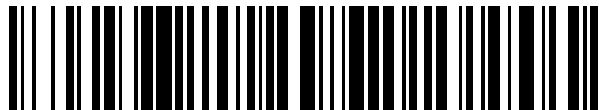


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 642 869**

51 Int. Cl.:

**G01M 11/02** (2006.01)

**G01M 11/04** (2006.01)

**G02B 23/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.08.2008 PCT/EP2008/061241**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.03.2009 WO09027440**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.08.2008 E 08787533 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.07.2017 EP 2181315**

54 Título: **Dispositivo de medida de la función de transferencia de modulación de instrumentos ópticos de gran dimensión**

30 Prioridad:

**29.08.2007 FR 0706034**

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

**20.11.2017**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**PERRIN, GUILLAUME;  
LIOTARD, ARNAUD;  
BENARD, HERVÉ y  
BLANC, PHILIPPE**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 642 869 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 medida de la función de transferencia de modulación de instrumentos ópticos de gran dimensión

El ámbito de la invención es el del control y de la medida de la calidad óptica de instrumentos ópticos que constan de elementos ópticos de gran dimensión.

5 Generalmente, estos instrumentos constan de una óptica de gran diámetro que forma, en la superficie fotosensible de una carcasa de detección, la imagen de un objeto luminoso en el infinito. El ámbito de aplicación preferente es el de los telescopios espaciales destinados a la observación terrestre, planetaria o astronómico. Estos instrumentos se enviarán al espacio. Es, por lo tanto, fundamental conocer perfectamente sus rendimientos ópticos antes del lanzamiento.

10 Se espera de los instrumentos ópticos de gran dimensión una muy alta calidad óptica, para conservar la ventaja de su gran pupila. Por muy bien concebidos y realizados que puedan estar, es imposible confiar completamente en la calidad del montaje optomecánico de estos instrumentos y es necesario controlarlos en bancos de medida adaptados. Un procedimiento de control de superficies ópticas solas se desvela en el documento WO 01/02822. De forma más precisa, un instrumento de observación se compone de dos partes, la parte óptica llamada telescopio y la parte electrónica llamada detector. Estos dos elementos pueden caracterizarse previamente de manera independiente. La calidad óptica del instrumento se caracteriza por un error de la fase del frente de onda, también llamada en terminología anglosajona WFE, acrónimo que significa WaveFront Error. Este WFE tiene en cuenta las aberraciones de los espejos del telescopio, pero igualmente los diferentes defectos de alineación de los espejos que constituyen el telescopio o del detector en relación con el telescopio. El conocimiento del WFE, se deduce de la función de transferencia óptica del telescopio también señalado como  $FTO_{\text{telescopio}}$ . Esta función se relaciona con la anterior por una relación de autocorrelación convencional. De la misma manera, el detector posee su función de transferencia óptica señalada como  $FTO_{\text{detector}}$ . La FTO del instrumento señalado como  $FTO_{\text{instrumento}}$  es el producto de la  $FTO_{\text{telescopio}}$  y de la  $FTO_{\text{detector}}$ .

20 Los defectos de alineación entre los diferentes componentes del instrumento no siendo predecibles, la medida de la FTO es indispensable para caracterizar el instrumento. Conociendo la función de transferencia óptica  $FTO_{\text{instrumento}}$ , se calcula, entonces, la función de transferencia de modulación  $FTM_{\text{instrumento}}$  del instrumento por paso al módulo de la función de transferencia de modulación.

25 Un banco de medida comprende, generalmente, un soporte 1 de "mármol" dispuesto en unas condiciones ambientales controladas. Se puede, por ejemplo, disponer en este mármol una cámara 2 de vacío. El instrumento 3 que se controlará y los medios 4 de medida y de control se disponen entonces en el mármol en el interior de la cámara. En las diferentes figuras que representan el banco de medida, el instrumento que hay que controlar consta, a título de ejemplo, de un objetivo catóptrico con dos espejos 31 y 32 y de una carcasa 33 de detección. Para eliminar los problemas de vibraciones, la cámara se coloca en dos columnas que constan de amortiguadores 5. Los diferentes medios optoelectrónicos de medida del banco se conectan a una bahía 6 de control exterior al banco óptico.

30 Un primer procedimiento para controlar un instrumento se ilustra en la figura 1. En ese caso, los medios de medida consisten esencialmente en un colimador 41 de control fijo. Este colimador consta de una pupila de diámetro al menos igual al de la pupila del instrumento que hay que controlar. Un bloque 42 fuente de transmisión se dispone en el foco del colimador 41. Este colimador debe ser de muy alta calidad óptica y, el bloque 42 fuente debe ajustarse perfectamente a su foco. Para la verificación de instrumentos de gran dimensión, esta solución es cara, siendo la fabricación de un gran colimador técnicamente muy compleja y muy larga de realizar.

35 Un segundo procedimiento para controlar un instrumento se ilustra en la figura 2. En ese caso, los medios de medida consisten esencialmente en un espejo 43 plano de autocolimación. El instrumento deviene su propio colimador. Por tanto, es necesario disponer de una fuente 42 óptica en el foco del instrumento. Ahora bien, esta ubicación se reserva a la carcasa 33 de detección del instrumento. Por tanto, es necesario realizar ajustes optomecánicos significativos para poder añadir la fuente óptica, así como unos medios ópticos de separación de haces ópticos de ida y vuelta. Estas restricciones adicionales se juzgan a menudo inaceptables por los diseñadores del instrumento.

