

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 877 682**

51 Int. Cl.:

**G02B 17/06** (2006.01)

**G02B 23/06** (2006.01)

**G02B 26/06** (2006.01)

**G02B 27/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.12.2017 E 17205097 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.05.2021 EP 3336594**

54 Título: **Telescopio compacto con múltiples distancias focales compensadas por componentes ópticos esféricos**

30 Prioridad:

**13.12.2016 FR 1601770**

**09.03.2017 FR 1700254**

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

**17.11.2021**

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)**

**Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade Nord,  
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**TETAZ, NICOLAS**

74 Agente/Representante:

**GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo**

ES 2 877 682 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**

Telescopio compacto con múltiples distancias focales compensadas por componentes ópticos esféricos

**Campo de la invención**

5 El campo de la invención es el de los telescopios, en particular el de los telescopios de observación embarcados en satélites. Más concretamente, el campo de la invención se refiere a los sistemas catóptricos con grandes distancias focales.

**Estado de la técnica**

10 Los telescopios espaciales actuales son de distancia focal. Un tipo de telescopio conocido es el telescopio Korsh. El telescopio Korsh, también llamado TMA (acrónimo de la expresión anglosajona "Three Mirrors Anastigmat"), es un telescopio anastigmático de tres espejos esféricos (es decir, cóncavo-convexo-cóncavo) que incluye al menos un primer espejo cóncavo M1, un segundo espejo convexo M2 y un tercer espejo cóncavo M3. Los tres espejos son esféricos y tienen una forma clásica para un telescopio de este tipo. Los espejos primero, segundo y tercero M1, M2 y M3 son esféricos, de forma fija, estando cada espejo caracterizado por al menos dos parámetros, un radio de curvatura R y una cónica c.

15 Este sistema óptico tiene un eje óptico O bien conocido por el experto en la materia, definido por el rayo que pasa por el centro de la pupila de entrada P<sub>E</sub> y perpendicular a esta pupila.

20 Los tres espejos M1, M2 y M3 están dispuestos de tal manera que el primer espejo y el segundo espejo forman una imagen intermedia de un objeto en el infinito dispuesto en un plano focal intermedio P<sub>FI</sub> situado entre el segundo espejo y el tercer espejo, formando el tercer espejo a partir de esta imagen intermedia una imagen final en el plano focal P<sub>F</sub> del telescopio en el que se sitúa un detector D. Es bien conocido por el experto en la materia que mediante la aplicación de las ecuaciones de Korsch se calculan fácilmente las posiciones y parámetros respectivos de los tres espejos. La solución teórica es de muy buena calidad, lo que constituye el interés de este tipo de telescopio.

La calidad de un sistema óptico se evalúa comparando la onda luminosa ideal limitada por difracción con la onda luminosa real a la salida del sistema óptico, teniendo en cuenta los defectos del sistema óptico por el que pasa.

25 El análisis de la diferencia entre la onda teórica y la real permite identificar los tipos de defectos o aberraciones del sistema óptico.

Se sabe que las principales aberraciones geométricas son: la aberración esférica, el astigmatismo, el coma, la curvatura de campo (desenfoque en el campo) y la distorsión.

30 Los polinomios, y más particularmente los polinomios de Zernike, se utilizan clásicamente para calificar más fácilmente los diversos tipos de aberraciones de un frente de onda (es decir, una superficie) a la salida de un sistema óptico.

Las superficies de Zernike son las más utilizadas. Una superficie de Zernike se define en coordenadas polares en un espacio (ρ, θ, z), y si z(ρ, θ) representa la coordenada z de un punto de esta superficie, tenemos la relación

$$z(\rho, \theta) = \frac{c(\rho^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2\rho^2}} + \sum C_j Z_j \quad (1)$$

35 Siendo Z<sub>j</sub> un polinomio de Zernike de orden j y C<sub>j</sub> la constante asociada a este polinomio, siendo j un índice que varía entre 0 y un número entero respectivamente, siendo k la constante de conicidad y c la curvatura de la superficie.

Cualquier superficie descompuesta según polinomios se denomina superficie φ-polinómica. Así, esta superficie se caracteriza por los valores de los coeficientes de estos polinomios.

40 El interés de la descomposición de las fuentes de onda en polinomios de Zernicke ortogonales es que cada polinomio de la base considerada corresponde a una categoría diferente de aberración geométrica. Así, es posible conocer la naturaleza de las aberraciones presentes en un frente de onda.

La tabla I que figura a continuación ilustra los diferentes polinomios de Fringe Zernike en función de su orden (aquí de 1 a 16), así como el tipo de aberración correspondiente.

45

Tabla I

Orden	Polinomio	Aberración (s)
1	1	Pistón
2	$\rho \text{ Cos}[\theta]$	Inclinación en x
3	$\rho \text{ Sen}[\theta]$	Inclinación en y
4	$-1 + 2 \rho^2$	Enfoque
5	$\rho^2 \text{ Cos}[2 \theta]$	Astigmatismo a 0°
6	$\rho^2 \text{ Sen}[2 \theta]$	Astigmatismo a 45°
7	$\rho (-2 + 3 \rho^2) \text{ Cos}[\theta]$	Coma en x
8	$\rho (-2 + 3 \rho^2) \text{ Sen}[\theta]$	Coma en y
9	$1 - 6 \rho^2 + 6 \rho^4$	Esfericidad y enfoque
10	$\rho^3 \text{ Cos}[3 \theta]$	Clasificación de láminas
11	$\rho^3 \text{ Sen}[3 \theta]$	Clasificación de láminas
12	$\rho^2 (-3 + 4 \rho^2) \text{ Cos}[2 \theta]$	Astigmatismo orden 2
13	$\rho^2 (-3 + 4 \rho^2) \text{ Sen}[2 \theta]$	Astigmatismo orden 2
14	$\rho (3 - 12 \rho^2 + 10 \rho^4) \text{ Cos}[\theta]$	Coma en x orden 2
15	$\rho (3 - 12 \rho^2 + 10 \rho^4) \text{ Sen}[\theta]$	Coma en y orden 2
16	$-1 + 12 \rho^2 - 30 \rho^4 + 20 \rho^6$	Esfericidad orden 2

Adoptando la definición de los polinomios de Fringe Zernike, los diferentes tipos de aberración corresponden a:

- el foco corresponde al término Z4,
- 5 - el astigmatismo corresponde a los términos Z5 y Z6,
- el coma a los términos de Z7 y Z8 y
- la aberración esférica de primer orden en Z9.
- aberración esférica de segundo orden en Z16

10 Clásicamente, se sabe que se puede mejorar la calidad de la imagen de los instrumentos ópticos añadiendo un espejo deformable MD en la pupila de salida, comúnmente llamado superficie "free form" o de forma libre, como se ilustra en la figura 1 para un TMA monofocal.

15 Pero siendo la solución teórica del telescopio de tres espejos Korsch de muy buena calidad, este espejo no interviene en la combinación óptica del telescopio y se utiliza únicamente para compensar los defectos debidos a la imperfección de realización del sistema real en comparación con la solución teórica (turbulencias atmosféricas, defectos del espejo M1). Por ello, se suele utilizar un espejo deformable en la pupila de salida para corregir las aberraciones constantes en el campo. Cuando se coloca en la pupila de un instrumento, la deformación del espejo deformable mediante la adición de un polinomio de Zernike introduce aberraciones constantes en el campo. Por

ejemplo, si introducimos un valor distinto de cero para el polinomio Z5 en el espejo deformable, cada punto del campo se verá afectado por el astigmatismo. En el caso general, la superficie S que debe darse al espejo deformable para permitir la corrección de los defectos se denomina superficie de "forma libre", lo que significa que no tiene simetría de rotación (véase la fórmula general (1) y la tabla I).

- 5 La formulación (1) es una base matemática de polinomios ortogonales que permite definir una superficie rotacionalmente simétrica o no.

Una superficie esférica es una superficie con simetría de rotación que no puede describirse con un único radio de curvatura (como una esfera) porque la curvatura local cambia a lo largo de la superficie.

La definición clásica de una superficie esférica definida en un espacio (ρ, z) es:

$$Z = \frac{\frac{\rho^2}{R}}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot \frac{\rho^2}{R^2}}} + A \cdot \rho^4 + B \cdot \rho^6 + C \cdot \rho^8 + \dots \quad (2)$$

10

R es el radio de curvatura, k la constante de conicidad, los términos A, B, C los coeficientes de asfericidad de 4º, 6º y 8º orden.

- 15 Comparando la fórmula (1) y la tabla I con la fórmula (2), se observa que una superficie esférica descompuesta en forma de polinomios de Zernike tiene Z4, Z9 y Z16 (polinomios de Zernicke en función de ρ únicamente, es decir, sólo simetría de revolución) y no Z5, Z6, Z7, Z8, Z10 a Z15 (coeficientes en función de θ), siendo por tanto estos últimos coeficientes nulos para este tipo de superficie.

- 20 Cuando se utiliza un espejo MD deformable y controlable para compensar las aberraciones del sistema, se puede obtener cualquier área deseada controlando el espejo, calculándose el área deseada del MD para compensar los defectos del sistema real. La superficie deseada se descompone utilizando los polinomios, y la superficie se genera aplicando los coeficientes correctos de forma controlada a través del sistema de control del espejo. La forma de la superficie puede entonces cambiarse modificando los valores de los coeficientes.

Así, es posible introducir las aberraciones deseadas en el diseño controlando directamente el valor de los coeficientes Cj.

- 25 Además, puede ser interesante poder cambiar la distancia focal en vuelo. En efecto, cambiar la distancia focal en vuelo permite modificar el campo de visión y/o la resolución de la imagen con un solo instrumento.

Actualmente existen dos familias de telescopios:

- telescopios bifocales, que pueden obtener imágenes de alta resolución pero en un campo estrecho o en un campo amplio pero con menor resolución, y
- telescopios con zoom reflector continuo que permiten un cambio de distancia focal en vuelo.

- 30 Como ejemplos de telescopios bifocales, se pueden citar los que se basan en la separación de un canal común en dos canales de distinta distancia focal. La separación puede hacerse de forma espectral: el mismo campo se separa mediante una lámina dicróica si el dominio de la longitud de onda permite esta separación espectral (ej.: visible e infrarrojo). Puede hacerse separando el flujo recibido en flujo reflejado y transmitido, mediante una densidad óptica si la gama de longitudes de onda no está disociada (por ejemplo, 50% del flujo es reflejado, 50% transmitido).

- 35 Ventajas de estas soluciones bifocales con separación de canal común:

- Función bifocal simultánea,
- Observación de un campo de visión común.

Desventajas de estas soluciones:

- 40
- Adición de elementos ópticos (lámina dicróica/densidad + espejos/lentes específicos para cada canal),
  - Detectores específicos para cada canal,
  - Si la gama espectral de los canales no está disociada, una parte importante del flujo debe perderse,
  - Sólo bifocales.

También se pueden mencionar los telescopios con separación en el campo de visión: los dos canales no tienen el mismo campo de visión.

Ventaja de estas soluciones bifocales con separación en el campo de visión:

- función bifocal simultánea.

5 Desventajas de estas soluciones:

- Incorporación de elementos ópticos: espejos/lentes específicos para cada canal,
- Detectores específicos para cada canal,
- Observación de un campo de visión diferente,
- Sólo bifocales.

10 Otra solución bifocal descrita en la patente US 6084727 permite modificar la distancia focal del telescopio mediante la inserción de elementos reflectantes en la trayectoria óptica.

Ventajas de esta solución de inserción de elementos reflectantes:

- Un solo detector,
- Observación de un campo común.

15 Desventajas de esta solución:

- Adición de elementos ópticos: espejos específicos para uno de los canales,
- Sólo bifocales,
- Función bifocal no simultánea.

20 Como ejemplo de telescopio con zoom continuo de reflexión, podemos citar el telescopio descrito en la patente US 6333811; se basa en un telescopio de tipo Cassegrain con recuperación de imagen cuyo aumento es variable, lo que permite obtener un zoom continuo. Ventajas de esta solución:

- Un solo detector,
- Zoom continuo,
- Observación de un campo común,

25 - No hay cambios en la forma de los espejos.

Desventajas de esta solución:

- El número de espejos: 7 espejos, incluyendo 3 esféricos, 2 "free form" y 1 espejo plano de deflexión,
- Desplazamiento de dos espejos freeforms cuyo posicionamiento puede ser sensible,
- Telescopio del tipo Cassegrain, por lo tanto con campo de visión limitado.

30 También hay objetivos de zoom que utilizan espejos de radio de curvatura deformable, un ejemplo de los cuales se ilustra en la publicación de Kristof Seidl et al. "Wide field-of-view all-reflective objectives designed for multispectral image acquisition in photogrammetric applications".

Ventajas de esta solución:

- Un solo detector,
- 35 - Zoom continuo,
- Observación de un campo común,
- No se desplazan los espejos.

Desventajas de esta solución:

- Demasiado voluminoso para distancias focales largas, por ejemplo, más de 10 m,

- Los espejos deformables sólo funcionan para espejos esféricos con diámetros pequeños del orden de unos pocos centímetros: por lo tanto, no son compatibles con los tamaños de pupila de los telescopios espaciales que suelen ser mayores de 0,5 m.

5 Otros telescopios convencionales se divulgan en los documentos US4993818, US6084727, US5144476, así como en ZHAO XIN et al: "Three mirror anastigmatic zoom system using deformable mirrors",INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOTOELECTRONIC DETECTION AND IMAGING 2011: SPACE EXPLORATION TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS, SPIE, 1000 20TH ST. BELLINGHAM WA 98225-6705 USA, vol. 8196, no. 1, 9 de junio de 2011, pp. 1-8.

10 Por lo tanto, actualmente no existe ningún telescopio TMA multifocal con una calidad óptica muy alta para todas las distancias focales que no utilice un componente caro como un espejo deformable.

15 Un objetivo de la presente invención es superar los inconvenientes mencionados proponiendo un telescopio compacto, mono-detector, multifocal, de tres espejos, que funciona para grandes diámetros de pupila, con un campo de visión mayor que el de un Cassegrain ( $>1^\circ$ ), y que presenta una calidad de imagen muy elevada para todas las distancias focales al estar compensado con componentes esféricos "clásicos" que no tienen una función deformable "free-form".

### Descripción de la invención

Es un objeto de la presente invención proporcionar un telescopio como se define en la reivindicación independiente 1, así como un procedimiento para determinar los parámetros de un telescopio como se define en la reivindicación independiente 16.

20 Preferiblemente, la forma de la superficie de cada componente esférico comprende además una aberración esférica de segundo orden para mejorar aún más la calidad de la imagen según dicho criterio.

25 Ventajosamente, la nueva conicidad se desvía de la conicidad inicial en más de un 5% y menos de un 30%. Según una realización, una nueva conicidad del primer espejo y una nueva conicidad del segundo espejo se determinan a partir de una conicidad inicial del primer espejo y una conicidad inicial del segundo espejo, respectivamente, determinándose las conicidades iniciales a partir de las ecuaciones de Korsch,

determinándose las nuevas conicidades de forma que se mejore aún más la calidad de imagen de dicho telescopio según dicho criterio.

Preferentemente, cada superficie de un componente esférico se define a partir de los coeficientes de los polinomios de Fringe Zernike Z4, Z9 y opcionalmente Z16.

30 Según una realización se define:

- un astigmatismo positivo como el que un foco tangencial se sitúa ante un foco sagital,
- un astigmatismo negativo como un astigmatismo en el que un foco sagital se sitúa ante un foco tangencial,
- un coma positivo como un coma para el cual la forma de la mancha de la imagen de un punto fuente es un "cometa" cuya cola se aleja del eje óptico y,
- 35 - un coma negativo como un coma en el que la forma de la mancha de la imagen de un punto fuente es un "cometa" cuya cola está dirigida hacia el eje óptico,

las aberraciones compensables son astigmatismo positivo y coma positivo para la distancia focal máxima, astigmatismo positivo y coma negativo para la distancia focal mínima.

40 Preferentemente, la nueva conicidad del tercer espejo se determina de forma que se modifique el signo del astigmatismo del telescopio para la distancia focal mínima, sin la presencia de un componente esférico.

Preferiblemente el criterio predeterminado es minimizar un error de forma de onda.

Preferentemente, dichas posiciones de los componentes esféricos están separadas entre sí por un máximo de 50 mm.

45 De acuerdo con una realización, al menos un componente esférico es retráctil para estar dispuesto en el camino óptico del haz correspondiente a la distancia focal asociada cuando el telescopio está operando en dicha distancia focal asociada, y fuera de los caminos ópticos asociados con las otras distancias focales cuando el telescopio está operando en una de estas otras distancias focales. Ventajosamente, los componentes ópticos esféricos son espejos retráctiles.

Ventajosamente, los espejos retráctiles están montados en un solo soporte, siendo entonces las posiciones de los espejos retráctiles sustancialmente idénticas.

5 Según una realización, los componentes esféricos son espejos retráctiles montados en un único soporte, comprendiendo el soporte además una posición para la que no aparece ningún espejo retráctil en el camino óptico del haz que incide sobre dicho soporte, pasando entonces el haz a través del soporte por un camino óptico secundario, comprendiendo además el telescopio:

- 10 - un dispositivo óptico dispuesto en el camino óptico secundario, configurado para generar un segundo plano focal del telescopio correspondiente a una distancia focal seleccionada, estando dicho dispositivo óptico configurado además para corregir dichas aberraciones compensables de dicho telescopio y para optimizar la calidad de la imagen en el segundo plano focal del telescopio según dicho criterio predeterminado y,
- un segundo detector dispuesto en el segundo plano focal del telescopio, y sensible en una segunda banda espectral diferente de una primera banda espectral de sensibilidad del primer detector.

15 Ventajosamente, el dispositivo óptico está adaptado para operar en transmisión en la segunda banda espectral, la primera banda espectral está en el rango visible y la segunda banda espectral está en el rango infrarrojo, y la distancia focal seleccionada tiene un valor menor que la distancia focal mínima.

Según otra realización, el al menos un componente esférico es una lámina que funciona en transmisión.

Según una variante, el telescopio según la invención comprende sólo dos distancias focales, la distancia focal mínima y la distancia focal máxima.

20 Otras características, propósitos y ventajas de la presente invención se harán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada y a la vista de los dibujos adjuntos que se dan como ejemplos no limitantes y en los que:

La figura 1 ya citada ilustra un telescopio de tipo Korsch mono-focal con un espejo deformable en la pupila de salida del telescopio.

25 La figura 2 ilustra un telescopio multifocal de tipo Korsch visto en un plano YZ, cuya distancia focal se hace variable desplazando el tercer espejo sobre el eje óptico. La figura 2a describe el sistema óptico para la distancia focal máxima y la figura 2b describe el sistema óptico para la distancia focal mínima.

La figura 3 ilustra el telescopio de la figura 2 visto en el plano XZ, la figura 3a describe el sistema óptico para la distancia focal máxima y la figura 3b describe el sistema óptico para la distancia focal mínima.

La figura 4a describe una primera variante de los medios para variar el camino óptico entre el tercer espejo y el detector D.

30 La figura 4b ilustra una segunda variante para variar el camino óptico entre el tercer espejo y el detector D en el que el detector D es fijo, comprendiendo el medio para variar el camino óptico dos espejos T1 y T2 en forma de tejado, para una posición del espejo T2.

35 La figura 4c ilustra el segundo medio alternativo de variación del camino óptico entre el tercer espejo y el detector D en el que el detector D está fijo, comprendiendo el medio de variación del camino óptico dos espejos T1 y T2 en forma de tejado, para otra posición del espejo T2.

La figura 4d ilustra una tercera variante en la que los medios para variar el camino óptico entre el tercer espejo y el detector D comprenden espejos convencionales fijos y al menos un espejo convencional retráctil....

