen homogeneidad horizontal del campo de viento en una área relativamente extensa alrededor del instrumento (habitualmente de varios km). La contribución de la velocidad de traslación en X e Y sobre la velocidad del viento es aditiva y constante dentro de la resolución temporal de LIDAR (tiempo que el instrumento invierte en realizar un medida) y, por tanto, de fácil corrección (basta con restar a la velocidad medida del viento la velocidad de la plataforma). El movimiento de traslación de la plataforma en Z (heave) y la componente de velocidad de la plataforma en esta dirección son respectivamente aditivas a la altura de medida y a la componente vertical de velocidad del viento y, aunque con mayores variabilidades que para las componentes X e Y, su corrección es sencilla, ya que basta con restar estas contribuciones a la medida. El movimiento angular en “yaw” es típicamente muy lento con respecto a la resolución temporal de la medida, por lo que puede suponerse comportamiento estático dentro de la resolución temporal de medida.

Las soluciones actuales de compensación del movimiento en plataformas off-shore flotantes y/o boyas instrumentadas con un LIDAR de medida de viento simplemente no utilizan compensación alguna quedando, por tanto, muy limitadas las condiciones de operación o, a lo sumo, se empiezan a centrar en métodos pasivos de compensación mecánica (balancines cardánicos donde se monta el instrumento LIDAR) [*FLIDAR, “Cost-effective, acurate offshore wind resource assessments,” http://www.flidar.com, accedida 16 Oct. 2012*]. En sistemas muy avanzados, el NOAA (National Oceanics and Atmospheric Administration) utiliza un sistema computerizado de corrección software que interactúa con el sistema de barrido del LIDAR pulsado a partir de la información de actitud del barco (ángulos de “pitch”, “roll”, y “yaw”) obtenida a partir de sensores angulares (giróscopos y un magnetómetro) [*J. E. James, “Beam Pointing Stabilization for a Shipboard Volumen Imaging LIDAR,” Report NRL/MR/7220-95-7646, Naval Research Lab., Washington, DC 20375-5320 (Jan. 26, 1995)*], [*R. J. Hill, W. A. Brewer, S. C. Tucker, “Platform-motion correction of velocity measured by Doppler LIDAR,” J. Atmospheric and Oceanic Technology, **25,** 1369-1382 (2008)*].

Mientas que los anteriores sistemas de estabilización anteriores están muy ligados al tipo de barrido y sistema LIDAR concreto (pulsado o CW) la invención que se describe en esta patente es totalmente independiente de la forma en que se hace el barrido (ya sea utilizando prismas o deflectores) y no viene limitada por el tipo de sistema LIDAR utilizado.

Por otra parte, las soluciones en sistemas de visión que se derivan del campo militar (sistemas de apuntamiento de armamento) o de la fotografía (sistemas de reducción de la vibración) basadas en deflectores giro-estabilizados capaces de mantener la línea de visión/apuntamiento no son directamente trasladables al campo LIDAR. Esto es debido a que para las aperturas típicas del cono LIDAR del sondeo (del orden de 15º-30º, ángulo mitad) se requieren tamaños enormes de deflectores, poco prácticos y muy costosos a las longitudes de onda de operación.

Descripción de la invención

Para solucionar los problemas técnicos indicados, la presente invención propone un sistema opto-mecánico que comprende un deflector (esto es, un deflector o deflectores en las distintas realizaciones prácticas de la invención) del cono LIDAR del sondeo, donde dicho deflector está actuado electrónicamente y configurado para compensar las rotaciones de pitch y roll en plataformas móviles, manteniendo el apuntamiento del LIDAR en una dirección dada. Más concretamente, se propone un sistema de estabilización para la compensación del movimiento angular en plataformas LIDAR móviles caracterizado porque comprende, al menos, un LIDAR y un deflector móvil configurado para mantener el apuntamiento del LIDAR en una dirección dada mediante un mecanismo de compensación angular controlado por un sistema electrónico de control conectado a, al menos, un sensor de actitud.

Las plataformas móviles son una seleccionada entre plataformas marinas como barcos o boyas, plataformas aerotransportadas, o satélites. La dirección de apuntamiento, en general, es la vertical de la plataforma en sentido cénit o nadir,

aunque no es exclusivo ni limitativo al objeto de la invención, puesto que puede ser cualquier dirección. Por otro lado, la presente invención es de aplicación en sistemas LIDAR, tanto pulsados cómo de onda continua (CW), empleados para la medida de viento y para cualquier otro campo de aplicación de un LIDAR.

Así pues, en una primera realización práctica, el LIDAR está dispuesto horizontalmente según el eje longitudinal de la plataforma.

La invención incorpora en otra realización práctica un subsistema óptico auxiliar para posibilitar el empleo de sistemas LIDAR dispuestos verticalmente. Para aperturas típicas del cono LIDAR de sondeo (15º-30º, ángulo mitad) el subsistema óptico auxiliar incorpora elementos de enfoque y desenfoque que permiten colimar y reducir sustancialmente el camino óptico recorrido por el cono LIDAR a través de un sistema opto-mecánico de compensación.

Consecuentemente, en esta última realización se permiten dimensiones pequeñas y, por tanto, realizables del deflector, como por ejemplo un deflector móvil de veinte centímetros de diámetro. Para conos LIDAR de muy pequeña apertura (5º) el sistema óptico auxiliar puede reducirse a un simple deflector fijo.

Como ha sido indicado, para compensar los movimientos de rotación de la plataforma móvil, el deflector (el o los deflectores) se actúan electrónicamente en dos grados de libertad, ángulos de roll y pitch correspondientes a los ejes longitudinal (eje X) y transversal (eje Y) de la plataforma móvil.

En síntesis, en una primera realización se emplea un deflector (un único deflector) móvil y un LIDAR dispuesto horizontalmente sobre la plataforma. En otras realizaciones, el LIDAR está dispuesto verticalmente sobre la plataforma y comprende un subsistema óptico auxiliar que permite:

i. Orientar el cono LIDAR de sondeo para incidir horizontalmente sobre el deflector móvil.

ii. Utilizar tamaños razonables para el deflector móvil (típicamente diámetros inferiores a veinte centímetros).

Cabe señalar que en la presente descripción y las reivindicaciones, se entenderá por “sensor de actitud” a cualquier sensor o conjunto de sensores capaz de medir los ángulos de rotación en los tres ejes cartesianos (como se verá más adelante, en los ejemplos de realización aquí presentados, el sensor de actitud asociado a un eje mide única y preferentemente la rotación de ese eje, aunque será obvio para el experto en la materia el empleo de sensores de actitud que puedan medir otras variables adicionales).

A lo largo de la descripción y las reivindicaciones la palabra "comprende" y sus variantes no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención. Los siguientes ejemplos y dibujos se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que restrinjan la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas.

Breve descripción de las figuras

A continuación se pasa a describir de manera muy breve una serie de dibujos que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

La figura 1 es la representación esquemática de los seis grados de libertad en los que puede moverse una plataforma móvil como, por ejemplo, una boya; y donde dichos seis grados de libertad corresponden a las tres posibles traslaciones y rotaciones en los ejes cartesianos.

La figura 2 es la representación del principio de compensación del movimiento angular en pitch y roll para el caso simplificado de utilizar un deflector móvil y un LIDAR dispuesto horizontalmente en la plataforma. La figura 2A muestra la deflexión del cono LIDAR de sondeo, mientras que la figura 2B ilustra como el deflector móvil mantiene el apuntamiento vertical del cono LIDAR de sondeo para diferentes inclinaciones de pitch de la plataforma.

La figura 3 muestra una representación esquemática de una primera realización con el LIDAR dispuesto horizontalmente respecto de la plataforma móvil (Fig. 3A) donde además se muestra un detalle (Fig. 3B) de la rótula actuada sobre los ejes de pitch y roll.

La figura 4 es un detalle conceptual de la realización mostrada en la figura 3 basada en un deflector móvil con un LIDAR dispuesto horizontalmente. La Fig. 4A ilustra la geometría de la compensación en pitch y las Figs. 4B y 4C ilustran la compensación en roll.

La figura 5 es un detalle conceptual de una realización basada en dos deflectores a modo de periscopio, con un deflector fijo, otro móvil y el LIDAR dispuesto verticalmente. La Fig. 5A esquematiza la orientación de los dos deflectores (E1 fijo y E2 móvil respecto a la plataforma) para diferentes ángulos de pitch de la plataforma manteniendo el apuntamiento vertical del cono LIDAR de sondeo. La Fig. 5B ilustra la geometría de la compensación angular en pitch.

La figura 6 muestra una tercera realización práctica de la invención basada en un deflector móvil y un subsistema óptico auxiliar con el LIDAR dispuesto verticalmente.

La figura 7 muestra la geometría utilizada para el cálculo del tamaño de los deflectores para la realización mostrada en la figura 5 y, por extensión, para la realización mostrada en al figura 3.

La figura 8 muestra el cálculo del tamaño de los deflectores para la realización mostrada en la figura 5. En Fig. 8A los parámetros utilizados son $R_1 = 10cm$, $R_2 = 10cm$ y $\phi = 5^o$ mientras que en Fig. 8B, los parámetros son $R_1 = 10cm$, $R_2 = 10cm$ y $\alpha = 30^o$.

Exposición de un modo detallado de realización de la invención

En la figura 1, como se ha indicado, se muestran esquemáticamente los grados de libertad que corresponden a las posibles traslaciones y rotaciones en los tres ejes cartesianos. En la presente memoria descriptiva los ángulos de roll y pitch se corresponden respectivamente a los ejes longitudinal (X') y transversal (Y') de la plataforma móvil.

En la figura 2 se muestra el principio de compensación del movimiento angular en pitch y roll basado en deflectar el cono LIDAR de sondeo (2,3) mediante un deflector móvil (4). En todas las realizaciones prácticas se utiliza al menos un deflector y como ejemplo de deflector se puede considerar un espejo, con lo que deflector y espejo han de ser tomados como sinónimos en este punto. Así pues, dicho deflector o deflector móvil (4) está actuado en estos dos ejes de rotación para mantener el apuntamiento vertical.

