

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS  
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 927 401**

(51) Int. Cl.:

**G02B 26/08** (2006.01)

**G02F 1/29** (2006.01)

**H04B 10/118** (2006.01)

(12)

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.05.2020 E 20382426 (3)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.07.2022 EP 3913417**

---

(54) Título: **Procedimiento para la alineación de un rayo láser emitido desde un transmisor de comunicación óptica con una estación receptora**

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**04.11.2022**

(73) Titular/es:

**UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE (50.0%)**  
**Avda. de la Universidad s/n**  
**03202 Elche, Alicante, ES y**  
**EMBEDDED INSTRUMENTS AND SYSTEMS S.L. (50.0%)**

(72) Inventor/es:

**CARRASCO HERNÁNDEZ, JOSÉ ANTONIO;**  
**GARCÍA DE QUIRÓS NIETO, FRANCISCO JAVIER y**  
**MORENO SORIANO, IGNACIO**

(74) Agente/Representante:

**ILLESCAS TABOADA, Manuel**

**ES 2 927 401 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

Procedimiento para la alineación de un rayo láser emitido desde un transmisor de comunicación óptica con una estación receptora

### Campo de la invención

5 La presente invención pertenece al campo técnico de la comunicación óptica, más en particular, la comunicación por satélite usando señales ópticas.

### Antecedentes de la invención

10 Los sistemas de comunicaciones ópticas en el espacio libre están ganando mucha atención en todo el mundo debido a que los avances tecnológicos permiten su implementación práctica en aplicaciones comerciales tales como naves espaciales, reemplazando los enlaces de radiofrecuencia más típicos en particular entre estaciones móviles. Sin embargo, los sistemas de comunicaciones ópticas presentan el problema adicional del apuntamiento y el seguimiento entre transmisor y receptor.

15 El apuntamiento y el seguimiento, con el transmisor, receptor o ambos, en movimiento, se deben implementar típicamente con excursiones precisas de 3 a 6 grados y errores de rayo láser por debajo de 0,02 grados. Esto se logró inicialmente con implementaciones mecánicas de propulsores controlados por servomotores o microespejos de sistemas microelectromecánicos (MEMS) (véase el documento WO2016022579 A1), que añaden complejidad, peso y volumen a los sistemas de comunicaciones ópticas, en particular plataformas pequeñas de 3 a 50 kg, además de que el uso de implementaciones mecánicas no es adecuado para misiones largas debido a las restricciones de combustible y energía, así como al desgaste que da como resultado una necesidad incrementada de mantenimiento y una fiabilidad reducida con el tiempo. También es posible realizar el apuntamiento de un pequeño satélite con un rayo láser solidario y actuar solo sobre el control de posicionamiento del satélite usando sensores estelares para la medición exacta de la posición tridimensional (3D) del satélite. De forma alternativa, se puede lograr el apuntamiento cambiando el índice de refracción de un cristal líquido a través del que viaja el rayo láser proyectado. Sin embargo, ambos procedimientos son complejos y en el caso del último requieren una óptica adicional para controlar la desviación del rayo.

20 El documento US5.475.520 A se refiere a un sistema de comunicaciones por satélite que comprende medios para transmitir una pluralidad de rayos unidireccionales de radiación electromagnética, donde cada rayo se transmite por fibra óptica.

25 Por tanto, el problema de la presente invención es proporcionar un procedimiento, sistema y dispositivo para transmitir información desde un transmisor de comunicación óptica a una estación receptora por medio de un rayo láser y para la alineación de dicho rayo láser emitido desde dicho transmisor de comunicación óptica con dicha estación receptora, en el que dicho transmisor de comunicación óptica tiene una complejidad mecánica mínima, peso reducido, desgaste mínimo, bajo mantenimiento y/o fiabilidad incrementada.

### Breve descripción de la invención

30 La presente invención, como se define en la reivindicación 1, se refiere a un procedimiento para transmitir información desde un transmisor de comunicación óptica (100) a una estación receptora (110) por medio de un rayo láser (18) y para la alineación de dicho rayo láser emitido desde dicho transmisor de comunicación óptica con dicha estación receptora, en el que:

- 35 - dicho transmisor de comunicación óptica se desplaza con respecto a dicha estación receptora y comprende un láser (16), un receptor de radio (32), un microprocesador (14) y un modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio (24) que comprende un elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, con lo que dicho rayo láser se emite desde dicho láser y se proyecta sobre un área por difracción y reflexión usando dicho modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio, en el que dicho láser y dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser se controlan por dicho microprocesador, en el que dicho rayo láser tiene un eje longitudinal paralelo a la trayectoria de propagación de dicho rayo láser, con lo que el desplazamiento de la estación receptora con respecto a dicho transmisor de comunicación óptica es una componente del vector que representa el movimiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a dicha estación receptora, en el que dicha componente está en el plano perpendicular a una línea entre dicha estación receptora y dicho transmisor de comunicación óptica,
- 40 - dicha estación receptora comprende un receptor de fotodiodo (52) para detectar dicho rayo láser transmitido y un transmisor de radio (60), y
- 45 - dicho procedimiento comprende las siguientes etapas:

- 50 (i) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora por difracción y reflexión usando dicho modulador de luz espacial;

- (ii) dividir dicho rayo láser proyectado en cuadrantes que se cruzan en el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado;
- 5 (iii) interrumpir la proyección de cada cuadrante de dicho rayo láser durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por pulsación de dicho rayo láser usando modulación de amplitud y por distorsión del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, para cada intervalo de dicho conjunto, en el que cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que otros cuadrantes de dicho rayo láser se proyectan y en el que dicho cuadrante se proyecta exclusivamente sobre al menos un intervalo de dicho subconjunto,
- 10 en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado son las mismas para todos los cuadrantes sobre los que se proyecta dicho rayo láser, y en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos un intervalo de dicho conjunto de intervalos son diferentes de la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos otro intervalo de dicho conjunto de intervalos;
- 15 (iv) identificar el cuadrante de dicho rayo láser proyectado que se detecta en dicho receptor de fotodiodo en la estación receptora determinando la frecuencia de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta el cuadrante de dicho rayo láser, y comunicar esta información a dicho transmisor de comunicación óptica por medio de dicho transmisor de radio y dicho receptor de radio;
- 20 (v) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre el área sobre la que se proyectó el cuadrante del rayo láser identificado en la etapa (iv) distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido desde el láser usando la máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, que proyectó exclusivamente dicho cuadrante del rayo láser en la etapa (iii); y
- 25 (vi) repetir las etapas (ii) a (v) al menos otras tres veces o hasta que el ángulo entre el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (v) y dicho eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (ii) sea menor que  $\pi/9500$  radianes,
- 30 en el que la dirección en la que se apunta el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en las etapas (i) a (v) se cambia cada  $t$  segundos como una función del desplazamiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido por el láser usando una máscara de difracción de seguimiento que se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, en el que los intervalos tienen una frecuencia de valor  $r$  de entre 10 y 500 Hz, los pulsos tienen una frecuencia de valor  $f$  de entre 0,1 kHz y 100 MHz, y  $t$  está entre 0,001 y 10 segundos,
- en el que cada máscara de difracción de seguimiento se usa:
- 35 (a) sola en la etapa (i) y en la primera iteración de la etapa (ii); y
- (b) en combinación con una máscara de difracción de apuntamiento en las etapas (iii) a (v) y en iteraciones posteriores de la etapa (ii),
- 40 y en el que:
- (c) cada máscara de difracción de seguimiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que, cuando se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, difracta y refleja el rayo láser que se emite desde dicho láser, y proyecta el rayo láser proyectado sobre el área que se proyectó usando la máscara de difracción de seguimiento usada inmediatamente antes de esto,
- 45 (d) cada combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que, cuando se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, difracta y refleja el rayo láser que se emite desde dicho láser, y proyecta el rayo láser proyectado:
- 50 - sobre el área que se proyectó usando la combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento usada inmediatamente antes de esto, cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son las mismas; o bien
- sobre un subconjunto del área sobre la que se proyectó usando:
- la máscara de difracción de seguimiento usada antes de esto cuando dicha combinación es la primera combinación usada después de usar una máscara de seguimiento; o

la combinación de la máscara de difracción de seguimiento y la máscara de difracción de apuntamiento usada antes de esto cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son diferentes.

5 Además, la presente invención se refiere a un dispositivo de comunicación óptica, como se define en la reivindicación 8, para transmitir información desde un transmisor de comunicación óptica (100) a una estación receptora (110) por medio de un rayo láser (18) y para la alineación de dicho rayo láser emitido desde dicho transmisor de comunicación óptica con dicha estación receptora, en el que dicho dispositivo comprende los siguientes componentes:

- un láser (16),
- un receptor de radio (32),
- 10 - un modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio (24) que comprende un elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser que se emite desde dicho láser, y
- un microprocesador (14),

en el que dicho láser y dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser se controlan por dicho microprocesador,

15 caracterizado por que dichos componentes están dispuestos para llevar a cabo las siguientes etapas:

- (i) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora por difracción y reflexión usando dicho modulador de luz espacial;
- (ii) dividir dicho rayo láser proyectado en cuadrantes que se cruzan en el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado;

20 (iii) interrumpir la proyección de cada cuadrante de dicho rayo láser durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por pulsación de dicho rayo láser usando modulación de amplitud y por distorsión del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, para cada intervalo de dicho conjunto, en el que cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que otros cuadrantes de dicho rayo láser se proyectan y en el que dicho cuadrante se proyecta exclusivamente sobre al menos un intervalo de dicho subconjunto,

25 en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado son las mismas para todos los cuadrantes sobre los que se proyecta dicho rayo láser, y en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos un intervalo de dicho conjunto de intervalos son diferentes de la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos otro intervalo de dicho conjunto de intervalos;