40 La figura 5 ilustra las aberraciones presentes en el plano focal para el telescopio bifocal cuyos espejos esféricos M1, M2 y M3 tienen los parámetros iniciales obtenidos al resolver las ecuaciones de Korsch. La figura 5a ilustra estas aberraciones cuando el telescopio funciona a la máxima distancia focal, y la figura 5b ilustra estas aberraciones cuando el telescopio funciona a la mínima distancia focal.

La figura 6 describe la convención de signos utilizada para algunas categorías de aberraciones.

La figura 7 muestra un telescopio tipo Korsh según la invención.

45 La figura 8 ilustra una primera variante del telescopio según la invención en la que todos los componentes esféricos CAi son espejos esféricos retráctiles.

La figura 9 ilustra un ejemplo de telescopio bifocal según la primera variante de la invención.

La figura 9bis muestra un ejemplo de soporte para los espejos retráctiles de un telescopio bifocal según la invención.

La figura 10 ilustra una segunda variante del telescopio según la invención en la que al menos un componente esférico es una lámina que funciona en transmisión.

5 La figura 11 ilustra, para el sistema inicial, las aberraciones resultantes tras la introducción de la aberración esférica  $Z_{9CA}$  en un componente esférico CA en función de su posición relativa con respecto a la pupila de salida efectiva, cuando el CA está situado aguas abajo de la pupila de salida efectiva. La figura 11a corresponde a  $Z_{9CA} < 0$  y la figura 8b a  $Z_{9CA} > 0$ .

10 La figura 12 ilustra, para el sistema inicial, las aberraciones resultantes tras la introducción de la aberración esférica  $Z_{9CA}$  en un componente esférico CA en función de su posición relativa con respecto a la pupila de salida efectiva, cuando CA está situado aguas arriba de la pupila de salida efectiva. La figura 9a corresponde a  $Z_{9CA} < 0$  y la figura 9b a  $Z_{9CA} > 0$ .

La figura 13 describe la evolución del valor medio del astigmatismo del telescopio en función del valor de la conicidad del M3.

15 La figura 14 muestra las diferentes aberraciones presentes en el primer plano focal del telescopio, con M3 que tiene una conicidad  $c'3 = -0,52$ , figura 14a para la distancia focal máxima y figura 14b para la distancia focal mínima.

La figura 15 muestra la evolución del valor cuadrático medio del error de forma de onda WFE RMS en función del valor de la conicidad del M3.

20 La figura 16 ilustra las diferentes aberraciones en el primer plano focal de un telescopio según la invención, teniendo el telescopio una nueva conicidad  $c'3$  del espejo M3, y para el espejo deformable, una posición intermedia  $P_m$  y valores optimizados de  $Z_{9MD}$  y  $Z_{4MD}$  ( $Z_{9MD/max}$  y  $Z_{9MD/min}$ ;  $Z_{4MD/max}$  y  $Z_{4MD/min}$ ) La figura 16a muestra las diferentes aberraciones para la distancia focal máxima y la figura 16b para la distancia focal mínima.

La figura 17 describe la variación del foco medio  $\langle Z_4 \rangle$  del telescopio de 3 espejos sin componente esférico en función del valor de la cónica de M3.

25 La figura 18 muestra la evolución de las principales aberraciones en función del valor de la conicidad de M2, para las distancias focales mínima y máxima.

La figura 19 muestra la evolución de las principales aberraciones en función del valor de la conicidad de M1 para las distancias focales mínima y máxima.

30 La figura 20 ilustra las diferentes aberraciones en el primer plano focal de un telescopio según la invención, teniendo el telescopio nuevas conicidades  $c'1$ ,  $c'2$  y  $c'3$  respectivamente de los espejos M1, M2 y M3, y para los componentes del espejo esférico, una posición  $P_m$  idéntica y valores optimizados de  $Z_{9MD}$ ,  $Z_{4MD}$  y  $Z_{16MD}$ . La figura 20a muestra las diferentes aberraciones para la distancia focal máxima y la figura 20b para la distancia focal mínima.

La figura 21 ilustra una realización multicanal del telescopio según la invención.

35 La figura 22 ilustra un soporte de espejo esférico adecuado para la realización multicanal.

La figura 23 ilustra el procedimiento de determinación de los parámetros de un telescopio anastigmático según la invención

La figura 24 muestra la evolución de la WFE promediada en las diferentes distancias focales, después de cada etapa del procedimiento.

#### 40 Descripción detallada de la invención

En primer lugar, describiremos un telescopio de tipo Korsch hecho multifocal. Las figuras 2 y 3 describen un telescopio 20 de tipo Korsch con 3 espejos multifocales, cuya distancia focal se hace variable desplazando el tercer espejo M3 sobre el eje óptico del telescopio O con la ayuda de medios 5 de desplazamiento lineal. El documento US 4993818 describe brevemente el principio de este sistema. Un telescopio de este tipo puede utilizarse en un entorno espacial, pero también en tierra para la observación o la vigilancia.

El desplazamiento del espejo M3 entre dos posiciones extremas  $P_{min}$  y  $P_{max}$  permite conseguir una distancia focal variable entre una distancia focal mínima  $f_{min}$  y una distancia focal máxima  $f_{max}$  respectivamente. El instrumento comprende al menos dos distancias focales  $f_{min}$  y  $f_{max}$  y es capaz de funcionar para distancias focales intermedias, desplazando el espejo M3.

50 La figura 2 ilustra el telescopio visto desde un lado en un plano YZ, la figura 2a ilustra el telescopio operando con la distancia focal máxima y la figura 2b ilustra el telescopio operando con la distancia focal mínima. La figura 3 ilustra el

telescopio visto lateralmente en un plano XZ, la figura 3a ilustra el telescopio funcionando a la máxima distancia focal y la figura 3b ilustra el telescopio funcionando a la mínima distancia focal.

5 Para M3 en una de las posiciones extremas  $P_{min}$ , el telescopio tiene la distancia focal mínima  $f_{min}$ , una primera pupila de salida PS1 en una primera posición P1 y un plano focal  $PF_{min}$  (Figuras 2b, 3b). Para M3 en la otra posición extrema  $P_{max}$ , el telescopio tiene la distancia focal máxima  $f_{max}$ , una segunda pupila de salida PS2 en una segunda posición P2 y un plano focal  $PF_{max}$  (Figuras 2a, 3a).

10 Dado que la posición del plano focal del telescopio varía con la distancia focal, es aconsejable integrar medios para variar el camino óptico entre el tercer espejo M3 y el detector D configurados de manera que el detector permanezca posicionado en el plano focal del telescopio. Estos medios se describen a continuación para el caso de un telescopio multifocal estándar 20, y se aplicarán más adelante a un telescopio según la invención.

Según una primera variante, los medios para variar el recorrido óptico entre el tercer espejo M3 y el detector D comprenden medios para trasladar el detector D a lo largo del eje óptico O, como se ilustra en la figura 4a. Un espejo plano M0 permite plegar el haz para compactar mejor el sistema óptico global y/o resolver un problema de espacio.

15 Según una segunda variante ilustrada en las figuras 4b y 4c, el detector D es fijo y los medios para variar el recorrido óptico comprenden dos espejos T1, T2 en forma de tejado (es decir, que tienen dos caras a aproximadamente  $90^\circ$  entre sí) situados entre el tercer espejo M3 y el detector D, y medios 10' para la traslación lineal de uno de los dos espejos en forma de tejado, T2 en el ejemplo, permaneciendo el otro fijo, a lo largo de un eje no paralelo al eje óptico, a fin de variar el recorrido óptico. Las pendientes de T1, preferiblemente de  $45^\circ$ , no son necesariamente paralelas a las de T2. La figura 4b ilustra una primera posición del espejo de tejado T2 correspondiente a una primera posición del espejo M3 (distancia focal corta), y la figura 4c ilustra una segunda posición del espejo de tejado T2 correspondiente a una segunda posición del espejo M3 (distancia focal más larga).

Un espejo plano M0 permite plegar el haz para compactar mejor el sistema óptico global y/o resolver un problema de espacio.

25 Una tercera variante ilustrada en la Figura 4d es particularmente adecuada cuando el telescopio es bifocal, es decir, opera a dos distancias focales solamente, la distancia focal  $f_{min}$  y la distancia focal  $f_{max}$ . El haz de luz correspondiente al funcionamiento a  $f_{min}$  está en gris oscuro, y el correspondiente al funcionamiento a  $f_{max}$  está en gris más claro. Los medios para variar la trayectoria óptica comprenden espejos convencionales fijos  $M_f$ ,  $M'_f$  y  $M''_f$  y al menos un espejo convencional retráctil Mesc. El espejo  $M_f$  está dispuesto en las trayectorias ópticas de los dos haces. El espejo retráctil se retrae cuando el telescopio funciona a  $f_{min}$  y se coloca en la trayectoria del haz cuando el telescopio funciona a  $f_{max}$ . Los espejos plegables  $M'_f$  y  $M''_f$  colocados en la trayectoria óptica del haz reflejado por Mesc permiten obtener un plano focal  $PF_{max}$  en el mismo lugar que  $PF_{min}$ , donde está colocado el detector D.

35 Para comprender el camino que condujo a la invención, describiremos primero cómo calcular un telescopio de tipo Korsch con una pluralidad de distancias focales  $f_i$ ,  $i$  indexadas de 1 a  $n$ . La distancia focal  $f_{min}$  corresponde a  $f_1$  y la distancia focal  $f_{max}$  corresponde a  $f_n$ . Para un telescopio bifocal,  $n=2$ , que opera sólo a  $f_{min}=f_1$  y  $f_{max}=f_2$ . Se determinan

los parámetros denominados iniciales del primer, segundo y tercer espejo compatibles con la distancia focal mínima  $f_{min}$  y la distancia focal máxima  $f_{max}$ ,

con un software de optimización óptica conocido en el estado de la técnica

40 Así, utilizando las ecuaciones de Korsch, determinamos los radios de curvatura y las cónicas iniciales para las dos distancias focales extremas de nuestro zoom.

Por ejemplo, es posible satisfacer las ecuaciones de Korsch simultáneamente para ambas distancias focales  $f_{min}$  y  $f_{max}$  teniendo un radio de curvatura M1 idéntico para las 2 distancias focales.

45 El punto de partida está constituido por los valores:  $R_1$ ,  $R_2_{f_{max}}$ ,  $R_2_{f_{min}}$ ,  $R_3_{f_{max}}$ ,  $R_3_{f_{min}}$ ,  $C1_{f_{max}}$ ,  $C1_{f_{min}}$ ,  $C2_{f_{max}}$ ,  $C2_{f_{min}}$ ,  $C3_{f_{max}}$ ,  $C3_{f_{min}}$ .

El resto de la optimización consiste en restringir los radios de curvatura y la conicidad para que sean idénticos para las 2 distancias focales extremas  $f_{min}$  y  $f_{max}$ .

50 La optimización se realiza de forma clásica utilizando software de cálculo óptico (CodeV, Zemax, Oslo,...). Estos programas funcionan según el principio de minimización de una función de error. Normalmente, la función de error incluye la calidad de la imagen en el plano focal y la restricción de las distancias focales  $f_{min}$  y  $f_{max}$ .

Así, con una primera optimización de la calidad de imagen en el plano focal del telescopio según un criterio predeterminado, se obtienen los parámetros iniciales:

Radios de curvatura iniciales:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  para  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$  respectivamente. Conicidades iniciales:  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  para  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$  respectivamente.

5 El criterio predeterminado consiste, por ejemplo, en minimizar un error de forma de onda o WFE por "Wave Front Error" en inglés, promediado sobre una pluralidad de puntos en el campo, que es bien conocido por los expertos en la materia. Normalmente, se busca minimizar el valor cuadrático medio o WFE RMS.

10 En este tipo de solución, las formas de los espejos  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ , caracterizadas por los parámetros radio de curvatura  $R$  y constante de conicidad  $c$  (se opta aquí por no tomar en consideración los términos de orden superior que no aportan ninguna mejora), responden a las ecuaciones establecidas por M. Korsch para obtener una solución aplanática y anastigmática, sin curvatura de campo. Sin embargo, estas ecuaciones no pueden resolverse rigurosamente de forma simultánea para las dos distancias focales  $f_{min}$  y  $f_{max}$ .

15 Es un compromiso y la calidad de la imagen se ve afectada. La calidad de la imagen sigue siendo aceptable para los telescopios con poca limitación de volumen (es decir, para los que los rayos inciden en los espejos con ángulos pequeños). En el ámbito espacial, la restricción de volumen es primordial. Por lo tanto, esta solución no es viable para los instrumentos espaciales de gran distancia focal y tamaño de pupila en los que los rayos inciden en los espejos con ángulos elevados.

Un ejemplo ilustrativo es un telescopio bifocal con:

Distancia focal máxima = 37,5 m

Distancia focal mínima: 15 m

Relación de zoom: 2,5

20 Diámetro del espejo  $M_1$ : 1,1 m

Distancia entre  $M_1$  y  $M_2$ : 1600 mm

Distancia entre las dos posiciones extremas de  $M_3$ : 250 mm

Distancia entre  $PS_1$  y  $PS_2$ : 250 mm

Distancia entre  $PF_{max}$  y  $PF_{min}$ : 1600 mm (PF: plano focal).

25 La etapa de determinar los parámetros iniciales mediante una primera optimización como la descrita anteriormente da como resultado una configuración inicial del telescopio con los siguientes valores:

$R_1 = 4000$  mm  $c_1 = -1$

$R_2 = 1000$  mm  $c_2 = -2,1$

$R_3 = 1200$  mm  $c_3 = -0,61$

30 La figura 5 ilustra las aberraciones presentes en el plano focal  $P_F$  (posición del detector) para el telescopio bifocal cuyos tres espejos esféricos  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$  tienen los parámetros iniciales obtenidos mediante la resolución de las ecuaciones de Korsch como se ha explicado anteriormente.

La figura 5a muestra las aberraciones para la distancia focal máxima  $f_{max}$ , y la figura 5b para la distancia focal mínima  $f_{min}$ .

35 Como recordatorio, el enfoque corresponde a  $Z_4$ , el astigmatismo a  $Z_5$  y  $Z_6$  ( $Z_5/6$ ), el coma a  $Z_7$  y  $Z_8$  ( $Z_7/8$ ) y la aberración esférica (de primer orden) a  $Z_9$ .

Para caracterizar con mayor precisión las diferentes categorías de aberraciones estudiadas, adoptaremos una convención de signos ilustrada en la figura 6. Denominaremos:

40 - astigmatismo "radial": astigmatismo cuyo foco tangencial se sitúa ante el foco sagital. En lo sucesivo, este astigmatismo se considerará por convención como positivo y se anotará  $A^+$ ;

- astigmatismo "tangencial": astigmatismo cuyo foco sagital se sitúa ante el foco tangencial. En lo sucesivo, este astigmatismo se considerará por convención como negativo y se anotará  $A^-$ .

45 - coma "externo": coma en el que la forma de la mancha de la imagen de un punto fuente es un "cometa" cuya cola (parte más ancha) se aleja del eje óptico. Se trata del coma creado por una lente bifocal. En lo sucesivo, este coma se considerará por convención como positivo, y se anotará  $C^+$ ;

- coma "interno": coma en el que la forma de la mancha de la imagen de un punto fuente es un "cometa" cuya cola se dirige hacia el eje óptico. En lo sucesivo, este coma se considerará por convención como negativo y se anotará  $C^-$

5 Se puede ver en la figura 5 que estas aberraciones, excepto la aberración esférica  $Z_9$ , son variables en el campo (X, Y) del telescopio. Las aberraciones dominantes para esta configuración inicial del telescopio son:

Aberraciones dominantes iniciales para la distancia focal máxima (figura 5a):

Astigmatismo ( $Z_5/6$ )  $>0$  anotado  $A^+$ , y Coma ( $Z_7/8$ )  $>0$  anotado  $C^+$ .

Aberraciones dominantes iniciales para una distancia focal mínima (figura 5b):

Astigmatismo ( $Z_5/6$ )  $<0$  anotado  $A^-$  y Coma ( $Z_7/8$ )  $<0$  anotado  $C^-$

10 El telescopio en su estado actual no puede utilizarse debido a las aberraciones demasiado importantes.

15 El telescopio tipo Korsh 30 según la invención, ilustrado en la figura 7, se basa en un telescopio 20 como el ilustrado en las figuras 2 a 4, que comprende los tres espejos M1, M2 y M3 como se ha descrito anteriormente, y un primer detector D situado en un primer plano focal  $P_F$  (nos referimos a D y  $P_F$  como primer detector y primer plano focal respectivamente, ya que un segundo detector y un segundo plano focal se introducirán más adelante en una variante de la invención).

20 El telescopio 30 según la invención comprende además una pluralidad de componentes ópticos esféricos  $CA_i$ , de índice  $i$  comprendido entre 1 y  $n$ , asociados respectivamente a la pluralidad de distancias focales  $f_i$ , y dispuestos respectivamente en una pluralidad de posiciones  $PCA_i$  situadas entre la primera posición  $P_1$  de la pupila de salida PS1 y la segunda posición  $P_2$  de la pupila de salida PS2. Es entre estas dos posiciones donde se minimiza el tamaño de los componentes esféricos. La función de estos componentes esféricos es compensar las aberraciones del sistema, distancia focal por distancia focal, y su cálculo se describe a continuación.

Preferiblemente las posiciones respectivas de los componentes esféricos están separadas entre sí por no más de 50 mm, preferiblemente no más de 20 mm. Esto facilita los cálculos de optimización que se describen más adelante.

25 El telescopio 30 puede incluir una pluralidad de  $n$  distancias focales con  $n > 2$ , o sólo dos distancias focales  $f_{min}$  y  $f_{max}$  (telescopio bifocal).

30 El telescopio 30 comprende además medios 50 de variación de la trayectoria óptica, dispuestos entre los componentes esféricos  $CA_i$  y el primer detector D, y configurados de manera que el primer detector permanezca posicionado en el primer plano focal del telescopio. Los medios 50 son típicamente los medios 10 descritos en la figura 4a, o el conjunto  $[T_1, T_2, 10']$  descrito en las figuras 4b y 4c, o un conjunto que comprende espejos fijos y al menos un espejo retráctil, como el conjunto  $[M_{0esc}, M_f, M_f']$  descrito en la figura 4d.

35 Cada componente esférico  $CA_i$  está dispuesto en una trayectoria óptica de un haz correspondiente a la distancia focal asociada  $f_i$  cuando el telescopio está operando a dicha distancia focal asociada  $f_i$ , y fuera de la trayectoria óptica asociada a otra distancia focal cuando el telescopio está operando a dicha otra distancia focal. Así, un componente esférico determinado  $CA_{i_0}$  es "visto" (reflejado o atravesado) por el haz de luz que pasa por el telescopio sólo cuando éste funciona a la correspondiente distancia focal  $f_{i_0}$ .

40 Para obtener esta propiedad, según una realización preferida, al menos un componente esférico es retráctil, a través de un mecanismo *ad hoc*, de manera que se dispone en la trayectoria óptica del haz correspondiente a dicha distancia focal asociada cuando el telescopio está operando en dicha distancia focal asociada, y fuera de la trayectoria óptica asociada a la distancia focal operativa, cuando el telescopio está operando en una de las otras distancias focales

Son posibles diferentes combinaciones del componente esférico  $CA_i$  y de los medios 50 para conseguir la propiedad anterior.

