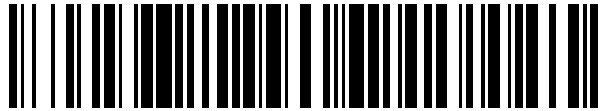


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 395 593**

51 Int. Cl.:

G02B 7/38

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.11.2008 E 08848818 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la solicitud europea: **21.07.2010 EP 2208099**

54 Título: **Dispositivo de medición de defectos de un instrumento de formación de imágenes con dos sensores optoelectrónicos**

30 Prioridad:

13.11.2007 FR 0707967

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

13.02.2013

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
45, RUE DE VILLIERS
92200 NEUILLY-SUR-SEINE, FR**

72 Inventor/es:

**PIGOUCHE, OLIVIER y
DANTES, DIDIER**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 395 593 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

Dispositivo de medición de defectos de un instrumento de formación de imágenes con dos sensores optoelectrónicos

5 La presente invención se refiere a un dispositivo de medición de defectos de un instrumento de formación de imágenes con sensor opto-electrónico, así como a un dispositivo de corrección de defectos que comprende dicho dispositivo de medición.

Un instrumento óptico, como un telescopio, instalado en un satélite de observación en órbita, se puede desenfocar en particular por los efectos termo-elásticos y de la desgasificación de la estructura.

10 La necesidad de tener un buen contraste en las imágenes implica la medición precisa de este des-enfoque y la implantación de un dispositivo de re-enfoque que se activará en función del resultado de la medición.

De acuerdo con la técnica anterior, esos problemas de determinación del desenfoco se resolvían de diferentes formas:

- mediante la comparación con unas simulaciones realizadas con diferentes desenfocos, pero un procedimiento de ese tipo no es muy preciso;
- 15 • mediante el análisis de la superficie de onda, su aplicación solo se puede hacer con un sistema complejo;
- recurriendo a un método de medición que consiste en hacer variar el mecanismo de re-enfoque y en seleccionar el mejor enfoque, pero su aplicación es complicada;
- por medio de un dispositivo específico o de un Divisor Óptico de Haz (denominado « DIVOLI »). Ese dispositivo necesita realizar en el suelo un alineamiento óptico perfecto entre sensores similares, e introducido, además, en
20 la combinación óptica del vidrio.

Por otra parte, se conoce un método denominado "diversidad de fase" que, partiendo de una imagen de un objeto y de la imagen del mismo objeto desenfocado con respecto a la primera imagen con un delta de desenfoco que se conoce por medio de un sensor adicional desenfocado en general de una fracción de longitud de onda, o por medio de una acción sobre el mecanismo de enfoque, aplica un algoritmo específico que permite superar no solo el desenfoco sino también otras aberraciones ópticas clásicas.
25

Se conoce por el documento JP 10 227971 A un dispositivo de enfoque que comprende un divisor de flujo óptico y en el cual se desplaza una barra de detección con respecto al plano de mejor enfoque óptico, lo que complica su realización y lo hace sensible a las aceleraciones, y reduce su fiabilidad en el entorno espacial.

30 Por otra parte, se conocen por los documentos US 2005/0270611 A1 y US 2007/0102620 unos microscopios con dispositivos de determinación del enfoque que comprenden unos divisores de haces de luz y un mecanismo piezo-eléctrico en el caso del dispositivo del primero de esos dos documentos, lo que hace que esos dispositivos sean relativamente voluminosos y difícilmente extrapolables para una utilización espacial con unos telescopios.

También se conoce por el documento JP 57019703 A un dispositivo estático de medición con dos sensores alineados de forma diferente con respecto al eje óptico.