30 (iv) identificar el cuadrante de dicho rayo láser proyectado que se detecta en dicho receptor de fotodiodo en la estación receptora determinando la frecuencia de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta el cuadrante de dicho rayo láser, y comunicar esta información a dicho transmisor de comunicación óptica por medio de dicho transmisor de radio y dicho receptor de radio;

35 (v) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre el área sobre la que se proyectó el cuadrante del rayo láser identificado en la etapa (iv) distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido desde el láser usando la máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser que proyectó exclusivamente dicho cuadrante del rayo láser en la etapa (iii); y

40 (vi) repetir las etapas (ii) a (v) al menos otras tres veces o hasta que el ángulo entre el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (v) y dicho eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (ii) sea menor que  $\pi/9500$  radianes,

45 en el que la dirección en la que se apunta el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en las etapas (i) a (v) se cambia cada  $t$  segundos como una función del desplazamiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido por el láser usando una máscara de difracción de seguimiento que se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, con lo que el desplazamiento de la estación receptora con respecto a dicho transmisor de comunicación óptica es una componente del vector que representa el movimiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a dicha estación receptora, en el que dicha componente está en el plano perpendicular a una línea

50 entre dicha estación receptora y dicho transmisor de comunicación óptica,

en el que los intervalos tienen una frecuencia de valor  $r$  de entre 10 y 500 Hz, los pulsos tienen una frecuencia de valor  $f$  de entre 0,1 kHz y 100 MHz, y  $t$  está entre 0,001 y 10 segundos,

en el que cada máscara de difracción de seguimiento se usa:

(a) sola en la etapa (i) y en la primera iteración de la etapa (ii); y

5 (b) en combinación con una máscara de difracción de apuntamiento en las etapas (iii) a (v) y en iteraciones posteriores de la etapa (ii),

y en el que:

10 (c) cada máscara de difracción de seguimiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que, cuando se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, difracta y refleja el rayo láser que se emite desde dicho láser, y proyecta el rayo láser proyectado sobre el área que se proyectó usando la máscara de difracción de seguimiento usada inmediatamente antes de esto,

15 (d) cada combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que, cuando se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, difracta y refleja el rayo láser que se emite desde dicho láser, y proyecta el rayo láser proyectado:

- sobre el área que se proyectó usando la combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento usada inmediatamente antes de esto, cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son las mismas; o bien
- sobre un subconjunto del área sobre la que se proyectó usando:

20 la máscara de difracción de seguimiento usada antes de esto cuando dicha combinación es la primera combinación usada después de usar una máscara de seguimiento; o

la combinación de la máscara de difracción de seguimiento y la máscara de difracción de apuntamiento usada antes de esto cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son diferentes.

## 25 Descripción de las figuras

Se describen varios aspectos y modos de realización de la invención, solo a modo de ejemplo, con referencia a las siguientes figuras.

30 **Figura 1.** Un dispositivo transmisor de comunicaciones ópticas que comprende un sistema de apuntamiento preciso y seguimiento conectado a un ordenador de control integrado que alimenta datos de calidad de enlace desde una estación receptora a través de un enlace de radio UHF y rastrea su posición en el espacio y el tiempo con un receptor GPS de acuerdo con un modo de realización de la invención.

**Figura 2.** Un sistema receptor de una estación receptora que forma parte de un sistema transmisor de comunicaciones ópticas de acuerdo con un modo de realización de la invención.

35 **Figura 3.** Representación pictórica de cómo el láser incidente se refleja en la superficie del SLM, en la que se presenta un holograma y se usa para mover un patrón cuadrado iluminado en un área (por ejemplo, la superficie de la Tierra).

40 **Figura 4. A.** Cinco hologramas digitales (a) a (e) representan lentes holográficas para compensar los desajustes de colimación dentro del sistema transmisor óptico implementando potencias ópticas de  $174 \text{ m}^{-1}$ ,  $87 \text{ m}^{-1}$ ,  $0$ ,  $-87 \text{ m}^{-1}$  y  $-174 \text{ m}^{-1}$  respectivamente; y **B.** Cinco patrones de hologramas digitales (a) a (e) que cuando se proyectan en el SLM que está iluminado por un láser producen un reflejo del rayo en un ángulo de  $-2^\circ$ ,  $-1^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+1^\circ$  y  $+2^\circ$  respectivamente.

45 **Figura 5. A.** Definición pictórica de la posición de un patrón cuadrado (por ejemplo, en la superficie de la Tierra) definida por coordenadas  $(y_n, x_n)$  con dependencia de dos ángulos definidos,  $\theta$  y  $\phi$ , y **B.** Cómo dos hologramas, (a) y (b), correspondientes a desplazamientos angulares  $\phi$  y  $\theta$  respectivamente, se combinan para obtener el patrón holográfico (c) iluminado en dicha área en cualquier posición dentro del campo de visión del sensor.

50 **Figura 6.** Situación pictórica de un satélite 100 como dicho transmisor de comunicación óptica sobre una estación terrestre 110 como dicha estación receptora que se sitúa, a modo de ejemplo en Nerpio (España), donde 120 representa el círculo de visibilidad del satélite, 122 el eje ortonormal x del campo de visión de LCOS-SLM del satélite 123, y 124 el correspondiente eje y con un centro que se define por la línea perpendicular a la superficie de la Tierra que cruza el satélite 125, en el que el área sombreada 126 representa el área iluminada por el rayo láser con un centro que se define por el eje de la trayectoria de propagación 127, que corresponde

a la desconvolución del holograma en el LCOS-SLM, 128 representa la dirección de viaje del satélite y los ángulos  $\theta$  y

$\phi$  representan respectivamente la desviación cenital y el ángulo de desviación acimutal en grados con respecto al eje longitudinal 125.

5 **Figura 7.** Transmisor de comunicación óptica y alineación de la estación receptora para el primer contacto aproximado, refinamiento de apuntamiento e inicio del diagrama de flujo del procedimiento de comunicación para un procedimiento de acuerdo con la invención exemplificado usando **A**. un satélite como dicho transmisor de comunicación óptica y **B**. una estación terrestre como dicha estación receptora.

10 **Figura 8.** Los hologramas de una serie de máscaras de difracción de apuntamiento que se proyectan en la superficie del SLM comprendido en el transmisor de comunicación óptica (por ejemplo, satélite) a medida que se determina la localización de la estación receptora (por ejemplo, estación terrestre) que termina con el apuntamiento de la luz láser dentro de  $\pi/9500$  radianes de la estación receptora, lo que da como resultado por tanto un enlace de comunicación entre ellos que tiene una eficacia máxima porque toda la luz disponible se concentra en un área pequeña (un plano cuadrado perpendicular al eje longitudinal del rayo láser proyectado en el que se localiza dicha estación receptora, que tiene lados de típicamente 100 a 200 m de longitud). El cuadrado exterior de cada cuadrícula representa el área total que se puede iluminar por el láser una vez reflejado y difractado por el SLM y el cuadrado oscuro dentro representa el área realmente iluminada por el láser después de reflejarse y difractarse por la máscara de difracción de apuntamiento inmediatamente debajo. **A.** Representa los cuatro cuadrantes que se iluminan (en este caso, en sentido contrario a las agujas del reloj comenzando por el cuadrante superior izquierdo) al comienzo del procedimiento de apuntamiento usando los correspondientes hologramas generados en cada máscara de difracción de apuntamiento en cada intervalo. Despues de proyectar sobre cada cuadrado durante un período que varía de 1 ms a 200 ms y recibir realimentación de la estación receptora, el transmisor de comunicación óptica determina que la estación receptora reside en el cuadrado número 3 (parte inferior derecha). **B.** En una iteración posterior, el microprocesador del emisor óptico recalcula a continuación los patrones de difracción y genera cuatro máscaras de difracción para iluminar sucesivamente los cuatro cuadrantes dentro del cuadrado número 3 usando los correspondientes hologramas generados en cada máscara de difracción de apuntamiento en cada intervalo. Al recibir realimentación de la estación receptora, el microprocesador de emisor óptico determina que la estación receptora se localiza dentro del cuadrado 33 (parte inferior derecha del cuadrado 3). **C.** El procedimiento se repite a continuación con este cuadrado 33 que determina que la estación receptora se localiza dentro del cuadrado 331 (parte superior izquierda del cuadrado 33). **D.** Al repetir el procedimiento (al menos) una vez más de esta manera, el láser apunta al cuadrado pequeño 3311 (parte superior izquierda del cuadrado 331) (o un cuadrado dentro del mismo). En este punto, el procedimiento de comunicación comienza cambiando el láser a una velocidad de 1 Mbps a 100 Mbps. Cabe destacar que las máscaras de difracción de seguimiento se deben añadir a las máscaras de difracción (usando la transformada de Fourier) para tener en cuenta el movimiento relativo del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora al hacer rotaciones para compensar este movimiento.

40 **Figura 9.** Los hologramas correspondientes al seguimiento de la estación receptora (en este modo de realización, una estación terrestre) una vez que se ha localizado para compensar el movimiento relativo del transmisor de comunicación óptica (en este modo de realización, un satélite) sobre su órbita con respecto a la estación terrestre estacionaria asumiendo que este desplazamiento se realiza en una dirección que coincide con la coordenada horizontal del elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser. **A.** (a) a (e) indican el cuadrante (en este modo de realización, sobre la superficie de la Tierra) que se ilumina mientras que **B** (a) a (e) muestran respectivamente el holograma proyectado en la superficie del elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser para lograr esto. En particular, (a) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma una vez se localiza la estación terrestre y se enfoca el láser a un ángulo de  $\pi/9500$  radianes; (b) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma proyectado en el LCOS cuando el satélite se ha movido un ángulo de  $\pi/9500$  radianes con respecto a la localización de la estación terrestre en (a); (c) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma proyectado en el LCOS cuando el satélite se ha movido un ángulo de  $2\pi/9500$  radianes con respecto a la localización de la estación terrestre en (a); (d) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma proyectado en el LCOS cuando el satélite se ha movido un ángulo de  $3\pi/9500$  radianes con respecto a la localización de la estación terrestre en (a); y (e) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma proyectado en el LCOS cuando el satélite se ha movido un ángulo de  $4\pi/9500$  radianes con respecto a la localización de la estación terrestre en (a).