En la figura 2A se muestran los planos perpendiculares a los ejes de rotación en pitch (6) y en roll (7), así como la normal (5) del deflector móvil (4). Tanto el deflector móvil (4) como el LIDAR (1) están embarcados en la plataforma. El LIDAR (1) se dispone horizontalmente, según el eje longitudinal de la plataforma.

Los ejes XYZ (8) definen el sistema coordenado fijo, mientras que los ejes X'Y'Z' (9) definen el sistema coordenado móvil, es decir, el asociado a la plataforma.

Por otro lado, en la figura 2B se muestra la orientación en pitch del deflector móvil (4) manteniendo el apuntamiento vertical del cono LIDAR de sondeo para dos ángulos de inclinación en pitch diferentes de la plataforma:

- Sin inclinación, con α=0º
- Inclinada un ángulo α =10º

La inclinación del deflector móvil (4) se referencia con la letra gamma (γ). Así pues, para las citadas inclinaciones de la plataforma (α), las inclinaciones del deflector son γ=45º y γ=50º, respectivamente. En dicha figura 2B, R_1 es la distancia entre el LIDAR (1) y el deflector móvil (4).

En la presente invención se ilustra, de forma no limitativa, mediante tres ejemplos prácticos, la compensación de los movimientos de pitch y roll en la plataforma. Estos ejemplos clasifican las soluciones según se utilice un LIDAR dispuesto horizontalmente (primer ejemplo de realización) o verticalmente (segundo y tercer ejemplo de realización). En ambos casos el deflector móvil permite orientar verticalmente el cono LIDAR de sondeo, en las direcciones cénit o nadir, aunque en las realizaciones se ha elegido el apuntamiento al cénit. No obstante, y como se ha indicado, el LIDAR podría colocarse en otras posiciones.

Ejemplo de realización con un deflector móvil y el LIDAR dispuesto horizontalmente

En la figura 3 se muestra una posible realización basada en un único deflector móvil a partir de una rótula que puede girar en dos ejes (pitch y roll) actuados electrónicamente. Los movimientos del deflector móvil (4) en pitch y roll se rigen respectivamente por las ecuaciones [3] y [7] indicadas a continuación.

Para facilitar la comprensión de las figuras se han utilizado las siguientes referencias numéricas:

(1) Sistema Lidar.
(2) “Cono Lidar de sondeo” incidente en el deflector.
(3) “Cono Lidar de sondeo” reflejado en el deflector.
(4) Deflector móvil (espejo móvil, a modo de ejemplo, en las realizaciones

presentadas).

(5) Vector normal al deflector.

(6) Plano X'Z' (perpendicular al eje de rotación en "pitch").

(7) Plano Y'Z' (perpendicular al eje de rotación en "roll").

(8) Sistema coordenado fijo (XYZ).

(9) Sistema coordenado móvil (X'Y'Z').

(10) Conjunto actuador-sensor inclinómetro solidario con la rótula (17) y que actúa en el ángulo de "pitch".

(11) Subsistema de engranajes con relación 2:1

(12) Eje de rotación ("pitch") de la rótula interior.

(13) Montura del deflector móvil a 45º (giratoria en "pitch").

(14) Conjunto actuador-sensor inclinómetro solidario con el perfil en "L" (18) y que actúa en el ángulo de "roll".

(15) Subsistema de engranajes con relación 1:1

(16) Eje de rotación ("roll") de la rótula exterior.

(17) Rótula exterior giratoria en el eje de "roll".

(18) Perfil en "L" para la fijación de la doble rótula sobre la plataforma.

(19) Pletinas solidarias a la montura del deflector móvil y rótula interior en el eje de "pitch".

(20) Rodamiento de bolas en el eje de "pitch".

(21) Rodamiento de agujas en el eje de "roll".

(i) Ecuaciones angulares de diseño del sistema óptico de compensación.

Se describen a continuación las ecuaciones de diseño que rigen el movimiento de rotación del deflector móvil (esto es, actuado electrónicamente) en función de la inclinación de la plataforma.

La figura 4 muestra de forma conceptual y geométrica el movimiento que realiza el deflector móvil para compensar una rotación en pitch (figura 4A) o en roll (figuras 4B y 4C) de la plataforma. El análisis se realiza atendiendo al principio de superposición de movimientos. El ángulo de pitch de la plataforma se nota como (α) y el de roll como

(α_r).

Los ángulos de compensación en pitch y en roll por parte del deflector medidos con respecto al sistema de referencia fijo XYZ se notan γ y γ_r, respectivamente. XYZ es el sistema coordenado de referencia fijo y X'Y'Z' el sistema coordenado de la plataforma móvil. En lo que sigue, los ángulos con respecto al sistema coordenado fijo se notan sin primas y los ángulos con respecto a sistema de referencia móvil con primas.

En la figura 4A, se representa el eje y la generatriz del cono LIDAR de sondeo incidente (2) y reflejado (3), supuesto éste con un ángulo de apertura ϕ. Así pues, partiendo de esta figura, la condición de apuntamiento vertical viene dada por

$$2\theta + \alpha = 90^{o} \quad \rightarrow \quad \theta = 45^{o} - \alpha/2 \,. \qquad \text{Ec. [1]}$$

Usando la relación geométrica,

$$\gamma = \theta + \alpha = \theta_1 + \alpha_1 \,, \qquad \text{Ec. [2]}$$

y substituyendo la ecuación [1] en la [2] se obtiene la ecuación de diseño buscada en pitch,

$$\gamma = 45^{o} + \alpha/2 \,. \qquad \text{Ec. [3]}$$

Equivalentemente, en el sistema coordenado móvil X'Y'Z', usando que $\gamma' = \gamma - \alpha$ se tiene

$$\gamma' = 45^{o} - \alpha/2 \,. \qquad \text{Ec. [4]}$$

Notemos que el movimiento angular en pitch de la plataforma será una función del tiempo $\alpha(t)$, por lo que el deflector móvil (4) deberá actuarse continuamente según la ecuación [3].

Mencionar también que, caso que el LIDAR se dispusiera formando un ángulo α_0 con el eje longitudinal de la plataforma, la ecuación [3] sigue siendo válida sin más que substituir α por $\alpha+\alpha_0$.

Finalmente, el rayo representado con una flecha en Fig. 4A, correspondiente al rayo más divergente del cono (generatriz), incide en el deflector móvil (4) con un ángulo α_1. Se demuestra a continuación que la apertura del cono de salida sigue valiendo $\phi=\alpha_1-\alpha$ de forma que el deflector móvil (4) no cambia el ángulo de apertura del cono sino únicamente orientación del camino óptico que siguen los rayos del cono LIDAR de sondeo.

De la geometría de la figura 4A y de la ley de reflexión puede escribirse que

$$\phi+2\theta_1+\alpha_1=90^{o}\,. \qquad \text{Ec. [5]}$$

Sustituyendo $\theta_1=\theta+\alpha-\alpha_1$ de la ecuación [2] en [5] y usando [1] se obtiene que

$$\phi=\alpha_1-\alpha\,, \qquad \text{Ec. [6]}$$

cómo se quiere demostrar.

En las figuras 4B y 4C se muestra la disposición del deflector móvil (4) cuando la plataforma sufre una inclinación α_r en roll. Para facilitar la comprensión, se representan las vistas en plano XZ (Fig. 4B) y en plano YZ (Fig. 4C). En la figura 4B, el eje del cono LIDAR de sondeo incidente en el deflector (2) se modela por el rayo incidente $\hat{u}_i$ y el eje del cono LIDAR de sondeo reflejado en el deflector (3) se modela por el rayo reflejado $\hat{u}_r$. El vector $\hat{u}_i$ y el vector normal al deflector (4), $\hat{n}$, definen el plano de incidencia.

Atendiendo a las leyes básicas de reflexión, el rayo reflejado $\hat{u}_r$ yace en el plano de

incidencia y forma con la normal un ángulo igual al de incidencia. Se busca que el rayo $\hat{u}_r$ emerja verticalmente del deflector (esto es, según el eje Z). Para ello y en ausencia de inclinación en pitch en la plataforma ($\alpha = 0$, principio de superposición de movimientos) el deflector se mantiene a γ=45º en “pitch” (ecuación [3]).

Cuando la plataforma sufre una rotación α_r en roll el plano de incidencia rota ese mismo ángulo (pasa de ser el plano XZ al plano X’Z’, véase Fig. 4C), por lo que para poder mantener la posición vertical del rayo reflejado $\hat{u}_r$ (equivalentemente del plano de incidencia), el deflector debe contra-rotar ese mismo ángulo de roll α_r, esto es, el deflector debe girar en “roll” un ángulo,

$$\gamma_r = -\alpha_r \,. \qquad \text{Ec. [7]}$$

La ecuación [7] arriba constituye la ecuación de diseño en roll.

En Fig. 4C, $\hat{n}_\perp$ representa la proyección del vector normal del deflector (4) sobre el plano YZ. La prima $'$ (tanto en la etiqueta del deflector, $4'$, como en la proyección del vector normal, $\hat{n}'_\perp$) indica la posición del deflector y de su normal proyectada en YZ tras la rotación en roll. La doble prima $''$ (tanto en la etiqueta del deflector, $4''$, como en la proyección del vector normal, $\hat{n}''_\perp$) indica la posición del deflector y de su normal proyectada en YZ tras aplicar la compensación angular según la ecuación [7].

Nótese también que para variaciones temporales en el ángulo del roll $\alpha_r(t)$, el movimiento de compensación del deflector debe ser $\gamma_r(t) = -\alpha_r(t)$.

A modo de ejemplo, y de acuerdo con la ley óptica de la reflexión, cuando en un instante de tiempo dado la plataforma (equivalentemente (18)) está nivelada en pitch ($\alpha = 0$ en la ecuación [3]) y en “roll” ($\alpha_r = 0$ en la ecuación [7]), el deflector móvil (4) se inclina a $\gamma = 45^o, \gamma_r = 0^o$ y transforma el cono LIDAR de sondeo incidente horizontalmente (2) en un cono reflejado vertical (3).