40 El banco según la invención consta de un colimador cuyo diámetro es inferior al del instrumento que hay que medir. Este colimador se integra en un soporte móvil en translación. El control total del instrumento se efectúa, por tanto, desplazando el colimador en su soporte móvil, para barrer toda la pupila del instrumento. De este modo, se evitan los inconvenientes anteriores: uso de un colimador de gran pupila o disposiciones complejas de la carcasa de detección.

45 Más particularmente, la invención tiene por objeto un banco de control óptico para instrumento óptico, constando el instrumento de un objetivo óptico y de una carcasa de fotodetección dispuesta en el foco de dicho objetivo, teniendo la pupila del objetivo óptico un diámetro  $D_T$ , disponiéndose el instrumento que hay que controlar en el banco, comprendiendo el banco al menos:

- un colimador equipado de una fuente de transmisión adaptada a dicho instrumento, disponiéndose el colimador y el instrumento de manera que una imagen de dicha fuente se forma sobre la superficie de fotodetección de la carcasa,
- medios de análisis de dicha imagen,

5 caracterizado porque:

- la pupila óptica del colimador tiene un diámetro  $D_c$  inferior al diámetro  $D_T$  de la pupila del objetivo,
- el banco de control consta, igualmente, de medios de desplazamiento en translación del colimador, dispuestos de manera que el colimador pueda ocupar diferentes posiciones,
- para cada posición, el colimador ilumina una parte de la pupila del objetivo óptico llamada subpupila, una imagen llamada subimagen que se forma en la superficie de fotodetección de la carcasa,
- el conjunto de las diferentes subpupilas se dispone para cubrir al menos la pupila del objetivo óptico;
- los medios de análisis constan de medios de restitución que permite a partir de diferentes subimágenes reconstruir el mapa del WFE de la parte óptica del instrumento, suma las aberraciones de los espejos del telescopio y los defectos de alineación.

15 Ventajosamente, los medios de restitución constan de:

- primeros medios que permiten calcular, para cada subpupila, a partir del análisis de cada subimagen asociada, un error local de frente de onda señalada como  $WFE_k$ ,
- segundos medios que permiten, a partir de los diferentes errores locales de frente de onda calcular el error de frente de onda global de la pupila de la parte óptica del instrumento,
- terceros medios que permiten, a partir del error de frente de onda global de la pupila de la parte óptica del instrumento y de características fotoeléctricas del detector encontrar la función de transferencia de modulación del instrumento.

25 Ventajosamente, comprendiendo los primeros medios de cálculo comprende un algoritmo de restitución de fase, el banco consta de medios de translación de la fuente de transmisión, el colimador tiene un diámetro  $D_c$  comprendido entre 50 % y 70 % del diámetro  $D_T$  de la óptica del instrumento, cada subpupila posee con al menos otra subpupila una zona de recubrimiento de al menos 20 % en la superficie.

La invención se comprenderá mejor y otras ventajas aparecerán tras la lectura de la siguiente descripción que se dará a título de ejemplo no limitante y gracias a las figuras adjuntas entre las que:

- 30 la figura 1 representa un primer modo de realización de un banco de control óptico según la técnica anterior;
- la figura 2 representa un segundo modo de realización de un banco de control óptico según la técnica anterior;
- las figuras 3 y 4 representan un banco de control óptico según la invención con dos posiciones diferentes del colimador;
- la figura 5 representa una vista de la pupila P del instrumento, de la subpupila  $SP_k$  iluminada en una primera posición y, de la subimagen  $SI_k$  que se forma sobre el detector;
- 35 la figura 6 representa una vista de la pupila P del instrumento y de una configuración de subpupilas  $SP_k$  iluminadas por el colimador dispuesta en diferentes posiciones;
- la figura 7 representa una vista de la pupila P del instrumento y de una configuración de subpupilas  $SP_k$  iluminadas por el colimador dispuesto en tres posiciones cuando el colimador posee una obturación central;
- 40 la figura 8 representa el enlace que existe entre cada subimagen  $SI_k$  y la superficie de onda  $WFE_k$  correspondiente en la subpupila  $SP_k$  iluminada;
- la figura 9 representa el principio de cálculo de error de frente de onda que corresponde a la pupila completa;
- la figura 10 representa un corte en el espacio de las frecuencias de la función de transferencia de modulación  $FTM_{instrumento}$  del instrumento, calculado a partir del error de frente de onda global WFE de la pupila del telescopio y de la FTO del detector.

45 A título de ejemplo no limitante, el banco de control según la invención se representa en las figuras 3 y 4. Este banco de medida comprende un "mármol" 1 colocado en el interior de una cámara 2 de vacío. El instrumento 3 que se controlará y los medios 4 de medida y de control se disponen en el mármol en el interior de la cámara. El instrumento que hay que controlar consta, a título de ejemplo, de un objetivo catóptrico con dos espejos 31 y 32 y de una carcasa 33 de detección. Para eliminar los problemas de vibraciones, el mármol se coloca en dos columnas que constan de amortiguadores 5. Los diferentes medios optoelectrónicos de medida del banco se conectan a una bahía 6 de control exterior al banco que comprende los medios de análisis específicos del banco de control según la invención.