## 55 **Descripción detallada de la invención**

La presente invención se refiere a un procedimiento y dispositivo de apuntamiento y seguimiento para la comunicación óptica en el espacio libre basada en un modulador de luz espacial controlable eléctricamente. También se divulga en la presente descripción un sistema de apuntamiento y seguimiento para la comunicación óptica en el espacio libre basado en un modulador de luz espacial controlable eléctricamente. Además, la presente descripción divulga un transmisor de comunicación óptica que comprende dicho dispositivo así como el uso de dicho procedimiento, sistema, dispositivo o transmisor de comunicación óptica para:

- alineación del rayo láser emitido desde dicho transmisor de comunicación óptica con una estación receptora; y/o
- transmitir información desde dicho transmisor de comunicación óptica a una estación receptora. Preferentemente, dicha comunicación óptica en el espacio libre es entre nave espacial o entre una nave espacial y una estación base (por ejemplo, estación terrestre), más preferentemente dicha comunicación óptica en el espacio libre es entre un satélite como transmisor de comunicación óptica (100) y una estación terrestre (terrena) como estación receptora (110).

5 La presente invención se refiere a un procedimiento y dispositivo para transmitir información desde un transmisor de comunicación óptica (100) a una estación receptora (110) por medio de un rayo láser (18) (una vez difractado y

10 reflejado por el modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio, figura 2) y para la alineación de dicho rayo láser emitido desde dicho transmisor de comunicación óptica con dicha estación receptora. Asimismo, la presente descripción también divulga un sistema para estos propósitos. Dicho transmisor de comunicación óptica se desplaza con respecto a dicha estación receptora (o viceversa, dicha estación receptora se desplaza con respecto a dicho transmisor de comunicación óptica, es decir, el transmisor de comunicación óptica está alejado de dicha estación

15 receptora y se mueve con respecto a ella) y transmite información a la misma por medio de dicho rayo láser. El desplazamiento de la estación receptora con respecto a dicho transmisor de comunicación óptica es una componente del vector que representa el movimiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a dicha estación receptora, en el que dicha componente está en el plano perpendicular a una línea entre dicha estación receptora y dicho transmisor comunicación óptica. Por tanto, dicho rayo láser proporciona un enlace de comunicación entre el

20 transmisor de comunicación óptica y la estación receptora. Para maximizar la eficacia del enlace de comunicación, es necesario que el rayo láser proyectado desde el transmisor de comunicación óptica se alinee lo más posible con dicha estación receptora (es decir, el rayo láser se proyecta sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora) de modo que la luz disponible emitida por el rayo láser se concentra en un área lo más pequeña posible. El procedimiento, sistema y dispositivo enfocan por tanto el rayo láser proyectado sobre un área en la que se localiza

25 dicha estación receptora, para aproximarse a la búsqueda de la estación a través del apuntamiento y el seguimiento. Por tanto, la presente invención se refiere a un procedimiento y dispositivo para rastrear una estación receptora a medida que se desplaza con respecto a un transmisor de comunicación óptica, y apuntar dicho transmisor de comunicación óptica (en particular, apuntar el eje longitudinal de la trayectoria de propagación del rayo láser proyectado desde dicho transmisor de comunicación óptica) hacia dicha estación receptora. Asimismo, la presente

30 descripción también divulga un sistema para estos propósitos. A diferencia de otros procedimientos, sistemas y dispositivos para alinear un rayo láser emitido desde dicho transmisor de comunicación óptica con una estación receptora cuando dicho transmisor de comunicación óptica se desplaza con respecto a dicha estación receptora, el procedimiento y dispositivo de la presente invención y el sistema de la presente descripción logran el seguimiento y apuntamiento sin necesidad de mover ninguna de las partes comprendidas en dicho transmisor de comunicación óptica con respecto al mismo y sin necesidad de transmitir una señal óptica desde la estación receptora hacia el

35 transmisor de comunicación óptica.

Dicho transmisor de comunicación óptica, como se divulga en dicho procedimiento y sistema, y dicho dispositivo se caracteriza por que comprende un láser (18), un receptor de radio (32), un microprocesador (14) y un modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio (24) que comprende un elemento para difractar y reflejar el rayo láser que se emite por dicho láser.

40 Dicho láser emite un rayo láser. Dicho rayo láser emitido se difracta y refleja por el elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser comprendido en dicho modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio que proyecta dicho rayo láser, por tanto difractado y reflejado, sobre un área. Dicha área es aquella en la que se localiza dicha estación receptora y es un cuadrado cuando el área es perpendicular al eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado, siendo el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado paralelo a la trayectoria de propagación de dicho rayo láser proyectado.

45 Dicho láser emite luz a una longitud de onda central, preferentemente seleccionada de una longitud de onda de entre 150 nm y 30000 nm, más preferentemente entre 375 nm y 4600 nm, incluso más preferentemente entre 1000 nm y 2000 nm. En un modo de realización aún más preferente, dicha longitud de onda es de 1550 nm. Dicho láser es preferentemente un láser semiconductor, más preferentemente un láser de fotodiodo. En el modo de realización exemplar descrito en el presente documento, el láser es el modelo L1550G1 de la empresa Thorlabs, que emite a una longitud de onda de 1550 nm.

50 Los moduladores de luz espacial (SLM) de cristal líquido sobre silicio (LCOS) son dispositivos electrónicos similares a las pantallas de visualización de cristal líquido (pantallas LCD) pero diseñados para controlar la fase de la luz incidente, generando por tanto una imagen de fase en lugar de una imagen de intensidad que se usa típicamente en una pantalla LCD. Se pueden comportar como elementos ópticos difractivos tales como rejillas o lentes de difracción en virtud del tipo de holograma digital mostrado en esto, pero con la capacidad de ser programables eléctricamente (sin partes móviles mecánicas) en virtud, por ejemplo, de un circuito excitador controlado por un microprocesador. Preferentemente, el LCOS-SLM se puede configurar para modificar la fase de un rayo láser que incide sobre él codificando una función de fase por una imagen generada por ordenador que tiene diferentes niveles de gris de modo que los niveles de gris en la imagen reproducen niveles de fase de  $-\pi$  a  $+\pi$  radianes en el láser incidente. De esta

forma, el SLM puede impartir al láser reflejado diferentes funciones difractivas ópticas dependiendo de la imagen codificada mostrada en la pantalla de SLM sobre la que se refleja el rayo láser. Además, la máscara de difracción del SLM puede cambiar fácilmente de una función a otra o realizar varias de dichas funciones simultáneamente. Por tanto, dicho modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio (LCOS-SLM) comprende un elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser. Holoeye se puede citar como un ejemplo de un proveedor de SLM de este tipo.

Dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser comprende una matriz de píxeles que modulan conjuntamente la fase del rayo láser que incide sobre ellos. En un modo de realización, cada píxel del elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser muestra un nivel de gris, de modo que el elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser muestra un patrón holográfico en escala de grises que comprende una máscara de difracción o una combinación de máscaras de difracción generadas en el mismo que da como resultado la difracción y reflexión del rayo láser que se emite desde dicho láser e incide sobre el mismo. Cada máscara, independientemente de su función, es una máscara de difracción de fase. Cada patrón holográfico comprende una máscara de difracción/combinación de máscaras de difracción que se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser y se muestra en él durante la duración total de un intervalo, siendo definido un intervalo por el tiempo (en segundos) entre el que se refresca dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser. Por tanto, si el elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser muestra el mismo patrón holográfico en una serie consecutiva de intervalos, el rayo láser que se proyecta desde dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser se proyectará de la misma forma para cada intervalo de dicha serie de intervalos consecutivos durante los que se muestra dicho patrón holográfico dado.

Al usar un LCOS-SLM en la forma descrita en el presente documento, es posible regular, entre otras variables, el ancho (es decir, el ángulo) sobre el que y/o la dirección en la que se refleja un rayo láser que incide sobre él y, de esta forma, es posible dar forma y enfocar el rayo (es decir, apuntamiento preciso y seguimiento) de un rayo láser proyectado desde un transmisor de comunicación óptica tal como una nave espacial sin el uso de partes móviles mecánicas para rastrear una estación receptora tal como una estación terrestre evitando por tanto los costes y el volumen asociados con los sistemas de apuntamiento mecánicos. En el caso del modo de realización preferente en el que el transmisor de comunicación óptica es una nave espacial tal como un satélite, esto es una gran ventaja porque permite la integración con las comunicaciones ópticas de naves espaciales más pequeñas y sigue las tendencias actuales en aplicaciones espaciales del uso de satélites más pequeños que 100 kg e incluso hasta 3 kg.

Además, al usar un LCOS-SLM de la forma descrita en el presente documento, se elimina la necesidad de usar un enlace óptico de retorno desde la estación receptora (por ejemplo, estación terrestre) al transmisor de comunicación óptica (por ejemplo, satélite) al reemplazar la adquisición del enlace óptico de retorno usado en el apuntamiento con un enlace de radio de datos de baja velocidad implementado, por ejemplo, en UHF o VHF, para cerrar el ciclo de control necesario para realizar y mantener el apuntamiento, simplificando además por tanto el modo de implementación de la estación receptora.

Dicho microprocesador controla el láser y la emisión del rayo láser del mismo, incluyendo preferentemente la intensidad de luz del mismo y la pulsación de dicho rayo láser, así como las máscaras de difracción generadas en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser. Por tanto, dicho microprocesador es un producto de programa informático que preferentemente controla toda o parte de la electrónica del transmisor de comunicación óptica usando instrucciones de programa legibles por ordenador. En un modo de realización más preferente, para controlar las máscaras de difracción generadas en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, dicho microprocesador codifica una imagen digital, reproduciéndose dicha imagen digital en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser (es decir, dicha pantalla de SLM), lo que actúa de forma similar a una pantalla de ordenador o televisión, pero muestra la imagen digital como valores de fase. Al cambiar la imagen codificada en dicho SLM en instrucciones de programa legibles por ordenador, es posible regular la dirección, alcance, enfoque y tiempo con el que se proyecta un rayo láser que incide en la pantalla de SLM a través de la reflexión y difracción del mismo.