(ii) Dispositivo de compensación

Esta primera realización práctica de la invención comprende elementos ópticos y mecánicos. Así pues, el dispositivo de compensación consiste (figura 3A) en un único deflector móvil (4) montado a 45º con respecto al eje del sistema LIDAR (1).

Por otro lado, los elementos mecánicos (figura 3B) permiten tanto la sujeción del deflector como los movimientos de rotación necesarios para la compensación del movimiento angular de la plataforma y solidarios con el movimiento de la misma.

Así, el mecanismo de compensación comprende un elemento fijo (18) en forma de L que sujeta una rótula giratoria (17). El eje (16) es un saliente del elemento fijo (18) y es el encargado de compensar las rotaciones en roll, para lo cual está encastado en la citada rótula giratoria (17).

El dispositivo comprende un segundo eje (12), ortogonal al primer eje (16) e igualmente encastado en la rótula giratoria (17), de tal forma que este segundo eje (12) es el encargado de compensar las rotaciones en pitch. El eje (12) se encasta, a su vez, en dos pletinas (19) solidarias con la montura (13) del deflector móvil (4), que es giratoria en pitch. La montura del deflector dispone, a su vez, de dos tuercas encargadas del alineamiento fino del deflector móvil (4).

El dispositivo comprende, además, un conjunto de sensores inclinométricos-actuadores (10,14) encargados de medir y compensar las variaciones angulares de la plataforma móvil actuando sobre los ejes de rotación de pitch (12) y roll (16) del deflector móvil (4). Para transmitir el movimiento de los actuadores/motores (10,14) hacia las rótulas (montura giratoria en pitch (13) y rótula giratoria en roll (17)), se incorpora un juego de engranajes (11,15). La relación de transmisión entre el engranaje emplazado en el eje del motor de pitch (10) y el engranaje emplazado en el eje de rotación en pitch (12) es una relación 2:1, tal y como se expresa en la ecuación [4]. Por otro lado, el engranaje emplazado en el eje del motor de roll (14) y el engranaje emplazado en el eje de rotación en roll (16) mantienen una relación de transmisión 1:1

(ecuación [7]).

En la presente descripción será obvio para el experto en la materia que en lugar de un motor podrá utilizarse cualquier dispositivo que cumpla la misma función, tal como por ejemplo un actuador o similar.

La relación de transmisión 2:1 en el eje pitch se justifica en base a la ecuación [4] ya que cuando la plataforma se inclina un ángulo α en pitch, el deflector móvil (4) debe rotar $-\alpha/2$ (referido al sistema coordenado X'Y'Z' de la plataforma) en ese mismo eje. La relación de transmisión 1:1 para el eje de roll atiende a la ecuación [7] ya que cuándo la plataforma sufre una rotación α_r en roll, el deflector debe contra-rotar ese mismo ángulo en el eje de roll.

En el presente ejemplo de realización se ha utilizado para cada eje (12,16) un módulo inclinométrico consistente en un sensor gravimétrico, un motor y un circuito electrónico de control. Los módulos sensores en pitch (10) y en roll (14) se mueven solidariamente con la rótula giratoria (17) y el elemento fijo (18) en forma de "L", respectivamente. El algoritmo de control electrónico implementado en la presente realización consiste en actuar el motor en sentido contrario hasta que el sensor indique 0º o 180º (apuntamiento cénit o nadir, respectivamente, según sea la aplicación que se busque), sin ser esta elección ni el algoritmo de control implementado limitativos de la invención.

En este ejemplo de realización se ha colocado el sistema de compensación descrito arriba a 10 cm de un cono de luz láser dispuesto horizontalmente y con una apertura de ϕ=15°, simulando así el cono LIDAR de sondeo, fijando como especificación una deriva angular máxima de la plataforma de ±30° en pitch y roll (α=±30°). Se obtiene (ecuación [18] en sección *"Cálculo del tamaño de los deflectores del sistema óptico de compensación")* un tamaño de deflector inferior a 15 cm, lo cual es tecnológicamente viable a las longitudes de onda de operación de los LIDAR (el cálculo del tamaño de los deflectores se indica posteriormente en la presente memoria descriptiva).

Esta realización está especialmente indicada para sistemas LIDAR de viento CW ya

que al ser sistemas enfocados en el volumen atmosférico de observación dónde se mide el viento, la utilización de un subsistema óptico auxiliar resulta menos recomendable ya que podría modificar la distancia de enfoque del LIDAR.

Ejemplo con un deflector móvil, un deflector fijo y el LIDAR dispuesto verticalmente

Esta realización difiere básicamente de la primera realización en que se utiliza un deflector fijo adicional (caso más simplificado del subsistema óptico auxiliar) intercalado entre el LIDAR y el deflector móvil (4) para posibilitar que el cono de sondeo incida horizontalmente en el deflector móvil. En la realización de la figura 5 se utiliza únicamente un deflector móvil (E2) – análogo al deflector móvil (4) de la realización de la figura 4 – y un deflector fijo (E1) y solidario con la plataforma móvil orientado a 45º, a modo de periscopio. Cabe notar aquí que el ángulo de 45º no es limitativo de la invención, aunque sí el que ha permitido la realización más sencilla de acuerdo con la ecuación [14] de diseño. Los movimientos del deflector E2 en pitch y roll se rigen respectivamente por las ecuaciones de compensación [7] y [14], según sigue.

(i) Ecuaciones de compensación

Se describe a continuación la ecuación de diseño que rige el movimiento de rotación del deflector móvil en función de la inclinación de la plataforma para la configuración periscopio basada en un deflector fijo y un deflector móvil (figura 5). Por simplicidad de construcción se asume que el primer deflector (E1) se mantiene fijo con respecto al eje óptico del periscopio (solidario con la plataforma móvil) y que el segundo deflector (E2) es móvil (esto es, actuado electrónicamente). En la figura, la plataforma sufre movimientos angulares en pitch.

Para una rotación de la plataforma en pitch, el ángulo de inclinación del segundo deflector γ_2, en función del ángulo de inclinación del primer deflector, γ_1' (parámetro de diseño) y del ángulo de pitch de la plataforma α, se obtiene de solucionar la geometría de la figura 5B.

Los ángulos γ_2 y α se miden con respecto al sistema coordenado fijo (XYZ). Por el contrario, γ_1' se mide con respecto al sistema coordenado móvil de la plataforma (X'Y'Z'), ya que el deflector E1 es fijo y con una orientación que es un parámetro de diseño a elegir. Como antes, los ángulos con respecto al sistema fijo se notan sin primas y los ángulos con respecto a sistema de referencia móvil con primas. El rayo flechado representa el eje del cono LIDAR de sondeo a su paso por los deflectores E1 y E2.

Del deflector E1 se tiene que

$$\gamma_1 = -\beta + \theta_1 , \qquad \text{Ec. [8]}$$

o equivalentemente en el sistema coordenado móvil X'Y'Z',

$$\gamma_1' = \gamma_1 + \alpha . \qquad \text{Ec. [9]}$$

Del deflector E2 se tiene que

$$\gamma_2 = -\beta + \theta_2 . \qquad \text{Ec. [10]}$$

Considerando ahora el triángulo rectángulo OO_1A en el deflector E1 se puede escribir que

$$-\beta = 90^{\circ} - 2\theta_1 - \alpha \qquad \text{Ec. [11]}$$

y a partir del triángulo rectángulo O_1O_2B entre los deflectores E1-E2,

$$-\beta + 2\theta_2 = 90^{\circ} . \qquad \text{Ec. [12]}$$

En el sistema de ecuaciones [8]-[12] arriba, $\theta_i, i = 1,2$ es el ángulo de incidencia (igual al ángulo de reflexión) en los deflectores E1 y E2, respectivamente, $\gamma_i, i = 1,2$ es la

inclinación de la normal de los deflectores respecto a la horizontal (eje X), y β es la inclinación del rayo incidente en el deflector E2 respecto a la horizontal.

La solución del citado sistema de ecuaciones viene dada por

$$\gamma_2 = \gamma_1' - \alpha/2 \,. \qquad \text{Ec. [13]}$$

Para una elección del ángulo γ_1' constante por parte del diseñador, la ecuación [13] rige el comportamiento del deflector móvil E2. Así, para variaciones temporales en el ángulo pitch $\alpha(t)$, el movimiento compensador del deflector (con respecto al sistema fijo XYZ) resulta $\gamma_2(t) = \gamma_1' - \alpha(t)/2$.

Por simplicidad de construcción se ha tomado $\gamma_1' = 45^{\circ}$, de forma que la ecuación de diseño en pitch viene dada por

$$\gamma_2 = 45^{\circ} - \alpha/2 \,. \qquad \text{Ec. [14]}$$

En estas condiciones, de las ecuaciones [8]-[12] se obtiene, $\theta_1 = 45^{\circ}$, $\theta_2 = 45^{\circ} + \alpha/2$ y $\beta = \alpha$. La ecuación de diseño [14] en la realización con dos deflectores (E1-E2) es análoga a la ecuación de diseño [3] en la realización con un único deflector (primera realización, figuras 3 y 4) salvo por un cambio de signo debido a que, para facilitar la comprensión geométrica, α es positivo en sentido horario en la figura 4B mientras que α es positivo en sentido anti-horario en la figura 4A.

Las ecuaciones [13] y [14] pueden unificarse al criterio coordenado habitual de signos positivos en sentido anti-horario sin más que cambiar en ellas α por $-\alpha$.

Finalmente, cuando la plataforma rota en roll, el comportamiento del sistema basado en dos deflectores E1-E2 es análogo al descrito para el sistema basado en un único deflector móvil y éste se rige por la misma ecuación [7] de compensación, ya que el plano de incidencia es el mismo para ambos deflectores.

En la sección *"cálculo de los tamaños de los deflectores del sistema óptico de compensación"* se desarrollan las relaciones de óptica geométrica que rigen las dimensiones de los dos deflectores para diferentes valores de los parámetros de diseño del periscopio. Los parámetros estudiados son la distancia entre el foco de cono LIDAR de sondeo y el primer deflector, R_1, la distancia entre los dos deflectores, R_2, y la apertura del cono, ϕ.

