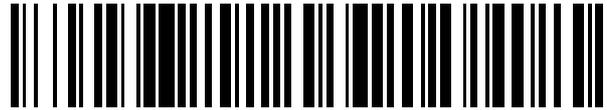


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 430 542**

51 Int. Cl.:

G01J 3/02 (2006.01)

G01J 3/45 (2006.01)

G01J 3/453 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.08.2010 E 10747222 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.07.2013 EP 2473824**

54 Título: **Interferómetro de compensación de campo**

30 Prioridad:

04.09.2009 FR 0956051

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
21.11.2013

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES
(50.0%)
2 Place Maurice Quentin
75001 Paris, FR y
THALES (50.0%)**

72 Inventor/es:

**BUIL, CHRISTIAN;
BUFFET, LAURENCE;
BELON, BRUNO;
DEGRELLE, CYRIL;
BUISSET, CHRISTOPHE y
SIMEONI, DENIS**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 430 542 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

Interferómetro de compensación de campo.

- 5 La invención se refiere a un interferómetro y a un procedimiento de interferometría en el campo de los interferómetros de Transformada de Fourier con dos espejos. Más precisamente, la invención se refiere a la compensación del campo de este tipo de instrumento.

Estado de la técnica

- 10 Los interferómetros de Transformada de Fourier con dos espejos (designados asimismo según la expresión anglosajona "FTS", por "Fourier Transform Spectrometer") se utilizan comúnmente en interferometría, y conocen en particular unas aplicaciones en espectrometría, como por ejemplo la espectrometría infrarroja.
- 15 En este tipo de instrumento, unos haces luminosos distintos, procedentes de la separación de un haz luminoso incidente, recorren unos caminos ópticos diferentes en unas porciones del interferómetro, denominadas asimismo "brazos" del interferómetro, generalmente en número de dos.
- 20 La recombinación de los haces distintos permite obtener entonces un interferograma, medido por un detector, que resulta de la diferencia de camino óptico entre dichos haces.
- Una diferencia de camino óptico variable se crea generalmente desplazando en el brazo del interferómetro uno o varios dispositivos ópticos mecánicamente móviles.
- 25 Se conoce a partir del documento EP 0 957 346 un interferómetro que permite generar una diferencia de camino óptico variable entre unos rayos luminosos que atraviesan dicho interferómetro, por translación de un dispositivo óptico mecánicamente móvil.
- 30 El documento US nº 5.131.747 describe un interferómetro que comprende un dispositivo óptico constituido por prismas unidos entre sí.
- El artículo titulado "Michelson wide-field stellar interferometry: principles and experimental verification", de Montilla *et al.* (20 de enero de 2005) describe un interferómetro que comprende un espejo en escalera para la introducción de una diferencia de camino óptico variable en función del ángulo de incidencia.
- 35 Por último, el documento 2003/0103209 describe un interferómetro de Transformada de Fourier.
- Un criterio fundamental para examinar las prestaciones de un interferómetro es su resolución espectral, es decir su capacidad para separar sin ambigüedad dos elementos espectrales contiguos.
- 40 La resolución espectral es tan elevada como elevada es la diferencia de camino óptico creada entre los brazos del interferómetro. En particular, la finura espectral es igual a la inversa de la diferencia de camino óptico creada entre los brazos del interferómetro.
- 45 Sin embargo, el aumento de la diferencia de camino óptico está sometido a ciertas limitaciones en los instrumentos de la técnica anterior.
- 50 Cuando los haces luminosos incidentes presentan un ángulo de campo θ no nulo con respecto al eje óptico del interferómetro, que resulta del campo angular de la escena observada (por ejemplo, una zona de la superficie de la Tierra), dichos haces recorrerán un camino óptico de longitud diferente con respecto a los haces luminosos incidentes a nivel del eje óptico, que presentan, a su vez, un ángulo de campo θ nulo.
- 55 La diferencia de camino óptico real δ es entonces una función del ángulo de campo θ . En un interferómetro de tipo Michelson, la diferencia de camino óptico real δ , variable en función del ángulo de campo θ , se escribe $\delta = \delta' \cos(\theta)$, en el que δ' es la diferencia de camino óptico creada según el eje óptico por medio del dispositivo óptico móvil en los brazos del interferómetro, y θ es el ángulo de campo.
- 60 En consecuencia, cada haz luminoso incidente procedente de un punto del campo produce su propio interferograma, diferente de otro haz luminoso, lo cual desenfoca el interferograma medido por el detector y disminuye su contraste.
- 65 Cuanto más grande es la diferencia de camino óptico δ' creada entre los brazos del interferómetro por medio del dispositivo óptico móvil, más disminuirá el contraste con el campo, hasta anularse en ciertos casos.
- Este fenómeno es conocido por el experto en materia bajo el nombre de auto-apodización.
- La resolución espectral está por lo tanto limitada por la apertura angular del instrumento, es decir su campo de

visión.

5 Se ha representado en la figura 1 (tomada de "Chemical infrared fourier- transform spectroscopy", Peter R. Griffiths, John Wiley, London, New York, Sydney y Toronto, 1975, p. 127) un interferómetro según la técnica anterior, para intentar evitar los problemas antes citados, es decir para compensar la presencia de campo, que provoca una diferencia de camino óptico no deseada.

10 El interferómetro comprende una lámina separadora semi-reflectante 12, apta para separar el haz luminoso incidente 4, que presenta un ángulo de campo θ con respecto a un eje óptico de dicho interferómetro, hacia dos brazos 5, 6 del interferómetro, que comprenden cada uno un prisma 18, 19 de los cuales una de las superficies es reflectora. La diferencia de camino óptico entre los dos brazos 5, 6 del interferómetro se obtiene desplazando uno de los prismas 18 según el eje 20. La compensación de campo se obtiene gracias a la distancia sustancialmente constante recorrida en el prisma, sea cual sea el ángulo de visión.

15 Un inconveniente de esta solución es que utiliza unos haces paralelos, lo cual necesita para la compensación de campo unos prismas muy grandes, del tamaño de la pupila de entrada, lo cual acentúa el volumen del interferómetro.

20 Otro inconveniente de esta solución es que sufre problemas de cromatismo debidos al paso de prismas muy gruesos por el haz luminoso.