55 El colimador 41 de las figuras 3 y 4 también comprende un objetivo catóptrico con dos espejos. El colimador se equipa de una fuente de transmisión adaptada al instrumento y emite una superficie de onda plana, disponiéndose el colimador y el instrumento de manera que dicha fuente se forme sobre la superficie de fotodetección de la carcasa. La pupila óptica del colimador tiene un diámetro  $D_c$  inferior al diámetro  $D_T$  del instrumento que se controlará. A título indicativo, el colimador tiene un diámetro comprendido entre 50 % y 70 % del diámetro del telescopio. El diámetro del colimador debe ser lo suficientemente grande como para limitar el número de medidas necesarias para el control.

Se estima, generalmente, que el número de medidas debe ser del orden de una decena. El banco de control consta de medios 44 de desplazamiento en translación el colimador perpendicularmente a su eje óptico, dispuestos de manera que el colimador pueda ocupar diferentes posiciones. Estos medios pueden ser platos en translación motorizados con gran recorrido. El recorrido de los medios de translación es suficiente para que el colimador pueda barrer el conjunto de la pupila del instrumento. Por ejemplo, en la figura 3, el colimador está en posición "alta" e ilumina la parte baja de la pupila del instrumento. En la figura 4, el colimador está en posición "baja" e ilumina la parte baja de la pupila del instrumento.

Para cada posición, el colimador ilumina una parte de la pupila del objetivo óptico llamada subpupila  $SP_k$ . Por ejemplo, en la figura 5, la zona iluminada se sitúa en la parte superior izquierda de la pupila P del instrumento. Se observa en esta figura que la pupila del instrumento posee una obturación OC central debida al espejo secundario del instrumento. Está claro que el banco según la invención funciona de la misma manera para instrumentos sin obturación central. Una subimagen  $SI_k$  se forma entonces en la superficie de fotodetección de la carcasa. En la parte derecha de la figura 5, las variaciones de energía en esta subimagen  $SI_k$  se representan por representación de superficie tridimensional. Esta subimagen  $SI_k$  se transforma por los sensores de la carcasa de detección en señal eléctrica enviada a los medios de análisis de la bahía de control.

El conjunto de las diferentes subpupilas  $SP_k$  iluminadas por el colimador se dispone para cubrir al menos la pupila P del objetivo óptico. El número y la disposición de la subpupilas depende, esencialmente, de los diámetros del colimador y del objetivo, de su geometría respectiva y de la tasa de recubrimiento que se desee obtener. Se estima que cada subpupila debe poseer con al menos otra subpupila una zona de recubrimiento de al menos 20 %. La figura 6 muestra una disposición posible donde una disposición de ocho subpupilas permite cubrir toda la pupila del instrumento. En la mayoría de los casos, el colimador posee una obturación OCC central. En ese caso, como se ilustra en la figura 7, es importante seleccionar una disposición que no deje subsistir zonas muertas.

Los medios de análisis constan de medios de restitución que permiten, a partir de las diferentes subimágenes  $SI_k$ , reconstruir un mapa del WFE óptico del instrumento en toda la pupila. De manera general, estos medios de restitución son medios de cálculo numéricos.

Estos medios constan de:

- primeros medios que permiten calcular, para cada subpupila, a partir del análisis de cada subimagen asociada, un error local de frente de onda señalada como  $WFE_k$ ,
- segundos medios que permiten, a partir de los diferentes errores locales de frente de onda calcular el error de frente de onda global de la pupila de la parte óptica del instrumento,
- de terceros medios que permiten, a partir del error de frente de onda global de la pupila del instrumento y de características fotoeléctricas del detector, encontrar la función de transferencia de modulación del instrumento.

Estos medios se detallan a continuación.

Como se ha visto, es necesario, conociendo la subimagen  $SI_k$  debida a una subpupila  $SP_k$  reducir el  $WFE_k$  correspondiente. Esta función se ilustra en la figura 8. En esta figura, las variaciones de fase del  $WFE_k$  se representan por tonos de gris. A esta operación se le llama, generalmente, "restitución de fase" o en terminología inglesa: "phase retrieval". Puede realizarse por un algoritmo de restitución de fase iterativa. Se citarán, a título de ejemplo, los algoritmos de tipo "Gerchberg-Saxton" desarrollados en la década de 1970. Estos algoritmos se han adaptado a las aplicaciones ópticas en la década de 1990 seguidas de problemas ópticos encontrados en el funcionamiento del telescopio espacial "Hubble" y se controlan bien actualmente.

En el caso general, esta operación es compleja en la medida en la que diversos WFE son susceptibles de dar la misma imagen y en la medida en la que una variación pequeña de la imagen puede deberse a una gran variación en la desviación de fase del WFE. No obstante, en nuestro caso particular, conocimientos a priori tales como los datos del  $WFE_{\text{telescopio}}$  teórica del telescopio o de la FTO del detector permiten mejorar sustancialmente la convergencia del algoritmo de restitución de fase. En la práctica, el algoritmo de restitución de fase consiste en ajustar un conjunto de parámetros  $\alpha$  que describen el WFE por la bahía de procedimientos de optimización o de algoritmos iterativos. Estos coeficientes son, por ejemplo, coeficientes de Zernike, correspondiendo cada uno de los coeficientes a un defecto geométrico específico como, por ejemplo, la inclinación de la superficie de onda.