En la tabla 1 se calcula el tamaño del deflector móvil (E2), l_{E_2}, para diferentes configuraciones de diseño en R_1, R_2 y ϕ. En todos los casos se supone un movimiento angular máximo de la plataforma de ±25º ($\alpha = \pm 25°$).

R_1 [cm]	R_2 [cm]	ϕ [º]	l_{E_2} [cm]
10	10	5	8
10	20	5	10
10	10	15	24
10	20	15	36
10	10	30	250
10	20	30	360

Tabla 1

En la tabla 1 se observa que para aperturas del cono pequeñas (ϕ=5º) el tamaño del deflector móvil es relativamente pequeño (l_{E_2}=8-10 cm) y, por tanto, fácilmente controlable. Por el contrario, para aperturas del cono grandes (ϕ=30º, valor típico, caso del LIDAR modelo *Zephyr Z300 de Natural Power*®) el tamaño del deflector móvil crece rápidamente (l_{E_2}=250-360 cm).

Se observa que uno de los principales inconvenientes de utilizar el sistema de periscopio presentado es el enorme tamaño que puede llegar a alcanzar el deflector móvil para las aperturas típicas del cono LIDAR de sondeo.

En consecuencia, si el sistema de compensación debe trabajar con aperturas de cono

superiores a los 5º, es preciso utilizar longitudes de periscopio ($R = R_1 + R_2$, donde $R_1 = \overline{OO_1}$ y $R_2 = \overline{O_1O_2}$ en la figura 5B) menores, esto es, un camino óptico más corto.

Para disminuir el camino óptico una primera opción es -como se ha visto en la primera realización, disponer el LIDAR horizontalmente y utilizar un sólo deflector –el móvil-. Cuando el LIDAR se dispone verticalmente, una estrategia para reducir la *longitud del camino óptico* dentro del periscopio es utilizar un subsistema óptico auxiliar adecuado que evite que el cono se vaya abriendo conforme se recorre el camino óptico, conforme se indica en una tercera realización de la invención (figura 6).

(ii) Cálculo del tamaño de los deflectores del sistema óptico de compensación

Se formulan a continuación las relaciones matemáticas que permiten calcular el tamaño de los deflectores del sistema de compensación para las dos realizaciones arriba presentadas. Tal y cómo se ha descrito, la primera realización consiste en un sistema LIDAR dispuesto horizontalmente y un único deflector móvil (4) como el mostrado en la figura 4B.

La segunda realización consiste en un LIDAR dispuesto verticalmente, un deflector fijo (E1) a 45º y un deflector móvil (E2) a modo de periscopio, tal y como se muestra en la figura 5B.

Estos dos ejemplos pueden calcularse a partir de la geometría de la figura 7. Si bien la figura que proyecta un cono de luz sobre los deflectores es una elipse, para simplificar, se han utilizado deflectores circulares en los ejemplos de realización. Con todo, la formulación que se presenta no es exclusiva de los ejemplos presentados.

La figura 7 muestra el cono LIDAR de sondeo a su paso por los deflectores E1 (primer deflector) y E2 (segundo deflector; considérese, por ejemplo, la realización de la figura 5), orientados de forma que el sistema de compensación ha compensado una rotación en pitch de la plataforma.

En la figura 7 se han desdoblado los caminos ópticos de los rayos que definen el cono, así como el eje óptico del sistema. El eje óptico del sistema emerge del origen O hacia el centro del primer deflector O_1 a través de la vertical de la plataforma móvil (eje Z').

En el tramo $\overline{O_1O_2}$ definido por los deflectores fijo (E1) y móvil (E2), el eje óptico del sistema es paralelo al eje horizontal de la plataforma (eje X'). Este cambio de dirección viene dado por la reflexión del eje óptico en el deflector fijo. Finalmente, el eje óptico que emerge del segundo deflector hacia el exterior lo hace en Z (vertical del sistema coordenado fijo). Para la estimación del tamaño de los deflectores la única rotación relevante es la de pitch ya que tal y cómo se muestra en la figura 4B el tamaño del deflector móvil (4) no se ve afectado cuando éste rota en roll. Esto es debido a que la proyección del cono LIDAR de sondeo sobre el deflector es invariante en roll.

Partiendo de la figura 7 el tamaño del primer deflector l_{E1} se calcula como la suma de los segmentos $\overline{O_1B_1}$ y $\overline{O_1B_2}$, correspondientes al eje mayor de la elipse. Esto es, la longitud geométrica

$$l_{E_1} = \overline{O_1B_1} + \overline{O_1B_2}\,, \qquad \text{Ec. [15]}$$

Donde O_1 es el punto de intersección del eje óptico con el primer deflector, y B1 y B2 los puntos de intersección del cono LIDAR con el deflector. Notando que

$$\overline{O_1B_1} = \overline{O_1A_1}\sec\gamma_1' \text{ y } \overline{O_1B_2} = \overline{O_1A_2}\sec\gamma_1' \qquad \text{Ec. [16]}$$

se calculan a continuación las longitudes de los segmentos $\overline{O_1A_1}$ y $\overline{O_1A_2}$ como

$$\begin{cases} \tan\phi = \dfrac{\overline{A_1B_1}}{R_1 - \overline{O_1A_1}} = \dfrac{\overline{O_1A_1}\tan\gamma_1'}{R_1 - \overline{O_1A_1}} \Rightarrow \overline{O_1A_1} = \dfrac{R_1\tan\phi}{\tan\gamma_1' + \tan\phi} \\ \tan\phi = \dfrac{\overline{A_2B_2}}{R_1 + \overline{O_1A_2}} = \dfrac{\overline{O_1A_2}\tan\gamma_1'}{R_1 + \overline{O_1A_2}} \Rightarrow \overline{O_1A_2} = \dfrac{R_1\tan\phi}{\tan\gamma_1' - \tan\phi} \end{cases}, \qquad \text{Ec. [17]}$$

donde $R_1 = \overline{OO_1}$ es la distancia entre el foco del cono y el primer deflector, ϕ es la apertura del cono, y γ_1' es el ángulo de inclinación del deflector con respecto al eje Z'.

Sustituyendo las ecuaciones [16] y [17] en [15], se obtiene la expresión buscada para el cálculo del tamaño del primer deflector,

$$l_{E_1} = R_1 \sec\gamma_1' \tan\phi \left(\frac{1}{\tan\gamma_1' + \tan\phi} + \frac{1}{\tan\gamma_1' - \tan\phi} \right). \qquad \text{Ec. [18]}$$

En el primer ejemplo de realización, el primer deflector es móvil y, en consecuencia, γ_1' viene dado por la ecuación [4]. Esta sustitución matemática permite extender la aplicabilidad de la ecuación [18] también al primer ejemplo de realización. En la segunda realización el primer deflector E1 se considera fijo a 45º, con lo cual se toma $\gamma_1' = 45^o$.

Para calcular el tamaño del segundo deflector (E2) en la figura 7 basta con substituir en la ecuación [18] el ángulo de inclinación del primer deflector, γ_1', por el del segundo deflector, γ_2, y la distancia $R_1 = \overline{OO_1}$ por $R_1 + R_2$ (con $R_2 = \overline{O_1O_2}$). El tamaño del segundo deflector resulta, por tanto,

$$l_{E_2} = (R_1 + R_2) \sec\gamma_2 \tan\phi \left(\frac{1}{\tan\gamma_2 + \tan\phi} + \frac{1}{\tan\gamma_2 - \tan\phi} \right). \qquad \text{Ec. [19]}$$

Las sustituciones arriba indicadas son válidas en tanto en cuanto el primer deflector (E1) sea fijo con respecto a la plataforma (esto es γ_1' igual a un valor constante, por ejemplo, 45º como se ha visto en el segundo ejemplo de realización).

A título ilustrativo, la figura 8 representa los tamaños mínimos de los deflectores E1 y E2 (l_{E_1} y l_{E_2} en las ecuaciones [18] y [19], respectivamente) para el segundo ejemplo de realización en función del ángulo de inclinación en pitch de la plataforma α. En las figuras 8A y 8B se ha representado con círculos el tamaño del deflector E1 y con cuadrados el tamaño del deflector E2.

Los parámetros de simulación se indican en la descripción de la figura 8. Se observa que el tamaño del primer deflector l_{E_1} no depende de la inclinación de la plataforma al haberse elegido $\gamma_1' = 45º$. Por el contrario, el tamaño del deflector móvil (E2) crece conforme lo hace la inclinación en pitch de la plataforma.

Análogamente, la figura 8 representa el tamaño de los deflectores en función de la apertura del cono LIDAR para el caso más desfavorable correspondiente a un ángulo máximo de pitch $\alpha = 30º$. Para aperturas superiores a aproximadamente 10º el tamaño de los deflectores crece sobremanera por lo que es recomendable utilizar un subsistema óptico auxiliar que reduzca el camino óptico $R = R_1 + R_2$, siendo la tercera realización –que sigue a continuación- una posible realización alternativa a la segunda realización.

Ejemplo con un deflector móvil y un subsistema óptico auxiliar. LIDAR dispuesto verticalmente

Finalmente, en este tercer ejemplo de realización mostrado en la figura 6 se utiliza el LIDAR emitiendo en vertical, un deflector móvil (4) análogo al descrito en la primera realización, y un subsistema óptico auxiliar (22) formado por un deflector fijo a 45º (22c, 22d) y un conjunto de lentes (22a, 22b, 22e) para la colimación/focalización del cono LIDAR de sondeo.

En esta realización práctica el término “lente” ha de ser tomado en sentido amplio, pudiendo considerarse en todo caso como cualquier elemento refractivo.

En esta figura se emplean las siguientes referencias numéricas, indicativas de las partes que componen el sistema en esta realización. Los elementos (4) a (21) son idénticos a los descritos en la sección “*Ejemplo de realización con un deflector móvil y el LIDAR dispuesto horizontalmente”.*

(1) Sistema Lidar.

(1a) Láser de diodo.

(1b) Prisma en cuña.

(2) Cono Lidar de sondeo antes de la deflexión.

(3) Cono Lidar de sondeo después de la deflexión

(4) Deflector móvil.

(5) Vector normal al deflector.

(6) Plano perpendicular al eje de rotación en “pitch”.

(7) Plano perpendicular al eje de rotación en “roll”.