25 Otro inconveniente también se refiere al desplazamiento del prisma, pesado y voluminoso, que se realiza en grandes distancias (del orden de 5 cm), lo cual plantea unos problemas fundamentales de posicionamiento y de mantenimiento del prisma a lo largo del eje de desplazamiento.

Presentación de la invención

La invención propone evitar por lo menos uno de estos inconvenientes.

30 Para ello, la invención propone un interferómetro de compensación de campo, que comprende un conjunto óptico apto para dirigir unos haces luminosos incidentes que presentan un ángulo de campo θ con respecto a un eje óptico del interferómetro hacia unos brazos del interferómetro, una lámina separadora, comprendiendo los brazos por lo menos un dispositivo óptico mecánicamente móvil para la creación de una diferencia de camino óptico variable entre unos haces procedentes de la separación de cada haz incidente por medio de dicha lámina separadora, estando dicho interferómetro caracterizado porque comprende por lo menos un elemento óptico de compensación del campo, dispuesto en uno u otro de los planos focales de imagen del conjunto óptico, conjugados con respecto a la lámina separadora, comprendiendo dicho elemento por lo menos una superficie curvada con el fin de crear una diferencia de camino óptico entre los haces incidentes que presentan un ángulo de campo no nulo y los haces incidentes, que presentan un ángulo de campo nulo, permitiendo la diferencia de camino óptico así creada compensar la autoapodización resultante del ángulo de campo.

La invención está ventajosamente completada por las características siguientes, consideradas solas o en cualquiera de sus combinaciones técnicamente posibles:

- 45 - el interferómetro comprende dos elementos ópticos de compensación del campo dispuestos respectivamente en cada uno de los dos planos focales de imagen del conjunto óptico, conjugados con respecto a la lámina separadora;
- 50 - la superficie del elemento óptico es curva en por lo menos uno de sus meridianos;
- el interferómetro comprende dos elementos ópticos, comprendiendo uno de los elementos una superficie curva sobre un primer meridiano, comprendiendo el otro de los elementos una superficie curva sobre un segundo meridiano, siendo dichos primero y segundo meridianos ortogonales;
- 55 - el elemento óptico es un espejo, comprendiendo dicho espejo una superficie curva reflectante sobre por lo menos uno de sus meridianos;
- la superficie curva reflectante de dicho espejo presenta un perfil mecánico continuamente curvado;
- 60 - la superficie curva reflectante de dicho espejo presenta un perfil mecánico compuesto por un conjunto discreto de superficies planas reflectantes;
- el interferómetro comprende unos medios de rotación de las superficies planas reflectantes;
- 65 - el elemento óptico es un espejo delgado y deformable por medio de un sistema de deformación;

- el sistema de deformación es un sistema piezoeléctrico;
- el interferómetro comprende una herramienta de metrología láser para el control del desplazamiento creado por los medios de desplazamiento o de la deformación creada por el sistema de deformación;
- el elemento óptico de compensación del campo es una lámina de vidrio delgada;
- el interferómetro comprende dos elementos ópticos de compensación del campo: una lámina de vidrio delgada y la lámina separadora, dispuestas en el plano focal de imagen del conjunto óptico.

La invención propone asimismo un procedimiento de interferometría de compensación de campo en un interferómetro, en el que un conjunto óptico dirige unos haces luminosos incidentes hacia los brazos del interferómetro, se desplaza el dispositivo óptico mecánicamente móvil para crear una diferencia de camino óptico entre los haces procedentes de la separación de cada haz incidente, cuya recombinación permite aplicar la interferometría, estando dicho procedimiento caracterizado porque comprende la etapa según la cual se desplazan en rotación las superficies planas reflectantes del espejo simultáneamente con el dispositivo óptico en un ángulo que compensa la diferencia de camino óptico creada por el desplazamiento de dicho dispositivo óptico.

La invención propone por último un procedimiento de interferometría de compensación de campo en un interferómetro, en el que un conjunto óptico dirige los haces luminosos incidentes hacia los brazos del interferómetro, se desplaza un dispositivo óptico mecánicamente móvil para crear una diferencia de camino óptico entre los haces procedentes de la separación de cada haz incidente, cuya recombinación permite aplicar la interferometría, estando dicho procedimiento caracterizado porque comprende la etapa según la cual se deforma la superficie del espejo delgada simultáneamente con el dispositivo óptico en una distancia que compensa la diferencia de camino óptico creada por el desplazamiento de dicho dispositivo óptico.

La invención presenta numerosas ventajas.

Una ventaja de la invención es que permite reducir e incluso anular la auto-apodización.

Otra ventaja de la invención es que propone una solución acromática.

Otra ventaja más de la invención es que permite reducir la dimensión de ciertos elementos ópticos críticos del instrumento con resolución espectral dada.

También otra ventaja de la invención es que permite aumentar el campo de visión del instrumento de resolución espectral dada.

Otra ventaja más de la invención es que permite aumentar la eficacia general del interferómetro, que puede ser definida como el producto de la resolución espectral por la luminosidad.

Por último, otra ventaja de la invención es que utiliza débiles desplazamientos de elementos ópticos para la compensación del campo.

Presentación de las figuras

Otras características, objetivos y ventajas de la invención destacarán de la descripción siguiente, que es puramente ilustrativa y no limitativa, y que debe ser leída en referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1, ya comentada, es un interferómetro según la técnica anterior;
- la figura 2 es una vista esquemática de un interferómetro de compensación de campo según la invención;
- la figura 3 es una vista en sección de un espejo para la compensación de campo;
- la figura 4 es una vista esquemática de otro modo de realización de un interferómetro de compensación de campo según la invención.

Descripción detallada

Se ha representado en la figura 2 un interferómetro 1 de compensación de campo según la invención.

El interferómetro 1 comprende un conjunto 2 óptico, apto para dirigir los haces luminosos incidentes 4, procedentes de la escena a observar, hacia unos brazos 5, 6 del interferómetro 1 para la creación de una diferencia de camino óptico que se describirá ulteriormente.

Este conjunto 2 óptico es generalmente un espejo esférico, o un espejo esférico, o un juego con varios espejos de diferentes tipos, sobre los cuales se reflejan los haces luminosos incidentes 4.

5 Puesto que la escena a observar por el interferómetro 1 no es en general un punto puntual, sino una zona más o menos extendida, ciertos haces luminosos incidentes 4 presentan un ángulo de campo θ no nulo con respecto a un eje óptico 23 del interferómetro 1, como se representa en la figura 2.