45 Según una primera variante, los componentes esféricos  $CA_i$  son todos espejos retráctiles esféricos  $MA_i$ , como se ilustra en la figura 8. Se colocan en el camino óptico común a todas las distancias focales, y se posicionan o no en el camino óptico dependiendo de la distancia focal utilizada. Normalmente, la solución más sencilla en términos de fabricación y ajuste es que todos los espejos retráctiles estén montados en un único mecanismo de movimiento 80. En este caso, las posiciones de los espejos retráctiles  $PCA_i$  son entonces sustancialmente idénticas, con una precisión de 10 mm o incluso 5 mm.

50 Para un número de distancias focales al menos igual a 3, un ejemplo de mecanismo es una rueda de barril, como se ilustra en la figura 8. Los medios 50 para posicionar el primer detector D en el primer plano focal  $P_F$  son, por ejemplo, espejos de tejado con un mecanismo de traslación  $10'$  como se describe en las figuras 4b y 4c.

- En el caso de un telescopio bifocal, puede utilizarse un mecanismo de traslación 90 para posicionar MA1 o MA2 en la trayectoria del haz óptico común a ambas distancias focales, como se ilustra en la figura 9. Cuando el telescopio 30 funciona con la distancia focal larga  $f_{max}$  (gris oscuro), el espejo retráctil M0esc se sitúa en la trayectoria óptica, los espejos fijos Mf' y Mf'' reflejan el haz sobre el primer detector D, como se describe en la figura 4d y en la figura 9.
- 5 Cuando el telescopio funciona con la distancia focal  $f_{min}$  (gris claro), el espejo M0esc se retrae con un mecanismo 95. Así se evita el complejo mecanismo de desplazamiento de los espejos de tejado.
- Para un telescopio bifocal con dos espejos esféricos retráctiles MA1 y MA2, también se puede utilizar un soporte 80 para el que el cambio de un espejo esférico a otro se realice mediante la basculación alrededor de un eje de rotación, un mecanismo conocido como "flip/flop".
- 10 Esta primera variante del telescopio 30 compuesta únicamente por espejos tiene la ventaja de funcionar independientemente de la longitud de onda, ya que los espejos no presentan cromatismo. La banda espectral de funcionamiento se determina entonces por la naturaleza del material reflectante de los espejos y la banda espectral de sensibilidad del primer detector.
- Según una segunda realización, al menos un componente esférico es una lámina esférica LA que funciona en transmisión. En la figura 10 se muestra un ejemplo de telescopio bifocal. El espejo esférico retráctil MA se sitúa en la trayectoria del haz cuando el telescopio funciona a la distancia focal  $f_{max}$ , y se retrae (mediante un mecanismo 105) cuando el telescopio funciona a la distancia focal  $f_{min}$ , estando entonces la lámina esférica LA en la trayectoria del haz. El mecanismo de desplazamiento 95 se suprime entonces.
- 15 En el caso de un telescopio 30 según la invención, la pupila de salida no es fija a lo largo de la distancia focal del zoom. La pupila de salida se desplaza (orden de magnitud  $\sim 200\text{mm}$ ) a lo largo de la distancia focal elegida. Por lo tanto, los espejos esféricos CAi. trabajan en el campo. Esto tiene un impacto muy importante en las aberraciones aportadas al sistema por los espejos esféricos.
- 20 Para un espejo situado en la pupila de salida, un haz correspondiente a un punto del campo ilumina este espejo en su totalidad, por lo que el haz reflejado se verá afectado por la aberración esférica si el espejo en cuestión tiene aberración esférica.
- 25 Para un espejo situado fuera de la pupila de salida, cada haz correspondiente a un punto del campo ilumina diferentes zonas del espejo (y no la totalidad). Por lo tanto, los frentes de onda reflejados por diferentes zonas del espejo tendrán diferentes aberraciones. Por ejemplo, como se explica más adelante, la introducción de la aberración esférica en los CAi cuya posición no coincide con la pupila de salida, introduce astigmatismo y coma en el telescopio en proporciones mucho mayores que la aberración esférica.
- 30 Estudiemos ahora qué aberraciones pueden ser corregidas por un componente esférico colocado en la zona interpupilar, es decir, entre PS1 y PS2, para el telescopio inicial optimizado con las ecuaciones de Korsh.
- A continuación, es importante no confundir las aberraciones del telescopio, correspondientes a los defectos del telescopio como sistema óptico, y las aberraciones introducidas en la forma del componente esférico, señaladas con el índice CA.
- 35 El siguiente análisis utiliza componentes de espejo esférico como ejemplo, y los cálculos pueden adaptarse fácilmente para utilizar al menos una lámina en lugar de un espejo.
- La figura 11 ilustra, para el sistema inicial, las aberraciones resultantes tras la introducción de la aberración esférica en un componente esférico  $Z_{9CA}$  ( $Z_{9CA} > 0$  para la figura 11a y  $Z_{9CA} < 0$  para la figura 11b), en función de su posición relativa con respecto a la pupila de salida efectiva PS, cuando se encuentra aguas abajo de PS con respecto al espejo M3
- 40 La figura 12 ilustra, para el sistema inicial, las aberraciones resultantes tras la introducción de la aberración esférica  $Z_{9CA}$  en un componente esférico, con  $Z_{9CA} > 0$  para la figura 12a y  $Z_{9CA} < 0$  para la figura 12b, en función de su posición relativa con respecto a la pupila de salida efectiva PS, cuando está situada aguas arriba de PS con respecto al espejo M3
- 45 El componente esférico está situado entre P1 y P2, según la figura 11 para la distancia focal máxima (aguas abajo de PS2 con respecto a M3) y según la figura 12 para la distancia focal mínima (aguas arriba de PS1 con respecto a M3).
- Se puede ver en las figuras 11 y 12 que la introducción de la aberración esférica  $Z_{9CA}$  en un componente esférico CA introduce aberraciones como astigmatismo y coma en el telescopio. Esto significa que un componente esférico puede compensar las aberraciones opuestas a las creadas por el  $Z_{9CA}$ .
- 50 De la figura 11 se deduce que para la distancia focal máxima  $f_{max}$ :
- introducir  $Z_{9CA} > 0$  crea astigmatismo  $< 0$  y coma  $< 0$ , por lo que se corrige astigmatismo  $> 0$  y coma  $> 0$

- introducir  $Z_{9CA} < 0$  crea astigmatismo  $> 0$  y coma  $> 0$ , por lo que corrige el astigmatismo  $< 0$  y el coma  $< 0$

De la figura 12 se deduce que para la distancia focal  $f_{min}$ :

- introducir  $Z_{9CA} > 0$  crea astigmatismo  $< 0$  y coma  $> 0$ , por lo que se corrige el astigmatismo  $> 0$  y el coma  $< 0$
- introducir  $Z_{9CA} < 0$  crea astigmatismo  $> 0$  y coma  $< 0$  que permite corregir el astigmatismo  $< 0$  y el coma  $> 0$

- 5 Así, al colocar un componente esférico por distancia focal entre P1 y P2,  $Z_{9CA}$  de un signo dado permite corregir simultáneamente las dos distancias focales extremas astigmatismo del mismo signo dado y coma del signo opuesto.

Por ejemplo,  $Z_{9CA} > 0$  permite corregir  $A^+$  y  $C^+$  para  $f_{max}$  y  $A^+$  y  $C^-$  para  $f_{min}$ .

Esta capacidad de corrección no es compatible con el sistema inicial cuyas aberraciones a corregir se ilustran en la figura 5.

- 10 Así, aplicando al telescopio bifocal un procedimiento clásico de optimización de sus parámetros mediante las ecuaciones de Korsch (configuración inicial del telescopio de 3 espejos) e intentando compensar las aberraciones mediante una componente esférica, llegamos a un callejón sin salida: una componente CA por distancia focal colocada en la zona interpupilar no puede corregir simultáneamente el astigmatismo y el coma presentes en el sistema que funciona a la distancia focal mínima y a la distancia focal máxima

- 15 Después de numerosos cálculos, se ha identificado una forma de producir un telescopio de tipo Korsch con una pluralidad de distancias focales y muy buena calidad de imagen.

En el telescopio 30 según la invención, el tercer espejo M3 tiene una nueva conicidad  $c_3$  determinada a partir de la conicidad inicial  $c_3$  (calculada a partir de las ecuaciones de Korsch durante la primera optimización como se ha explicado anteriormente).

- 20 La nueva conicidad  $c_3$  se determina de manera que el telescopio anastigmático con tres espejos esféricos tenga, sin la presencia de un componente esférico, y para las distancias focales mínima y máxima, aberraciones que puedan compensarse añadiendo este componente esférico.

Según una realización, las aberraciones compensables son el astigmatismo y el coma. Teniendo en cuenta la enseñanza de las figuras 11 y 12, se busca obtener una configuración del telescopio M1/M2/M3 (sin CAi) que tenga las siguientes aberraciones compensables:

- 25

Para la distancia focal máxima: astigmatismo positivo  $A^+$  y coma positivo  $C^+$ .

Para la distancia focal mínima: astigmatismo positivo  $A^+$  y coma negativo  $C^-$ .

En la figura 5, se puede observar que el astigmatismo para la distancia focal mínima es negativo. La nueva conicidad  $c_3$  se determina, por tanto, para modificar el signo del astigmatismo del telescopio sin presencia de componente esférica, para la distancia focal mínima, es decir, para transformar el astigmatismo negativo del sistema en un astigmatismo positivo para la distancia focal mínima.

- 30

La figura 13 describe la evolución del valor medio del astigmatismo del telescopio de 3 espejos (sin los CAi)  $< Z_{5/6} >$  según una unidad arbitraria, para la distancia focal mínima (curva 11) y la distancia focal máxima (curva 12), en función del valor de la conicidad de M3. Encontramos para la conicidad inicial  $c_3 = -0,61$  un astigmatismo positivo para  $f_{max}$  y negativo para  $f_{min}$ .

- 35

Esta figura muestra la existencia de un valor de  $c_3^{inf}$  para el que se invierte el signo del astigmatismo para la distancia focal mínima, aquí  $c_3^{inf} = -0,56$ . Para una nueva conicidad  $c_3$  mayor o igual a  $c_3^{inf}$ , el astigmatismo de la distancia focal mínima cambia de signo. El nuevo valor de  $c_3$  no puede desviarse demasiado del valor inicial  $c_3$  para mantener la convergencia del sistema óptico.

- 40 A continuación se realiza una segunda optimización de la calidad de la imagen, a partir del valor  $c_3^{inf}$ , para determinar la nueva conicidad  $c_3$ , y cada posición PCAi de los CAi, así como cada forma de la superficie Si que permita obtener la mejor calidad de imagen según el criterio predeterminado.

Preferiblemente, cuando todos los componentes esféricos son espejos, se consideran posicionados en la misma ubicación, es decir, todos los PCAi son iguales a una única posición  $P_m$ , lo que simplifica la optimización. A continuación, calculamos S1 para  $f_{min}$  y Sn para  $f_{max}$ , y deducimos el Si intermedio a partir de S1 y S2.

- 45

Según otra realización, primero se calculan PCA1 y S1 y PCAn y Sn, y a partir de estos valores se deducen PCAi y Si intermedios.

Con el conocimiento a priori de las aberraciones que pueden ser compensadas por un componente esférico, como se ilustra en las figuras 11 y 12, se sabe que la forma de la superficie Si de un CAi capaz de compensar las

aberraciones del sistema óptico de distancia focal  $f_i$  que comprende M1, M2 y M3 de conicidad  $c'3$ , debe comprender la aberración esférica de primer orden  $Z9_{CA}$ , y más particularmente la  $Z9_{CA}$  positiva.

5 Así, el valor exacto de la nueva conicidad  $c'3$ , las posiciones  $CA_i$ , si es necesario la posición intermedia  $P_m$  de los  $CA_i$ , y las formas S1 para  $f_{min}$ ,  $S_n$  para  $f_{max}$ , y  $S_i$  para  $f_i$ , se determinan mediante una segunda optimización de las trayectorias ópticas en el instrumento para corregir las aberraciones de los 3 espejos del telescopio que tienen una nueva conicidad  $c'3$  y para optimizar la calidad de la imagen en el primer plano focal del telescopio según el criterio predeterminado, típicamente la minimización de un error de frente de onda WFE.

10 La modificación de la conicidad de M3 permite invertir el signo del astigmatismo de la distancia focal  $f_{min}$ , y así introducir en el sistema óptico aberraciones tales que las aberraciones resultantes del sistema óptico son compensables por un componente esférico situado en la zona interpupilar.

La figura 14 ilustra las diferentes aberraciones presentes en el primer plano focal del telescopio de 3 espejos cuyo M3 tiene la nueva conicidad  $c'3 = -0,52$

El nuevo valor  $c'3$  de la cónica del M3 permite obtener un astigmatismo positivo para todas las distancias focales y comas opuestos para las distancias focales extremas.

15 En el ejemplo, la nueva conicidad  $c'3$  se desvía aproximadamente un 20% del valor de la conicidad inicial  $c3$  (igual a  $-0,61$ ). Preferiblemente, la nueva conicidad  $c'3$  se desvía de la conicidad inicial  $c3$  en más del 5% y menos del 30%.

20 La figura 15 muestra la evolución del valor cuadrático medio del error de forma de onda WFE RMS en función del valor de conicidad del M3, para las distancias focales mínima (curva 15) y máxima (curva 16). Se puede observar que la conicidad inicial  $c3$  correspondía al valor de calidad de imagen optimizado, un nuevo valor de conicidad  $c'3$  superior a  $-0,56$  da lugar a un aumento de la WFE, es decir, a una disminución de la calidad de imagen. El cambio en el valor de la cónica del M3 no responde a una necesidad de calidad de imagen, sino que permite obtener aberraciones compensadas por un CA. Se trata de una desviación de la calidad de imagen óptima para permitir la corrección de las aberraciones.

25 La introducción de la aberración esférica  $Z9_{CA}$  en cada componente esférico  $CA_i$  reduce en gran medida la Z7/8 (coma) y Z5/6 (astigmatismo) del sistema, pero no reduce el enfoque Z4. Por el contrario,  $Z9_{CA}$  también conducirá a un aumento del Z4 del telescopio, como se ilustra en la figura 17, que describe la variación del foco medio  $\langle Z4 \rangle$  del sistema (telescopio de 3 espejos sin  $CA_i$ ) en función del valor de la cónica de M3, para la distancia focal mínima (curva 17) y la distancia focal máxima (curva 18): se puede observar que el foco Z4 aumenta significativamente, especialmente para la distancia focal mínima.

30 Es aconsejable introducir el foco  $Z4_{CA}$  en la forma de cada  $CA_i$  para compensar el Z4 del sistema (el inicialmente presente y el introducido por  $Z9_{CA}$ ).

La introducción de  $Z4_{CA}$  también equilibra los valores de astigmatismo y coma, es decir, hace que los valores de los respectivos coeficientes se acerquen, mejorando así la compensación por  $Z9_{CA}$ .

35 A partir del rango identificado para  $c'3$ , la determinación del valor final de  $c'3$ ,  $Z9_{CA}(i)$  y  $Z4_{CA}(i)$  para S1,  $S_n$  y todos los Si intermedios, así como las diferentes posiciones (o la posición única  $P_m$ ) del  $CA_i$  se realiza mediante una segunda optimización.

40 La figura 16 ilustra las diferentes aberraciones en el primer plano focal de un telescopio 30 según la invención, teniendo el telescopio una nueva conicidad  $c'3$  del espejo M3, y  $CA_i$  teniendo una única posición intermedia  $P_m$  y valores optimizados de  $Z9_{CA}(1)$ ,  $Z9_{CA}(n)$ , y  $Z4_{CA}(1)$ ,  $Z4_{CA}(n)$  (es decir,  $Z9_{CA}/max$ , y  $Z9_{CA}/min$ ;  $Z4_{CA}/max$ , y  $Z4_{CA}/min$ ). La figura 16a muestra las diferentes aberraciones para la distancia focal máxima y la figura 16b para la distancia focal mínima.

La forma de la superficie para la distancia focal máxima  $S_n$  comprende, pues,  $Z9_{CA}(n)$  y  $Z4_{CA}(n)$ . La forma de la superficie para la distancia focal mínima S1 comprende  $Z9_{CA}(1)$  y  $Z4_{CA}(1)$ .

45 En el ejemplo  $c'3 = -0,52$ , las  $CA_i$  se colocan todas 110 mm después de PS1 y 140mm antes de PS2. Se puede ver comparando esta figura 16 con la figura 5 (véase el cambio de escala), que la calidad del telescopio mejora mucho.

Según una realización, para mejorar aún más la calidad de la imagen, se modifica ligeramente la conicidad de los espejos M2 y M1 del telescopio 30 según la invención.

50 En el ejemplo, el rendimiento del telescopio puede mejorarse aún más, compensando el Z7/8 y el Z9 sólo con el  $Z9_{CA}$ .

## ES 2 877 682 T3

La modificación de la conicidad de M2 (nuevo valor  $c'2$ ) permite jugar con estas dos aberraciones. Sin embargo, esta nueva conicidad  $c'2$  también aporta una cantidad significativa de Z4. Este exceso de Z4 se contrarresta con la modificación de la conicidad de M1 (nuevo valor  $c'1$ ), que también juega en el Z9.

5 Así, una nueva conicidad del primer espejo  $c'1$  y una nueva conicidad del segundo espejo  $c'2$  se determinan respectivamente a partir de una primera conicidad inicial  $c1$  del primer espejo y una segunda conicidad inicial  $c2$  del segundo espejo, para mejorar aún más la calidad de imagen del telescopio según el criterio predeterminado

Por ejemplo, estas modificaciones se ilustran en las figuras 18 y 19. La figura 18 ilustra la evolución de las aberraciones principales en función del valor de la conicidad de M2, para las distancias focales mínimas y máximas, y la figura 19 ilustra la evolución de las aberraciones principales en función del valor de la conicidad de M1.

10 Mediante una tercera optimización, se determinan los nuevos valores de conicidad  $c'2$  y  $c'1$ , ilustrados en las figuras 18 y 19:

$$C'1 = -0.98$$

$$C'2 = -2.1$$

15 Al compararlos con los valores iniciales  $c1 = -1$  y  $c2 = -2$ , podemos ver que estas variaciones de conicidad son pequeñas (menos del 10%, o incluso menos del 5% para  $c1$ ), pero aún así nos permiten mejorar la calidad de la imagen.

Alternativamente, también se añade  $Z16_{CA}$ , es decir, la aberración esférica de segundo orden, que influye en Z16, Z9, Z4, Z5/6 y Z7/8 y aumenta aún más la calidad de la imagen.

20 La figura 20 ilustra las diferentes aberraciones en el primer plano focal de un telescopio 30 según la invención, teniendo el telescopio nuevas conicidades  $c'1$ ,  $c'2$  y  $c'3$  respectivamente de los espejos M1, M2 y M3, y para CA1 y CAn, una posición intermedia  $Pm$  y valores optimizados de  $Z9_{CA}$ ,  $Z4_{CA}$  y  $Z16_{CA}$ . La figura 20a muestra las diferentes aberraciones para la distancia focal máxima y la figura 20b para la distancia focal mínima.

Como recordatorio tenemos  $c'3 = -0,52$ ,  $c'1 = -0,98$  y  $c'2 = -2,1$ .

25 La tabla 2 siguiente ilustra los valores de los parámetros (R, k, A, B) así como los coeficientes de Zernicke equivalentes Z4, Z9 y Z16 que permiten caracterizar la superficie  $S_n$  del espejo esférico MAn correspondiente a  $f_{max} = 37,5m$ .

Tabla 2

	Z4	-2,89E-02 mm	
	Z5	0	
	Z6	0	
R	-34500	Z7	0
k	0	= Z8	0
A	-3.43E-10	Z9	-7.21E-04
B	4.27E-15	Z10	0
	Z11	0	
	Z12	0	
	Z13	0	
	Z14	0	
	Z15	0	
	Z16	1.06E-05	

La tabla 3 siguiente ilustra los valores de los parámetros (R, k, A, B) así como los coeficientes de Zernicke equivalentes Z4, Z9 y Z16 para caracterizar la superficie S1 del espejo esférico MA1 correspondiente a  $f_{min} = 15m$ .