35 La presente invención tiene por objeto un dispositivo de medición de los defectos como aberraciones ópticas de un instrumento de formación de imágenes con sensor optoelectrónico que comprende varios elementos sensores que sea preciso, fácil de realizar y de aplicar, y lo menos caro y menos voluminoso posible, así como un dispositivo de corrección de defectos que aplica dicho dispositivo de medición, esos dispositivos no corriendo el riesgo de bloqueo en el espacio. Por otra parte, en el entorno espacial, los mecanismos corren el riesgo de bloqueos que son difíciles de detectar en las pruebas en la Tierra, en particular a causa de una gravedad y temperatura diferentes. También es conveniente señalar que los movimientos de los mecanismos pueden provocar vibraciones en los satélites que los comprenden, lo que resulta molesto cuando los instrumentos instalados a bordo de esos satélites son unos generadores de imágenes.
40

El dispositivo de acuerdo con la invención es un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1.

45 Se sobreentiende que por « dispositivo estático », se entiende que el dispositivo de la invención se encuentra sin reenfoques sucesivos y sin desplazamiento de un componente óptico, al contrario de lo que sucede con los dispositivos conocidos, lo que hace que el dispositivo de la invención sea más sencillo y menos frágil que esos dispositivos conocidos.

50 La presente invención se entenderá mejor tras la lectura de la descripción detallada de un modo de realización, que se da a título de ejemplo no excluyente y que se ilustra en el dibujo adjunto, en el cual:

- la figura 1 es un esquema muy simplificado de una vista de lado de un dispositivo de aplicación del procedimiento de la invención;
- la figura 2 es una vista desde arriba del dispositivo de la figura 1 en el caso de una barra lineal de sensores; y

- la figura 3 es una vista desde arriba del dispositivo de la figura 1 en el caso de sensores dispuestos en una matriz.

La presente invención se describe a continuación en referencia a un instrumento opto-electrónico como un telescopio con sensor opto-electrónico instalado a bordo de un satélite de observación, siendo el defecto que hay que corregir un desenfoque, pero se sobreentiende que la invención no está limitada a esta única aplicación y que esta se puede aplicar en el caso de los equipos instalados a bordo de otros artefactos voladores distintos de los satélites (avión, helicóptero o vehículo aéreo no tripulado), ya sean esos equipos unos telescopios u otros equipos opto-electrónicos, y los defectos que hay que corregir ya sean desenfoques u otros tipos de defectos ópticos, en particular defectos como el astigmatismo, la aberración esférica y el coma. Para corregir esos otros defectos, se determinará por tanto una función de transferencia, que depende de la combinación óptica, que, para un conjunto de aberraciones medidas, permite encontrar las mejores correcciones en términos de deformaciones y de desplazamientos de los elementos ópticos del telescopio.

Por otra parte, la invención se describe a continuación en referencia a un satélite para el cual la adquisición de las imágenes se realiza de acuerdo con la técnica « *Push-Broom* » (barrido de la zona de la que hay que captar), pero se sobreentiende que no está limitada a esa técnica de adquisición y se puede aplicar con otras técnicas de adquisición. La invención se aplica en particular a los satélites que contienen una matriz opto-electrónica (satélite en órbita no sincrónica, geoestacionaria o astronómica) a condición de que se pueda captar con la matriz inclinada y la matriz nominal la misma escena por medio de la desalineación del satélite o del instrumento.

En las figuras del dibujo se ha esquematizado únicamente la parte que constituye la retina de un telescopio de satélite de observación terrestre, su parte óptica, y los circuitos de conversión de las señales eléctricas de la retina al realizarse de la forma clásica no se han representado en el dibujo. La realización de los circuitos de tratamiento de la señal que realizan la medición del desenfoque y, llegado el caso, la medición de las aberraciones en las frecuencias bajas, resultará evidente para el experto en la materia al leer la presente descripción.