10 Los haces luminosos incidentes 4, que son paralelos al eje óptico 23 del interferómetro 1, presentan, a su vez, un ángulo de campo θ igual a cero.

Los haces luminosos incidentes 4, reflejados por el conjunto 2 óptico, encuentran entonces una lámina separadora semi-reflectante 12, que separa cada haz luminoso incidente 4 en dos haces luminosos de intensidad casi-idéntica.

15 Este tipo de lámina separadora se puede obtener, por ejemplo, depositando una capa fina de un compuesto metálico (tal como el aluminio) o dieléctrico, en la superficie de una lámina de vidrio.

20 La lámina separadora 12 permite por lo tanto separar cada haz luminoso incidente 4 en dos haces luminosos hacia los brazos 5, 6 del interferómetro, comprendiendo uno de los brazos 6 de manera clásica una lámina de vidrio delgada 11, conocida por el experto en la materia bajo el nombre de lámina compensadora.

Para poder crear un interferograma, es necesario que los haces luminosos, procedentes de la separación de cada haz luminoso incidente 4, recorran un camino óptico diferente en cada brazo 5, 6 del interferómetro.

25 Para ello, los brazos 5, 6 comprenden por lo menos un dispositivo 15, 16 óptico mecánicamente móvil, cuyo desplazamiento está indicado por unas flechas en la figura 2, que permiten crear una diferencia de camino óptico variable entre los haces procedentes de la separación de cada haz 4 incidente por la lámina separadora semi-reflectante 12.

30 Se pueden utilizar diversos tipos de dispositivos ópticos mecánicamente móviles para la creación de la diferencia de camino óptico variable.

35 En la figura 2, se ha representado una posible solución con dos dispositivos 15, 16 ópticos mecánicamente móviles. En esta solución, cada brazo 5, 6 comprende una esquina de cubo 15, 16 retro-reflectora que puede ser desplazada sobre un eje paralelo al eje óptico 23 del interferómetro 1. Los haces luminosos son colimados hacia las esquinas de cubo 15, 16 por medio de espejos 17, 21. Cada esquina de cubo 15, 16 es móvil sobre el eje óptico 23 según dos sentidos de desplazamiento, lo cual provoca según el sentido de desplazamiento un avance o un retraso en términos de diferencia de camino óptico.

40 Las esquinas de cubo retro-reflectoras 15, 16 pueden ser desplazadas utilizando dos mecanismos independientes, o utilizando un solo mecanismo con un movimiento pendular.

45 Evidentemente, es posible utilizar una solución en la que un solo dispositivo óptico mecánicamente móvil es común a los dos brazos 5, 6 del interferómetro 1. Se pueden, por ejemplo, solidarizar las dos esquinas de cubo 15, 16 colocándolas lado a lado de manera "pies contra cabeza", lo cual permite desplazar solamente un solo dispositivo óptico mecánicamente móvil.

Otra solución consiste en utilizar uno o varios espejos móviles en los brazos del interferómetro 1.

50 La presencia de por lo menos un dispositivo 15, 16 mecánicamente móvil permite por lo tanto crear una diferencia de camino óptico δ' , que se puede hacer variar desplazando el dispositivo 15, 16. El dispositivo mecánicamente móvil 15, 16 está típicamente desplazado en una distancia de algunos milímetros a algunos centímetros, con el fin de crear una diferencia de camino óptico δ' en el mismo intervalo.

55 La recombinación de los haces luminosos separados anteriormente por la lámina separadora semi-reflectante 12 y que presenta una diferencia de camino óptico, permite crear el interferograma, cuya intensidad está modulada periódicamente en función de la diferencia de camino óptico creada. Generalmente, y como se ha representado en la figura 2, la lámina separadora semi-reflectante 12 sirve también para la recombinación de los haces.

60 Como se ha expuesto anteriormente, en ausencia de un elemento óptico que permite compensar la diferencia de camino óptico debida al ángulo de campo θ con respecto al eje óptico 23 del interferómetro 1, es decir en presencia de auto-apodización, los haces incidentes que presentan un ángulo de campo θ no nulo y los haces incidentes que presentan un ángulo de campo θ nulo presentarán una diferencia de camino óptico diferente, variable en función de θ .

65 Así, en ausencia de compensación de campo, la diferencia de camino óptico real δ creada en el interferómetro 1 se escribe:

$$\delta = \delta' \cos(\theta)$$

5 La presencia del ángulo de campo θ introduce por lo tanto una diferencia de camino óptico expresada por el término "cos θ ".

Para compensar la diferencia de camino óptico que resulta del ángulo de campo θ , el interferómetro 1 de compensación de campo según la invención comprende en particular:

- 10 - por lo menos un elemento E óptico de compensación del campo, dispuesto en uno u otro de los planos focales de imagen del conjunto 2 óptico, conjugados con respecto a la lámina separadora 12, en el que el conjunto 2 óptico forma la imagen de la escena a observar,
- 15 - comprendiendo dicho elemento E por lo menos una superficie 9 curvada para crear una diferencia de camino óptico entre los haces incidentes que presentan un ángulo de campo θ no nulo y los haces incidentes que presentan un ángulo de campo θ nulo, que compensa la diferencia de camino óptico resultante del ángulo de campo θ .

20 Los planos focales de las imágenes del conjunto 2 óptico en los que está dispuesto el elemento óptico E son conjugados con respecto a la lámina separadora, lo cual significa que estos planos focales son imágenes el uno del otro con respecto a la lámina separadora, como se representa en la figura 2.

25 En un modo de realización ventajoso de la invención, y como se describirá a continuación, el interferómetro 1 comprende dos elementos E ópticos de compensación del campo dispuestos respectivamente en cada uno de los dos planos focales de imagen del conjunto 2 óptico, conjugados con respecto a la lámina separadora 12. El conjunto 2 óptico forma por lo tanto la imagen de la escena a observar sobre cada uno de estos dos elementos E ópticos de compensación del campo.

30 En un modo de realización de la invención, el elemento E óptico de compensación del campo es un espejo 7, 8 reflectante dispuesto sobre uno de los planos focales de las imágenes del conjunto 2 óptico conjugados con respecto a la lámina separadora 12.

35 El espejo 7, 8 comprende una superficie 9 reflectante curvada sobre por lo menos uno de sus meridianos 13, con el fin de crear una diferencia de camino óptico que compensa la diferencia de camino óptico debida al ángulo de campo θ .