Tabla 3

	Z4	-2.72E-02	
	Z5	0	
	Z6	0	
R	-46500	Z7	0
k	0	= Z8	0
A	-5.40E-10	Z9	-1.31E-03
B	1.67E-14	Z10	0
	Z11	0	
	Z12	0	
	Z13	0	
	Z14	0	
	Z15	0	
	Z16	6.50E-05	

5 La optimización de cada superficie puede realizarse sobre los parámetros (R, k, A, B) o sobre los coeficientes de Zernicke equivalentes Z4, Z9, Z16, según la opción elegida del software utilizado.

También se puede desarrollar la optimización en órdenes superiores refinando la superficie mediante los parámetros C, D ...o su equivalente en coeficientes de Zernicke.

10 Al comparar la Figura 20 con la Figura 16 (véase el cambio de escala), se puede observar que la calidad del telescopio ha mejorado aún más. La calidad final de la imagen obtenida es compatible con la restricción de un WFE RMS  $< \lambda/15$ , que para el visible corresponde a un WFE RMS  $< 50$  nm. (véase la figura 22).

En el telescopio 30 según la invención los componentes esféricos CAi son una parte integral de la combinación óptica del instrumento.

15 Preferentemente, cuando el telescopio según la invención tiene una pluralidad de distancias focales intermedias con  $n > 2$ , la forma Si de cada CAi asociada a las distancias focales intermedias se calcula a partir de la forma de la superficie para los valores mínimos de la distancia focal S1 y máximos de la Sn, con el fin de aplicar la corrección adecuada para cada distancia focal;

20 Así, una vez optimizadas las aberraciones  $Z9_{CA}$ ,  $Z4_{CA}$  y  $Z16_{CA}$  para  $f_{min}$  y  $f_{max}$ , es decir, los valores de los coeficientes de los polinomios Fringe Zernike determinados para  $f_{min}$  y  $f_{max}$ , se calculan los valores de los coeficientes de los polinomios para cada valor de la distancia focal intermedia a partir de los valores de los coeficientes de los polinomios Fringe Zernike determinados para  $f_{min}$  y  $f_{max}$

Según una realización, el telescopio 30 según la invención tiene un canal adicional que opera en un rango de longitudes de onda diferente del rango de operación del canal principal del telescopio, un ejemplo de la arquitectura del cual se ilustra en la Figura 21.

25 El canal principal opera en un primer rango de longitudes de onda SB1, típicamente el visible entre 400 y 800 nm, y el primer detector D tiene una sensibilidad adaptada a SB1. El canal adicional opera para una segunda banda espectral SB2 diferente de la SB1, típicamente dentro de la banda infrarroja.

En esta realización, los componentes esféricos asociados a las diferentes distancias focales son preferentemente espejos retráctiles MAi montados en un único soporte 80. Este soporte también tiene una posición neutra para la que

no aparece ningún espejo retráctil en la trayectoria óptica del haz óptico que incide en el soporte (simple "agujero sin función óptica). A continuación, el haz atraviesa el soporte 80 a lo largo de un camino óptico secundario 86.

5 Para un telescopio bifocal, en la figura 22 se ilustra un ejemplo de dicho soporte 80 de tres posiciones, que comprende tres posiciones, obtenidas respectivamente mediante el giro alrededor de un eje de rotación 40, estando los dos espejos esféricos MA1 y MA2 montados alrededor de una estructura hueca. En una primera posición MA1 refleja el rayo incidente, en una segunda posición MA2 refleja el rayo incidente, y en una tercera posición neutra el rayo incidente atraviesa el soporte. Por supuesto, son posibles otros diseños, como una rueda de barril.

10 Este telescopio multicanal 30 incluye además un dispositivo óptico 85 dispuesto en el camino óptico secundario 86 y configurado para generar un segundo plano focal del telescopio  $P'_F$  correspondiente a una distancia focal seleccionada  $f'$ . El dispositivo óptico 85 funciona preferentemente en transmisión, para ser compatible con un valor de distancia focal seleccionado  $f'$  mucho menor que  $f_{min}$ , típicamente 10 veces menor. El dispositivo 85 está configurado además para corregir las aberraciones compensables del telescopio y para optimizar la calidad de la imagen en el segundo plano focal del telescopio  $P'_F$  según los criterios predeterminados. Realiza la misma función de compensación que los espejos esféricos. Suele ser un objetivo dióptrico compuesto por varias lentes. Gracias a la flexibilidad del diseño, las lentes pueden ser esféricas y seguir cumpliendo la función de compensación. ¿Otra precisión que añadir?

15 Un segundo detector  $D'$  está dispuesto en el segundo plano focal del telescopio  $P'_F$ , y tiene una sensibilidad en la segunda banda espectral SB2. Un filtro espectral está preferentemente dispuesto en el camino óptico secundario, entre el soporte 80 y el segundo detector  $D'$  para seleccionar la banda espectral SB2.

20 Se consigue así una vía adicional de baja complejidad mecánica.

25 Un ejemplo de una realización es un telescopio con un canal principal bifocal en el visible y un canal infrarrojo monofocal adicional. En el caso de las ópticas de los satélites, el objetivo es obtener un canal infrarrojo con una resolución inferior a la del canal visible, pero con un campo de visión mayor, que se obtiene con una distancia focal  $f'$  menor, normalmente por un factor de 10, en comparación con  $f_{min}$ . Por ejemplo, una distancia focal en el rango visible de unos diez metros y una distancia focal en el IR del orden de un metro.

La posición del espejo M3 para el funcionamiento en infrarrojos es preferentemente (pero no necesariamente) igual a una de las posiciones correspondientes a las distancias focales del canal visible principal. Para esta distancia focal, es posible realizar una medición simultánea en el visible / IR.

30 Según una variante, el telescopio según la invención comprende un diafragma de apertura colocado en la zona interpupilar y ajustable en apertura para mantener una apertura numérica sustancialmente constante cuando varía la distancia focal.

Según otro aspecto, la invención se refiere a un procedimiento 60 de determinación de parámetros de un telescopio anastigmático mostrado en la figura 23.

El telescopio comprende:

- 35 - tres espejos esféricos, un primer espejo cóncavo M1, un segundo espejo convexo M2, un tercer espejo cóncavo M3,
- un primer detector D,
- una pluralidad de componentes esféricos CA<sub>i</sub> (índice i de 1 a n) y,
- 40 - medios 5 para el desplazamiento lineal del tercer espejo sobre el eje óptico O del telescopio, con el fin de variar la distancia focal del telescopio según una pluralidad de distancias focales  $f_i$  (índice i de 1 a n) entre una distancia focal mínima  $f_{min}$  y una distancia focal máxima  $f_{max}$ .

45 Los tres espejos M1, M2 y M3 están dispuestos de manera que el primer espejo y el segundo espejo forman una imagen intermedia de un objeto en el infinito situado entre el segundo espejo y el tercer espejo, formando el tercer espejo a partir de esta imagen intermedia una imagen final en el primer plano focal del telescopio en el que se encuentra el primer detector D.

Los espejos primero, segundo y tercero tienen una forma fija caracterizada por al menos una cónica y un radio de curvatura.

50 Además, el telescopio en la distancia focal mínima tiene una primera pupila de salida PS1 en una primera posición P1, y el telescopio en la distancia focal máxima tiene una segunda pupila de salida PS2 en una segunda posición P2. La pluralidad de componentes esféricos CA<sub>i</sub> están asociados respectivamente a la pluralidad de distancias focales  $f_i$ , estando cada componente esférico dispuesto en un camino óptico de un haz correspondiente a dicha

distancia focal asociada cuando el telescopio está operando a dicha distancia focal asociada, y fuera del camino óptico asociado a otra distancia focal cuando el telescopio está operando a dicha otra distancia focal.

Los componentes esféricos están dispuestos en una pluralidad de posiciones  $PC_{Ai}$  situadas respectivamente entre la primera y la segunda posición.

- 5 El procedimiento 60 incluye una primera etapa 100 en el que se determinan los valores de las cónicas y los radios de curvatura, denominados valores iniciales, del primer, segundo y tercer espejo del telescopio:

$M1 (c_1, R_1)$ ;  $M2 (c_2, R_2)$ ,  $M3 (c_3, R_3)$ .

- 10 Estos valores iniciales son compatibles con la distancia focal mínima  $f_{min}$  y la distancia focal máxima  $f_{max}$ , sin la presencia de los componentes esféricos, y se determinan a partir de las ecuaciones de Korsh, mediante una primera optimización de la calidad de la imagen en el primer plano focal del telescopio según un criterio predeterminado.

Según una segunda etapa 200, se determina un valor de conicidad del tercer espejo  $c'_{3inf}$ , a partir de la conicidad inicial  $c_3$  del tercer espejo, a partir del cual el telescopio presenta, sin la presencia de los componentes esféricos y para las distancias focales mínima y máxima, aberraciones compensables por los componentes esféricos  $CA_1$  y  $C_{An}$  respectivamente asociadas a las distancias focales  $f_{min}$  y  $f_{max}$ .

- 15 A continuación, en una etapa 300, se determina un nuevo valor de conicidad del tercer espejo  $c'_3$ , la posición  $PC_{Ai}$  y la forma de la superficie  $S_i$  de cada componente esférico  $CA_i$  mediante una segunda optimización, con el fin de corregir las aberraciones compensables y optimizar la calidad de la imagen en el primer plano focal del telescopio según el criterio predeterminado. La forma de cada superficie  $S_i$  comprende al menos la aberración esférica de primer orden y el enfoque.

- 20 Preferentemente, el procedimiento 60 comprende además una etapa 400 de determinación de una nueva conicidad del primer espejo  $c'_1$  y de una nueva conicidad  $c'_2$  del segundo espejo  $M_2$ , con el fin de mejorar aún más la calidad de la imagen según el criterio predeterminado.

- 25 Preferiblemente, el procedimiento 60 según comprende también una etapa 500 de refinar la superficie  $S_i$  de cada componente esférico integrando además una aberración esférica de segundo orden para mejorar aún más la calidad de la imagen según el criterio predeterminado.

Típicamente el criterio predeterminado es minimizar un error de forma de onda WFE.

La figura 24 ilustra la evolución de la WFE RMS promediada sobre las diferentes distancias focales al final de cada etapa del procedimiento, es decir, en función de las diferentes modificaciones introducidas en el sistema óptico, para el ejemplo de telescopio dado anteriormente.

- 30 La WFE obtenida tras la primera optimización basada en las ecuaciones de Korsch es del orden de 560 nm, incompatible con la restricción  $WFE_{RMS} < 50$  nm. Al modificar el valor de conicidad de  $M_3$  para modificar el signo del astigmatismo, la WFE se degrada (todavía no hay componentes esféricos compensadores). Por otra parte, al introducir para cada distancia focal un componente esférico cuya superficie incluye la aberración esférica de primer orden y el enfoque, la WFE se mejora considerablemente hasta unos 100 nm. Modificando la conicidad de  $M_1$  y  $M_2$ ,  
 35 la WFE se reduce a menos de 50 nm, y la optimización final, introduciendo la aberración esférica de segundo orden, la reduce aún más a unos 10 nm.

REIVINDICACIONES

1. Telescopio anastigmático (30) con tres espejos esféricos que comprende al menos un primer espejo cóncavo (M1), un segundo espejo convexo (M2), un tercer espejo cóncavo (M3) y un primer detector (D), y que tiene un eje óptico (O)
  - 5 - los tres espejos están dispuestos de manera que el primer espejo (M1) y el segundo espejo (M2) forman una imagen intermedia de un objeto en el infinito situado entre el segundo espejo y el tercer espejo, y el tercer espejo (M3) forma a partir de esta imagen intermedia una imagen final en un primer plano focal del telescopio ( $P_F$ ) en el que está colocado el primer detector, teniendo los espejos primero, segundo y tercero una forma fija **caracterizada por** al menos un radio de curvatura y una conicidad,
  - 10 el telescopio comprende además:
    - medios (5) para el desplazamiento lineal del tercer espejo (M3) sobre el eje óptico del telescopio (O) con el fin de variar la distancia focal del telescopio según una pluralidad de distancias focales ( $f_i$ ) entre al menos una distancia focal mínima ( $f_{min}$ ) y una distancia focal máxima ( $f_{max}$ ),
    - 15 el telescopio en la distancia focal mínima tiene una primera pupila de salida (PS1) en una primera posición (P1), y el telescopio en la distancia focal máxima tiene una segunda pupila de salida (PS2) en una segunda posición (P2)
 

**caracterizado porque** el telescopio comprende además:

      - 20 - una pluralidad de componentes ópticos esféricos (CAi) asociados respectivamente a la pluralidad de distancias focales ( $f_i$ ), dispuestos respectivamente en una pluralidad de posiciones (PCAi) situadas entre la primera y la segunda posición, estando cada componente esférico dispuesto en un camino óptico de un haz correspondiente a dicha distancia focal asociada cuando el telescopio está operando a dicha distancia focal asociada, y fuera del camino óptico asociado a otra distancia focal cuando el telescopio está operando a dicha otra distancia focal,
      - 25 - medios de variación del camino óptico (50) dispuestos entre los componentes esféricos y el primer detector (D), y configurados de manera que dicho primer detector permanezca posicionado en el primer plano focal del telescopio,
      - el tercer espejo tiene una conicidad ( $c'3$ ) determinada a partir de una conicidad inicial ( $c3$ ), determinándose la conicidad inicial ( $c3$ ) a partir de las ecuaciones de Korsch,
      - 30 determinándose la conicidad ( $c'3$ ) de forma que el telescopio tenga, sin la presencia de dichos componentes esféricos y para las distancias focales mínima y máxima, astigmatismo y aberraciones de coma que puedan ser compensadas por dichos componentes esféricos,
      - 35 - la posición (PCAi) y la forma de la superficie (Si) de cada componente esférico se determinan para corregir dichas aberraciones compensables de dicho telescopio para la distancia focal asociada ( $f_i$ ) y para optimizar la calidad de la imagen en el primer plano focal del telescopio según un criterio predeterminado, comprendiendo la forma de la superficie (Si) de cada componente esférico al menos un primer y un segundo tipo de aberración, siendo el primer tipo de aberración la aberración esférica de primer orden ( $Z_{9CA}$ ) y el segundo tipo de aberración el enfoque ( $Z_{4CA}$ ).
  - 40 2. Telescopio según la reivindicación 1 en el que dicha forma de la superficie de cada componente esférico comprende además una aberración esférica de segundo orden ( $Z_{16CA}$ ) para mejorar aún más la calidad de la imagen según dicho criterio.
  3. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la conicidad ( $c'3$ ) se desvía de la conicidad inicial en más del 5% y menos del 30%.
  - 45 4. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores, en el que una conicidad del primer espejo ( $c'1$ ) y una conicidad del segundo espejo ( $c'2$ ) se determinan a partir de una conicidad inicial del primer espejo ( $c1$ ) y de una conicidad inicial del segundo espejo ( $c2$ ), respectivamente,
    - determinándose las conicidades iniciales a partir de las ecuaciones de Korsch,
    - determinándose las conicidades de forma que se mejore aún más la calidad de imagen de dicho telescopio de acuerdo con dichos criterios.
  - 50 5. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores en el que se define:

- un astigmatismo positivo (A+) como un astigmatismo en el que un foco tangencial se sitúa antes de un foco sagital,
  - un astigmatismo negativo (A-) como un astigmatismo en el que un foco sagital se sitúa antes de un foco tangencial,
- 5
- un coma positivo como un coma para el cual la forma de la mancha de la imagen de un punto fuente es un "cometa" cuya cola se aleja del eje óptico y,
  - un coma negativo como un coma en el que la forma de la mancha de la imagen de un punto fuente es un "cometa" cuya cola está dirigida hacia el eje óptico,
- 10
- las aberraciones compensables son astigmatismo positivo (A+) y coma positivo (C+) para la distancia focal máxima, astigmatismo positivo (A+) y coma negativo (C-) para la distancia focal mínima.
6. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores en el que se define:
- un astigmatismo positivo (A+) como un astigmatismo en el que un foco tangencial se sitúa antes de un foco sagital,
  - un astigmatismo negativo (A-) como un astigmatismo en el que un foco sagital se sitúa antes de un foco tangencial,
- 15
- y en el que la conicidad del tercer espejo (c<sup>3</sup>) se determina de manera que se modifique el signo del astigmatismo del telescopio para la distancia focal mínima, sin la presencia de un componente óptico esférico.
7. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores en el que el criterio predeterminado es minimizar un error de forma de onda (WFE).
- 20
8. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores en el que dichas posiciones de los componentes esféricos están separadas entre sí por no más de 50 mm.
9. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores, en el que al menos un componente óptico esférico es retráctil para estar dispuesto en el camino óptico del haz correspondiente a la distancia focal asociada cuando el telescopio está operando a dicha distancia focal asociada, y fuera de los caminos ópticos asociados a las otras distancias focales cuando el telescopio está operando a una de estas otras distancias focales.
- 25
10. Telescopio según la reivindicación 9, en el que los componentes ópticos esféricos son espejos retráctiles (MAi).
11. Telescopio según la reivindicación 10, en el que los espejos retráctiles están montados en un único soporte (80), siendo entonces las posiciones de los espejos retráctiles sustancialmente idénticas.
- 30
12. Telescopio según la reivindicación 11, en el que dichos componentes esféricos son espejos retráctiles (MAi) montados en un único soporte (80), comprendiendo dicho soporte además una posición para la que ningún espejo retráctil se encuentra en el camino óptico del haz que incide sobre dicho soporte, pasando entonces el haz a través del soporte según un camino óptico secundario (86), comprendiendo además el telescopio:
- un dispositivo óptico (85) dispuesto en el camino óptico secundario, configurado para generar un segundo plano focal del telescopio (P'<sub>F</sub>) correspondiente a una distancia focal seleccionada (f), estando dicho dispositivo óptico (85) configurado además para corregir dichas aberraciones compensables de dicho telescopio y para optimizar la calidad de la imagen en el segundo plano focal del telescopio (P'<sub>F</sub>) según dicho criterio predeterminado y,
  - un segundo detector (D') dispuesto en el segundo plano focal del telescopio (P'<sub>F</sub>), y sensible en una segunda banda espectral (SB2) diferente de una primera banda de sensibilidad espectral (SB1) del primer detector.
- 35
- 40
13. Telescopio según la reivindicación 12, en el que el dispositivo óptico (85) está adaptado para funcionar en transmisión en la segunda banda espectral (SB2), en el que la primera banda espectral está comprendida en el visible y la segunda banda espectral está comprendida en el infrarrojo, y en el que la distancia focal seleccionada (f) tiene un valor inferior a la distancia focal mínima.
- 45
14. Telescopio según una de las reivindicaciones 1 a 9, en el que al menos un componente esférico es una lámina operativa en transmisión.
15. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores que comprende sólo dos distancias focales, la distancia focal mínima y la distancia focal máxima.