En la figura 1 se ha esquematizado un dispositivo óptico clásico de formación de imágenes 1 de telescopio cuyo eje óptico tiene la referencia 2 y el plano denominado de aquí en adelante « plano focal » la referencia 3. La parte retina de ese sistema de formación de imágenes de un telescopio comprende, de origen, en un primer modo de realización (figuras 1 y 2), una barra lineal 4 de elementos sensores opto-electrónicos situada en el plano focal 3 (y que se confunde con la línea de ese plano focal en la vista de la figura 1). En la presente descripción, el término « sensor » designa cualquier componente opto-electrónico o cualquier conjunto de componentes opto-electrónicos que se pueden utilizar en asociación con un instrumento óptico, por ejemplo un telescopio, para constituir un sistema de formación de imágenes del tipo que se ha mencionado con anterioridad.

Hay que señalar que el plano focal 3 no se define como el plano de mejor enfoque de la óptica del instrumento, sino por el hecho de que contiene la barra lineal nominal 4.

De acuerdo con la invención, se sitúa cerca de la barra 4 y en paralelo a esta otra barra lineal 5 de sensores, en general similar o más corta que la barra 4, que entra, en el presente ejemplo, en el campo óptico del dispositivo óptico 1. Se considera que la barra 5 es paralela a la barra 4 en la medida en que sus proyecciones sobre un plano perpendicular al eje óptico 2 son paralelas entre sí, tal y como se representa en la figura 2. No obstante, la barra 5 no se encuentra dentro del plano que contiene la barra 4 y perpendicular al eje óptico, y esta solo lo corta según una recta cuya línea 6 se puede observar en la figura 1. De forma general, esa recta 6 se encuentra dentro de los dos planos que contienen, cada uno, una de las dos barras (o de manera más exacta las superficies sensibles de esas barras, que se puede suponer que son de dos dimensiones), pero no pasa necesariamente por en medio de la longitud de cada una de esas dos barras. El plano de la barra 5 forma un ángulo α con el plano focal 3. El valor del ángulo α depende, de acuerdo con el método de medición escogido, de la estimación del desenfoque máximo del instrumento y de la longitud de la barra, o bien, en caso de utilización del método denominado de « diversidad de fase » de una fracción o de un múltiplo de la longitud de onda óptica y de la longitud de la barra, el seno del ángulo siendo la relación entre el desenfoque máximo y la mitad de la longitud de la barra. De aquí en adelante, la barra 4 también se llamará barra nominal, y la barra 5 se llamará barra inclinada. El punto 6 se ha representado en el medio de la longitud de la barra 5 y sobre el eje 2, pero no es necesariamente así, y ese punto (que corresponde a la intersección de la barra 5 con el plano focal 3) puede estar alejado del eje 2 y/o no estar situado en el medio de la barra 4.

Hay que señalar que en el ejemplo que se ilustra en el dibujo la barra 5 está próxima a la barra 4, pero, en concreto cuando no hay espacio suficiente en el campo óptico del dispositivo 1 para alojar la barra 5, se la puede situar fuera de ese campo y hacer que reciba la misma zona que la que recibe la barra 4 (no de forma simultánea para las dos barras) por medio de un dispositivo adyacente. Para que la barra 5 puede recibir la misma zona que la barra 4, se puede o bien aprovechar la desalineación del satélite portador o bien una maniobra del satélite portador, o si no recurrir a la inclinación del instrumento, con el fin de desplazar el eje de alineación del telescopio para que la zona de terreno (o del espacio) que se ha captado en la barra 4 se capte lo antes posible en la barra 5.

Por medio de la inclinación de la barra 5 con respecto al plano focal 3, a lo largo de la barra, cada píxel « ve » un enfoque diferente, que varía desde $-d_{max}$ hasta $+d_{max}$. El parámetro d_{max} es un incremento del desenfoque posible

cuando las barras se encuentran en el mejor plano de enfoque del instrumento.

Cuando el instrumento se des-enfoca con un des-enfoque d_0 desconocido, entonces:

La retina de la barra nominal se desenfoca de d_0 .

5 A lo largo de la barra inclinada, el des-enfoque varía desde $d_0 - d_{\max}$ hasta $d_0 + d_{\max}$, y el des-enfoque de un píxel i será, por lo tanto, $d_i = d_0 + i \cdot d_{\max} / i_{\max}$ (suponiendo que el índice i va desde $-i_{\max}$ hasta $+i_{\max}$).