Así, la curvatura de la superficie 9 reflectante se selecciona para introducir una diferencia de camino óptico de compensación δ_E que se escribe:

$$40 \quad \delta_E = \delta_0 (1 - \cos(\theta))$$

En esta ecuación, δ_0 es un parámetro libre, que depende de la curvatura que se da en la superficie 9 reflectante del espejo 7, 8.

45 En consecuencia, gracias al espejo 7, 8 que asegura la compensación del campo, la diferencia de camino óptico real δ creada en el interferómetro 1 se escribe ahora:

$$\delta = \delta' \cos(\theta) + \delta_0 (1 - \cos(\theta)) \Leftrightarrow \delta = \delta_0 + (\delta' - \delta_0) \cos(\theta)$$

50 La compensación del campo es total cuando el dispositivo 15, 16 óptico mecánicamente móvil está desplazado para crear una diferencia de camino óptico δ' igual a δ_0 , ya que, en este caso, la diferencia de camino óptico real no depende ya del ángulo de campo θ . El fenómeno auto-apodización está entonces anulado.

55 Para unas diferencias de camino óptico δ' diferentes de δ_0 , la compensación del campo se realiza asimismo, ya que el término "cos(θ)" está modulado por la diferencia " $\delta' - \delta_0$ ". En este caso, se reduce el fenómeno de auto-apodización.

La selección del valor δ_0 corresponde a la elección de una diferencia de camino óptico privilegiada δ_0 , para la cual la compensación del campo es total.

60 Como la resolución espectral crece con la diferencia de camino óptico creada por el dispositivo óptico 15, 16 mecánicamente móvil, es ventajoso seleccionar un valor elevado para δ_0 , lo cual permite aumentar la resolución espectral.

65 Según otro aspecto de la invención, es posible utilizar un elemento E óptico de compensación del campo cuya superficie 9 se modifica "en tiempo real" para introducir la diferencia de camino óptico $\delta_E(\theta, \delta') = \delta'(1 - \cos(\theta))$, siendo

esta solución descrita anteriormente. En este caso, el elemento E óptico de compensación del campo permite compensar totalmente el campo, es decir anular la auto-apodización, para todas las diferencias de camino óptico δ' creadas por medio del dispositivo 15, 16 mecánicamente móvil.

5 La curvatura de la superficie 9 reflectante sobre por lo menos uno de los meridianos 13 del espejo 7, 8 se puede realizar fabricando la superficie 9 del espejo 7, 8 de manera continua. En este caso, la superficie 9 del espejo 5, 6 posee un perfil mecánico continuamente curvado sobre por lo menos uno de sus meridianos 13, cuya curvatura describe la función $\delta_E = \delta_0(1-\cos(\theta))$.

10 Otra solución, representada en la figura 3, consiste en utilizar una superficie 9 curva reflectante que comprende un perfil mecánico compuesto por un conjunto discreto de superficies planas reflectantes (S_{θ_0} , S_{θ_1} , S_{θ_2} , etc.).

15 Así, los haces luminosos incidentes 4 que presentan un ángulo de campo próximo al valor θ_1 serán dirigidos por el conjunto 2 óptico sobre la superficie S_{θ_1} . Los haces luminosos incidentes 4 que presentan un ángulo de campo θ_0 nulo o casi nulo, es decir los haces luminosos 4 próximos al eje óptico del interferómetro 1, serán dirigidos sobre la superficie S_{θ_0} .

20 La superficie S_{θ_1} está inclinada con respecto a la superficie S_{θ_0} para crear una diferencia de camino óptico debida al ángulo de campo θ_1 no nulo.

Es el mismo caso para los haces luminosos incidentes 4 que presentan un ángulo de campo próximo al valor θ_2 , que estarán dirigidos sobre la superficie S_{θ_2} por el conjunto 2 óptico, que está inclinado con respecto a la superficie S_{θ_0} .

25 A título de ejemplo, la utilización de un perfil mecánico compuesto por un conjunto discreto de superficies planas reflectantes (S_{θ_0} , S_{θ_1} , S_{θ_2} , etc.) no permite describir exactamente la función $\delta_E = \delta_0(1-\cos(\theta))$, pero permite obtener ya una compensación del campo satisfactoria, en numerosas situaciones.

30 En la práctica, la utilización de tres superficies planas reflectantes (S_{θ_0} , S_{θ_1} , S_{θ_2}) es suficiente para compensar el campo de manera satisfactoria, es decir reducir la auto-apodización.

35 Por otra parte, como los haces luminosos incidentes 4 pueden presentar un ángulo de campo θ con respecto al eje óptico del interferómetro 1 en todas las direcciones del espacio, describiendo así un cono de revolución de ángulo en el vértice igual a θ alrededor del eje óptico 23 del interferómetro 1, los haces luminosos reflejados por el conjunto óptico 2 estarán desplazados linealmente sobre la superficie 9 del espejo 7, 8. Este desplazamiento se realiza en particular sobre la superficie 9 según las dos direcciones horizontales y verticales de dicha superficie 9.

40 Para poder compensar el campo en todas las direcciones del espacio, el espejo 7, 8 presenta ventajosamente una superficie 9 curvada sobre dos de sus meridianos, ortogonales entre sí. La curvatura puede ser realizada utilizando un perfil mecánico curvado de manera continua o discreta, como se ha expuesto anteriormente.

Otra solución ventajosa consiste en utilizar dos espejos 7, 8, dispuestos cada uno en uno de los brazos 5, 6 del interferómetro, como se ilustra en la figura 2. Los dos espejos 7, 8 están dispuestos respectivamente en cada uno de los dos planos focales de las imágenes del conjunto 2 óptico conjugados con respecto a la lámina separadora 12.

45 En este caso, es ventajoso utilizar uno de los dos espejos 7 que comprenden una superficie 9 curva sobre un primer meridiano, comprendiendo el otro de los dos espejos 8 una superficie 9 curva sobre un segundo meridiano, siendo el primer y el segundo meridiano ortogonales.

50 Evidentemente, es posible utilizar dos espejos 7, 8 que presentan cada uno una superficie 9 curvada sobre cada uno de los dos meridianos.