16. Procedimiento (60) para determinar los parámetros de un telescopio anastigmático que comprende tres espejos esféricos, un primer espejo cóncavo (M1), un segundo espejo convexo (M2), un tercer espejo cóncavo (M3), un primer detector (D) una pluralidad de componentes esféricos (CA<sub>n</sub>) y medios (5) para el desplazamiento lineal del tercer espejo sobre un eje óptico (O) del telescopio con el fin de variar la distancia focal del telescopio según una pluralidad de distancias focales (f<sub>i</sub>) entre al menos una distancia focal mínima (f<sub>min</sub>) y una distancia focal máxima (f<sub>max</sub>)
- los tres espejos están dispuestos de manera que el primer espejo y el segundo espejo forman una imagen intermedia de un objeto en el infinito situado entre el segundo espejo y el tercer espejo, formando el tercer espejo una imagen final de esta imagen intermedia en el primer plano focal del telescopio en el que está colocado el primer detector, siendo los espejos primero, segundo y tercero de forma fija, **caracterizada por** al menos una cónica y un radio de curvatura,
- el telescopio en la distancia focal mínima tiene una primera pupila de salida (PS1) en una primera posición (P1), y el telescopio en la distancia focal máxima tiene una segunda pupila de salida (PS2) en una segunda posición (P2), estando la pluralidad de componentes esféricos (CA<sub>i</sub>) asociados respectivamente a la pluralidad de distancias focales (f<sub>i</sub>) cada componente esférico está dispuesto en un camino óptico de un haz correspondiente a dicha distancia focal asociada cuando el telescopio se opera a dicha distancia focal asociada, y fuera del camino óptico asociado a otra distancia focal cuando el telescopio se opera a dicha otra distancia focal,
- estando dichos componentes esféricos dispuestos respectivamente en una pluralidad de posiciones (PCA<sub>i</sub>) situadas entre la primera y la segunda posición,
- comprendiendo el procedimiento las etapas de:
- determinar (100) los valores de las cónicas y los radios de curvatura, denominados valores iniciales, de los espejos primero (c1, R1), segundo (c2, R2) y tercero (c3, R3) de dicho telescopio compatibles con la distancia focal mínima (f<sub>min</sub>) y la distancia focal máxima (f<sub>max</sub>), sin la presencia de dichos componentes esféricos, a partir de las ecuaciones de Korsh, mediante una primera optimización de la calidad de la imagen en el primer plano focal del telescopio de acuerdo con un criterio predeterminado,
  - determinar (200) un valor de conicidad del tercer espejo (c'3<sub>inf</sub>), a partir de la conicidad inicial del tercer espejo (c3), a partir del cual el telescopio presenta, sin la presencia de dichos componentes esféricos y para las distancias focales mínima y máxima, aberraciones compensables por los componentes esféricos respectivamente asociados a dichas distancias focales mínima y máxima, siendo las aberraciones compensables el astigmatismo y el coma,
  - determinar (300) un nuevo valor de conicidad del tercer espejo (c'3), la posición (PCA<sub>i</sub>) y la forma de la superficie (Si) de cada componente esférico mediante una segunda optimización, para corregir dichas aberraciones compensables y optimizar la calidad de la imagen en el primer plano focal del telescopio según el criterio predeterminado,
- la forma de dichas superficies de los componentes esféricos incluye al menos la aberración esférica de primer orden (Z<sub>9CA</sub>) y el enfoque (Z<sub>4CA</sub>).
17. Procedimiento según la reivindicación 16 que comprende además una etapa de determinación (400) de una nueva conicidad de los espejos primero (c'1) y segundo (c'2) para mejorar aún más la calidad de la imagen según el criterio predeterminado.
18. Procedimiento según la reivindicación 17 que comprende además una etapa (500) que consiste en refinar la determinación de la forma de la superficie (Si) de cada componente esférico integrando además una aberración esférica de segundo orden (Z<sub>16CA</sub>) para mejorar aún más la calidad de la imagen según el criterio predeterminado.

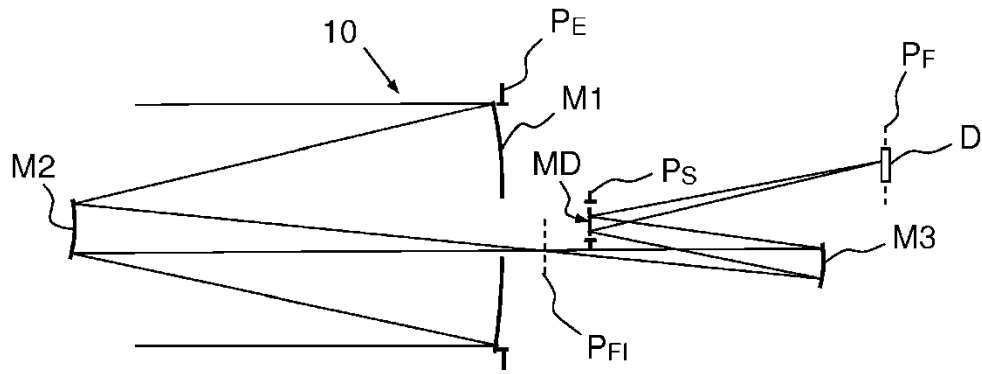


FIG.1

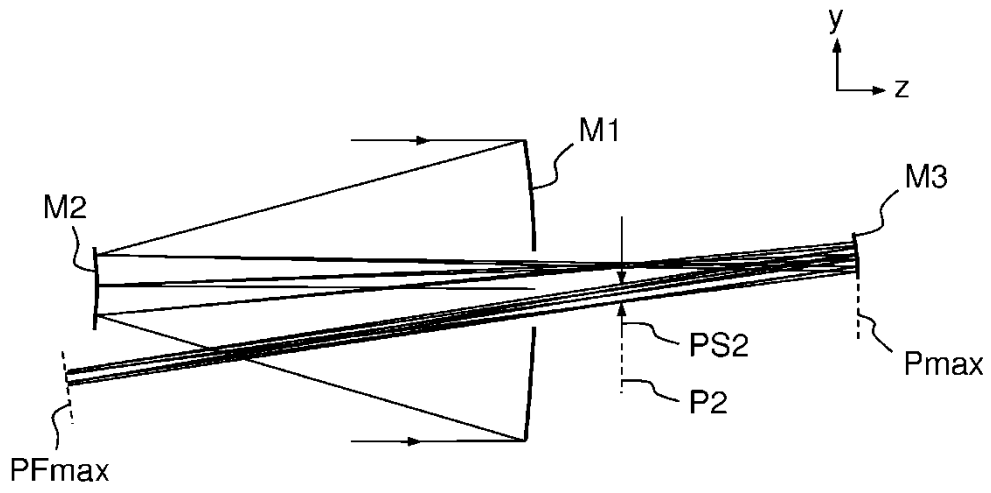


FIG.2a

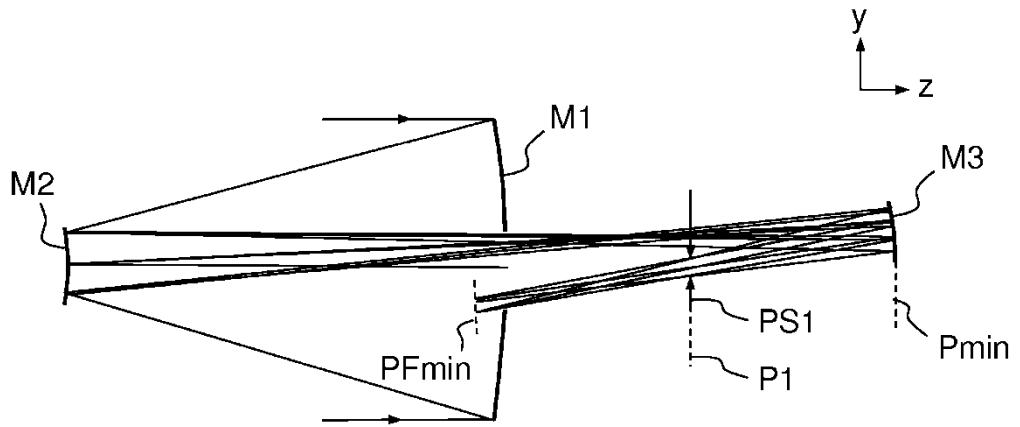
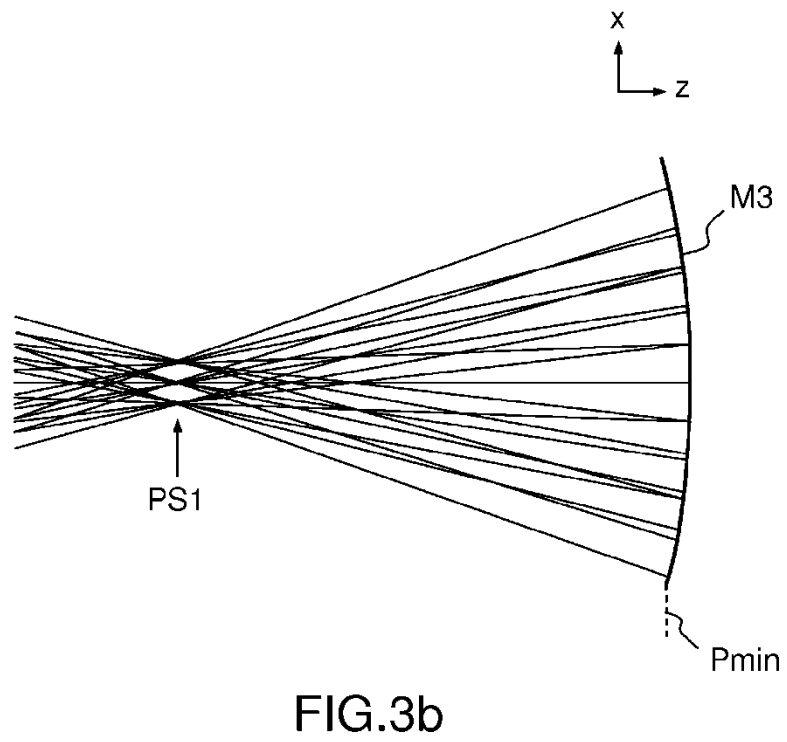
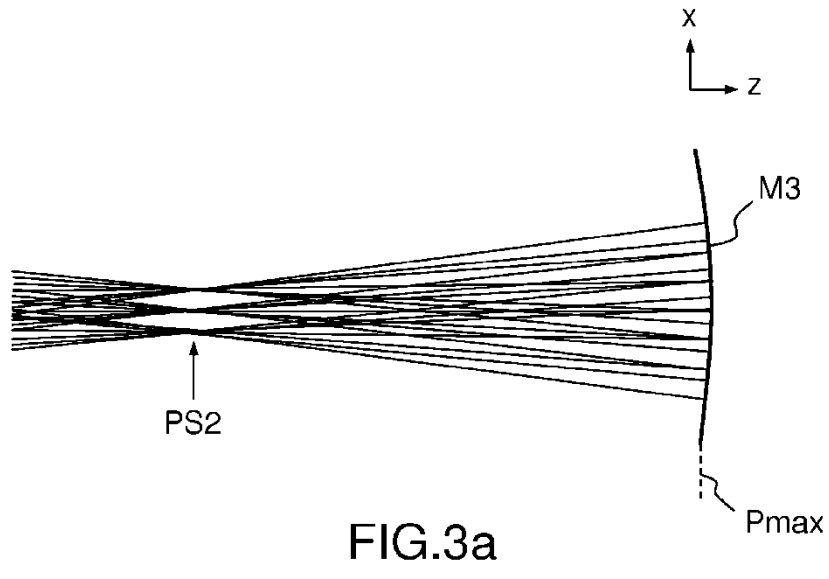


FIG.2b



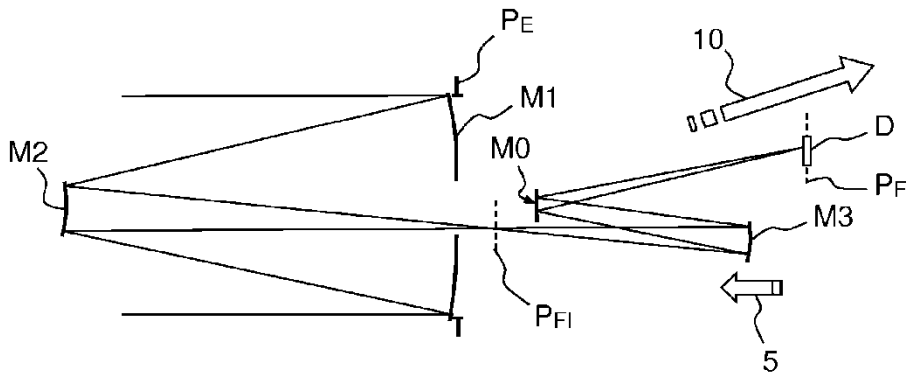


FIG.4a

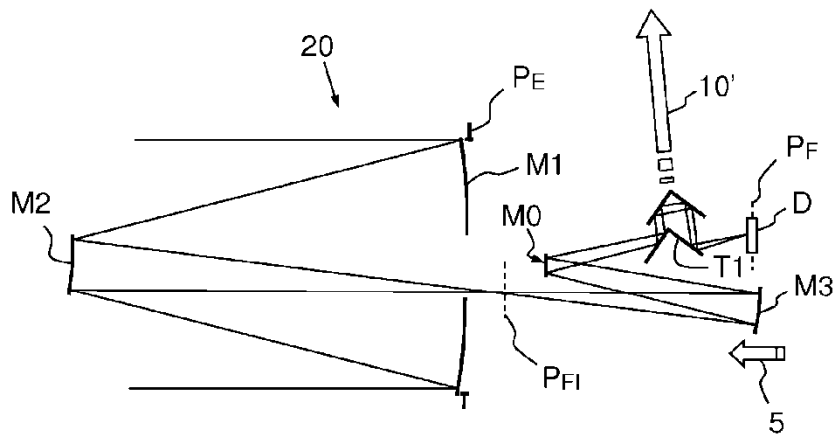


FIG.4b

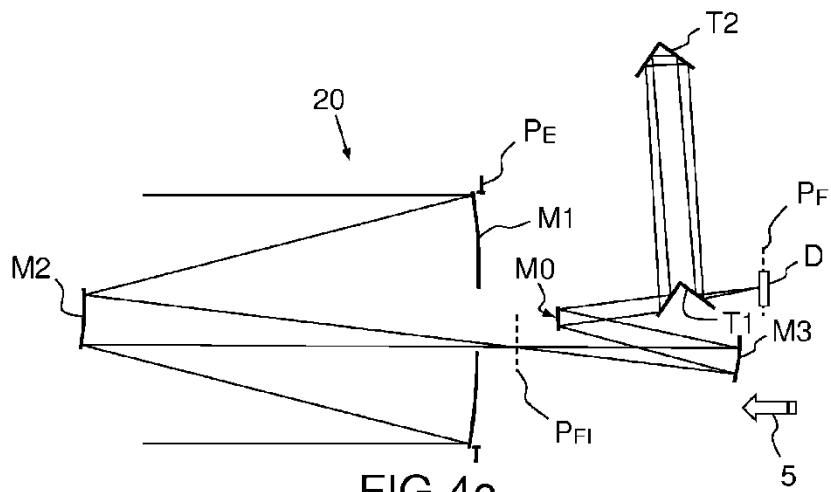


FIG.4c

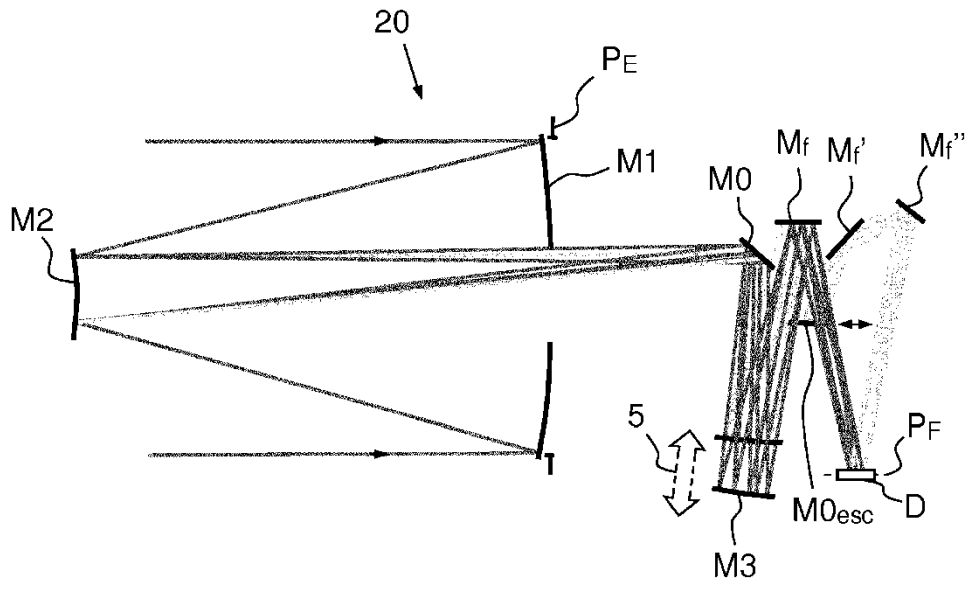
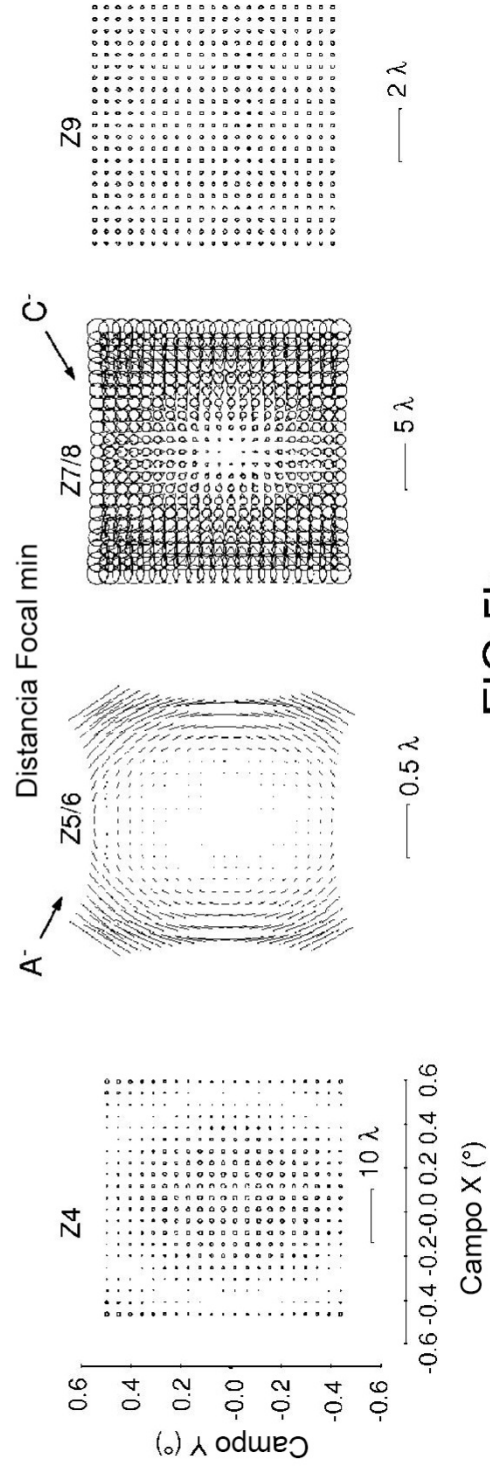
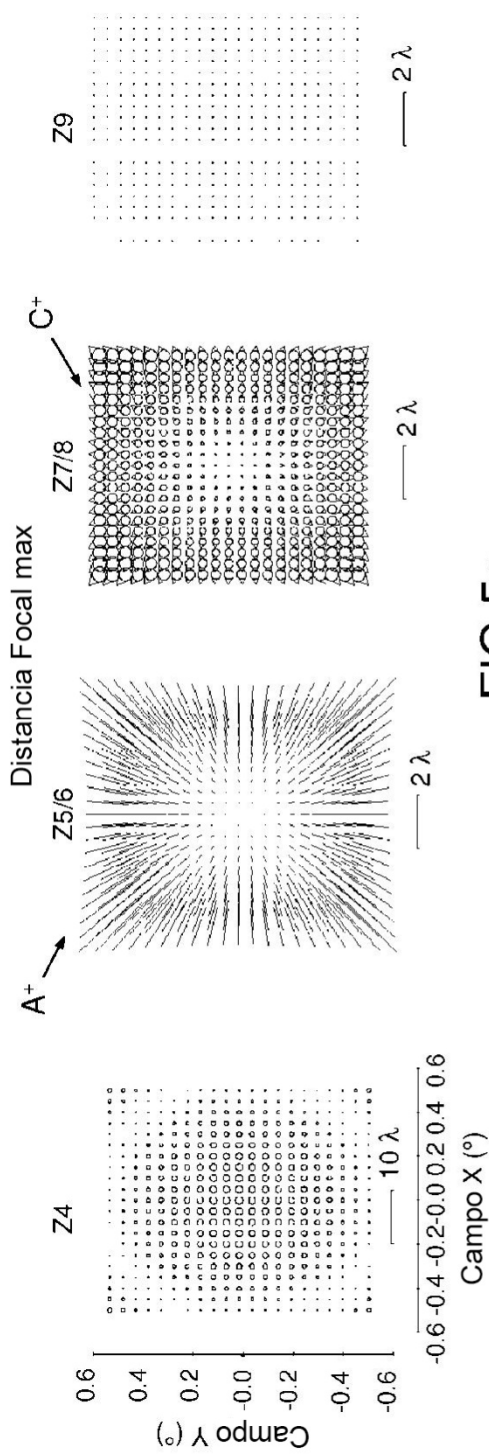