El producto de programa informático puede incluir un medio (o medios) de almacenamiento legible por ordenador que tiene instrucciones de programa legibles por ordenador en él para hacer que un procesador lleve a cabo aspectos de la presente invención.

El medio de almacenamiento legible por ordenador puede ser un dispositivo tangible que puede retener y almacenar instrucciones para su uso por un dispositivo de ejecución de instrucciones. El medio de almacenamiento legible por ordenador puede incluir, pero no se limita a, un dispositivo de almacenamiento electrónico, un dispositivo de almacenamiento magnético, un dispositivo de almacenamiento óptico, un dispositivo de almacenamiento electromagnético, un dispositivo de almacenamiento semiconductor o cualquier combinación adecuada de los anteriores. Una lista no exhaustiva de ejemplos más específicos del medio de almacenamiento legible por ordenador incluye lo siguiente: un disquete de ordenador portátil, un disco duro, una memoria de acceso aleatorio (RAM), una memoria de solo lectura (ROM), una memoria de solo lectura programable y borrable (EPROM o memoria Flash), una memoria estática de acceso aleatorio (SRAM), una memoria de solo lectura de disco compacto portátil (CD-ROM), un disco versátil digital (DVD), una tarjeta de memoria, un disquete, un dispositivo mecánico dispositivo codificado mecánicamente tal como tarjetas perforadas o estructuras elevadas en un surco que tienen instrucciones grabadas en el mismo, y cualquier combinación adecuada de los anteriores.

Las instrucciones de programa legibles por ordenador descritas en el presente documento se pueden descargar a los respectivos dispositivos informáticos/de procesamiento desde un medio de almacenamiento legible por ordenador o a un ordenador externo o dispositivo de almacenamiento externo por medio de una red, por ejemplo, Internet, una red de área local, una red de área amplia y/o una red inalámbrica. La red puede comprender cables de transmisión de cobre, fibras de transmisión óptica, transmisión inalámbrica, enruteadores, cortafuegos, conmutadores, ordenadores de pasarela y/o servidores perimetrales. Una tarjeta adaptadora de red o interfaz de red en cada dispositivo informático/procesador recibe instrucciones de programa legibles por ordenador de la red y reenvía las instrucciones de programa legibles por ordenador para almacenarlas en un medio de almacenamiento legible por ordenador dentro del respectivo dispositivo informático/procesador.

- 10 Las instrucciones de programa legibles por ordenador para llevar a cabo las operaciones del procedimiento de la presente invención, y en el dispositivo de la presente invención, así como en el sistema de la presente descripción, pueden ser información codificada en forma de instrucciones del ensamblador, instrucciones de arquitectura del conjunto de instrucciones (ISA), instrucciones de máquina, instrucciones dependientes de máquina, microcódigo, instrucciones de *firmware*, datos de configuración de estado o cualquier código fuente o código objeto escrito en cualquier combinación de uno o más lenguajes de programación, incluyendo un lenguaje de programación orientado a objetos tal como Smalltalk, C++ o similares, y lenguajes de programación de procedimientos convencionales, tales como el lenguaje de programación "C" o lenguajes de programación similares. Las instrucciones de programa legibles por ordenador se pueden ejecutar completamente en el ordenador del usuario, parcialmente en el ordenador del usuario, como un paquete de *software* independiente, parcialmente en el ordenador del usuario y parcialmente en un ordenador remoto o completamente en el ordenador o servidor remoto. En este último escenario, el ordenador remoto se puede conectar al ordenador del usuario a través de cualquier tipo de red, incluyendo una red de área local (LAN) o una red de área amplia (WAN), o la conexión se puede realizar hacia un ordenador externo (por ejemplo, a través de Internet usando un proveedor de servicios de Internet). En algunos modos de realización, los circuitos electrónicos que incluyen, por ejemplo, circuitos lógicos programables, conjuntos de puertas programables en campo (FPGA) o conjuntos lógicos programables (PLA) pueden ejecutar las instrucciones de programa legibles por ordenador utilizando información de estado de las instrucciones de programa legibles por ordenador para personalizar el circuito electrónico, para realizar aspectos de la presente invención.

30 Los aspectos de la presente invención se describen en el presente documento con referencia a las ilustraciones de diagramas de flujo y/o diagramas de bloques (véase la **figura 7**) del procedimiento de la presente invención y el sistema de la presente descripción que se implementan en el dispositivo de comunicación óptica y el transmisor de comunicación óptica. Se entenderá que cada bloque cuadrado o romboidal de las ilustraciones del diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, y combinaciones de bloques en las ilustraciones del diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, se pueden implementar por medios mecánicos, técnicas ópticas o instrucciones de programa legibles por ordenador, o combinaciones de los mismos.

- 35 Estas instrucciones de programa informático legibles se pueden proporcionar a un procesador de un ordenador de propósito general, ordenador de propósito especial u otro aparato de procesamiento de datos programable para producir una máquina, de modo que las instrucciones, que se ejecutan por medio de procesador del ordenador u otro aparato de procesamiento de datos programable, crean medios para implementar las funciones/acciones especificadas en el diagrama de flujo y/o bloque o bloques del diagrama de bloques. Estas instrucciones de programa legibles por ordenador también se pueden almacenar en un medio de almacenamiento legible por ordenador que puede dirigir un ordenador, un aparato de procesamiento de datos programable y/u otros dispositivos para que funcionen de una manera particular, de modo que el medio de almacenamiento legible por ordenador que tiene instrucciones almacenadas en él comprende un artículo de fabricación que incluye instrucciones que implementan aspectos de la función/acción especificada en el diagrama de flujo y/o bloque o bloques del diagrama de bloques.
- 45 Las instrucciones de programa legibles por ordenador también se pueden cargar en el microprocesador mencionado anteriormente, un ordenador, otro aparato de procesamiento de datos programable u otro dispositivo para hacer que se realice una serie de etapas operativas en el ordenador, otro aparato programable u otro dispositivo para producir un proceso implementado por ordenador, de modo que las instrucciones que se ejecutan en el ordenador, otro aparato programable u otro dispositivo implementan las funciones/acciones especificadas en el diagrama de flujo y/o bloque o bloques del diagrama de bloques.

50 El diagrama de flujo y los diagramas de bloques en las figuras ilustran la arquitectura, funcionalidad y funcionamiento de posibles implementaciones de procedimientos y dispositivos de acuerdo con diversos modos de realización de la presente invención y sistemas de acuerdo con la presente descripción. En este sentido, cada bloque en el diagrama de flujo o diagramas de bloques puede representar un módulo, segmento o porción de instrucciones, que comprende una o más instrucciones ejecutables para implementar la(s) función/funciones lógica(s) especificada(s). En algunas implementaciones alternativas, las funciones anotadas en el bloque se pueden producir fuera del orden indicado en la **figura 7**. Por ejemplo, dos bloques mostrados en sucesión se pueden ejecutar, de hecho, sustancialmente al mismo tiempo, o los bloques se pueden ejecutar a veces en orden inverso, dependiendo de la funcionalidad implicada. También cabe destacar que cada bloque de los diagramas de bloques y/o ilustración de diagrama de flujo, y combinaciones de bloques en los diagramas de bloques y/o ilustración de diagrama de flujo, se puede implementar por sistemas basados en *hardware* de propósito especial que realizan las funciones o acciones especificadas, o que llevan a cabo combinaciones de instrucciones informáticas y *hardware* de propósito especial.

Dicho receptor de radio recibe transmisiones de radiofrecuencia desde dicha estación receptora. Cada transmisión de radiofrecuencia desde dicha estación receptora proporciona información al transmisor de comunicación óptica sobre la eficacia del enlace de comunicación, así como información sobre el cuadrante del rayo láser proyectado que se detecta en el receptor de fotodiodo en la estación receptora (es decir, información sobre el cuadrante que se proyecta sobre el área en la que se localiza la estación receptora). Esta información se obtiene determinando la frecuencia de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta el cuadrante de dicho rayo láser que se detectan en dicha estación receptora.

Dicha estación receptora, como se usa en dicho procedimiento, sistema y dispositivo, se caracteriza por que comprende un receptor de luz de fotodiodo (52) para detectar dicho rayo láser transmitido (es decir, proyectado) y un transmisor de radio (60). Preferentemente, la estación receptora comprende un receptor de fotodiodo detrás de un filtro de luz muy estrecho, en un foco principal de un dispositivo de detección óptica. Más preferentemente, dicho dispositivo de detección óptica es un telescopio accionado por una montura altacimutal controlada por ordenador.

Dicho receptor de fotodiodo detecta el rayo láser proyectado desde dicho transmisor de comunicación óptica, incluyendo la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado. La frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado y se detectan por dicho receptor de fotodiodo es única para el subconjunto del conjunto de intervalos durante los que el rayo láser proyectado se proyecta sobre cada cuadrante del mismo. Por tanto, la frecuencia de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos que se detectan en dicha estación receptora determina el cuadrante del rayo láser proyectado que se detecta por la estación receptora y por lo tanto en qué cuadrante se localiza la estación receptora. Esta información sobre el cuadrante del rayo láser proyectado que se detecta en el receptor de fotodiodo en la estación receptora (es decir, la información sobre el cuadrante que se proyecta sobre el área en la que se localiza la estación receptora) se transmite a continuación a dicho transmisor de comunicación óptica usando el transmisor de radio.

El transmisor de radio de la estación receptora proporciona preferentemente comunicación por radiofrecuencia en las bandas UHF o VHF. Más preferentemente, se conecta a una antena controlada por un ordenador, que se implementa más preferentemente por una topología Yagi directiva accionada por una montura altacimutal controlada por dicho ordenador.