(8) Sistema coordenado fijo (XYZ).

(9) Sistema coordenado móvil (X’Y’Z’).

(10) Conjunto actuador-sensor inclinómetro solidario con la rótula (17) y que actúa en el ángulo de “pitch”.

(11) Subsistema de engranajes con relación 2:1.

(12) Eje de rotación (“pitch”) de la rótula interior.

(13) Montura del deflector móvil a 45º (giratoria en “pitch”).

(14) Conjunto actuador-sensor inclinómetro solidario con el perfil en “L” (18) y que actúa en el ángulo de “roll”.

(15) Subsistema de engranajes con relación 1:1.

(16) Eje de rotación (“roll”) de la rótula exterior.

(17) Rótula exterior giratoria en el eje de “roll”.

(18) Perfil en “L” para la fijación de la doble rótula sobre la plataforma.

(19) Pletinas solidarias a la montura del deflector móvil y rótula interior en el eje de “pitch”.

(20) Rodamiento de bolas en el eje de “pitch”.

(21) Rodamiento de agujas en el eje de “roll”.

(22) Subsistema óptico deflector.

(22a) Lente convergente.

(22b) Lente divergente

(22c) Montura del deflector fijo a 45º.

(22d) Deflector Fijo.

(22e) Lente convergente.

Este subsistema óptico permite trasladar la apertura numérica del cono que emerge en vertical del plano del prisma rotativo en cuña (1b) o plano de referencia, al plano de la lente (22e) del cual emerge horizontalmente, siendo ésta una situación análoga a la de la primera realización. La focal de la lente (22e) es tal que la apertura del cono emitido es aproximadamente la misma que la del cono que se emite (2).

El subsistema óptico permite colimar el cono LIDAR de sondeo en buena parte del recorrido óptico hacia el deflector móvil (4). Las lentes (22a) y (22b) se encargan de colimar el haz dentro del subsistema óptico de forma que entre las lentes (22b) y (22e) y, en particular, a su paso por el deflector fijo (22d), se tiene un haz colimado. Se evita de esta forma que el cono de sondeo a la salida del elemento (2) se vaya abriendo progresivamente hasta alcanzar el deflector móvil (4), motivando tamaños de deflectores inasumibles técnica o económicamente.

Nótese que para la tercera realización, las distancias R_1 y R_2 en Fig. 7, ya no representan las distancias entre el vértice del cono LIDAR de sondeo y el deflector fijo (E1), y entre el deflector fijo y el móvil (E2), respectivamente, sino la longitud neta de camino óptico definida como la suma de las longitudes de los caminos ópticos en los que el cono se va abriendo (es decir, los tramos de camino óptico que el cono recorre colimadamente no contribuyen a la longitud neta).

A diferencia de la segunda realización, la presente realización resulta muy conveniente en sistemas LIDAR pulsados, ya que contrariamente a los sistemas LIDAR CW la radiación no se enfoca a la distancia donde se localiza el volumen atmosférico de medida de la velocidad del viento. Esto hace que la modificación de distancias de enfoque por parte de lentes no afecte a los planos de observación del instrumento LIDAR.

REIVINDICACIONES

1 – Sistema de estabilización para la compensación del movimiento angular en plataformas LIDAR móviles caracterizado porque comprende, al menos, un LIDAR (1) y un deflector móvil (4, E2) configurado para mantener el apuntamiento del LIDAR (1) en una dirección dada mediante un mecanismo de compensación angular (10 a 21) controlado por unos sistemas electrónicos de control que comprenden, a su vez, al menos un sensor de actitud, dicho mecanismo de compensación angular comprende un elemento fijo (18) que sujeta una rótula giratoria (17), de tal forma que un saliente del elemento fijo (18) constituye un primer eje (16) encastado en la citada rótula giratoria (17) y configurado para compensar las rotaciones en roll; y que además comprende un segundo eje (12), ortogonal al primer eje (16) e igualmente encastado en la rótula giratoria (17), de tal forma que dicho segundo eje (12) es el encargado de compensar las rotaciones en pitch; y donde el segundo eje (12) se encasta, a su vez, en dos pletinas (19) solidarias con la montura (13) del deflector móvil (4), que es giratoria en pitch.

2 – Sistema de acuerdo con la reivindicación 1 que para transmitir el movimiento del conjunto actuador-sensor inclinométrico (10,14) hacia la montura giratoria en pitch (13) y la rótula giratoria en roll (17) incorpora dos juegos de engranajes (11,15), de tal forma que para el juego de engranajes (11), la relación de transmisión entre el engranaje emplazado en el eje del motor de pitch (10) y el emplazado en el eje de pitch (12) es una relación 2:1; para el juego de engranajes (15), el engranaje emplazado en el eje del motor de roll (14) y el engranaje del eje de rotación en roll (16) mantienen una relación de transmisión 1:1.

3 – Sistema de acuerdo con la reivindicación 2 dónde la relación de transmisión de movimiento del conjunto actuador-sensor inclinométrico (10,14) hacia la montura giratoria en pitch (13) y la rótula giratoria en roll (17) se realiza mediante los sistemas electrónicos de control.

4 – Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 2-3 donde cada eje (12,16) comprende un módulo inclinométrico formado por un sensor de actitud, un actuador/motor y un sistema electrónico de control, de tal forma que los módulos inclinométricos en pitch (10) y en roll (14) se mueven solidaria y respectivamente con la rótula giratoria (17) y el elemento fijo (18) en base a las ecuaciones angulares de diseño que calculan los ángulos de deflexión en pitch y en roll para mantener el apuntamiento del LIDAR en una dirección dada a lo largo del tiempo (dirección habitualmente cénit o nadir).

5 – Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4 donde el LIDAR (1) está dispuesto horizontalmente respecto del eje de la plataforma móvil.

6 – Sistema de acuerdo con la reivindicación 5 que comprende un único deflector móvil (4).

7 – Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4 que comprende un LIDAR (1) dispuesto verticalmente.

8 – Sistema de acuerdo con la reivindicación 7 que comprende un deflector móvil (E2) y un subsistema óptico auxiliar.

9 – Sistema de acuerdo con la reivindicación 7 que comprende un deflector fijo (E1) y un deflector móvil (E2).

10 – Sistema de acuerdo con la reivindicación 8 donde el subsistema óptico auxiliar comprende un deflector fijo a 45º (22d) y un conjunto de elementos refractivos (22a, 22b, 22e).

11 – Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8-10 donde la focal de la lente (22e) es tal que la apertura del cono de emisión LIDAR emitido es aproximadamente la misma que la apertura del cono de sondeo LIDAR que se emite (2).

12 – Sistema de acuerdo con las reivindicaciones 8-11 que comprende un colimador formado por dos primeras lentes (22a, 22b) de forma que entre unas segundas lentes (22b, 22e) y a su paso por el deflector fijo (22d), se obtiene un haz óptico colimado.