55 La utilización de un elemento óptico E de compensación de campo es un espejo 7, 8 reflectante que presenta la ventaja de proponer una solución acromática. En efecto, la compensación de campo se realiza por reflexión de los haces luminosos incidentes 4 sobre el espejo 7, 8 y no, como algunas soluciones de la técnica anterior, por transmisión en largas distancias en medios de índices diferentes.

60 Por otra parte, en el interferómetro 1 según la invención, el elemento E óptico de compensación del campo, que es por ejemplo el espejo 7, 8, está dispuesto a nivel del plano focal de imagen del conjunto 2 óptico, por eso se hace que los haces luminosos incidentes 4 reflejados por dicho conjunto 2 converjan hacia el elemento E óptico de compensación del campo.

La disposición del elemento E óptico de compensación del campo puede presentar un cierto margen de error de posicionamiento con respecto al plano focal de imagen del conjunto 2 óptico.

65 Esta configuración es muy ventajosa, ya que el hecho de que los haces luminosos 4 estén dirigidos de manera convergente hacia el elemento E óptico de compensación del campo permite reducir el tamaño de dicho elemento E

óptico de compensación del campo.

En efecto, la compensación de campo se efectúa entonces sobre haces convergentes, más concentrados que unos haces colimados paralelos.

5 Así, es posible utilizar como elemento E óptico de compensación de campo un espejo 7, 8 de dimensión compacta. En un interferómetro 1 según la invención, el espejo puede, por ejemplo, presentar un tamaño de algunos milímetros hasta algunas decenas de milímetros.

10 Otra ventaja de la invención es que permite aumentar el ángulo de campo θ aceptable en el interferómetro, lo cual permite obtener un instrumento con gran campo de visión, sin reducir la resolución espectral.

15 Asimismo, es posible aumentar la apertura angular a nivel del dispositivo 15, 16 mecánicamente móvil, como por ejemplo el cubo retro-reflector, lo cual permite reducir el tamaño lineal de dicho dispositivo, y más generalmente disminuir el volumen del interferómetro.

20 En un modo de realización de la invención, se utiliza un elemento E óptico de compensación del campo que permite compensar totalmente el campo, es decir anular la auto-apodización, para todas las diferencias de camino óptico δ' creadas por medio del dispositivo 15, 16 mecánicamente móvil.

25 La anulación total de la auto-apodización para todas las diferencias de camino óptico necesita la utilización de un elemento E óptico de compensación del campo que permite obtener una diferencia de camino óptico de compensación variable no sólo en función del ángulo de campo θ , a través de la utilización de una superficie 9 curvada y tal como se ha descrito antes, sino también variable en función de la diferencia de camino óptico δ' . Este elemento E óptico debe por lo tanto introducir la diferencia de camino óptico δ_E variable con δ' :

$$\delta_E(\theta, \delta') = \delta'(1-\cos(\theta))$$

30 Con un elemento E óptico de este tipo, la diferencia de camino óptico real δ creada en el interferómetro 1 ya no depende del ángulo de campo θ , y se escribe:

$$\delta = \delta'\cos(\theta) + \delta'(1-\cos(\theta)) \Leftrightarrow \delta = \delta'$$

35 Para ello, es necesario desplazar o deformar la superficie del elemento E óptico en tiempo real, es decir simultáneamente al desplazamiento del dispositivo 15, 16 óptico mecánicamente móvil.

40 En un modo de realización de la invención, y como se ilustra en la figura 3, se utilizan para ello unos medios 10 de rotación de las superficies planas reflectantes ($S_{\theta 1}$, $S_{\theta 2}$, etc.) del espejo 7, 8 con el fin de crear una diferencia de camino óptico de compensación también variable en función de δ' .

Los medios 10 de rotación hacen girar las superficies planas reflectantes ($S_{\theta 1}$, $S_{\theta 2}$, etc.). La rotación se puede realizar alrededor de cualquier punto de cada una de dichas superficies planas reflectantes, como por ejemplo el centro de dicha superficie, o su extremo.

45 Cada una de las superficies planas reflectantes ($S_{\theta 1}$, $S_{\theta 2}$, etc.) define otras tantas porciones elementales del campo de imagen. Se aplica a cada una de dichas superficies ($S_{\theta 1}$, $S_{\theta 2}$, etc.) una rotación cuya amplitud es propia de cada una de dichas superficies, con el fin de realizar una compensación óptima de la variación de la diferencia de camino óptico en función de δ' y θ .

50 En la configuración particular ilustrada en la figura 3, la superficie $S_{\theta 0}$ está situada en el centro del campo de imagen y por lo tanto no necesita ser desplazada, dado que corresponde a un ángulo de campo nulo o casi nulo.

55 En un procedimiento de interferometría de compensación de campo según la invención, las superficies planas reflectantes ($S_{\theta 1}$, $S_{\theta 2}$, etc.) del espejo 7, 8 están desplazadas en rotación simultáneamente al dispositivo 15, 16 óptico de un ángulo que permite compensar la diferencia de camino óptico creada por el desplazamiento del dispositivo 15, 16 óptico. Así, el espejo 7, 8 introduce, para cada diferencia de camino óptico δ' creada por el dispositivo 15, 16 óptico, una diferencia de camino óptico de compensación que se aproxima lo mejor posible a la función $\delta_E = \delta'(1-\cos(\theta))$.

60 La rotación se realiza por medio de unos medios 10 de rotación, que están representados de manera muy esquemática en forma de bloques funcionales en la figura 3.

Más generalmente, es posible utilizar otros medios de desplazamiento, como medios de translación de las superficies planas reflectantes.

65

En otro modo de realización de la invención, se utiliza un espejo 7, 8 delgado y deformable por medio de un sistema 22 de deformación, como se ilustra en la figura 2.

Este tipo de espejo puede ser, por ejemplo, deformado por medio de un sistema 22 piezoeléctrico o de un sistema 22 magnético, cuya acción mecánica y/o eléctrica y/o magnética permite obtener la deformación deseada de la superficie 9 reflectante del espejo 7, 8. Se puede utilizar cualquier otro sistema 22 de deformación conocido por el experto en la materia.

En un procedimiento de interferometría de compensación de campo según la invención, la superficie 9 del espejo delgado 7, 8 se deforma simultáneamente al desplazamiento del dispositivo 15, 16 óptico, en una distancia que compensa la diferencia de camino óptico creada por el desplazamiento de dicho dispositivo 15, 16 óptico. Así, el espejo 7, 8 introduce para cada diferencia de camino óptico δ' creada por el dispositivo 15, 16 óptico una diferencia de camino óptico de compensación $\delta_e = \delta'(1-\cos(\theta))$. Dado que se puede controlar la deformación de cada punto del espejo deformable, es posible obtener una diferencia de camino óptico de compensación δ_E muy precisa.