Para eliminar ciertas indeterminaciones o en ausencia previa, es posible efectuar los cálculos utilizando nuevas subimágenes obtenidas introduciendo un defecto conocido en la superficie de onda generada por el colimador. A tal efecto, la fuente de transmisión del colimador puede constar de medios de translación. Desplazando la fuente de transmisión, se introduce un defecto de focalización perfectamente conocido en el WFE óptico. Estos nuevos datos se utilizan por un algoritmo llamado "diversidad de fase".

Conociendo las diferentes distancias en la superficie de onda dadas por cada subpupila, los segundos medios permiten encontrar a desviación en la superficie de onda global de la pupila del instrumento. Esta función se ilustra en la figura 9. Se utiliza, a tal efecto, un algoritmo de recalibrado adaptado. A título de ejemplo, este algoritmo puede ser uno de los que se utilizan en interferometría llamado de "acoplamiento de zonas", más conocido bajo el nombre de "stitching interferometry". Estos algoritmos se utilizan para encontrar una desviación de frente de onda global a

5 partir de las desviaciones de frente de onda medidas localmente. Esta etapa de recalibrado permite realizar la unión de N mapas de  $WFE_k$  elementares para encontrar el WFE global de la parte óptica del instrumento. Se evitan, de esta manera, errores de medida que provienen ya sea de movimientos de piezas ópticas y mecánicas que componen el instrumento, o bien de errores relacionados con la alineación debidos a las posiciones sucesivas del colimador.

Conociendo, ahora, el WFE de la parte óptica del instrumento, queda calcular la función de transferencia de modulación del instrumento, señalada como  $FTM_{\text{instrumento}}$ . Esta función se ilustra en la figura 10. Los cálculos efectuados en esta última etapa son los siguientes:

10 Se define una función de pupila compleja p a partir del WFE total de pupila y de su soporte  $p_0$  según la expresión matemática:

$$p = p_0 \cdot e^{WFE}$$

La autocorrelación de esta función compleja da la FTO del conjunto óptico controlado también marcado como  $FTO_{\text{telescopio}}$ . Se tiene:

$$FTO_{\text{telescopio}} = p \otimes p$$

15 La FTM del instrumento se obtiene seguidamente tomando el valor absoluto de la FTO del instrumento, producto de la  $FTO_{\text{telescopio}}$  y de la  $FTO_{\text{detector}}$ . Se tiene:

$$FTM_{\text{instrumento}} = |FTO_{\text{instrumento}}| = |FTO_{\text{telescopio}} \times FTO_{\text{detector}}|$$

**REIVINDICACIONES**

1. Banco de control óptico para instrumento óptico, constando el instrumento de un objetivo (3) óptico y de una carcasa (33) de fotodetección dispuesta en el foco de dicho objetivo, teniendo la pupila óptica del objetivo óptico un diámetro  $D_T$ , disponiéndose el instrumento a controlar en el banco, comprendiendo el banco al menos:

- 5
- un colimador (4) equipado de una fuente (42) de transmisión adaptada a dicho instrumento y que emite una superficie de onda plana, disponiéndose el colimador y el instrumento de manera que una imagen de dicha fuente se forma sobre la superficie de fotodetección de la carcasa,
  - medios (6) de análisis de dicha imagen,

**caracterizado porque:**

- 10
- la pupila óptica del colimador tiene un diámetro  $D_c$  inferior al diámetro  $D_T$  de la pupila del objetivo,
  - el banco de control consta, igualmente, de medios (44) de desplazamiento en translación del colimador, dispuestos de manera que el colimador pueda ocupar diferentes posiciones,
  - para cada posición, el colimador ilumina una parte de la pupila del objetivo óptico llamada subpupila  $SP_k$ , una imagen llamada subimagen  $SI_k$  que se forma en la superficie de fotodetección de la carcasa,
- 15
- el conjunto de las diferentes subpupilas  $SP_k$  se dispone para cubrir al menos la pupila del objetivo óptico;
  - los medios de análisis constan de medios de restitución que permiten al menos, a partir de las diferentes subimágenes  $SI_k$ , reconstruir el mapa del error de fase del frente de onda óptica del instrumento, también llamado "WFE".

2. Banco de control óptico según la reivindicación 1, **caracterizado porque** los medios de restitución constan de:

- 20
- primeros medios que permiten calcular, para cada subpupila  $SP_k$ , a partir del análisis de cada subimagen asociada  $SI_k$ , un error local de frente de onda señalada como  $WFE_k$ ,
  - segundos medios que permiten, a partir de los diferentes errores locales de frente de onda  $WFE_k$  calcular el error de frente de onda global WFE de la pupila de la parte óptica del instrumento,
- 25
- terceros medios que permiten, a partir del error de frente de onda global de la pupila de la parte óptica del instrumento y de características fotoeléctricas del detector, encontrar la función de transferencia de modulación del instrumento.