10 Las barras inclinada y nominal son paralelas y ven, por lo tanto, el mismo paisaje salvo por un desfase temporal debido al desfase en el eje Y de las barras de acuerdo con la dirección de la velocidad de desplazamiento (en modo « *push-broom* »). La relación $R_i(f)$ entre la DSP (Densidad Espectral de Potencia, calculada de acuerdo con un procedimiento de la técnica anterior) de la imagen que obtiene la barra inclinada y la DSP de la imagen que obtiene la retina nominal para una columna i dada para una frecuencia espacial f en las imágenes (dichas DSP de las imágenes corrigiéndolas con una estimación de la DSP del ruido de adquisición estimada de acuerdo con el estado de la técnica) es entonces:

$$R_i(f) = \frac{DSP_{pc_i}(f) \cdot FTM_{defoc}(d_i + d_0)(f)^2}{DSP_{pc_i}(f) \cdot FTM_{defoc}(d_0)(f)^2} = \frac{FTM_{defoc}(d_i + d_0)(f)^2}{FTM_{defoc}(d_0)(f)^2}$$

15 en esa expresión, $FTM_{defoc}(d)(f)$ es la Función de Transferencia de Modulación del instrumento para una frecuencia espacial considerada f y para un desenfoque d , es decir que esta califica el desenfoque acimutal de la imagen obtenida, d_i es el desenfoque relativo de un píxel o de una columna de píxeles en la posición i del sensor inclinado con respecto al sensor nominal, desenfoque que es una función lineal de $i \cdot \text{seno } \alpha$ de acuerdo con la expresión: $d_i = i \cdot \text{anchura del píxel en la barra inclinada} \cdot \text{seno } \alpha$ (donde i se cuenta desde el centro de la barra inclinada, es decir que tiene el mismo desenfoque que la de la barra nominal) y $DSP_{pc_i}(f)$ es la DSP de la porción de paisaje que ve la columna i para la frecuencia espacial f . Debido a que la DSP del paisaje de la columna i se encuentra en el numerador y en el denominador, esta se elimina en R_i y no interviene.

20 Esa relación será máxima para la columna i_0 con mejor enfoque, de esta se deduce el valor del des-enfoque del instrumento $d_0 = -d_{i_0}$ (d_{i_0} es el desenfoque relativo de la columna i_0 en el sensor inclinado). La búsqueda del valor máximo de $R_i(f)$ da, por lo tanto, directamente el desenfoque d_0 del instrumento.

25 Esto es válido para cualquier frecuencia f . Al tener el desenfoque un impacto en FTM en las frecuencias altas, se puede seleccionar f o bien calcular la relación en una banda de frecuencia (f_a , f_b) próxima a la media-frecuencia de muestreo. Hay que señalar que, debido a que la DSP del ruido del sensor y el solapamiento de espectro pueden alterar la medición de R_i , la media-frecuencia de muestreo no es necesariamente la mejor frecuencia de análisis posible. Una optimización de la banda de frecuencia de análisis es posible teniendo en cuenta las características de FTM de la óptica y del ruido del sensor.

30 Por supuesto, se puede adaptar el método considerando que el des-enfoque es prácticamente constante en unos grupos de píxeles adyacentes de la barra inclinada. Se utiliza entonces la DSP de cada grupo de columnas.

Hay que señalar que las longitudes de las barras consideradas pueden ser muy grandes (algunos miles de píxeles), lo que mejora la precisión del método.

35 De acuerdo con una variante de la invención, cuando el sensor opto-electrónico comprende, tal y como se esquematiza en la figura 3, una matriz rectangular nominal 7 de elementos sensores opto-electrónicos, se sitúa en paralelo a esta otra matriz rectangular 8 (idéntica o no) e inclinada de la misma forma que lo está la barra 5 con respecto a la barra 4 .