Se pueden considerar, por supuesto, otras soluciones con el fin de desplazar la o las superficies del espejo 7, 8 en función de la diferencia de camino óptico δ' creada por el desplazamiento del dispositivo 15, 16 óptico.

Ventajosamente, se controla el desplazamiento de las superficies ($S_{\theta 1}$, $S_{\theta 2}$, etc.) del espejo 7, 8, o la deformación de la superficie 9 del espejo 7, 8 deformable, por medio de una herramienta de metrología láser. Esto permite verificar que se introduce bien la diferencia de camino óptico de compensación δ_E deseada.

Está claro que, en el caso en el que se utilicen los medios 10 de rotación o del sistema 22 de deformación, se encuentra el modo de realización descrito anteriormente, en el que el elemento E óptico de compensación del campo, como por ejemplo el espejo 7, 8, está inmóvil e introduce una diferencia de camino óptico de compensación $\delta_E = \delta_0(1-\cos(\theta))$, en el que δ_0 tiene un valor fijado. Utilizando los medios 10 de rotación o el sistema 22 de deformación, es posible entonces asignar el valor que se desea al parámetro δ_0 .

El desplazamiento o la deformación en tiempo real de la o de las superficies del elemento óptico E de compensación del campo en el interferómetro 1 según la invención presenta numerosas ventajas, además de las ya citadas en el marco del modo de realización con un elemento E inmóvil.

Una ventaja de la invención es que permite compensar totalmente el campo, es decir anular totalmente la auto-apodización, sean cual sean las diferencias de camino óptico δ' . La invención permite hacer desaparecer la tensión de los interferómetros, y más generalmente de los instrumentos ópticos, que asocian a una resolución espectral dada un valor de ángulo de campo máximo aceptable, y a la inversa.

Gracias a la invención, la resolución espectral del interferómetro está ya limitada sólo por la diferencia de camino óptico δ' que puede ser creada por el desplazamiento del dispositivo 15, 16 óptico, lo cual es muy ventajoso.

La compensación total del campo realizada por la invención permite por lo tanto utilizar unos interferómetros que tienen un campo de visión aceptable muy grande, y conservar al mismo tiempo una fuerte resolución espectral.

Además, dado que se puede aumentar el campo de visión sin disminuir la resolución espectral, esto permite aumentar la luminosidad, que depende del flujo luminoso incidente y por lo tanto del campo de visión, lo cual aumenta el producto entre la resolución espectral y la luminosidad. Como el producto de la resolución espectral por la luminosidad define la eficacia general del interferómetro, la invención permite por lo tanto aumentar la eficacia de dicho interferómetro.

Se ha mencionado en el modo de realización que utiliza un elemento E óptico de compensación del campo inmóvil, que la invención permitía aumentar la apertura angular a nivel del dispositivo 15, 16 mecánicamente móvil, como por ejemplo el cubo retro-reflector, lo cual puede permitir la reducción del tamaño lineal de dicho dispositivo, y el volumen del interferómetro. La composición total del campo, sea cual sea la diferencia de camino óptico δ' que puede ser creada por el desplazamiento del dispositivo 15, 16 óptico, permite reducir aún más el tamaño de dicho dispositivo y por lo tanto el volumen del interferómetro.

Otra ventaja de la invención es que necesita una rotación débil de las superficies ($S_{\theta 1}$, $S_{\theta 2}$, etc.) del elemento E óptico de compensación del campo, por medio de los medios 10 de rotación. El orden de magnitud de la rotación a aplicar es de algunos miliradianes para las aplicaciones corrientes y típicas.

Se ha representado en la figura 4 una variante del modo de realización de la invención, utilizando un elemento E óptico de compensación del campo inmóvil, en el que el elemento E óptico de compensación del campo es una lámina de vidrio delgada.

La lámina de vidrio delgada 11 está dispuesta en el plano focal de imagen del conjunto 2 óptico. Por lo menos una

superficie 9 externa de la lámina de vidrio 11 está fabricada de manera curva, con el fin de crear una diferencia de camino óptico que compensa la diferencia de camino óptico debida al ángulo de campo θ .

5 La compensación de campo se lleva a cabo en este modo de realización gracias al grosor variable de la lámina de vidrio delgada 11, que está atravesada por los haces luminosos 4 reflejados por el conjunto 2 óptico, lo cual permite introducir una diferencia de camino óptico de compensación δ_E .

10 Así, la curvatura de la superficie 9 externa de la lámina de vidrio delgada 11 se selecciona para introducir una diferencia de camino óptico de compensación δ_E que se escribe, como ya se ha explicado antes:

$$\delta_E = \delta_0(1 - \cos(\theta))$$

15 El radio de curvatura a seleccionar para la lámina de vidrio delgada 11 es grande, lo cual implica que los problemas de cromatismo son insignificantes. El radio de curvatura es típicamente del orden de varios metros.

La lámina de vidrio delgada 11 puede presentar ventajosamente una superficie 9 curvada sobre dos de sus meridianos, ortogonales entre sí.

20 Como se ha explicado en el primer modo de realización, el posicionamiento de la lámina de vidrio delgada 11 a nivel del plano focal de imagen del conjunto 2 óptico permite reducir el tamaño de dicha lámina 11, ya que los haces luminosos 4 convergen. Así, el tamaño de la lámina 11 está típicamente comprendido entre 60 y 80 mm, lo cual es muy compacto.

25 Como variante, es posible utilizar como elemento óptico E de compensación del campo, la lámina de separación 12, de tipo semi-reflectante, dispuesta en el plano focal de imagen del conjunto 2 óptico. Esta lámina de separación 12 difiere de la lámina de vidrio delgada 11 porque se ha depositado sobre dicha lámina 12 un compuesto metálico o dieléctrico.

30 La lámina de separación 12 está fabricada para presentar por lo menos una superficie 9 externa curvada para compensar el campo.

La lámina de separación 12 puede presentar ventajosamente una superficie 9 curvada sobre dos de sus meridianos, ortogonales entre sí.