FIG.4d



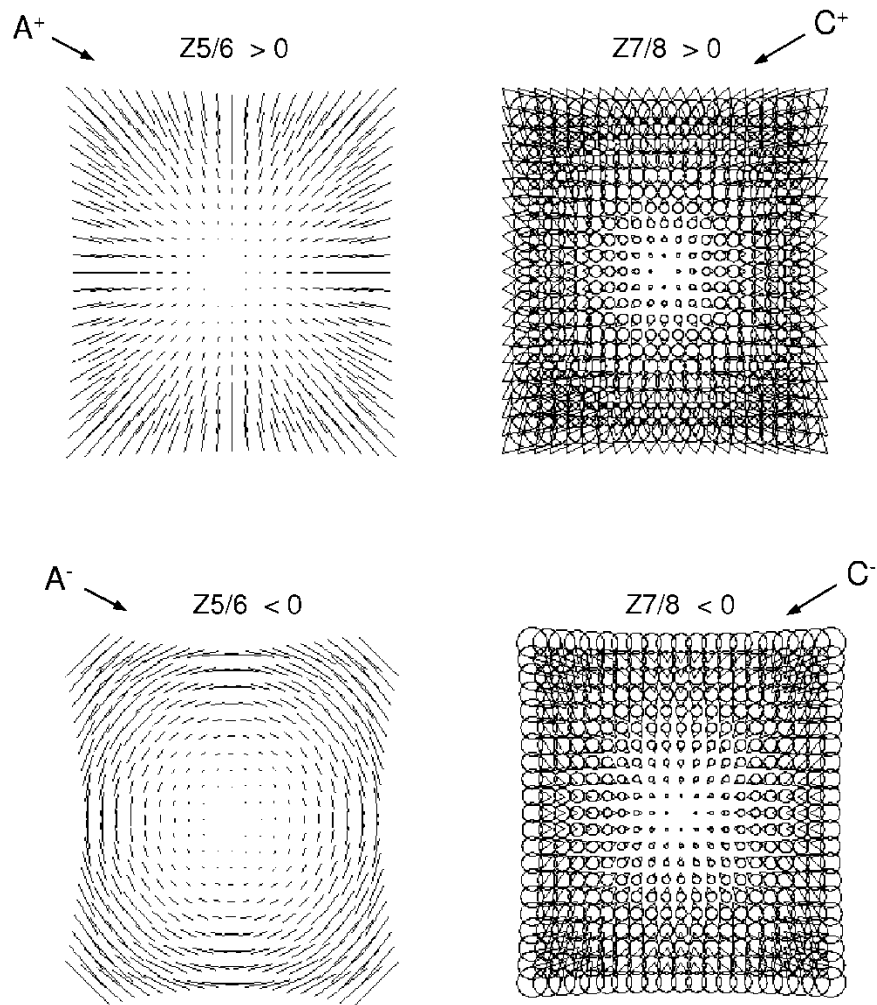


FIG.6

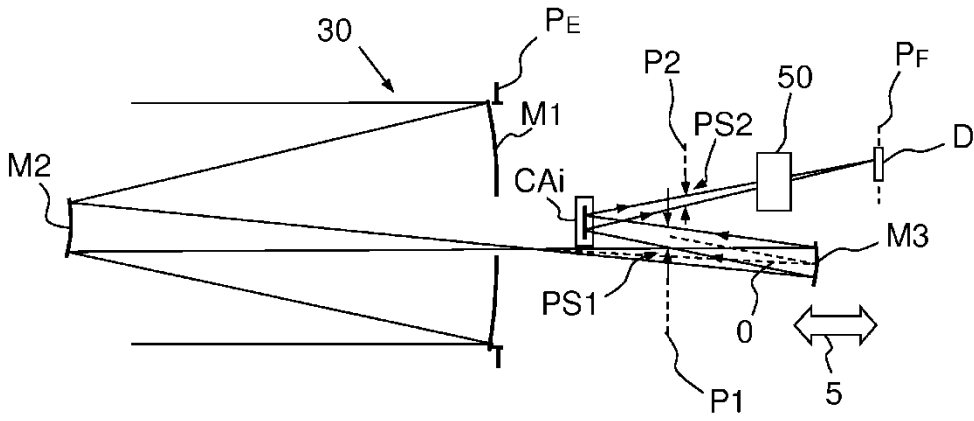


FIG. 7

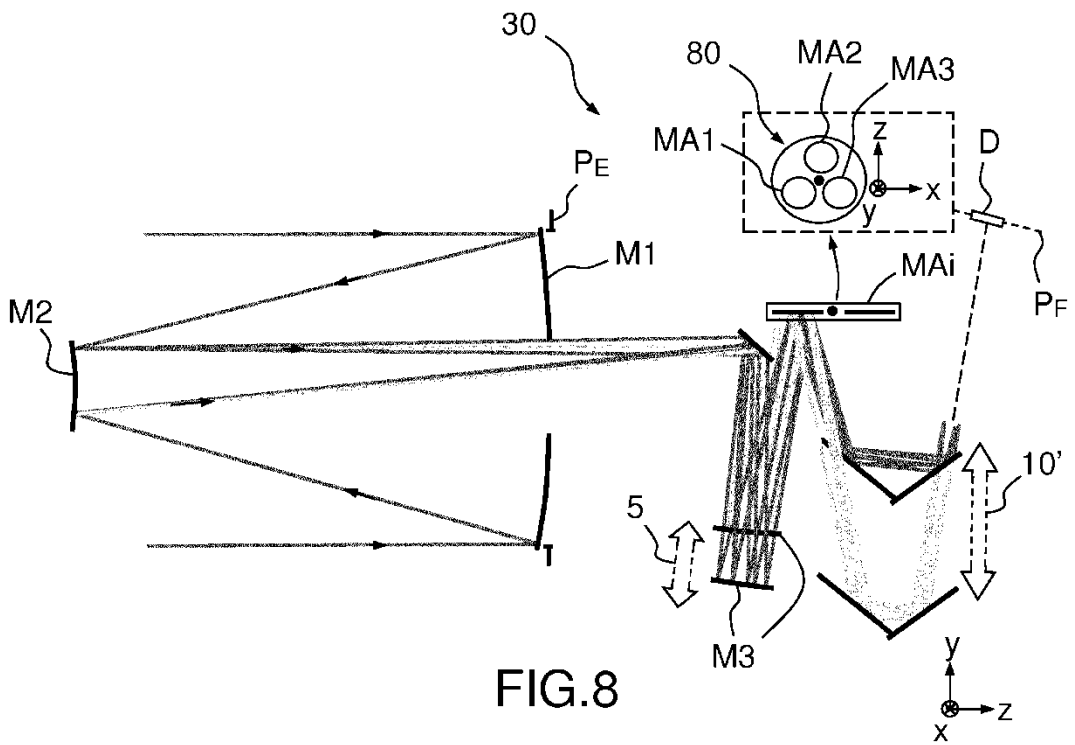


FIG. 8

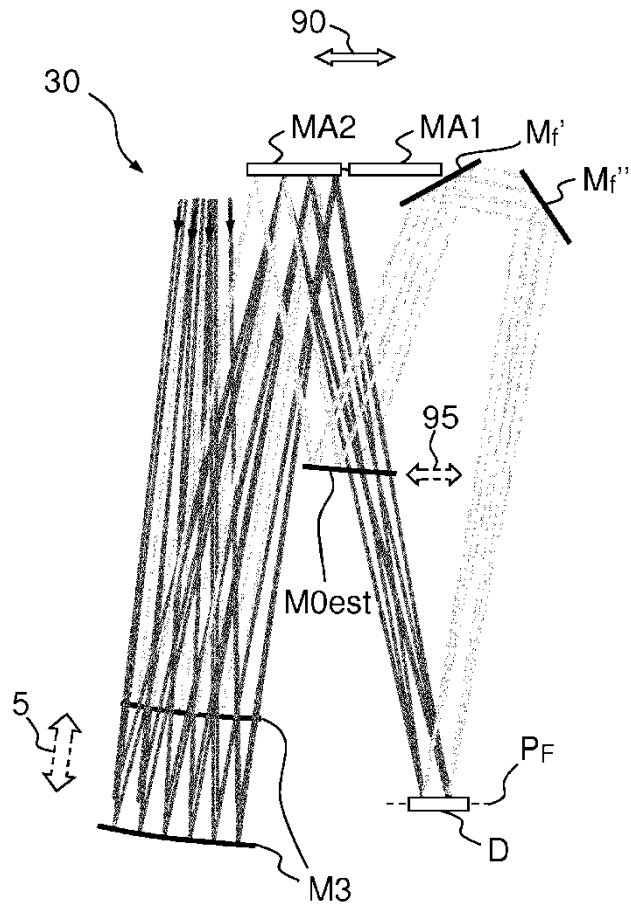


FIG.9

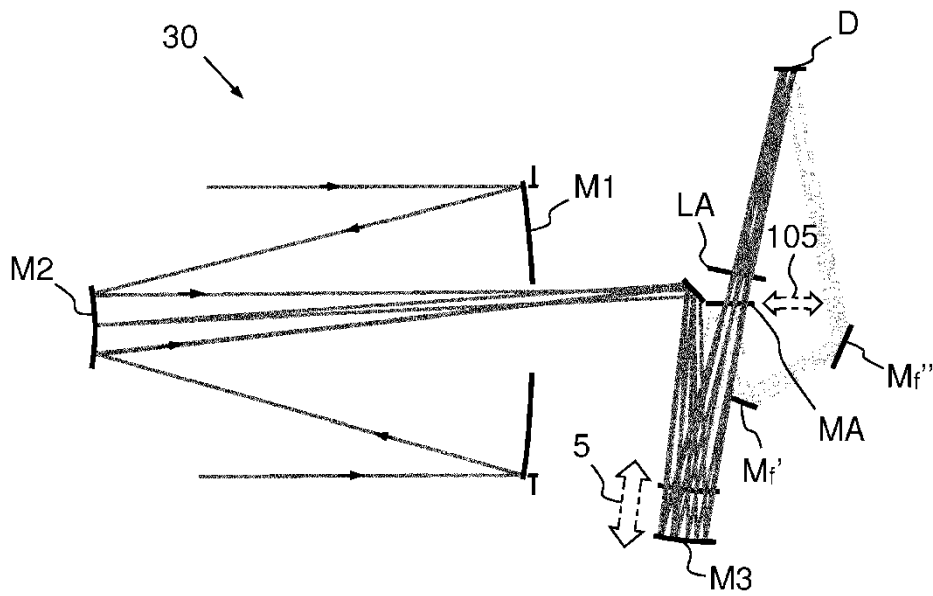


FIG.10

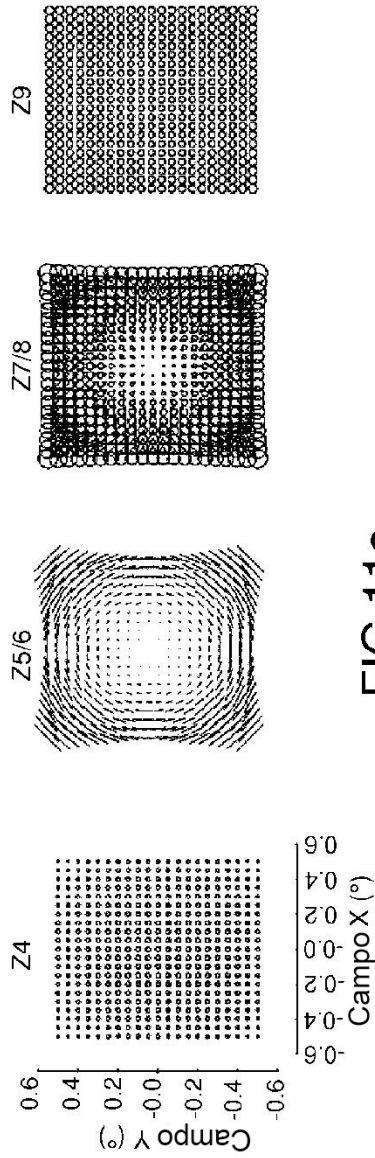


FIG.11a

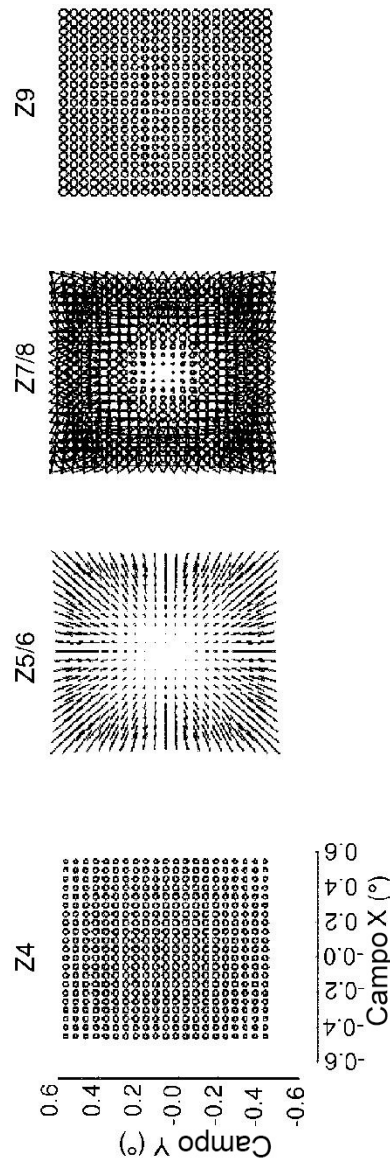
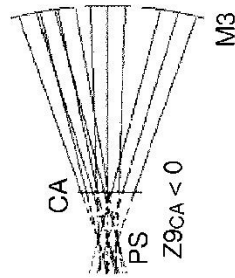
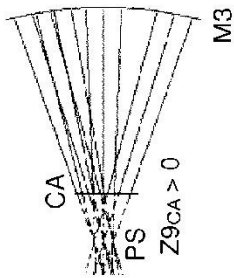