3. Banco de control óptico según la reivindicación 2, **caracterizado porque** los primeros medios de cálculo comprenden un algoritmo de restitución de fase.

30

4. Banco de control óptico según la reivindicación 1, **caracterizado porque** el colimador se equipa de medios de translación de su fuente de emisión.

5. Banco de control óptico según la reivindicación 1, **caracterizado porque** el colimador tiene un diámetro comprendido entre 50 % y 70 % del diámetro de la pupila del instrumento.

6. Banco de control óptico según la reivindicación 1, **caracterizado porque** cada subpupila posee con al menos otra subpupila una zona de recubrimiento de al menos 20 %.

35

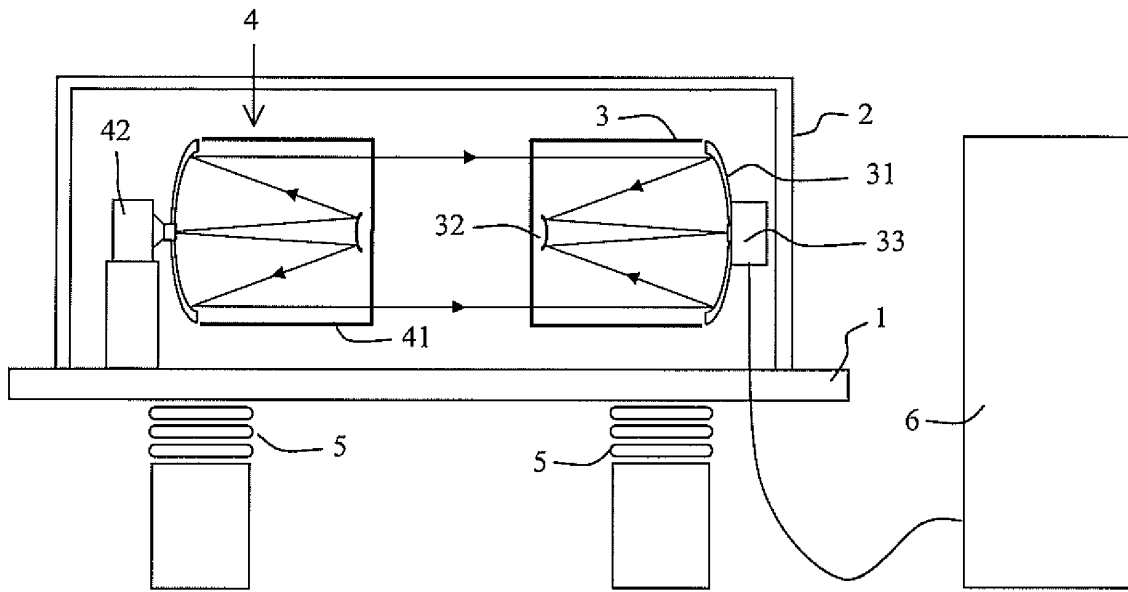


FIG. 1

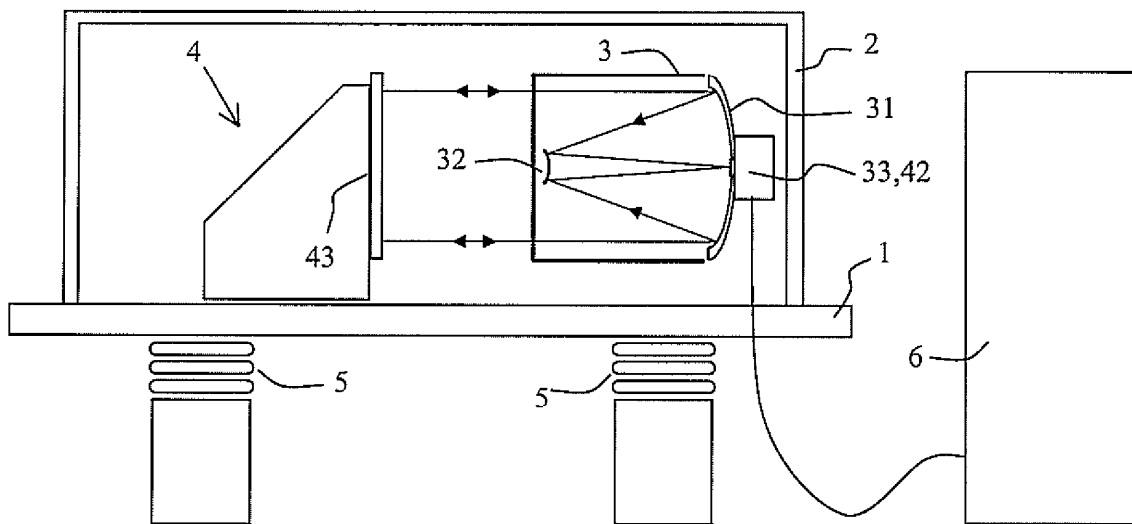


FIG. 2

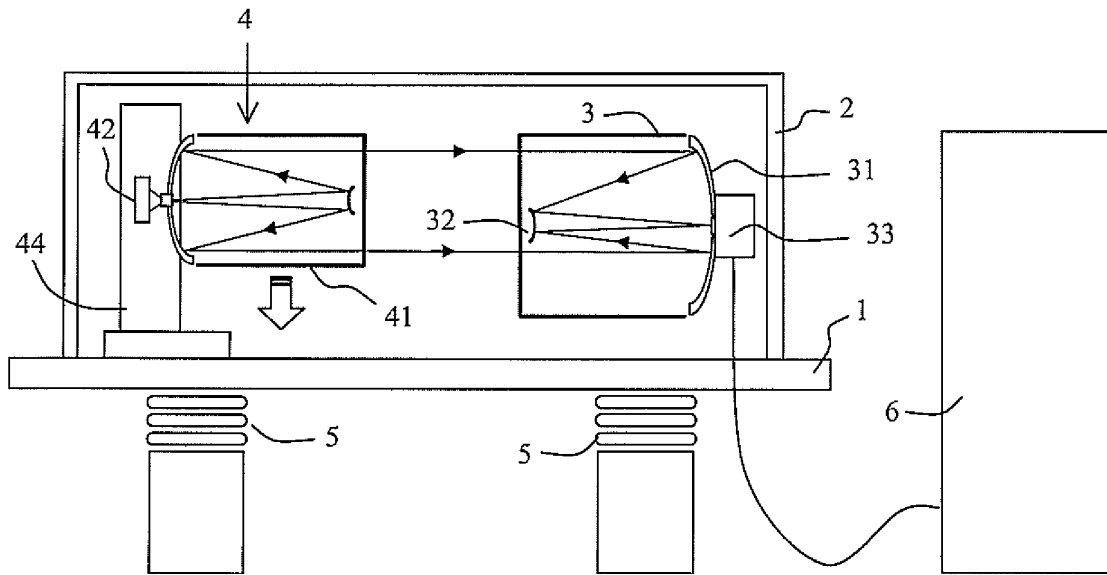


FIG. 3

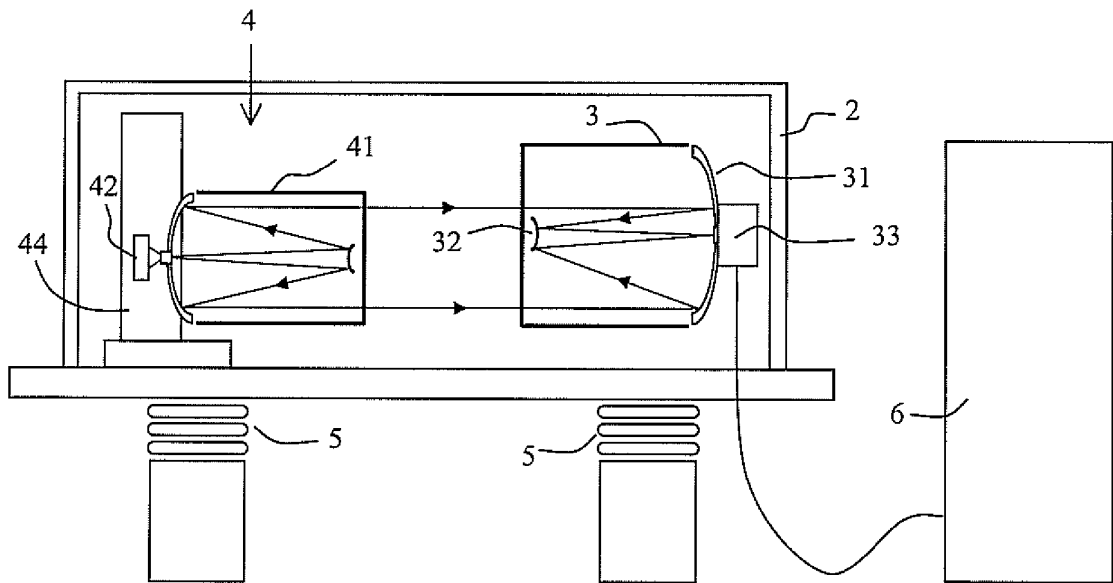


FIG. 4