35 En otra variante, el interferómetro 1 comprende dos elementos ópticos E de compensación del campo, a saber la lámina de vidrio delgada 11 y la lámina de separación 12, que están agrupadas y dispuestas a nivel del plano focal de imagen del conjunto 2 óptico. En este caso, los planos focales de las imágenes del conjunto 2 óptico conjugados con respecto a dicha lámina separadora 12 están confundidos, y se dispondrán en ellos la lámina de vidrio delgada 11 y la lámina de separación 12.

40 En este caso, es ventajoso utilizar una de las dos láminas 11 que comprende una superficie 9 curva sobre un primer meridiano, comprendiendo la otra de las dos láminas 12 una superficie 9 curva sobre un segundo meridiano, siendo el primer y el segundo meridiano ortogonales.

45 La ventaja de la configuración que utiliza una o varias láminas como elemento E óptico de compensación del campo es que el interferómetro 1 obtenido es compacto. En efecto, las láminas son de tamaños reducidos. Además, en esta configuración, se disminuye el número de elementos ópticos a utilizar en el interferómetro, y por lo tanto su volumen.

50 El interferómetro 1 según la invención encuentra numerosas aplicaciones en la industria, la investigación fundamental o aplicada, o cualquier otro campo que necesita un interferómetro tal como se ha descrito anteriormente.

55 El interferómetro 1 según la invención se puede utilizar, por ejemplo, en el marco de misiones espaciales de observación de la Tierra, basadas en particular en técnicas de espectrometría infrarroja. En este caso, el interferómetro 1 está embarcado en un satélite de observación de la Tierra. El instrumento según la invención es compacto, lo cual es ventajoso para la embarcación sobre un satélite. Por otra parte, presenta un gran ángulo de campo aceptable y una resolución espectral importante, lo cual permite obtener muy buenas prestaciones instrumentales, compatibles con las exigencias de las misiones de observaciones de la Tierra.

60

REIVINDICACIONES

1. Interferómetro (1) de compensación de campo, que comprende
- 5 un conjunto (2) óptico apto para dirigir unos haces luminosos incidentes (4) que presentan un ángulo de campo θ con respecto a un eje óptico del interferómetro (1) hacia unos brazos (5, 6) del interferómetro,
- una lámina separadora (12),
- 10 comprendiendo los brazos (5, 6) por lo menos un dispositivo (15, 16) óptico mecánicamente móvil para la creación de una diferencia de camino óptico variable entre unos haces procedentes de la separación de cada haz (4) incidente por medio de dicha lámina separadora (12),
- estando dicho interferómetro (1) caracterizado porque comprende:
- 15 por lo menos un elemento (E) óptico de compensación del campo, dispuesto en uno u otro de los planos focales imagen del conjunto (2) óptico conjugados con respecto a la lámina separadora (12),
- comprendiendo dicho elemento (E) por lo menos una superficie (9) curvada de manera que crea una diferencia de camino óptico entre los haces incidentes que presentan un ángulo de campo no nulo y los haces incidentes que
- 20 presentan un ángulo de campo nulo, permitiendo la diferencia de camino óptico así creada compensar la autoapodización resultante del ángulo de campo.
2. Interferómetro según la reivindicación 1, que comprende dos elementos (E) ópticos de compensación del campo dispuestos respectivamente en cada uno de los dos planos focales imagen del conjunto (2) óptico conjugados con respecto a la lámina separadora (12).
3. Interferómetro según una de las reivindicaciones 1 o 2, en el que la superficie (9) del elemento (E) óptico es curva sobre por lo menos uno de sus meridianos (13).
- 30 4. Interferómetro según una de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende dos elementos (E) ópticos,
- comprendiendo uno de los elementos una superficie (9) curva sobre un primer meridiano,
- 35 comprendiendo el otro de los elementos una superficie (9) curva sobre un segundo meridiano,
- siendo el primer y el segundo meridiano ortogonales.
5. Interferómetro según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el elemento (E) es un espejo (7, 8), comprendiendo dicho espejo (7, 8) una superficie (9) curva reflectante sobre por lo menos uno de sus meridianos (13).
6. Interferómetro según la reivindicación 5, en el que la superficie (9) curva reflectante presenta un perfil mecánico curvado continuamente.
- 45 7. Interferómetro según la reivindicación 5, en el que la superficie (9) curva reflectante presenta un perfil mecánico compuesto por un conjunto discreto de superficies planas reflectantes (S_{θ_0} , S_{θ_1} , S_{θ_2} , etc.).
8. Interferómetro según la reivindicación 7, que comprende unos medios (10) de rotación de las superficies planas reflectantes (S_{θ_0} , S_{θ_1} , S_{θ_2} , etc.).
- 50 9. Interferómetro según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que el elemento (E) es un espejo (7, 8) y deformable por medio de un sistema (22) de deformación.
- 55 10. Interferómetro según la reivindicación 9, en el que el sistema (22) de deformación es un sistema piezoeléctrico.
11. Interferómetro según una de las reivindicaciones 7 a 10, que comprende una herramienta de metrología láser para el control del desplazamiento creado por los medios (10) de desplazamiento o de la deformación creada por el sistema (22) de deformación.
- 60 12. Interferómetro según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el elemento (E) óptico de compensación del campo es una lámina de vidrio delgada (11).
13. Interferómetro según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el interferómetro (1) comprende dos elementos (E) ópticos de compensación del campo: una lámina de vidrio delgada (11) y la lámina separadora (12), dispuestas
- 65

en el plano focal de imagen del conjunto 2 óptico.

14. Procedimiento de interferometría de compensación de campo en un interferómetro (1) según una de las reivindicaciones 7, 8 u 11, en el que:

5 el conjunto (2) óptico dirige los haces luminosos incidentes (4) hacia los brazos (5, 6) del interferómetro,

10 el dispositivo (15, 16) óptico mecánicamente móvil está desplazado para crear una diferencia de camino óptico entre los haces procedentes de la separación de cada haz (4) incidente, cuya recombinación permite realizar la interferometría,

estando dicho procedimiento caracterizado porque comprende la etapa según la cual:

15 se desplazan en rotación las superficies planas reflectantes ($S_{\theta 1}$, $S_{\theta 2}$, etc.) del espejo (7, 8) simultáneamente al dispositivo (15, 16) óptico en un ángulo que compensa la diferencia de camino óptico creada por el desplazamiento de dicho dispositivo (15, 16) óptico.