Cabe destacar que el rayo láser emitido desde el láser al modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio (es decir, el rayo láser incidente, emitido) puede pasar a través de al menos otro componente óptico comprendido en el transmisor de comunicación óptica o el dispositivo de comunicación óptica comprendido en él antes de alcanzar el modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio, mientras que el rayo láser que se proyecta desde el modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio antes de dejar el transmisor de comunicación óptica (es decir, el rayo láser proyectado o transmitido) puede atravesar al menos otro componente óptico después de dejar el modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio. Preferentemente, cualquiera o ambos de dicho rayo láser emitido y dicho rayo láser proyectado pasan a través de al menos otro componente óptico comprendido en dicho transmisor de comunicación óptica o dicho dispositivo de comunicación óptica, en el que cada componente óptico se selecciona preferentemente del grupo que comprende un expulsor de rayo, una lente, un prisma, fibra óptica y una placa paralela plana. Más preferentemente, cualquiera o ambos de dicho rayo láser emitido y dicho rayo láser proyectado pasan a través de al menos un expulsor de rayo. Por tanto, un rayo láser que de otro modo es muy estrecho, se puede expandir para que cubra toda el área de pantalla del elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser comprendido en el modulador de luz espacial y por lo tanto hace un uso eficaz de la imagen mostrada en él. Cuando dicho(s) componente(s) óptico(s) comprende(n) fibra óptica, también es más preferentemente que esté comprendido en él/ellos un acoplador de fibra óptica.

En un modo de realización en particular preferente del procedimiento de la presente invención y el sistema de la presente descripción, dicho transmisor de comunicación óptica es un satélite de comunicaciones ópticas y dicho dispositivo de comunicaciones ópticas está comprendido en un satélite de comunicaciones ópticas. Por tanto, un modo de realización en particular más preferente de la presente invención se refiere a un procedimiento que comprende al menos un satélite y una estación receptora, incluso más preferentemente en el que dicha estación receptora es una estación terrestre.

Dicho procedimiento comprende las siguientes etapas, dicho sistema comprende medios para llevar a cabo las siguientes etapas y dicho dispositivo está dispuesto para llevar a cabo las siguientes etapas:

(i) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora por difracción y reflexión usando dicho modulador de luz espacial;

(ii) dividir dicho rayo láser proyectado en cuadrantes que se cruzan en el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado;

(iii) interrumpir la proyección de cada cuadrante de dicho rayo láser durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por pulsación de dicho rayo láser usando modulación de amplitud y por distorsión del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho

5 elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, para cada intervalo de dicho conjunto, en el que cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que otros cuadrantes de dicho rayo láser se proyectan y en el que dicho cuadrante se proyecta exclusivamente sobre al menos un intervalo de dicho subconjunto,

10 en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado son las mismas para todos los cuadrantes sobre los que se proyecta dicho rayo láser, y en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos un intervalo de dicho conjunto de intervalos son diferentes de la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos otro intervalo de dicho conjunto de intervalos;

15 (iv) identificar el cuadrante de dicho rayo láser proyectado que se detecta en dicho receptor de fotodiodo en la estación receptora determinando la frecuencia de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta el cuadrante de dicho rayo láser, y comunicar esta información a dicho transmisor de comunicación óptica por medio de dicho transmisor de radio y dicho receptor de radio;

20 (v) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre el área sobre la que se proyectó el cuadrante del rayo láser identificado en la etapa (iv) distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido desde el láser usando la máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser que proyectó exclusivamente dicho cuadrante del rayo láser en la etapa (iii); y

25 (vi) repetir las etapas (ii) a (v) al menos otras tres veces o hasta que el ángulo entre el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (v) y dicho eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (ii) sea menor que  $\pi/9500$  radianes,

en el que la dirección en la que se apunta el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en las etapas (i) a (v) se cambia cada  $t$  segundos como una función del desplazamiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido por el láser usando una máscara de difracción de seguimiento que se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, en el que los intervalos tienen una frecuencia de valor  $r$  de entre 10 y 500 Hz, los pulsos tienen una frecuencia de valor  $f$  de entre 0,1 kHz y 100 MHz, y  $t$  está entre 0,001 y 10 segundos,

en el que cada máscara de difracción de seguimiento se usa:

(a) sola en la etapa (i) y en la primera iteración de la etapa (ii); y

30 (b) en combinación con una máscara de difracción de apuntamiento en las etapas (iii) a (v) y en iteraciones posteriores de la etapa (ii).

35 En la etapa (i), dicho rayo láser se proyecta en intervalos consecutivos sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora por difracción y reflexión usando dicho modulador de luz espacial. Cada intervalo de dichos intervalos consecutivos en el rayo proyectado se corresponde con el intervalo durante el que se muestra continuamente un holograma en el modulador de luz espacial antes de mostrar un nuevo holograma que es igual o bien diferente del mismo (es decir, el intervalo entre refrescos sucesivos de dicho modulador de luz espacial). Los intervalos tienen una frecuencia de valor  $r$  de entre 10 y 500 Hz. Si dicho modulador de luz espacial tiene una frecuencia de refresco  $r$ , a continuación la duración de cada intervalo es menor que o igual a  $r^{-1}$ . Esto significa que el rayo láser proyectado se emite en pulsos definidos por la frecuencia de refresco de dicho modulador de luz espacial.

40 45 En un modo de realización preferente del sistema de la presente descripción, los medios usados para llevar a cabo la etapa (i) se refieren al microprocesador, láser y SLM (y, por tanto, al elemento del mismo para difractar y reflejar dicho rayo láser), proporcionando/recibiendo respectivamente dicho microprocesador instrucciones de programa legibles por ordenador o información codificada hacia/desde dicho láser y dicho SLM.

En un modo de realización preferente de la presente invención y la presente descripción, la etapa (i) de proyectar dicho rayo láser sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora comprende las etapas de:

50 (a) estimar la posición del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora y estimar la posición de la estación receptora con respecto al transmisor de comunicación óptica;

(b) apuntar el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en una dirección A hacia la posición de la estación receptora estimada en la etapa (a) cambiando la actitud del transmisor de comunicación óptica usando al menos un actuador;

(c) apuntar dicho receptor de fotodiodo en una dirección B hacia la posición del transmisor de comunicación óptica estimada en la etapa (a) cambiando los ángulos de acimut y/o altitud de dicho receptor de fotodiodo, en el que dicha dirección B es perpendicular al plano focal de dicho receptor de fotodiodo y paralela a dicha dirección A; y

5 (d) repetir las etapas (b) y (c) hasta que se detecte el rayo láser proyectado en la etapa (b) usando dicho receptor de fotodiodo. Este modo de realización preferente de la presente invención y la presente descripción describen una etapa de "apuntamiento aproximado" que implica actuadores. El apuntamiento aproximado tiene típicamente un ángulo de error A de aproximadamente  $\pi/950$  radianes (es decir, sobre un cuadrado que tiene lados de E km de longitud a una distancia de 600 km en el que E es de aproximadamente 2 km, con lo que dicho cuadrado se toma como el plano perpendicular a el eje longitudinal del rayo láser proyectado en el que se localiza dicha estación receptora), distinguiéndolo por tanto del "apuntamiento preciso" usado en las etapas 10 (ii) a (vi) que no requiere movimiento de ningún componente en dicho transmisor de comunicación óptica y típicamente tiene un ángulo de error A de menos de  $\pi/9500$  radianes (es decir, correspondiente al cuadrado mencionado anteriormente que tiene lados de menos de 200 m a una distancia de 600 km).

En la etapa (a) de dicho modo de realización preferente de la presente invención y la presente descripción, se estima la posición del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora y se estima la posición de la estación receptora con respecto al transmisor de comunicación óptica. Dichas estimaciones comprenden:

- 15 - estimación continua de la localización precisa del transmisor de comunicación óptica por el microprocesador integrado en el mismo, usando un GPS conectado a él para el cronometraje, junto con la posición de la estación receptora usando su referencia geodésica (es decir, latitud y altitud de acuerdo con, por ejemplo, ETRS89); y
- 20 - estimación continua de la posición del ordenador de estación receptora usando un GPS conectado a él para el cronometraje y su referencia geodésica (es decir, latitud y altitud de acuerdo con, por ejemplo, ETRS89), junto con los elementos de dos líneas (TLE) del transmisor de comunicación óptica y un algoritmo de propagación de órbita tal como Simplified Orbit Perturbations 4 (SPG4).