40 De acuerdo con otra variante de la invención, se aplica el método denominado de « diversidad de fase » para cada par de sub-imágenes de una misma escena o del mismo objeto. Por par de sub-imágenes, se entiende una sub-imagen suministrada por la barra inclinada y la sub-imagen correspondiente (que ve el mismo objeto o zona del paisaje) de la barra nominal (en plano), desenfocadas con un valor prácticamente constante en el interior de cada sub-imagen siempre y cuando el ángulo α sea bastante pequeño, pero con desenfoques diferentes entre los pares en función de la posición de la sub-imagen en el sensor inclinado, y por medio de un efecto de promedio o de promedio ponderado de los resultados de la aplicación de los algoritmos de medición de las aberraciones ópticas del método de diversidad de fase de acuerdo con la técnica anterior, se obtiene una gran mejora de la precisión de los resultados finales de ese método de « diversidad de fase ». Las sub-imágenes son de manera ventajosa unas imágenes en miniatura de unas decenas de píxeles de lado, por ejemplo 150 píxeles. En esos 150 píxeles, el desenfoque debe ser más o menos constante (lo que es así si α es pequeño). Se obtiene entonces ($N/150$) pares diferentes ($N =$ número de píxeles de la barra). Se pueden escoger menos pares, la elección realizándose en particular de acuerdo con un criterio que depende del gradiente del paisaje en el interior de cada sub-imagen para eliminar las escenas casi homogéneas, o separándolas, para seleccionar por ejemplo la mitad del número total de estas. De cada par, la diversidad de fases permite extraer las aberraciones en frecuencias bajas de la óptica:

desenfoque, coma, astigmatismo, etc. Se hace la media de los M resultados ($M = N/(150 \cdot 2)$) para mejorar la precisión de esas aberraciones, lo que permite obtener una medición precisa.

5 En los modos de realización que se han escrito con anterioridad, hay que asociar un objeto visto por la barra nominal con el mismo objeto visto por la barra inclinada. Es decir que es necesaria una correspondencia sub-pixélica entre las dos sub-imágenes. Ahora bien, si las dos barras están bastante separadas, pueden existir perturbaciones geométricas causadas en particular por las derivas del SCAO (Sistema de Control de Actitudes y de Órbita) y causadas por las micro-vibraciones, corriéndose el riesgo de que se borren las imágenes (es decir que estas no se superpondrán en algunas configuraciones de la plataforma). Ese problema se resuelve de manera clásica mediante, por una parte:

- 10
- o bien una modelización de las deformaciones entre las dos imágenes con un modelo de los instrumentos instalados a bordo (utilizando en particular las mediciones SCAO si estas son bastante precisas);
 - o bien una modelización directamente imagen por imagen mediante unas correlaciones de imágenes a partir de las cuales se construye un modelo de correspondencia (bien conocido en el tratamiento de imágenes),

15 y, por otra parte, mediante un re-muestreo eventual de los pares de imágenes en la misma geometría utilizando el interpolador mejor adaptado para la conservación de la DSP de las imágenes.

De este modo, por medio de la simple adición de una barra inclinada y de algunos circuitos de cálculo, se crea un número importante de pares de imágenes desenfocadas (con unas delta de desenfoque diferentes), lo que permite tener una muy buena resolución para la determinación de las principales aberraciones que afectan a la óptica común a los dos sensores.

20 De acuerdo con una característica ventajosa de la invención, el dispositivo de medición se aplica en un dispositivo de corrección de los defectos ópticos ya mencionados (debidos en particular a las deformaciones termo-elásticas y a la desgasificación), con el fin de realizar un instrumento óptico autofocus. Ese dispositivo de medición se inserta entonces en un bucle de control que comprende en particular un dispositivo (mecánico, térmico u óptico) de compensación de las deformaciones causadas por la óptica de la barra nominal. La realización de un dispositivo de