15. Procedimiento de interferometría de compensación de campo en un interferómetro (1) según una de las reivindicaciones 8 a 10, en el que:

20 el conjunto (2) óptico dirige los haces luminosos incidentes (4) hacia los brazos (5, 6) del interferómetro,

25 el dispositivo (15, 16) óptico mecánicamente móvil está desplazado para crear una diferencia de camino óptico entre los haces procedentes de la separación de cada haz (4) incidente, cuya recombinación permite realizar la interferometría,

estando dicho procedimiento caracterizado porque comprende la etapa según la cual:

30 la superficie (9) del espejo (7, 8) delgado está deformada simultáneamente al dispositivo (15, 16) óptico en una distancia que compensa la diferencia de camino óptico creada por el desplazamiento de dicho dispositivo (15, 16) óptico.

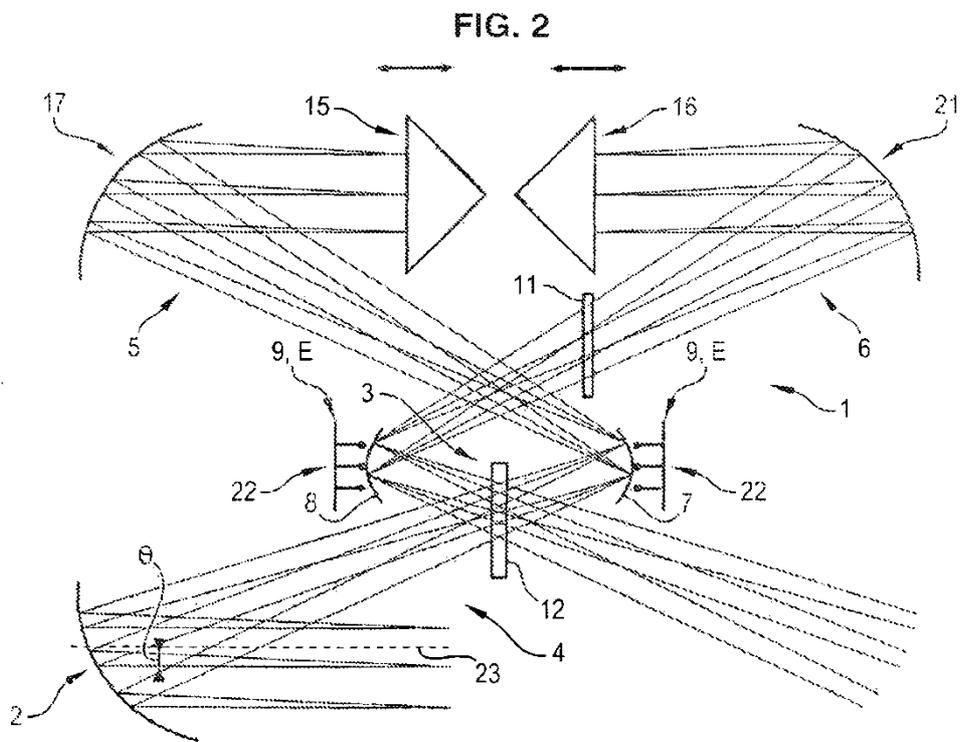
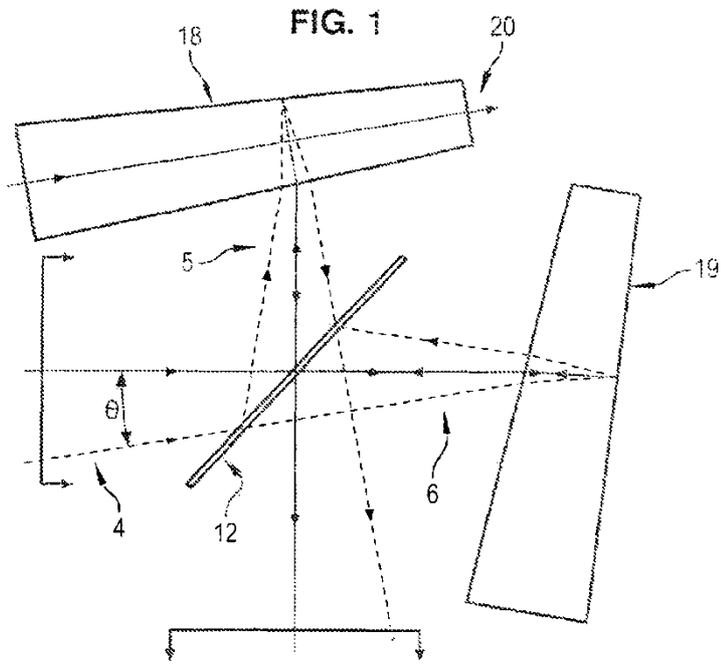


FIG. 3

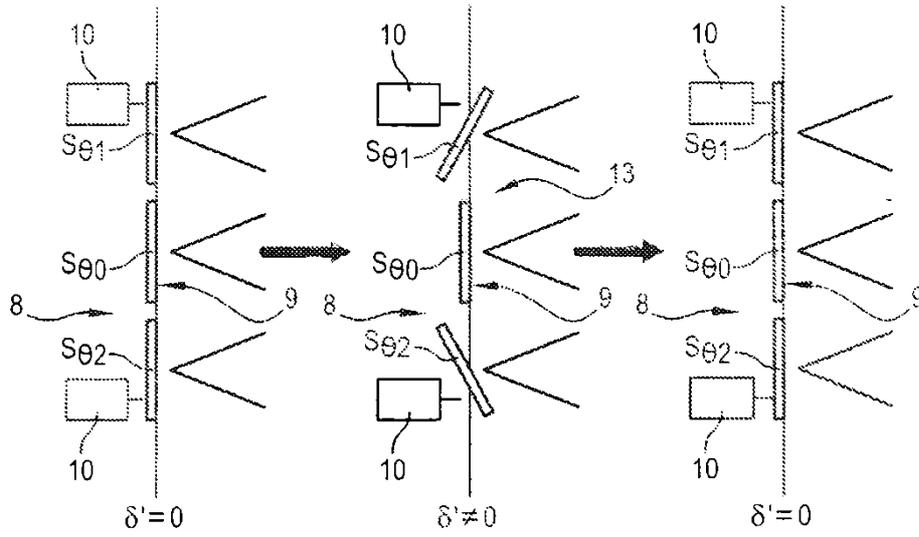


FIG. 4