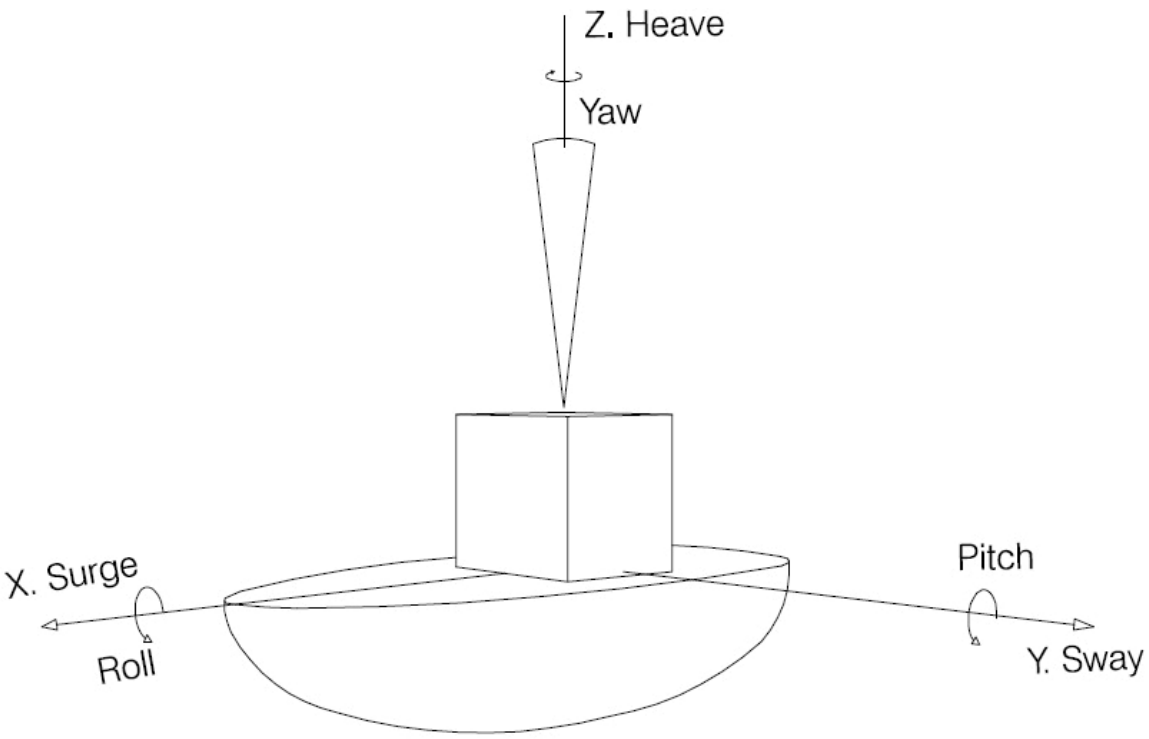

FIG. 1

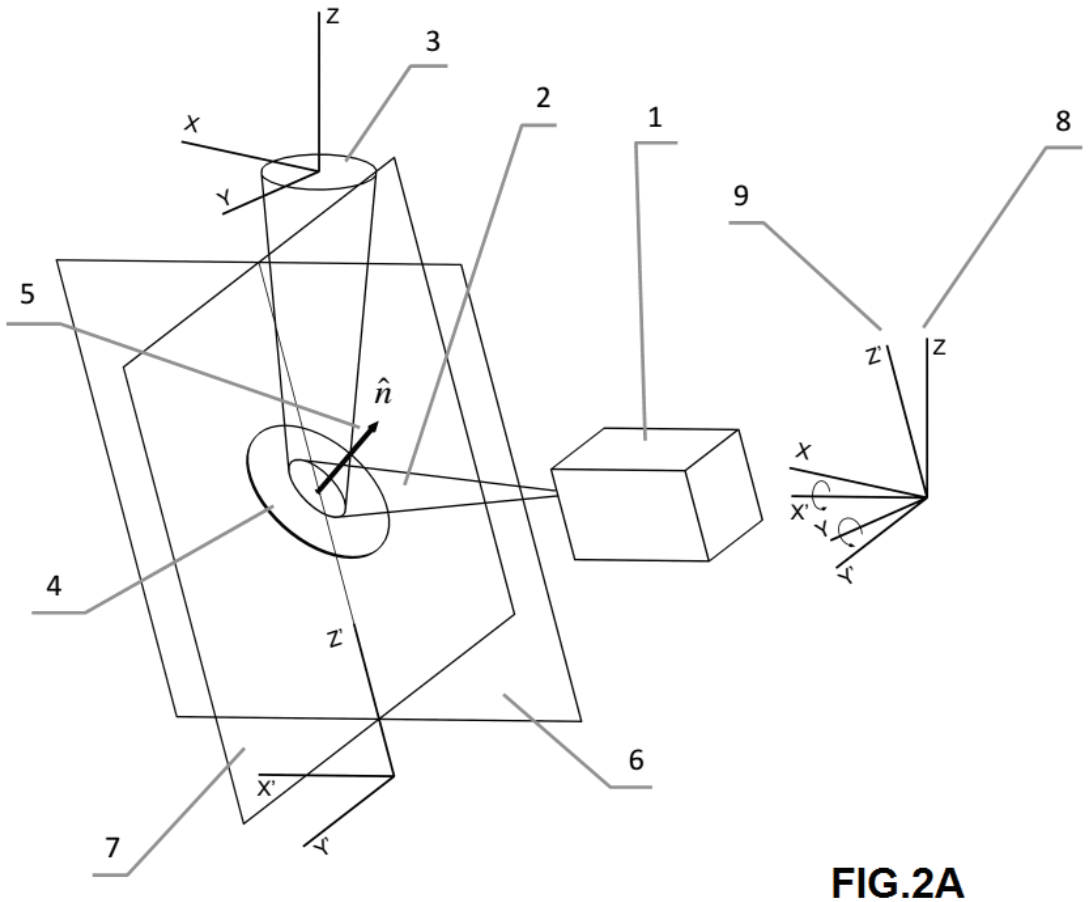

FIG.2A

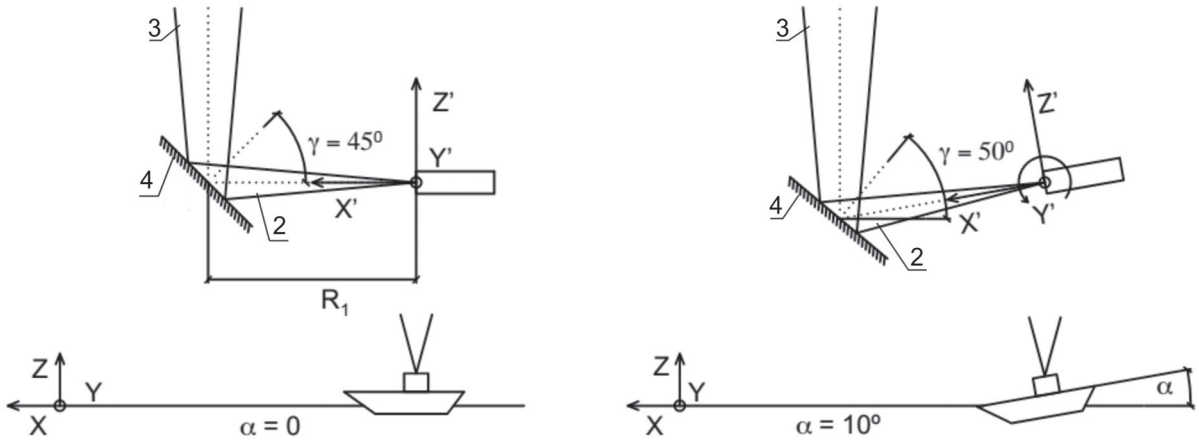

FIG.2B

FIG.2

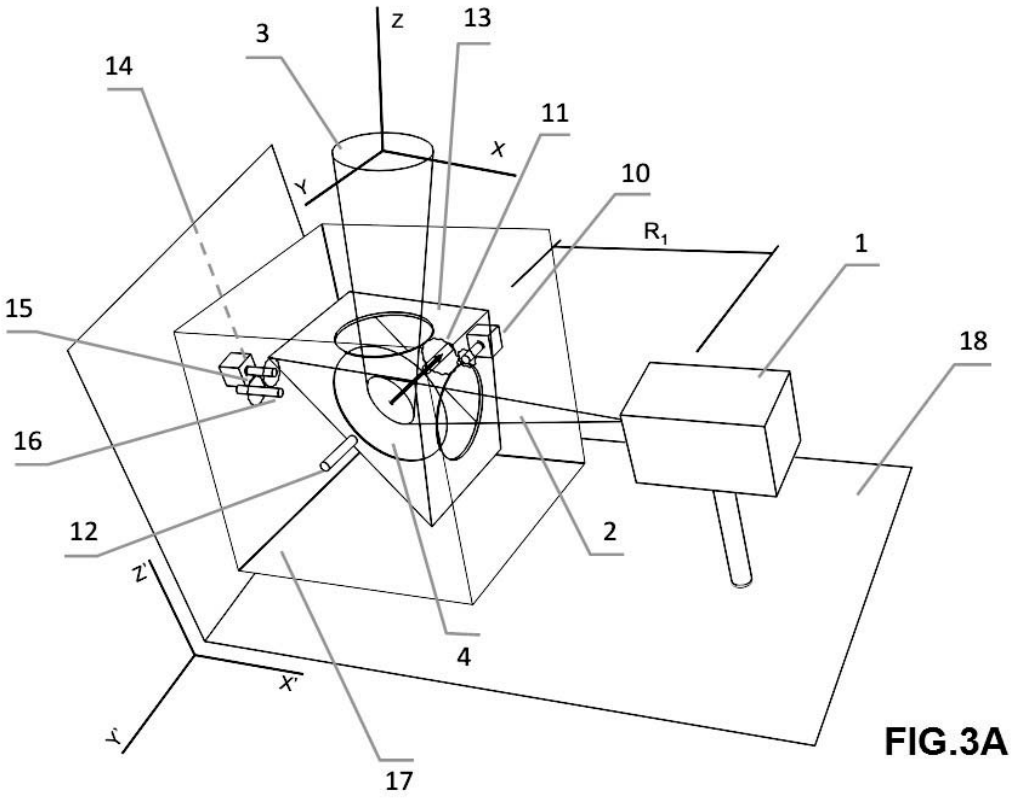

FIG.3A

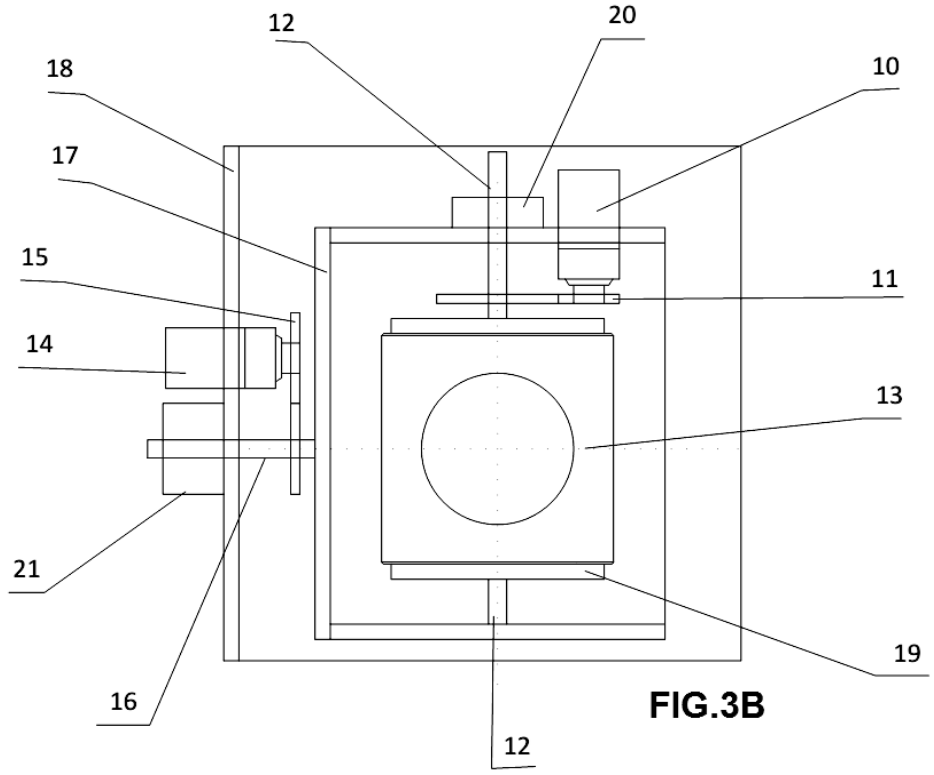

FIG.3B

FIG.3