Una vez se ha estimado la posición del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora y la posición de la estación receptora con respecto al transmisor de comunicación óptica, se realiza el apuntamiento aproximado de las etapas (b) a (d) hasta que se establece la línea de visión entre dicho transmisor de comunicación óptica y la estación receptora (y viceversa), después de esto se proyecta dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre el área en la que se localiza dicha estación receptora por difracción y reflexión usando dicho modulador de luz espacial según etapa (i) del procedimiento y dispositivo de la presente invención y la etapa (i) del sistema de la presente descripción. Para garantizar que dicha estación receptora se localice en el área sobre la que se proyecta dicho rayo láser, preferentemente se proyecta en primer lugar sobre un ángulo mayor que el ángulo de error A mencionado anteriormente. En un modo de realización preferente de la etapa (i) de la presente invención y la presente descripción, el rayo láser se proyecta en un ángulo de entre  $\pi/18850$  y  $\pi/180$  radianes (es decir, sobre el cuadrado mencionado anteriormente que tiene lados de entre 100 m y 10 km de longitud). Más preferentemente, el ángulo sobre el que se proyecta en primer lugar dicho rayo láser es menor que  $\pi/950$  radianes (es decir, sobre el cuadrado mencionado anteriormente de lados que son menores que 2 km), incluso más preferentemente menor que  $\pi/1885$  radianes (es decir, sobre el cuadrado mencionado anteriormente que tiene lados menores que 1 km). En consecuencia, el proceso iterativo de las etapas (a) a (d) se detiene, permitiendo que se lleve a cabo la etapa (i) del procedimiento y dispositivo de la presente invención, y la etapa (i) del sistema de la presente descripción, cuando la estación receptora entra dentro del ángulo proyectado por el rayo láser proyectado en la etapa (b) y dicho rayo láser se detecta usando dicho receptor de fotodiodo. Por tanto, en dichas circunstancias, una primera proyección según la etapa (i) que comprende las etapas (a) a (d) del modo de realización preferente mencionado anteriormente de la presente invención y la presente descripción, se puede considerar como "apuntamiento aproximado". Una vez que se confirma la conexión inicial por la estación receptora, se envía una señal al transmisor de comunicación óptica que inicia la etapa (ii) y comienza por tanto el proceso de "apuntamiento preciso". En el modo de realización preferente mencionado anteriormente del sistema de la presente descripción, los medios usados para llevar a cabo la etapa (a) se refieren al microprocesador, más preferentemente un microprocesador y un GPS, los medios usados para llevar a cabo las etapas (b) y (c) se refieren al microprocesador, láser, SLM (y, por tanto, el elemento del mismo para difractar y reflejar dicho rayo láser), fotodiodo y actuador, proporcionando y recibiendo dicho microprocesador instrucciones de programa legibles por ordenador o información codificada para dicho láser, dicho SLM y dicho actuador, y los medios usados para llevar a cabo la etapa (d) se refieren al microprocesador, láser, SLM (y, por tanto, el elemento del mismo para difractar y reflejar dicho rayo láser), fotodiodo, transmisor de radio y receptor.

50 Un actuador, como se usa en dicho modo de realización preferente de la presente invención y la presente descripción, es preferentemente un dispositivo eléctrico, mecánico o electromecánico, más preferentemente un motor, propulsor, rueda de reacción o par de torsión mecánico.

55 En la etapa (ii), dicho rayo láser proyectado se divide en cuadrantes que se cruzan en el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado. Dicha división es puramente abstracta, dando como resultado conceptualmente en cuatro trayectorias de propagación paralelas, una a lo largo de cada cuadrante, que se cruzan en el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado, siendo el rayo láser, o parte del mismo que se proyecta sobre (es decir, a lo largo de la trayectoria de propagación de) cada cuadrante, diferente del proyectado sobre otros cuadrantes en las etapas posteriores (iii) a (v). Esta etapa se lleva a cabo tanto para el rayo láser proyectado de acuerdo con la etapa (i) en la primera iteración de la etapa (ii) como para el rayo láser proyectado de acuerdo con la etapa (v) en iteraciones posteriores de la etapa (ii). En un modo de realización preferente del sistema de la presente descripción, los medios usados para llevar a cabo la etapa (ii) se refieren al microprocesador, láser y SLM (y, por tanto, al elemento del mismo

para difractar y reflejar dicho rayo láser), proporcionando/recibiendo respectivamente dicho microprocesador instrucciones de programa legibles por ordenador o información codificada hacia/desde dicho láser y dicho SLM.

En la etapa (iii), se interrumpe la proyección de cada cuadrante de dicho rayo láser durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por pulsación de dicho rayo láser usando modulación de amplitud y por distorsión

5 del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, para cada intervalo de dicho conjunto, en el que cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que otros cuadrantes de dicho rayo láser se proyectan y en el que dicho cuadrante se proyecta exclusivamente sobre al menos un intervalo de dicho subconjunto,

10 en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado son las mismas para todos los cuadrantes sobre los que se proyecta dicho rayo láser, y en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos un intervalo de dicho conjunto de intervalos son diferentes de la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos otro intervalo de dicho conjunto de intervalos. En un modo de realización preferente 15 del sistema de la presente descripción, los medios usados para llevar a cabo la etapa (iii) se refieren al microprocesador, láser y SLM (y, por tanto, al elemento del mismo para difractar y reflejar dicho rayo láser), proporcionando/recibiendo respectivamente dicho microprocesador instrucciones de programa legibles por ordenador o información codificada hacia/desde dicho láser y dicho SLM.

20 Dicha interrupción durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por pulsación de dicho rayo láser por modulación de amplitud da como resultado una serie de impulsos que se emiten con una frecuencia  $f$  de entre 0,1 kHz y 100 MHz, preferentemente entre 1 kHz y 10 MHz. La frecuencia  $f$  es la misma para todos los cuadrantes del rayo láser que se emiten en un momento dado (es decir, durante cualquier intervalo dado) pero difiere para al menos un intervalo del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta dicho rayo láser. Por otra parte, dicha interrupción durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por distorsión del frente de onda de dicho rayo láser 25 usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser da como resultado un cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado que se proyecta sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que otros cuadrantes de dicho rayo láser se proyectan y en el que dicho cuadrante se proyecta exclusivamente sobre al menos un intervalo de dicho subconjunto. En un modo de realización preferente de la presente invención y la presente 30 descripción, un cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta exclusivamente sobre cada intervalo de dicho subconjunto (es decir, múltiples cuadrantes de dicho rayo láser proyectado no se proyectan sobre ningún intervalo dado), como se ilustra en figura 9.

35 La combinación de interrupción por pulsación de dicho rayo láser usando modulación de amplitud y/o interrupción por distorsión del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, que tiene lugar en cada intervalo, y el hecho de que cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecte sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que se proyectan otros cuadrantes de dicho rayo láser, significa que sobre dicho conjunto de intervalos en los que se interrumpe cada cuadrante de dicho rayo láser proyectado, cada cuadrante de dicho rayo láser proyectado se interrumpe de manera diferente (es decir, ya sea por medio de una máscara de difracción de apuntamiento, que interrumpe un cuadrante dado en un intervalo dado, o por la pulsación mencionada anteriormente de dicho rayo láser durante un intervalo dado, que interrumpe dicho cuadrante sobre el que dicha máscara de difracción de apuntamiento permite su proyección durante otro intervalo dado). Preferentemente, la distorsión del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento significa que en cualquier intervalo dado se proyecta un cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado, 40 en el que el cuadrante de dicho rayo láser proyectado que se proyecta se interrumpe por la pulsación de dicho rayo láser a una frecuencia  $f$  diferente de la que se usa para interrumpir otros cuadrantes de dicho rayo láser proyectado cuando estos se proyectan durante otros intervalos. Esto significa que cada cuadrante de dicho rayo láser proyectado tiene una "firma" que es diferente de los otros cuadrantes de dicho rayo láser proyectado.

45 En la etapa (iv), el cuadrante de dicho rayo láser proyectado que se detecta en dicho receptor de fotodiodo en la estación receptora se identifica determinando la frecuencia de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta el cuadrante de dicho rayo láser, y comunicar esta información a dicho transmisor de comunicación óptica por medio de dicho transmisor de radio y dicho receptor de radio. Por tanto, en la etapa (iv), se determina la "firma" del rayo láser que se detecta por la estación receptora para identificar qué cuadrante de dicho rayo láser proyectado se detectó por dicha estación receptora, e identificar por tanto el área en el que se localiza dicha estación receptora en base al área sobre la que se proyectó dicho cuadrante, identificado por tanto. Preferentemente, esto se logra sincronizando adicionalmente el transmisor de comunicación óptica y la estación receptora usando una señal de temporización. Una vez determinada, esta información se transmite a dicho transmisor de comunicación óptica enviando ondas de radio desde el transmisor de radio comprendido en dicha estación receptora al receptor de radio comprendido en dicho transmisor de comunicación óptica. En un modo de realización preferente del sistema de la presente descripción, los medios usados para llevar a cabo la etapa (iv) se refieren al microprocesador, láser, SLM (y, por tanto, el elemento del mismo para difractar y reflejar dicho rayo láser), fotodiodo, transmisor de radio y receptor

de radio, proporcionando/recibiendo respectivamente dicho microprocesador instrucciones de programa legibles por ordenador o información codificada hacia/desde dicho láser, dicho SLM y dicho receptor de radio.

Un modo de realización preferente del procedimiento y dispositivo de la presente invención y del sistema de la presente descripción, es el que comprende las siguientes etapas (iii) y (iv):