25 corrección de ese tipo dependiendo de las características del instrumento, no se describirá con más detalle en este documento.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo estático de medición de defectos ópticos de un instrumento de formación de imágenes con sensor opto-electrónico que comprende varios elementos sensores, y que comprende un primer sensor (4) y al menos un segundo sensor (5) situado en un plano inclinado con respecto al plano que contiene el primer sensor (4) y con respecto al eje óptico (2) del instrumento de formación de imágenes (1), ese plano inclinado comprendiendo una recta (6) que une los dos sensores y contenida en dicho plano que contiene dicho primer sensor, **caracterizado porque** dicho segundo sensor capta la misma escena que el primer sensor y **porque** el dispositivo comprende unos medios que permiten captar la misma escena en dichos primer y segundo sensores en dos instantes diferentes en el mismo tiempo, y un dispositivo de cálculo de las aberraciones ópticas que afectan a cada elemento de los dos sensores.

2. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado porque** dicho instrumento está situado en un satélite en órbita no sincrónico y comprende un telescopio y **porque** la adquisición de las imágenes mediante dichos primer y segundo sensores se realiza debido al desplazamiento de dicho satélite que genera un desplazamiento del eje de alineación de dicho telescopio.

3. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado porque** dicho instrumento está situado sobre un satélite y comprende un telescopio y **porque** la adquisición de las imágenes mediante dichos primer y segundo sensores se realiza en una maniobra de dicho satélite que genera un desplazamiento del eje de alineación de dicho telescopio.

4. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, aplicado a la medición de desenfoques, **caracterizado porque** comprende unos medios de cálculo del valor del desenfoque, que viene dado por el valor máximo de la relación de las Densidades Espectrales de Potencia (DS_p) de las imágenes obtenidas por unas columnas o grupos de columnas de los dos sensores y corregidas con una estimación de la DSP del ruido de adquisición, esa relación (R_i(f)) viniendo dada por:

$$R_i(f) = \frac{FTMdefoc(di + d0)(f)^2}{FTMdefoc(d0)(f)^2}$$

en la cual: d0 es el valor del desenfoque del primer sensor, di es el desenfoque relativo de un píxel o columna de píxeles en la posición i del segundo sensor con respecto al primer sensor, desenfoque que es una función lineal de i* seno α de acuerdo con la expresión: di = i*anchura del píxel en la barra inclinada * seno α, i contándose desde el centro de la barra inclinada, FTMdefoc(d) es la función de transferencia de modulación para una frecuencia espacial f y un des-enfoque d de las imágenes.

5. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el ángulo de inclinación (α) del primer sensor con respecto al segundo está en función de la estimación del desenfoque máximo del instrumento de formación de imágenes.

6. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende unos medios que aplican el método de diversidad de fase.

7. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 6, **caracterizado porque** el ángulo de inclinación (α) del primer sensor con respecto al segundo está en función del desenfoque necesario para la aplicación del método de diversidad de fase.

8. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** los dos sensores son unas barras lineales de elementos sensores opto-electrónicos.

9. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado porque** los dos sensores son unas matrices rectangulares (7, 8) de elementos sensores opto-electrónicos.

10. Dispositivo de corrección de las aberraciones ópticas de un instrumento de formación de imágenes con sensor opto-electrónico **caracterizado porque** comprende en un bucle de control un dispositivo de medición de esos defectos de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores.

11. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** está instalado en un instrumento opto-electrónico montado a bordo de un vehículo espacial.

12. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 10, **caracterizado porque** está instalado en un instrumento opto-electrónico montado a bordo de un avión, helicóptero o vehículo aéreo no tripulado.