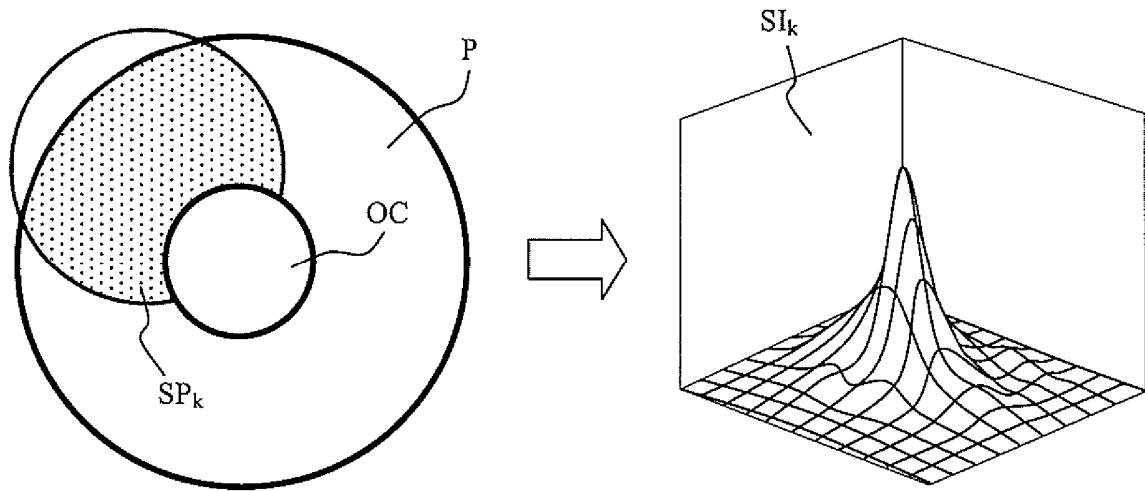


FIG. 5

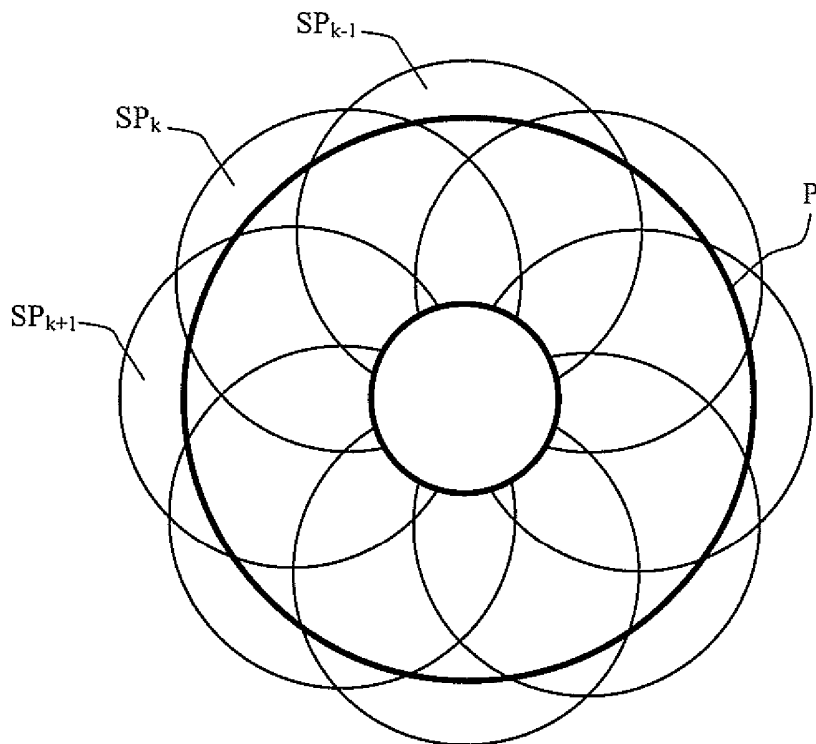


FIG. 6

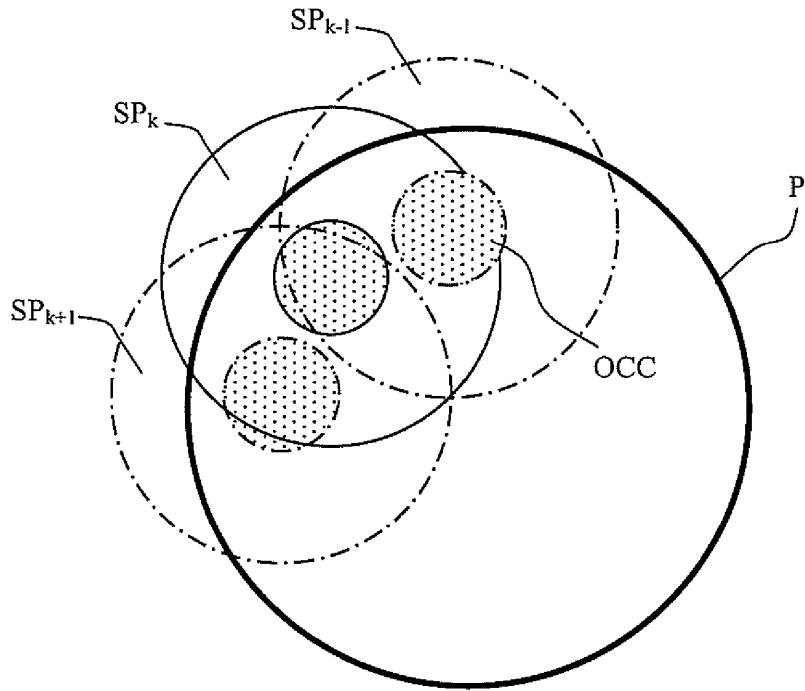


FIG. 7

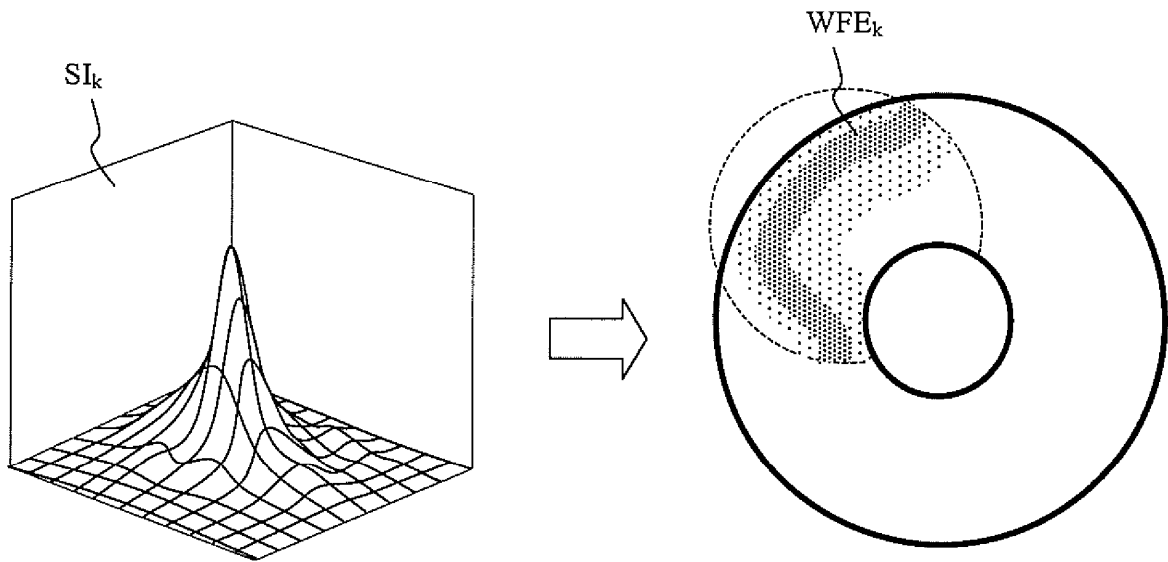


FIG. 8

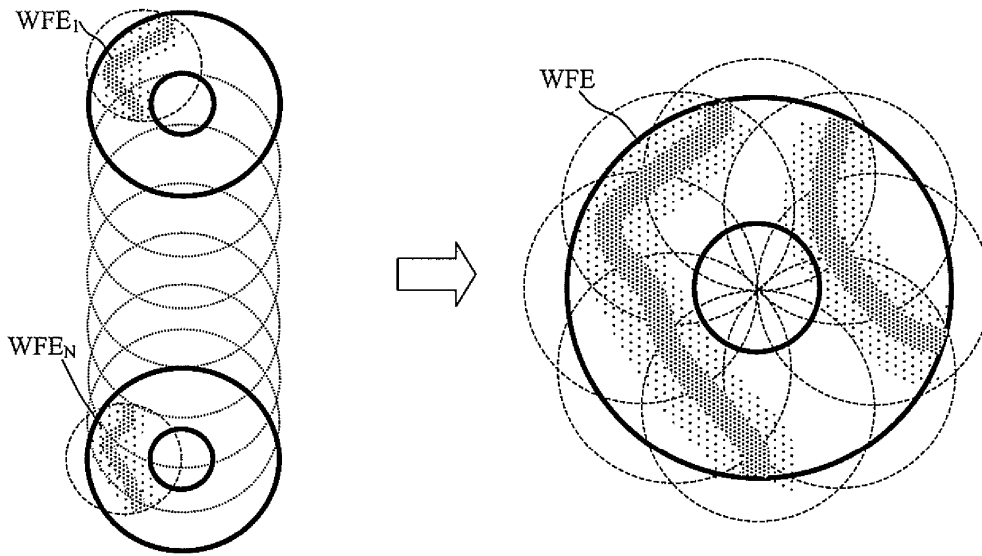


FIG. 9

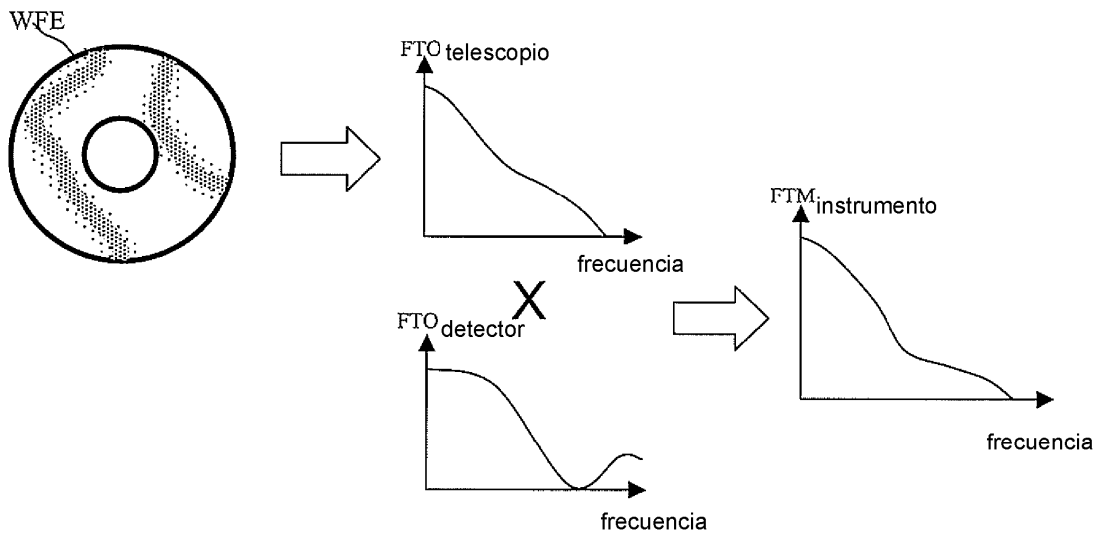


FIG. 10