- 5 (iii) interrumpir la proyección de cada cuadrante de dicho rayo láser durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por pulsación de dicho rayo láser usando modulación de amplitud y por distorsión del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, para cada intervalo de dicho conjunto, en el que cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que otros cuadrantes de dicho rayo láser se proyectan y en el que dicho cuadrante se proyecta exclusivamente sobre al menos un intervalo de dicho subconjunto,
- 10 en el que la frecuencia y/o duración de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado son las mismas para todos los cuadrantes sobre los que se proyecta dicho rayo láser, y en el que la frecuencia y/o duración de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos un intervalo de dicho conjunto de intervalos son diferentes de la frecuencia y/o duración de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos otro intervalo de dicho conjunto de intervalos;
- 15 (iv) identificar el cuadrante de dicho rayo láser proyectado que se detecta en dicho receptor de fotodiodo en la estación receptora determinando la frecuencia y/o duración de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta el cuadrante de dicho rayo láser, y comunicar esta información a dicho transmisor de comunicación óptica por medio de dicho transmisor de radio y dicho receptor de radio;
- 20 en el que los intervalos tienen una frecuencia de valor  $r$  de entre 10 y 500 Hz, como se define anteriormente, y una duración menor que o igual a  $r^{-1}$ , los pulsos tienen una frecuencia de valor  $f$  de entre 0,1 kHz y 100 MHz, como se define anteriormente, y una duración menor que o igual a  $f^{-1}$ , y  $t$  está entre 0,001 y 10, como se define anteriormente. Por tanto, no solo la frecuencia sino también la duración de los intervalos y pulsos es pertinente para determinar la "firma" del rayo láser que se proyecta.
- 25 En la etapa (v), el rayo láser se proyecta en intervalos consecutivos sobre el área sobre la que se proyectó el cuadrante del rayo láser identificado en la etapa (iv) distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido desde el láser usando la máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser que proyectó exclusivamente dicho cuadrante del rayo láser en la etapa (iii). En otras palabras, en la etapa (v) el rayo láser se proyecta en intervalos consecutivos sobre el área que el cuadrante del rayo láser que se detectó por dicha estación receptora proyectó en la etapa (iv). En un modo de realización preferente del sistema de la presente descripción, los medios usados para llevar a cabo la etapa (v) se refieren al microprocesador, láser y SLM (y, por tanto, al elemento del mismo para difractar y reflejar dicho rayo láser), proporcionando/recibiendo respectivamente dicho microprocesador instrucciones de programa legibles por ordenador o información codificada hacia/desde dicho láser y dicho SLM.
- 30 En la etapa (vi), las etapas consecutivas previas (ii) a (v) se repiten al menos otras tres veces o hasta que el ángulo entre el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (v) y dicho eje longitudinal de dicho láser proyectado en la etapa (ii) [es decir, la iteración de la etapa (ii) antes de la iteración de la etapa (v)] sea menor que  $\pi/9500$  radianes. Por tanto, las etapas (ii) a (v) se repiten para estrechar sucesivamente el ángulo de proyección del rayo láser de modo que se proyecte sobre un área cada vez más pequeña dentro de la que se localiza la estación receptora. En un modo de realización, las etapas (ii) a (v) se repiten preferentemente entre otras 3 a 5 veces (es decir, 4 a 6 veces en total), más preferentemente otras 6 veces. En otro modo de realización, las etapas (ii) a (v) se repiten preferentemente hasta que el ángulo entre el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (v) y dicho eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (ii) sea menor que  $\pi/10000$  radianes, más preferentemente menor que  $\pi/12000$  radianes. De esta forma, la luz disponible proyectada por dicho rayo láser proyectado se concentra sobre un área lo más pequeña posible y el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado se alinea estrechamente con la localización real del rayo láser de la estación receptora. Conjuntamente, el proceso iterativo de las etapas (ii) a (v) y la etapa (vi) se puede considerar como "apuntamiento preciso". En un modo de realización preferente del sistema de la presente descripción, los medios usados para realizar la etapa (vi) se refieren al microprocesador y los medios mencionados anteriormente usados para llevar a cabo las etapas (ii) a (v).
- 35 40 45 50 55 El proceso iterativo mencionado anteriormente de "apuntamiento preciso" se logra a través del uso de máscaras de difracción de apuntamiento. A modo de resumen, el apuntamiento preciso reduce el ángulo sobre el que se proyecta el rayo láser proyectado al proyectar el rayo láser sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora y:
- modificar el frente de onda del rayo láser emitido usando patrones holográficos generados por ordenador mostrados en el elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, en el que cada patrón holográfico comprende

- una máscara de difracción de apuntamiento, estando localizada dicha estación receptora en un subconjunto de dicha área sobre la que se proyecta un cuadrante de dicho rayo láser proyectado;
- 5     - detectar el cuadrante de dicho rayo láser, proyectado por tanto, en un receptor de fotodiodo en la estación receptora y comunicar información sobre dicho cuadrante detectado al transmisor de comunicación óptica por medio de dicho transmisor de radio y dicho receptor de radio antes de proyectar dicho rayo láser sobre el área sobre la que se proyecta dicho cuadrante detectado; y
- 10    - repetir las dos etapas precedentes recursivamente para estrechar el ángulo sobre el que se proyecta el rayo láser proyectado y dentro del que se localiza dicha estación receptora, preferentemente dentro de los límites de la divergencia del rayo láser proyectado.
- 15    Mientras esto tiene lugar, también tiene lugar el desplazamiento del transmisor de comunicación óptica (por ejemplo, un satélite sobre el cielo) con respecto a la estación receptora en varias fracciones de un grado por segundo, de modo que una máscara de difracción de seguimiento está comprendida en cada patrón holográfico mostrado sobre dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, que corrige este movimiento. Por tanto, además de los procesos de "apuntamiento" mencionados anteriormente, también se logra un proceso de "seguimiento" a través del uso de máscaras de difracción de seguimiento, en el que cada máscara de difracción de seguimiento se usa:
- 20       (a) sola en la etapa (i) y en la primera iteración de la etapa (ii); y
- 25       (b) en combinación con una máscara de difracción de apuntamiento en las etapas (iii) a (v) y en iteraciones posteriores de la etapa (ii).
- 30    Se requiere el seguimiento porque después de haber generado una máscara de difracción en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, lo que da como resultado que el rayo láser proyectado se proyecte sobre un área en la que se localiza la estación receptora, ha transcurrido un tiempo  $t$ , durante el que ha tenido lugar el desplazamiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora. Por tanto, el seguimiento se logra de acuerdo con la presente invención cambiando la dirección en el que la dirección en la que se apunta el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en las etapas (i) a (v) cada  $t$  segundos como una función del desplazamiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido por el láser usando una máscara de difracción de seguimiento que se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, en el que  $t$  está entre 0,001 y 10 segundos. Por lo tanto, en dicho elemento se genera una nueva máscara de difracción de seguimiento para difractar y reflejar dicho rayo láser cada  $t$  segundos, en el que cada nueva máscara de difracción de seguimiento, generada por tanto, cambia la dirección en la que se apuntó el eje
- 35    longitudinal de dicho rayo láser proyectado en el intervalo anterior a esto a una nueva dirección (es decir, el ángulo en el que se proyecta desde el transmisor de comunicación óptica se cambia y el eje longitudinal del rayo láser se alinea con el centro del área sobre la que se proyectó dicho rayo láser en la etapa previa a esto). En otras palabras, dicho rayo láser se proyecta sobre la misma área sobre la que se proyectó al usar la máscara de difracción anterior en el intervalo anterior a esto y en la que se localiza dicha estación receptora (es decir, sobre el área del plano en la que se
- 40    localiza dicha estación receptora que es perpendicular al eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado) a pesar de dicho desplazamiento. En un modo de realización preferente, cada nueva máscara de difracción de seguimiento, generada por tanto, cambia la dirección en la que se apuntó el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en el intervalo anterior a esto a una nueva dirección, asumiendo que el desplazamiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora ha tenido lugar en dicho intervalo anterior a esto. Si se usa una nueva
- 45    máscara de difracción de seguimiento en combinación con una máscara de difracción de apuntamiento que apunta el rayo láser proyectado (o un cuadrante del mismo) sobre un subconjunto del área sobre la que se proyectó usando la máscara de difracción anterior a esto (en virtud del apuntamiento preciso), la nueva máscara de difracción de seguimiento se proyectará sobre la misma área sobre la que se proyectó al usar la máscara de difracción anterior a esto, apuntando la máscara de difracción de apuntamiento usada en combinación con ella el rayo láser proyectado (o un cuadrante del mismo) sobre dicho subconjunto de dicha área. De esta forma, para dos intervalos consecutivos  $I_1$  e  $I_2$  separados por un tiempo  $t$ , el área sobre la que se proyecta el rayo láser (o un cuadrante del mismo) durante el intervalo  $I_2$  es la misma que el área, o un subconjunto de dicha área, sobre la que se proyecta el rayo láser (o un cuadrante del mismo) en  $I_1$ , aunque se generan diferentes máscaras de difracción en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser durante  $I_1$  y  $I_2$ .
- 50    Cada patrón holográfico en escala de grises mostrado en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser en cualquier intervalo o conjunto de intervalos dado se calcula para comprender una máscara de difracción o una combinación de máscaras de difracción. Dado que dicho patrón holográfico en escala de grises siempre comprende una máscara de seguimiento, para cualquier intervalo dado en el que se muestre apunta el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en una dirección que (al menos momentáneamente) significa que dicho rayo láser se proyectará sobre la misma área como se proyectó al usar la máscara de difracción anterior a esto, apuntando la máscara de difracción de apuntamiento usada en combinación con ella el rayo láser proyectado (o un cuadrante del mismo) sobre dicho subconjunto de dicha área, para lograr el seguimiento.

Por tanto, cada máscara de difracción de seguimiento o cada combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises (41) que

preferentemente se calcula en dicho microprocesador y se muestra en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, en el que dicho patrón holográfico en escala de grises, visualizado por tanto, proyecta el rayo láser proyectado sobre el área en la que se proyectó usando la máscara de difracción de seguimiento o la combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento anterior a esto, o sobre un subconjunto de dicha área sobre la que se proyectó usando la máscara de difracción de seguimiento o la combinación de la máscara de difracción de seguimiento y la máscara de difracción de apuntamiento anterior a esto. En otras palabras, de acuerdo con la invención reivindicada, cada máscara de difracción de seguimiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que proyecta el rayo láser proyectado sobre el área que se proyectó usando la máscara de difracción de seguimiento usada inmediatamente antes de esto, mientras que cada combinación de la máscara de difracción de seguimiento y la máscara de difracción de apuntamiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que proyecta el rayo láser proyectado:

5 (a) sobre el área que se proyectó usando la combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento usada inmediatamente antes de esto, cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son las mismas; o bien

10 15 (b) sobre un subconjunto del área sobre la que se proyectó usando:

(i) la máscara de difracción de seguimiento usada antes de esto cuando dicha combinación es la primera combinación usada después de usar una máscara de seguimiento; o

20 (ii) la combinación de la máscara de difracción de seguimiento y la máscara de difracción de apuntamiento usada antes de esto cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son diferentes.