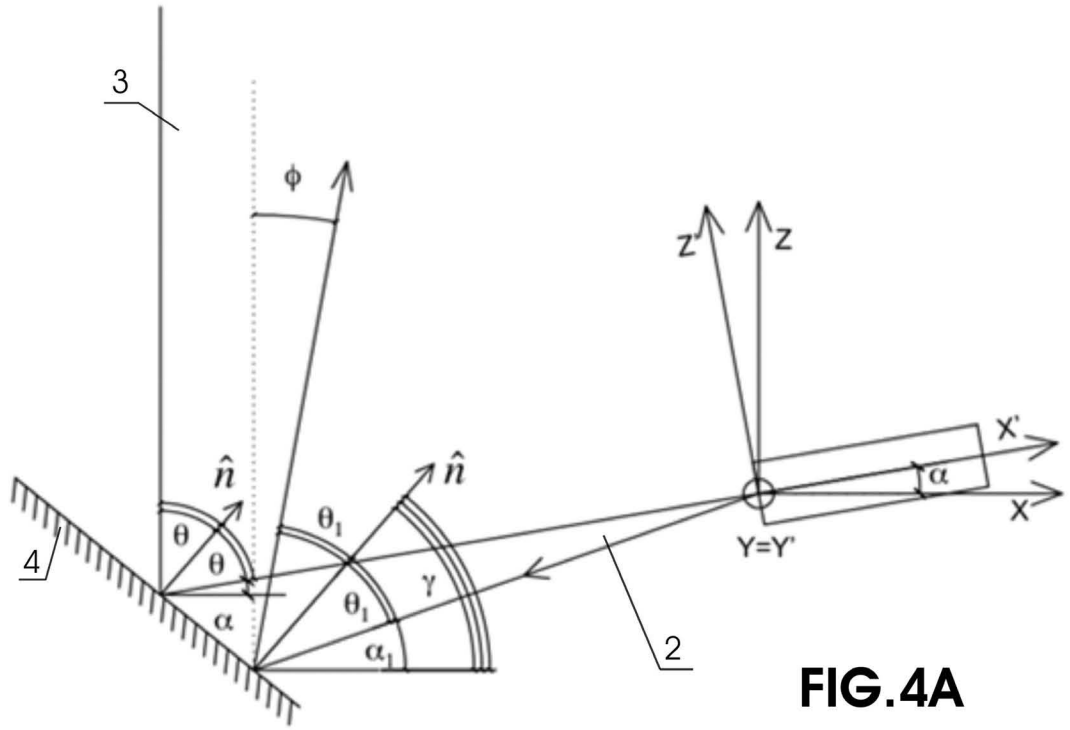

FIG.4A

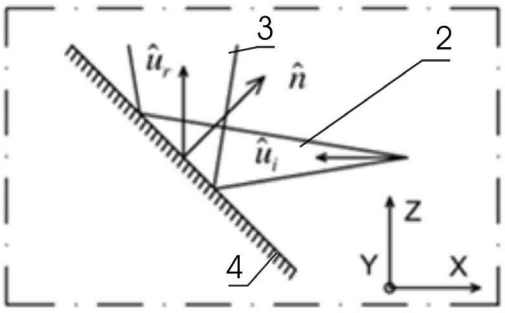

FIG.4B

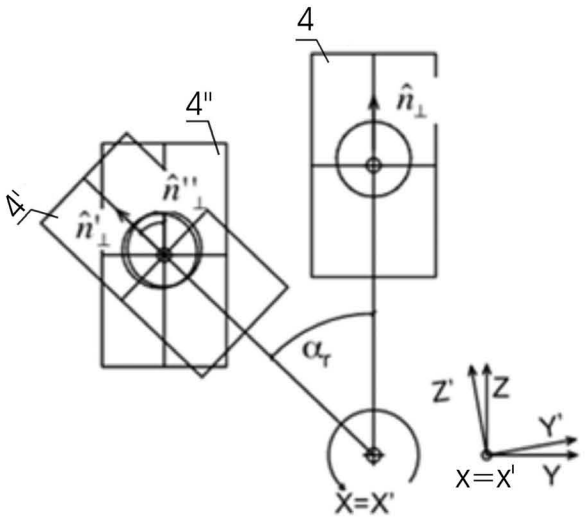

FIG.4C

FIG.4

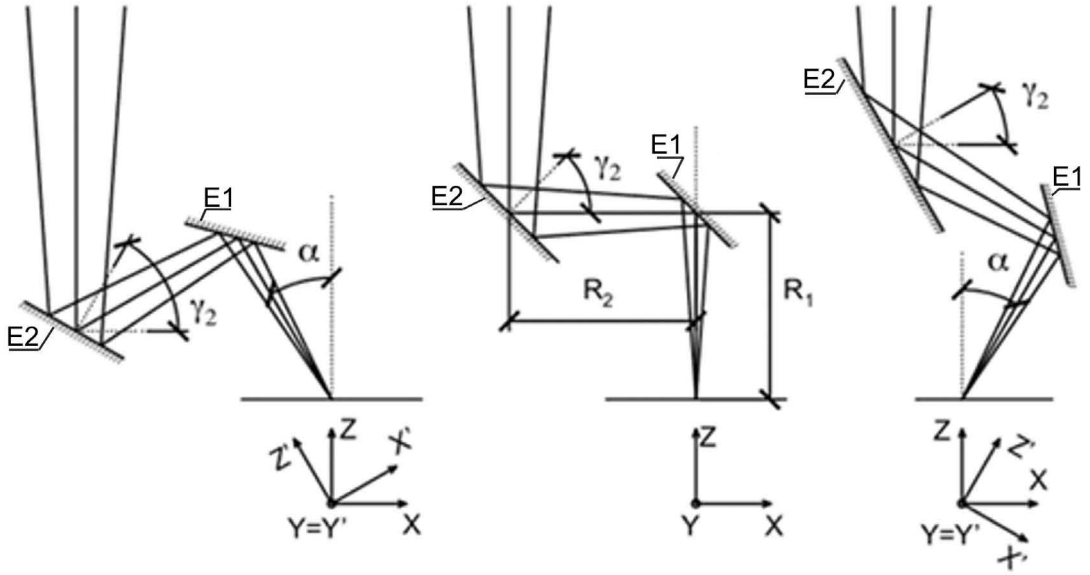

FIG.5A

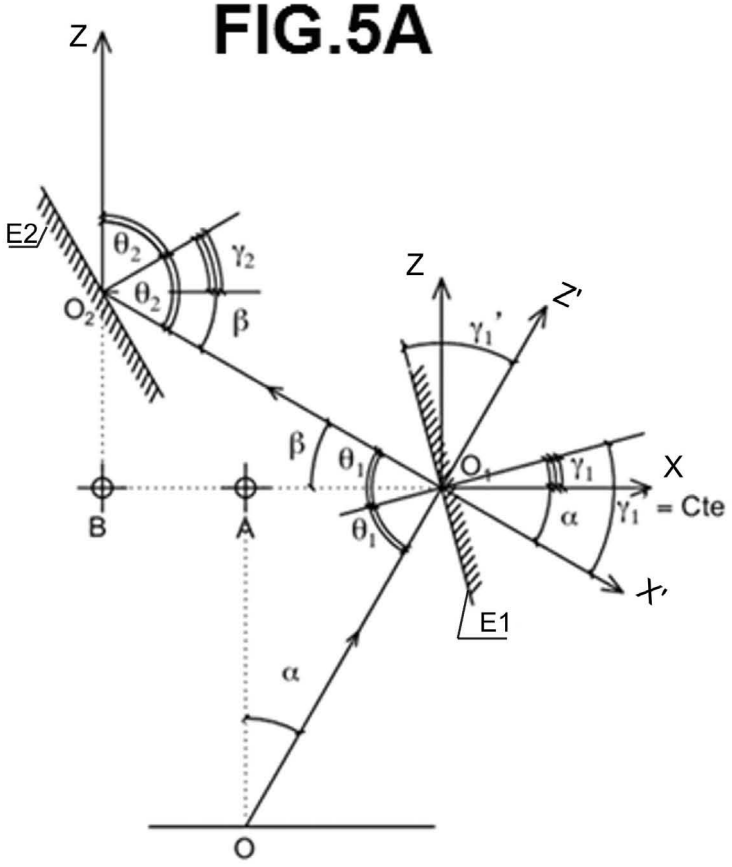

FIG.5B

FIG.5

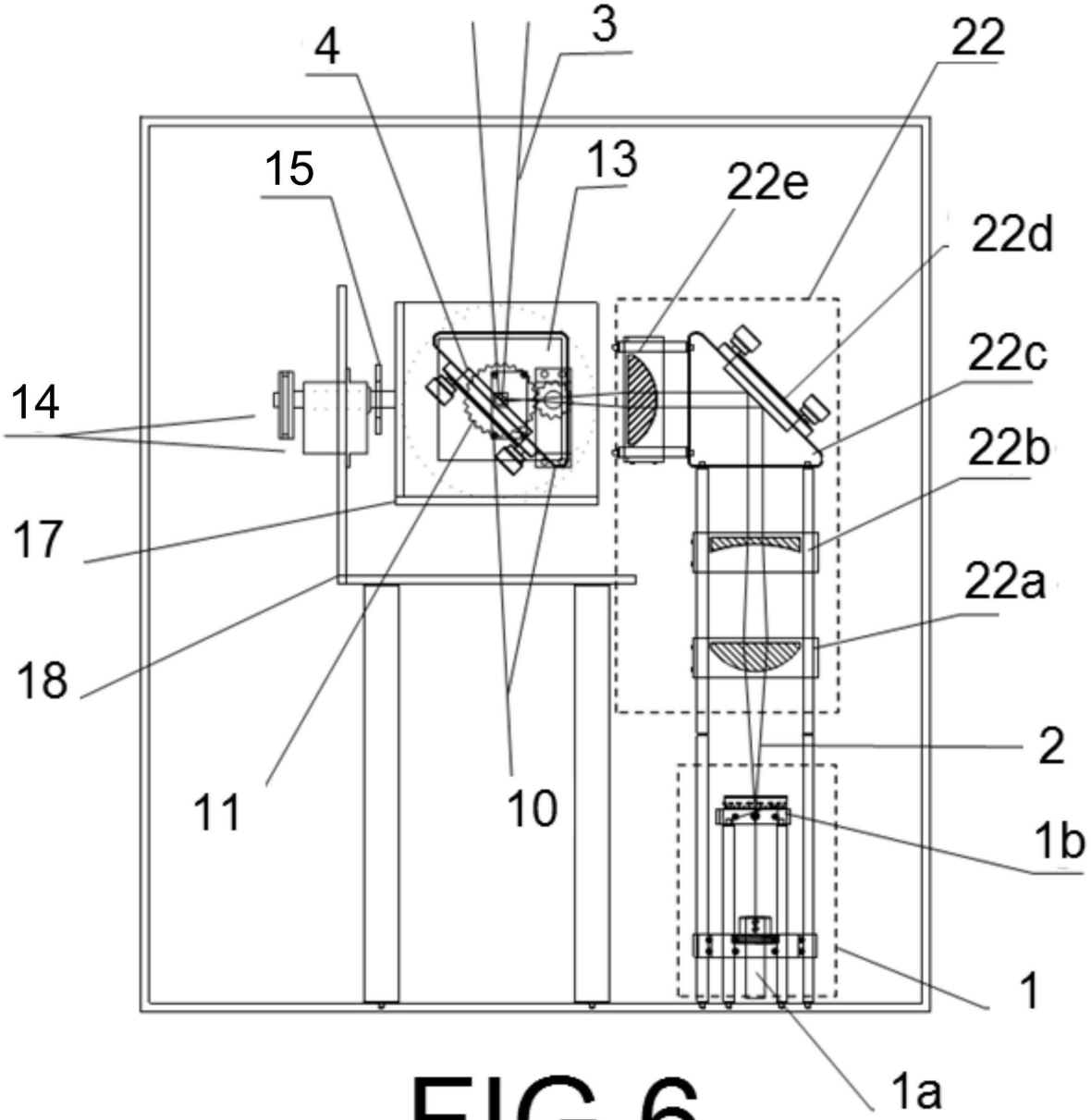