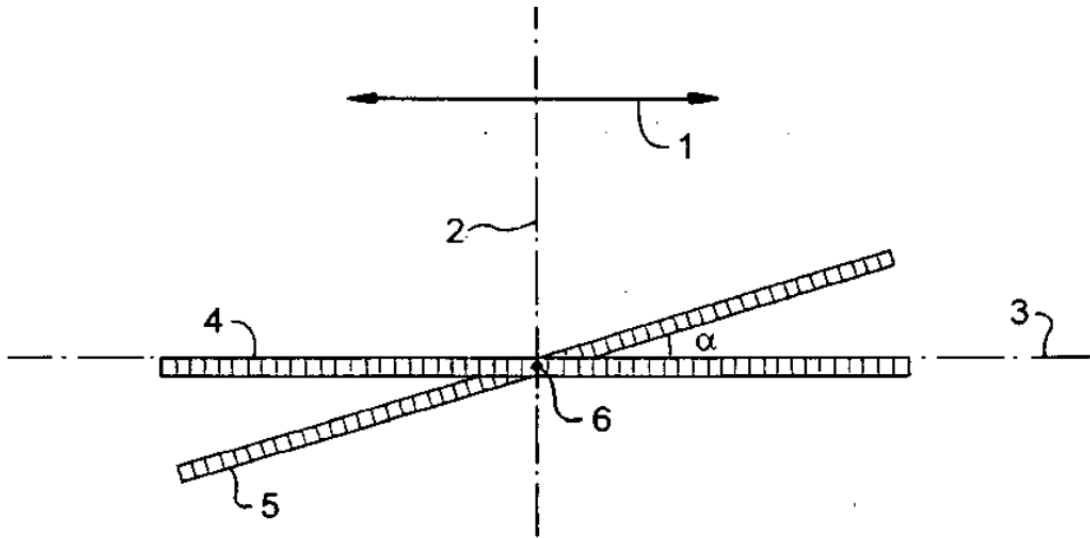


FIG. 1

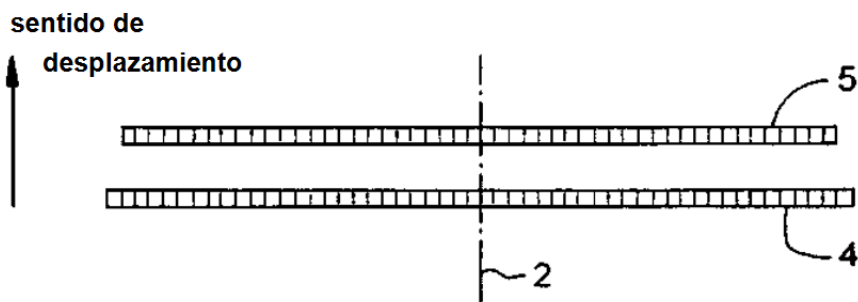


FIG. 2

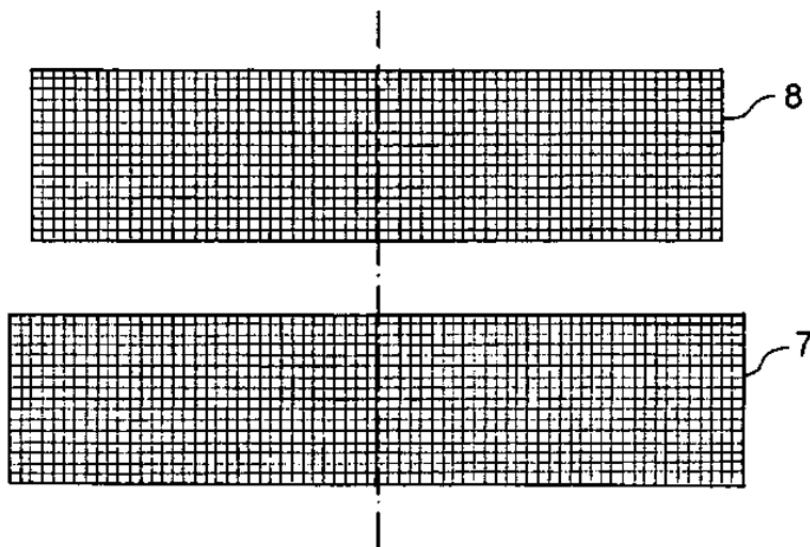


FIG. 3