FIG.11b



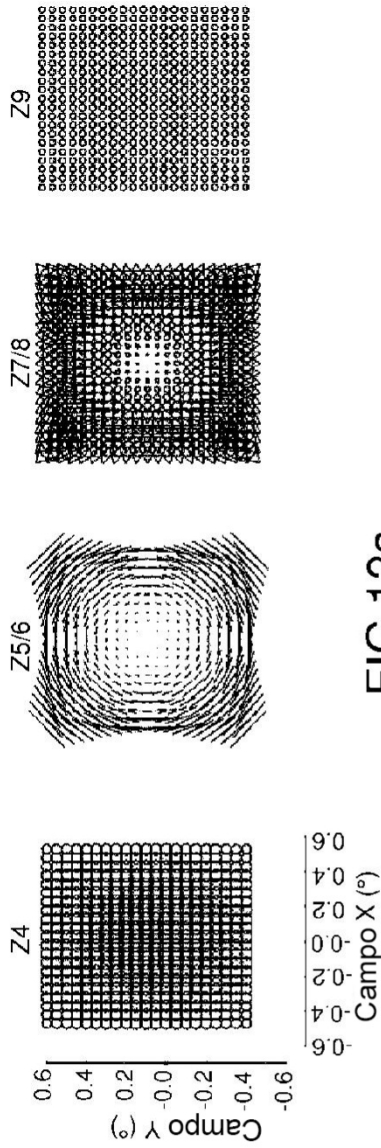


FIG. 12a

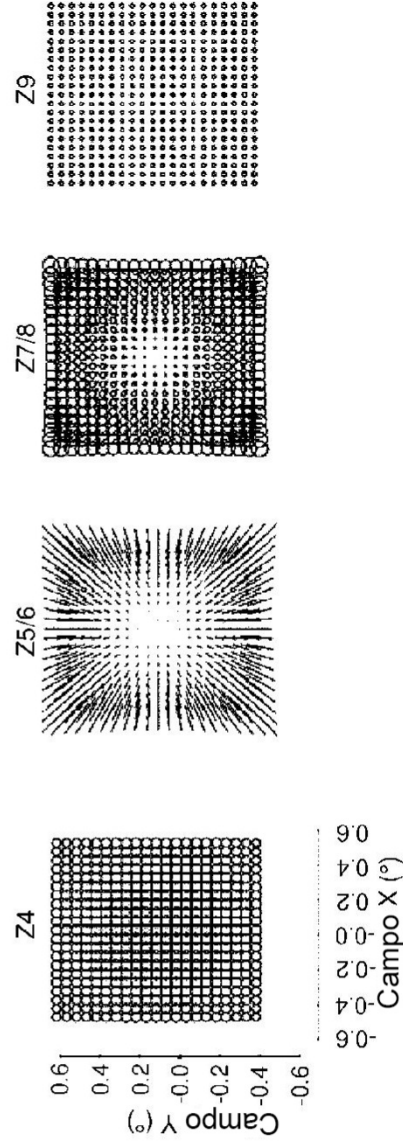


FIG. 12b

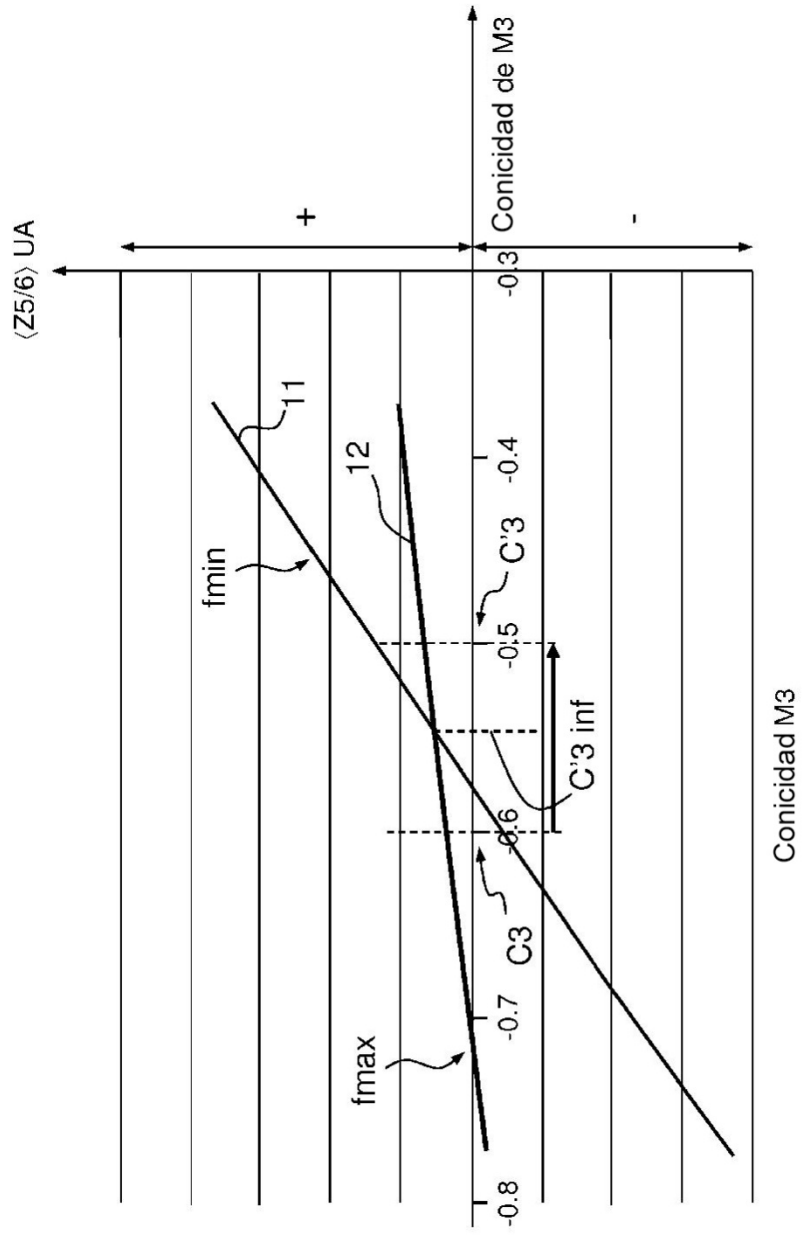
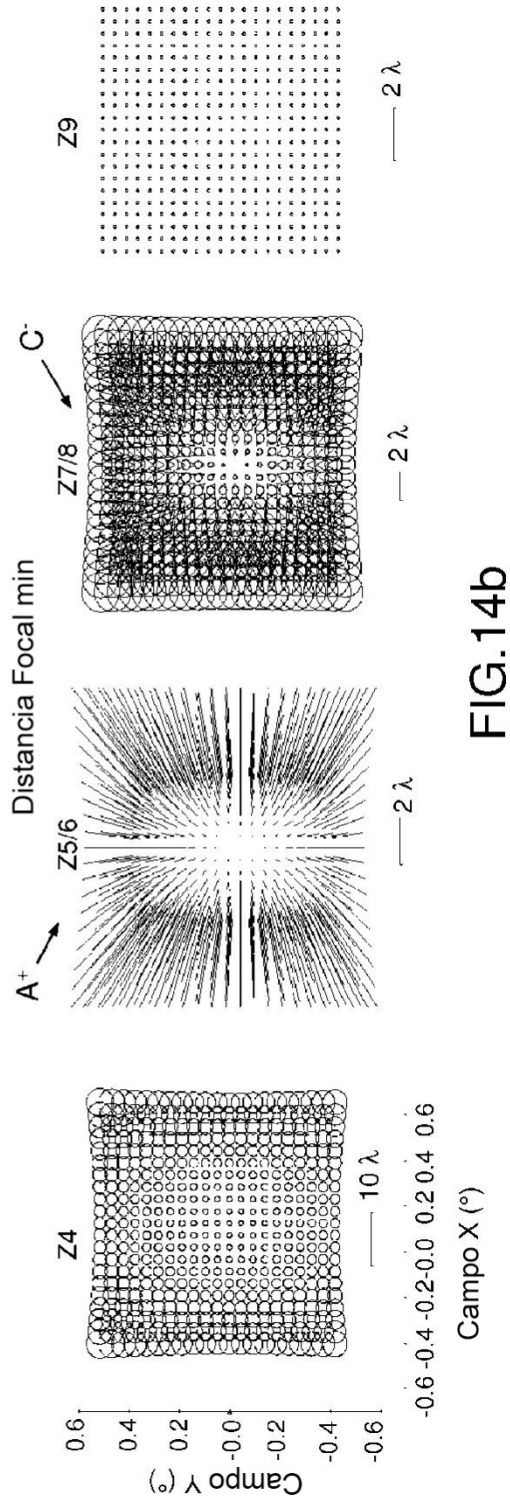
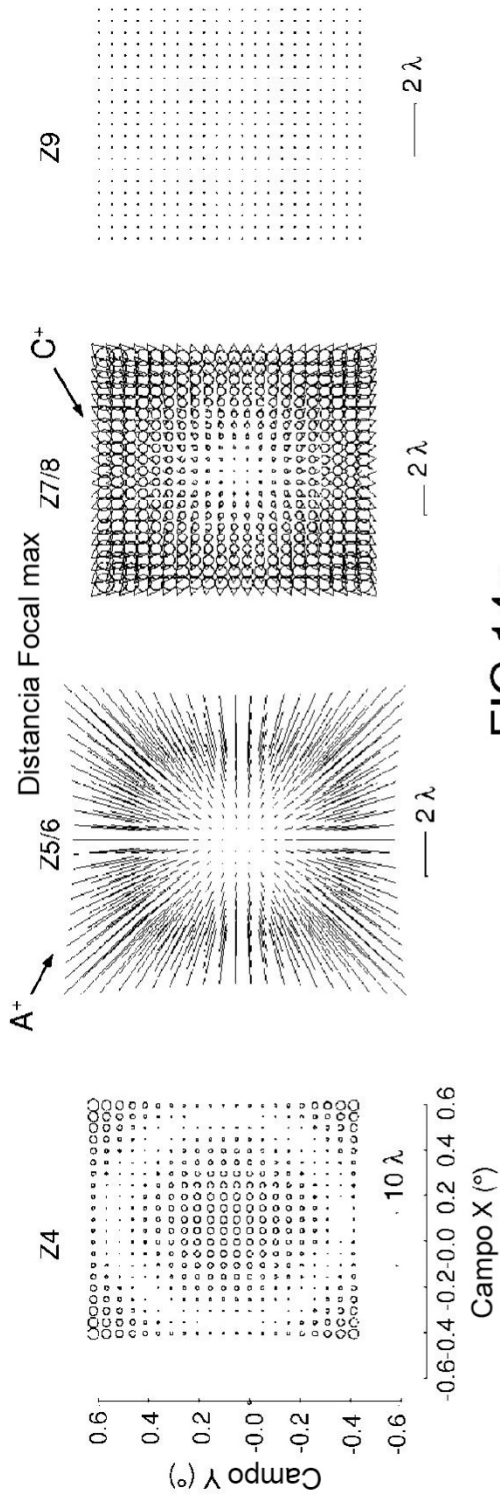


FIG.13



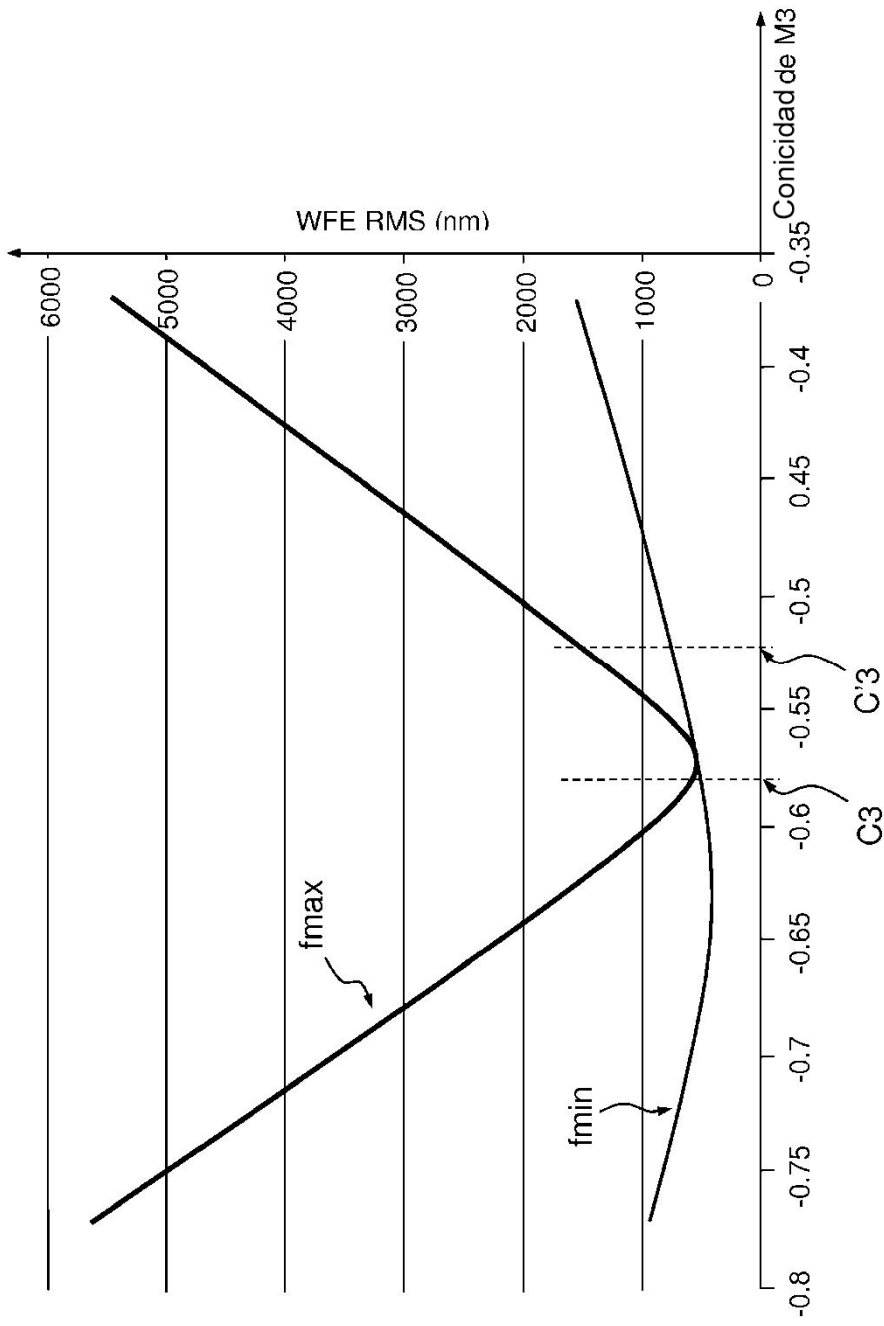
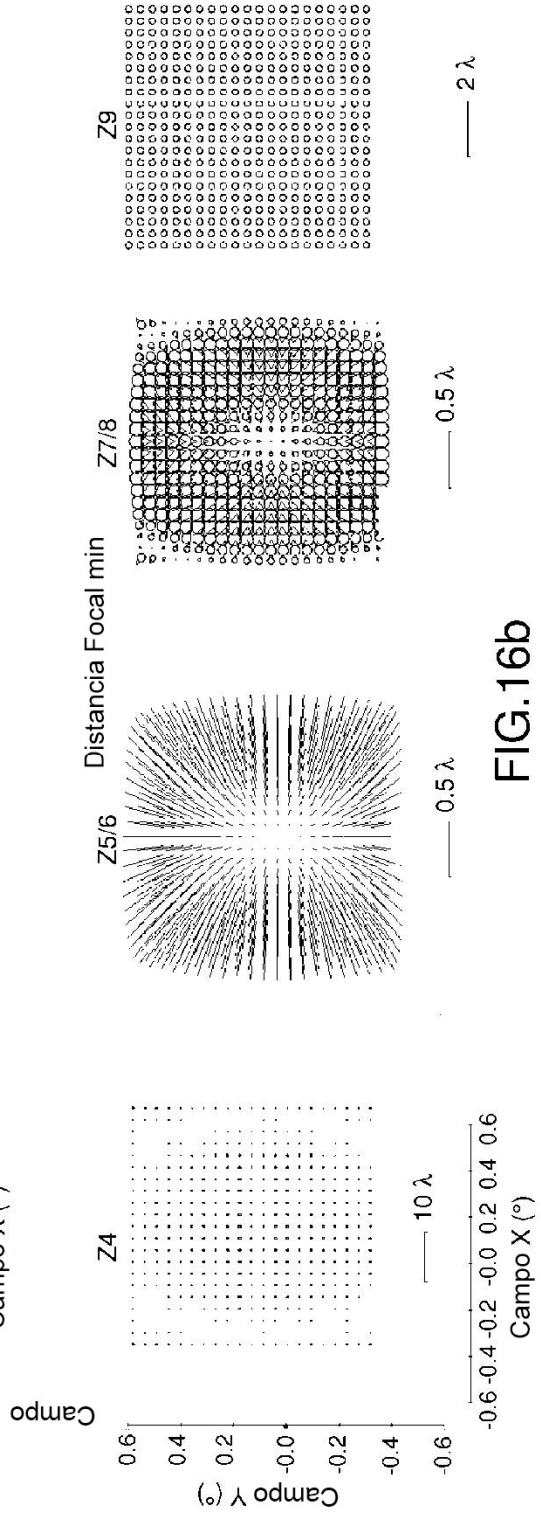
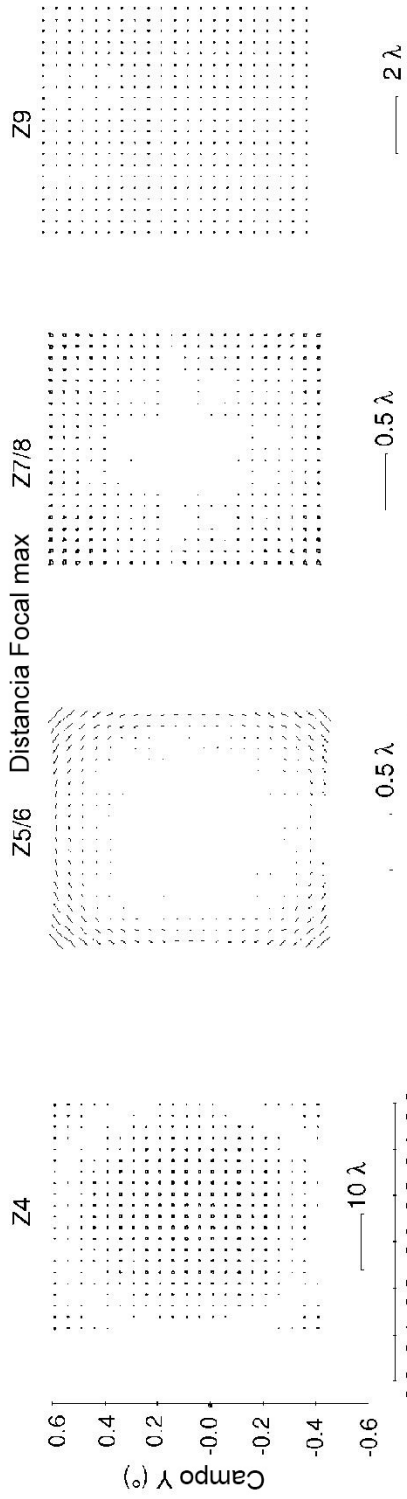