FIG.6

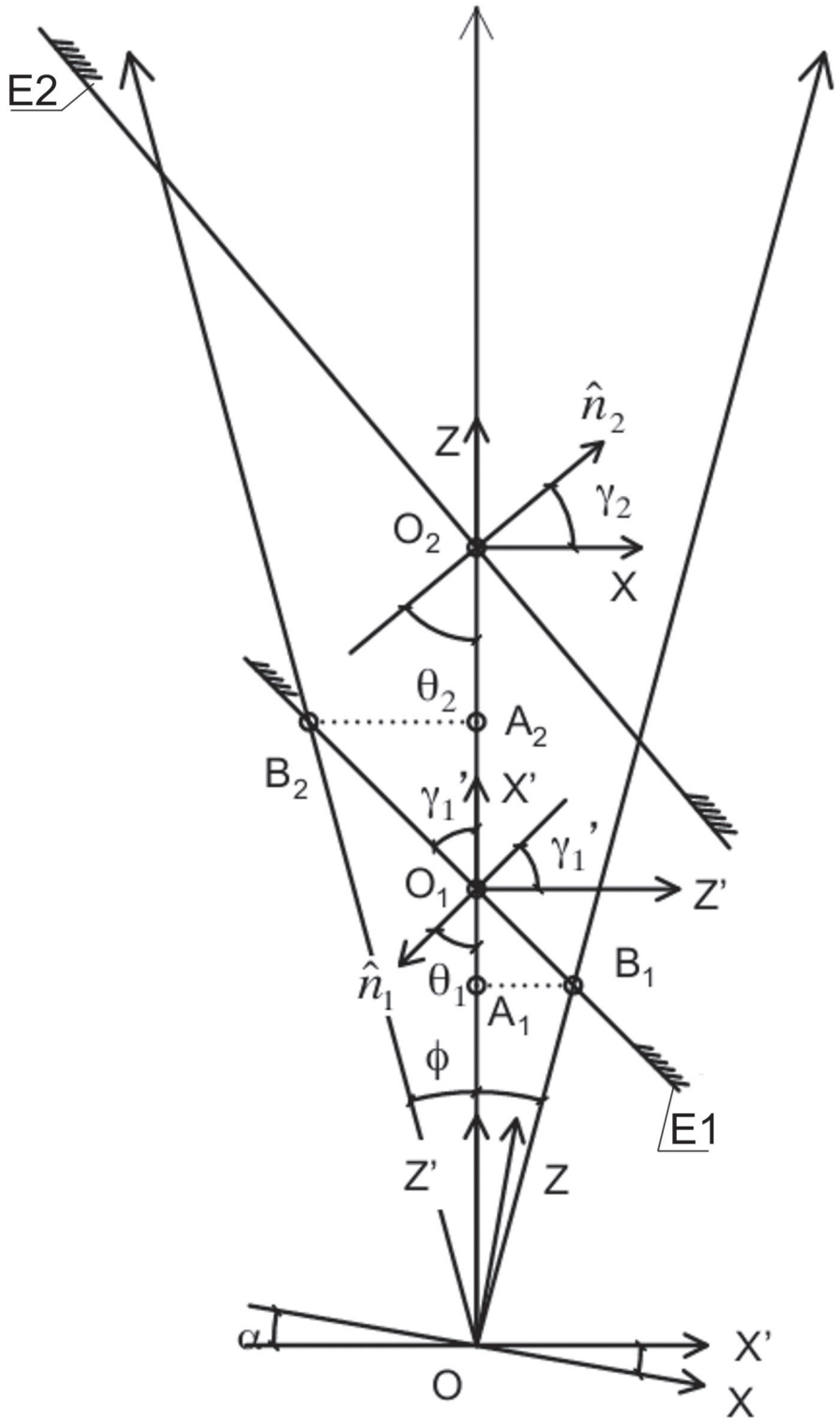
E2
Z
$\hat{n}_2$
γ_2
O_2
X
θ_2
A_2
B_2
γ_1'
X'
γ_1'
O_1
Z'
$\hat{n}_1$
θ_1
B_1
A_1
ϕ
E1
Z'
Z
α
X'
O
X

FIG.7

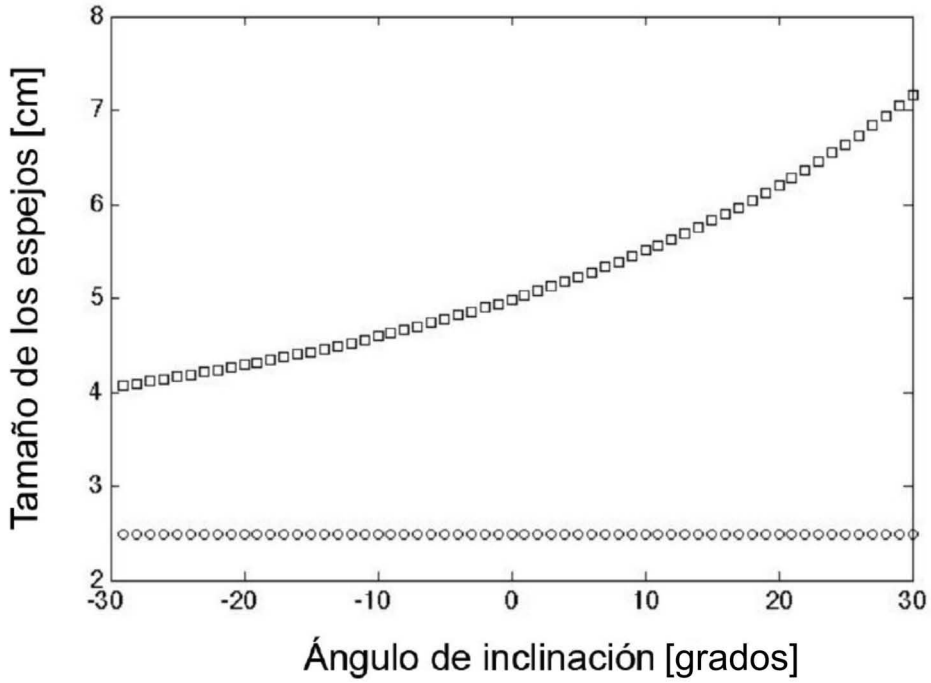

FIG 8A

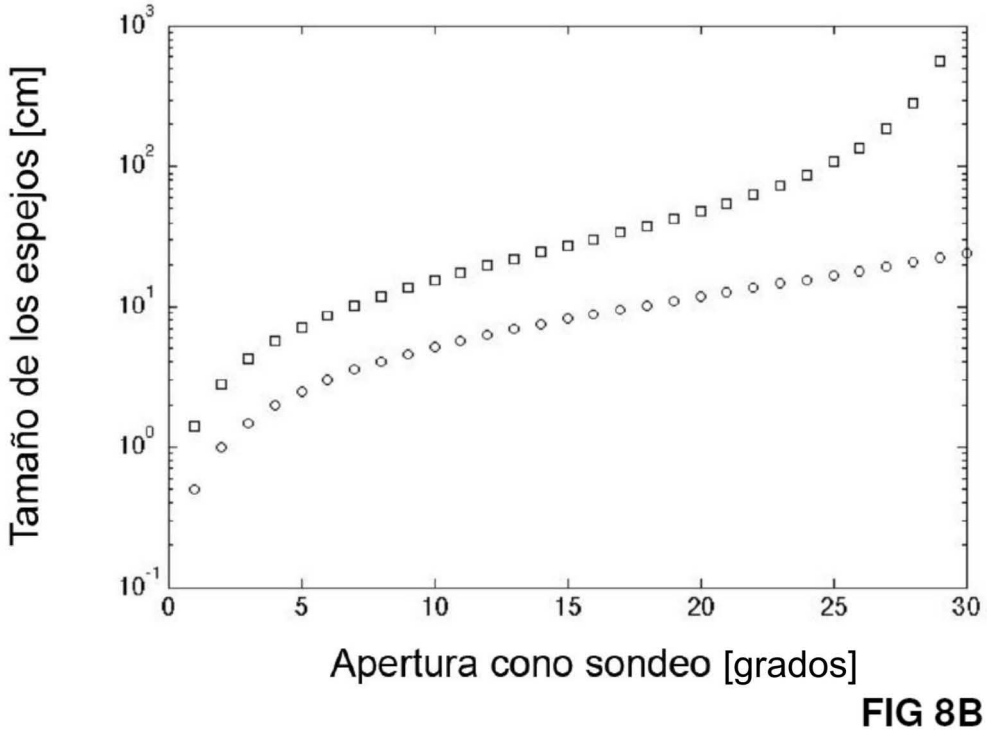

FIG 8B

FIG 8