FIG.15



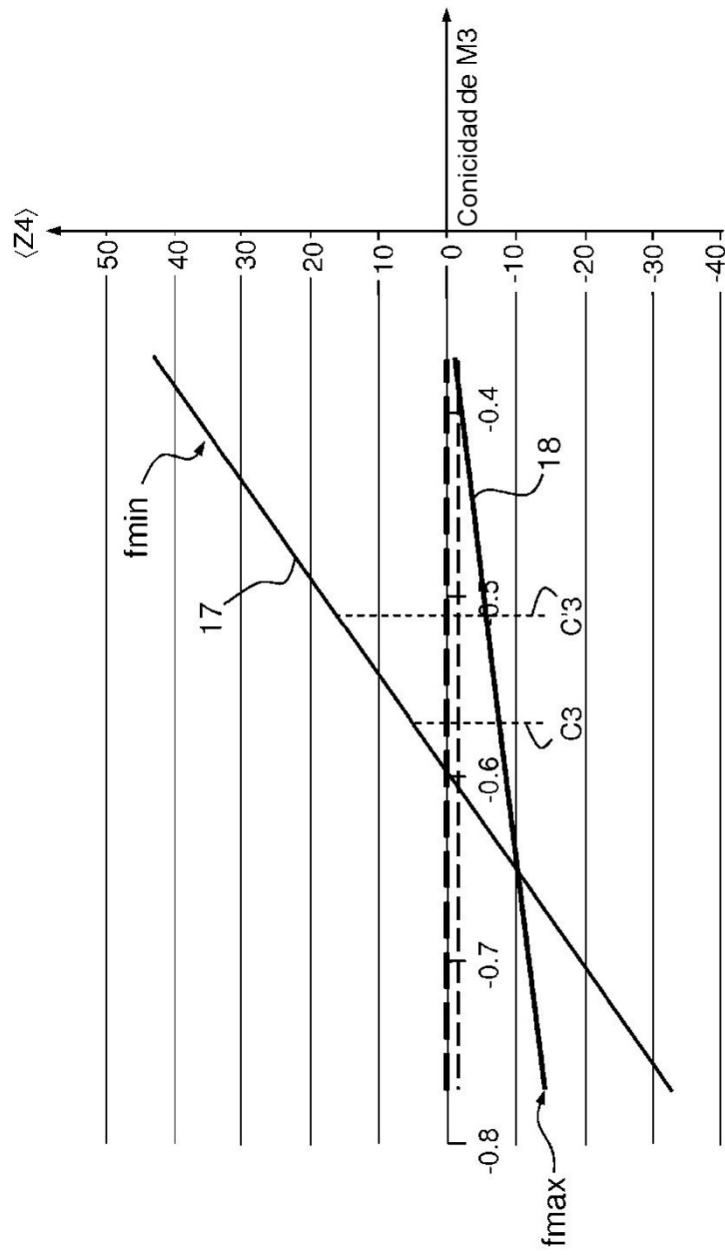


FIG.17

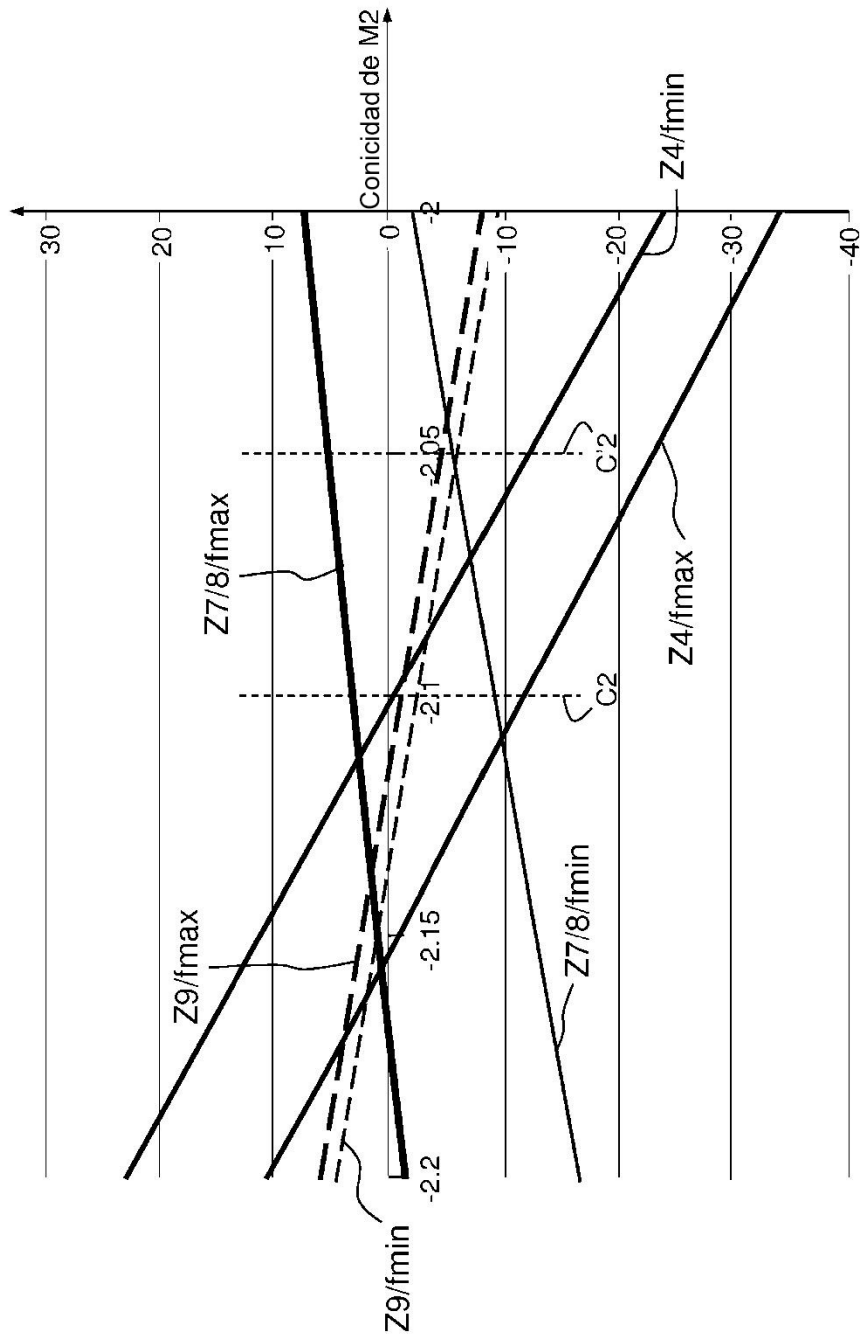


FIG.18

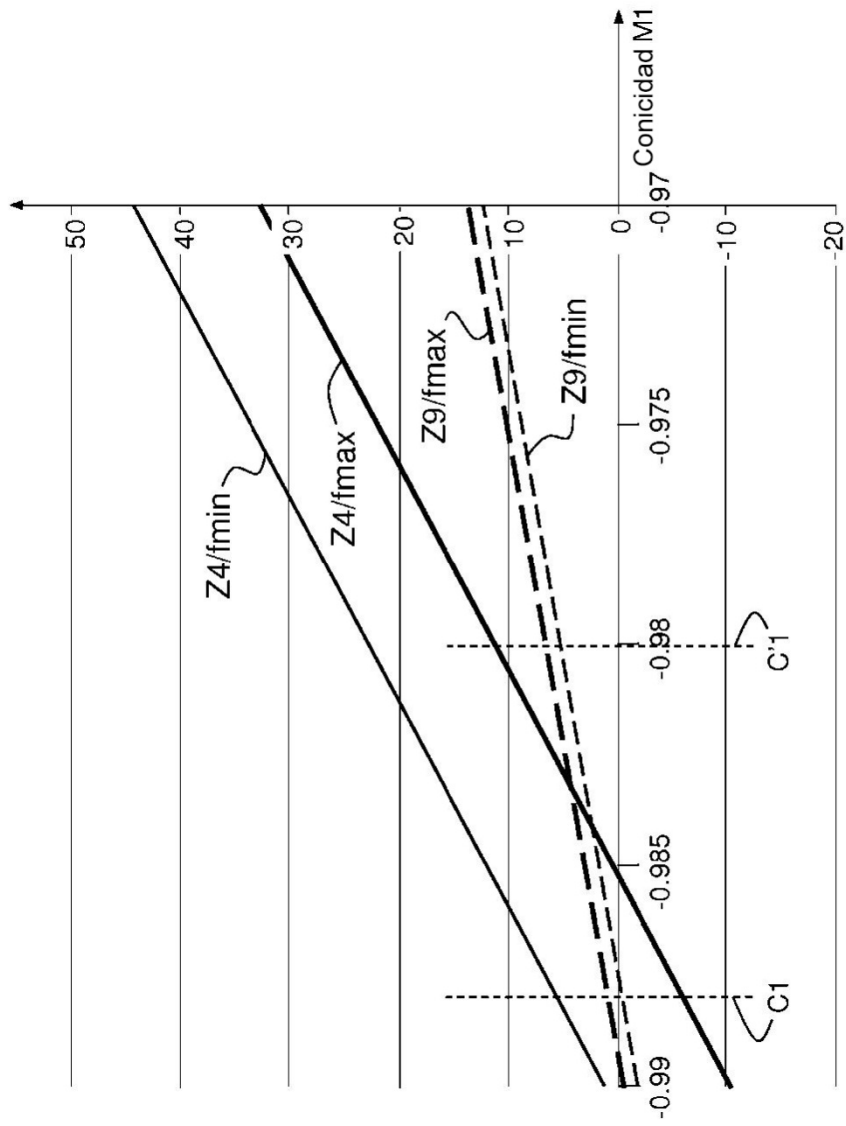
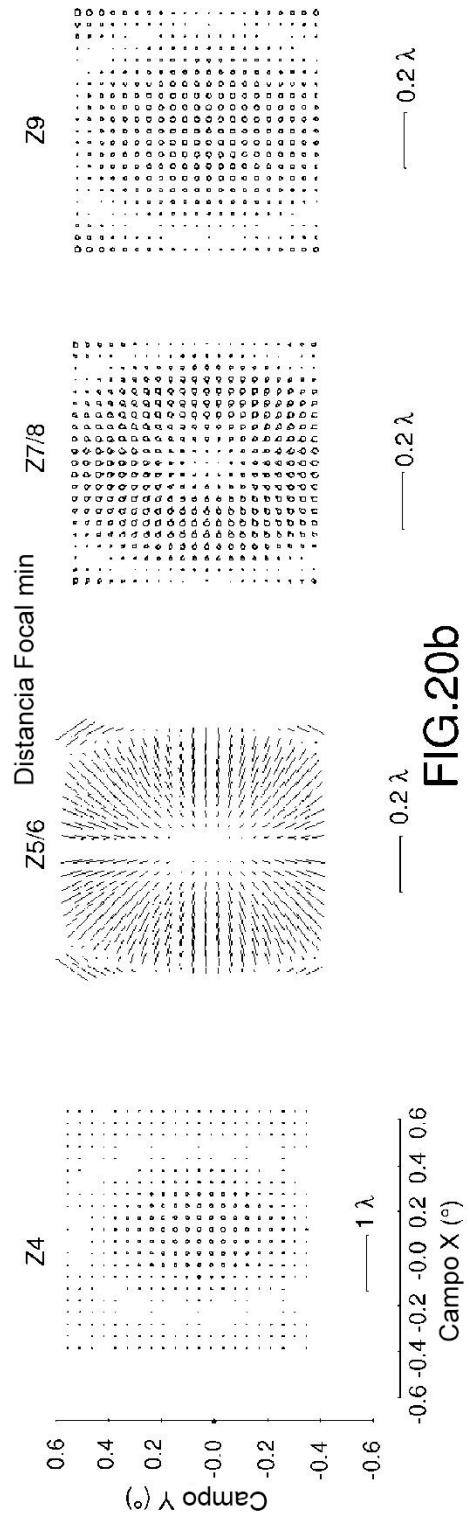
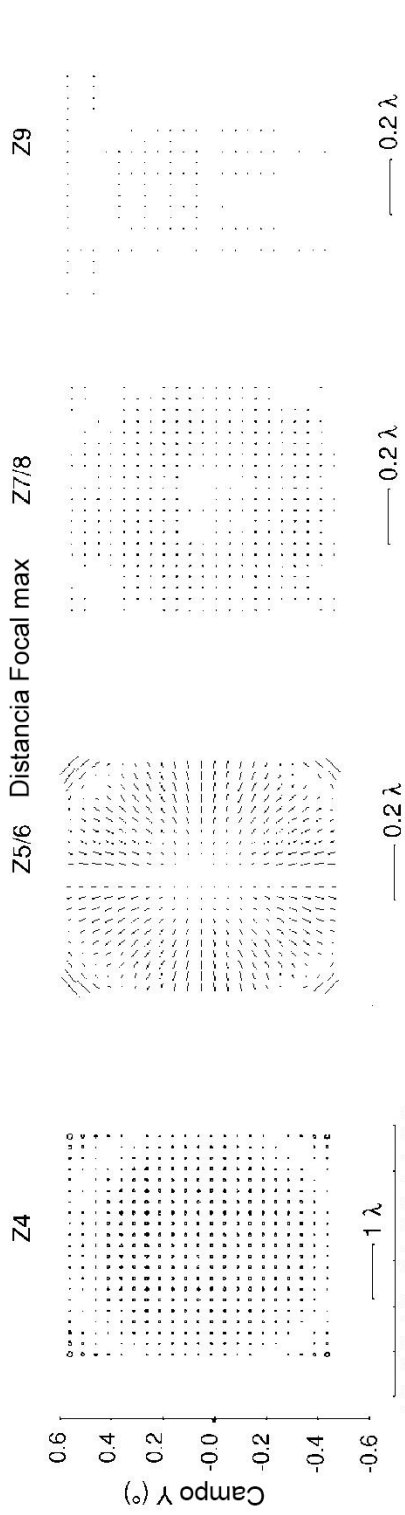


FIG.19



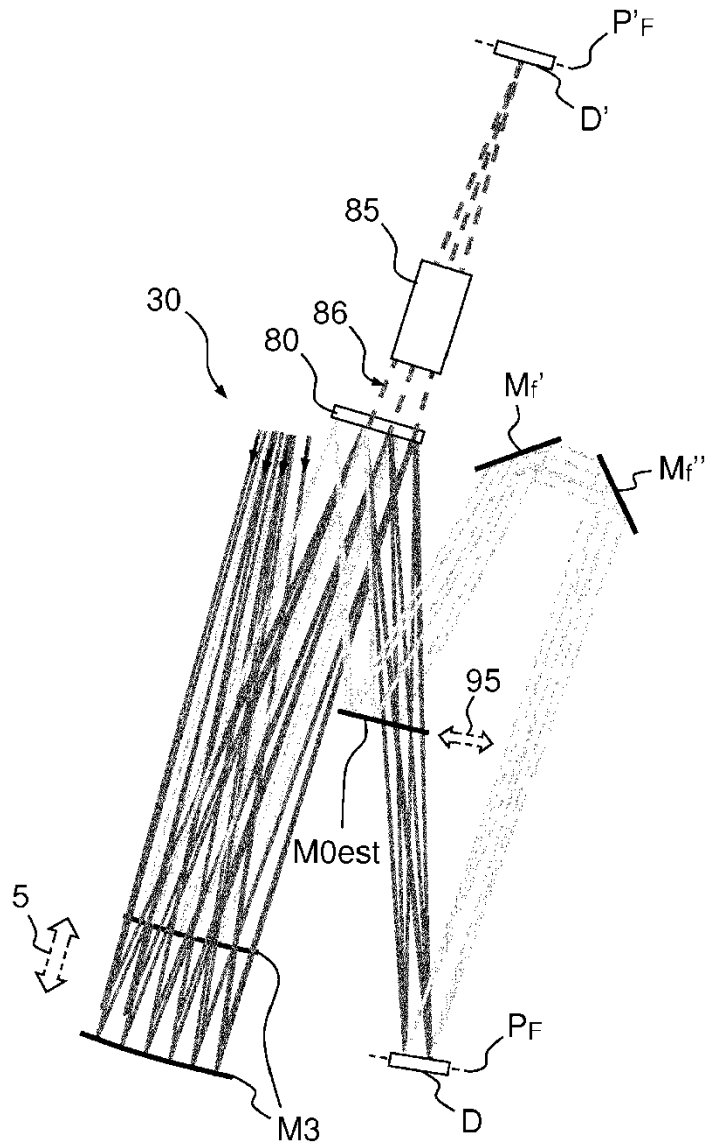


FIG.21

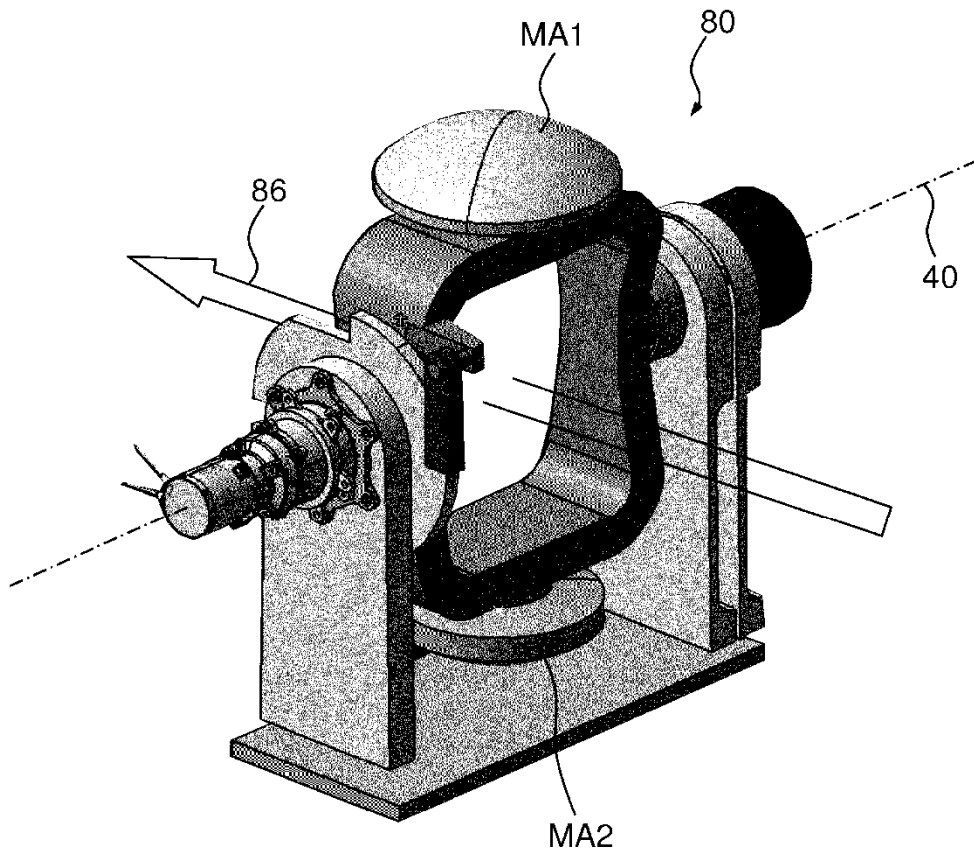


FIG.22

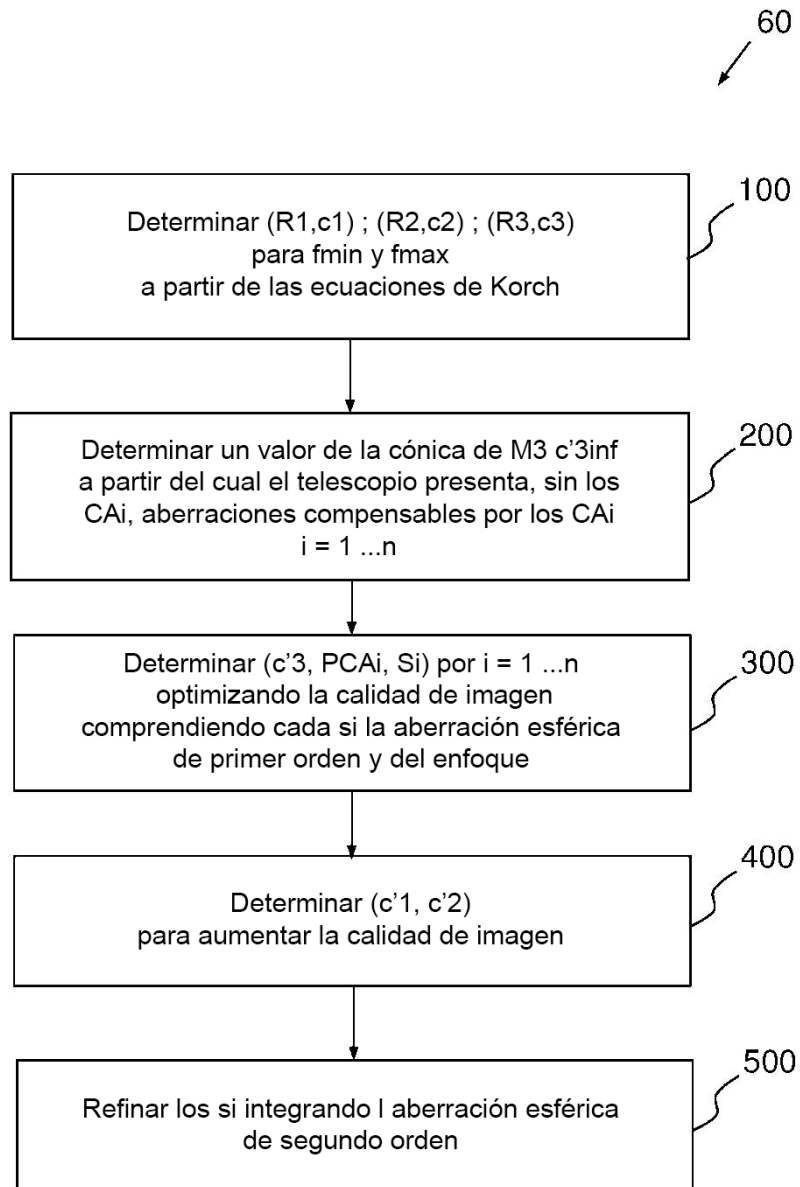


FIG.23

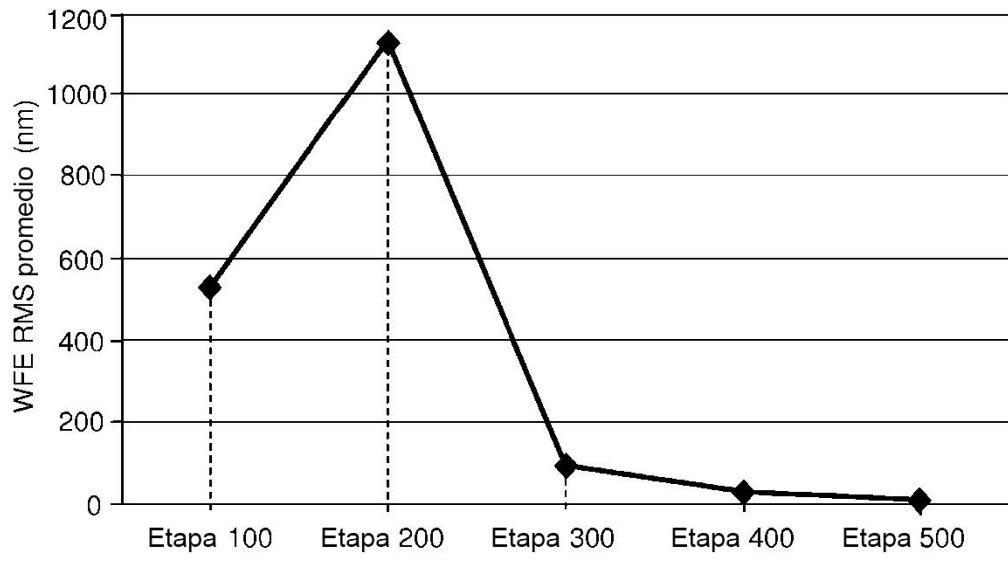


FIG.24