En un modo de realización preferente del procedimiento y dispositivo de la presente invención y sistema de la presente descripción, cada máscara de difracción de seguimiento o combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento que se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser distorsiona el frente de onda del rayo láser y proyecta una imagen  $I(x,y)$  (42) sobre dicha área, en el que dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser comprende una matriz de píxeles, estando definido cada píxel por una coordenada  $p$  y una coordenada  $q$ , en el que el píxel  $(p,q) = (0,0)$  es el píxel en el centro de dicha matriz, y en el que dicha máscara de difracción o combinación de máscaras de difracción está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que se calcula en un microprocesador y se muestra en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, en el que cada píxel  $(p,q)$  de dicha matriz se asigna un nivel de gris,  $g'(p,q)$  entre 0 y  $w$  calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$g'(p,q) = (g(p,q) + g_{\varphi\theta}(p,q)) \bmod(w)$$

en la que:

$$g(p,q) = \frac{w}{2 \cdot \pi} \cdot \psi(p,q)$$

y

$$g_{\varphi\theta}(p,q) = g_{\theta}(p',q')$$

en la que  $g_{\theta}(p',q')$  es un cálculo de  $g_{\theta}(p,q)$  usando la siguiente matriz de rotación:

$$\begin{pmatrix} p' \\ q' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix}$$

en la que:

$$g_{\theta}(p,q) = \frac{w}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{n} \right) \bmod(2 \cdot \pi) \right]$$

40 45 en la que:

- $p$  es la coordenada de abscisas del píxel  $(p,q)$ ;
- $q$  es la coordenada de ordenadas del píxel  $(p,q)$ ;
- $w$  es el valor de gris que proporciona modulación de fase  $2 \cdot \pi$  en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser;
- $\bmod(w)$  es la operación del módulo sobre  $w$ ;

- $\psi(p, q)$  es la función de fase de la transformada inversa de Fourier de dicha imagen y se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$A(p, q)e^{i \cdot \psi(p, q)} = \text{FT}^{-1}[I(x, y)]$$

en la que:

5  $\text{FT}^{-1}[I(x, y)]$  = transformada inversa de Fourier de dicha imagen

$A(p, q)$  = es la amplitud de la transformada inversa de Fourier de dicha imagen  $i$  = unidad imaginaria

- $\phi$  es el ángulo de deflexión acimutal en radianes con respecto al eje longitudinal;
- $n$  se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{\lambda}{\sin(\theta) \cdot l}$$

10 en la que:

- $\lambda$  es la longitud de onda en metros del rayo láser;
- $l$  es la longitud de un lado del píxel en metros; y
- $\theta$  es el ángulo de deflexión cenital en radianes con respecto al eje longitudinal; y
- $\text{mod}(2\pi)$  es la operación del módulo sobre la función angular.

15 La ventaja del cálculo de cada máscara de difracción de seguimiento o combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento de esta manera es que implica una transformada de Fourier que se simplifica por las fórmulas mencionadas anteriormente en virtud de algunas funciones de transformada de Fourier que ya se calculan en la memoria del microprocesador de modo que solo es necesario realizar rotaciones y multiplicaciones, en lugar de llevar a cabo cálculos complejos que requieren una mayor potencia del microprocesador.

20 Preferentemente  $w$  está entre 150 y 500, más preferentemente entre 200 y 360, incluso más preferentemente entre 250 y 260, todavía más preferentemente 255.

Un modo de realización preferente del procedimiento y dispositivo de la presente invención y el sistema de la presente descripción comprende una etapa adicional (vii) después de la etapa (vi) de transmitir otra información a dicha estación receptora controlando la modulación de intensidad y amplitud de dicho rayo láser proyectado, en el que la dirección

25 en la que se proyecta el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado se cambia distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido por el láser usando una máscara de difracción de seguimiento en combinación con dicha máscara de difracción de apuntamiento generada en la última iteración de la etapa (v). Por tanto, la etapa (vi) comprende transmitir información a dicha estación receptora que se codifica por dicho rayo láser proyectado. Preferentemente, la transmisión de información puede tener lugar usando un protocolo de transmisión estándar tal

30 como la codificación ON-OFF. Esta etapa de transmitir otra información requiere cambiar la máscara de difracción de seguimiento usada en combinación con la máscara de difracción de apuntamiento generada en la última iteración de la etapa (v) cada  $t$  segundos para tener en cuenta el desplazamiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a dicha estación receptora mientras transmite dicha otra información. Por tanto, esta etapa de transmitir otra información usa una máscara de difracción de apuntamiento que mantiene el rayo láser enfocado sobre la estación

35 receptora combinada con una máscara de difracción de seguimiento que corrige el movimiento inherente del transmisor de comunicación óptica (por ejemplo, como un satélite a lo largo de su órbita). Al mismo tiempo, la estación receptora más preferentemente el ordenador usa el TLE almacenado (elementos de dos líneas) del transmisor de comunicación óptica y el algoritmo SPG4 para estimar el movimiento del transmisor de comunicación óptica y seguirlo, manteniendo por tanto el enlace de comunicaciones ópticas. Una velocidad de transmisión de comunicación

40 preferentemente para este enlace óptico en el espacio libre es de 10 Mbps (10 megabits por segundo) o mayor, más preferentemente de 50 Mbps o mayor, incluso más preferentemente de 100 Mbps o mayor. En un modo de realización preferente del sistema de la presente descripción, los medios usados para llevar a cabo la etapa (vi) se refieren al microprocesador, láser, SLM (y, por tanto, al elemento del mismo para difractar y reflejar dicho rayo láser) y fotodiodo de la estación receptora, proporcionando/recibiendo respectivamente dicho microprocesador instrucciones de programa legibles por ordenador o información codificada hacia/desde dicho láser y dicho SLM.

45 La información sobre la calidad del enlace para la transmisión de otra información se realimenta al transmisor de comunicación óptica por la estación receptora usando el enlace de radio a través de la antena Yagi. Cualquier pequeño error en el seguimiento que pueda afectar negativamente a la calidad del enlace para la transmisión de otra información, en un modo de realización preferente, se compensa por el microprocesador del transmisor de comunicación óptica cambiando las características de la máscara de difracción o combinación de máscaras de

50

difracción que se generan en el elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser como patrones holográficos mostrados en el SLM para mejorar la calidad de la comunicación.

### Ejemplo

En el presente documento se describe, con referencia a las figuras mencionadas anteriormente y de acuerdo con la numeración adoptada en el presente documento, un ejemplo preferente pero no limitante del procedimiento y dispositivo de acuerdo con la presente invención y el sistema y transmisor de comunicación óptica de acuerdo con la presente descripción, siendo lo siguiente un ejemplo de un modo de realización preferente, no exclusivo, dentro de los límites definidos en el presente documento.

Por tanto, en el presente documento se describe un sistema y dispositivo de seguimiento y apuntamiento preciso, en el que dicho sistema o dispositivo, cuando se implementa en un satélite (100) como transmisor de comunicación óptica, está configurado para realizar la conformación del rayo asociada con el apuntamiento preciso y el seguimiento de una la estación receptora basada en la tierra (110) por reflexión difractiva. Por tanto, el procedimiento y dispositivo de acuerdo con la presente invención, y el sistema y transmisor de comunicación óptica de acuerdo con la presente descripción, encuentran aplicación en comunicaciones por satélite implementando el sistema o dispositivo transmisor óptico (10) como el que se muestra en la figura 1. En el modo de realización mostrado en la **figura 1**, la electrónica de control del emisor (12) en comunicación con el ordenador a bordo del satélite (OBC, microprocesador 14), controla la intensidad de luz del fotodiodo láser (16) y la frecuencia de conmutación (es decir, la frecuencia de pulso) para transmitir información en virtud de difractarse y reflejarse por el patrón de interferencia que se muestra en el dispositivo modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio (LCOS-SLM, 24).

La luz láser (18) producida se introduce en la fibra óptica (15) por un acoplador de fibra óptica (20) y se controla en intensidad con un bucle cerrado a partir de una medición realizada por un aislador (21) y detectada por un fotodiodo (13) conectado a un convertidor de analógico a digital de la electrónica de control (12). La fibra óptica (15), pasa a través de un expansor de rayo (22) y una lente de colimación (23) para cubrir toda la pantalla de SLM (24), y una vez reflejada en ésta, se proyecta hacia el espacio libre a través de una placa paralela de plano de protección (26) hacia el receptor.

En este modo de realización de la invención, el láser que genera la comunicación en la plataforma del satélite es el modelo L1550G1 de la compañía Thorlabs, que es un láser infrarrojo de 1550 nm de longitud de onda, y el modulador de luz espacial es el modelo GAEA-2-TELCO-033, de la compañía Holoeye. Este SLM se maneja por un IC controlador de Microdisplay JD2704 y se ve como un monitor de ordenador por la electrónica de control (12) con una resolución de 4160 x 2464 elementos de imagen (píxeles). Se usa un cuadrado máximo de 2464 x 2464 píxeles para construir el holograma.

En este modo de realización, el LCOS-SLM, además de reflejar el rayo láser, se usa como una unidad óptica programable al programarlo eléctricamente para mostrar una imagen difractiva que codifica una función de fase al establecer una intensidad de gris para cada píxel (x,y) de dicha imagen  $I(x,y)$ , en la que dicha intensidad se da por la fase en la función  $\exp(i\psi_1(x,y))$  donde  $\psi_1(x,y) = [\gamma_x x + \gamma_y y] \pmod{2\pi}$ , donde x e y representan las coordenadas de píxeles,  $\gamma_x$  y  $\gamma_y$  son las derivadas de la fase en las direcciones x e y de la matriz de píxeles de SLM, y  $\pmod{2\pi}$  es la operación del módulo sobre la función angular.

En una posible implementación de la **figura 1**, el acoplador y el divisor de fibra óptica se implementan con un modelo TW1550R1A1 de Thorlabs y el expansor de rayo con una pieza HBE-1064-20x de Hyperion Optics.

La electrónica del emisor (12) usa un SmartFusion 2 SoC de Microsemi para comunicarse por medio de LVDS con un circuito integrado IC-HC de IC-Haus que controla la intensidad de luz y la conmutación del diodo láser (16). Un fotodetector G8935 MSM GaAs (13) detecta parte de la luz emitida por el diodo láser y, después de amplificarse por un amplificador operacional LTC6268 de lineal, se convierte a digital por un convertidor de analógico a digital (A/D) ADS1278 y se envía al SmartFusion 2 SoC como realimentación sobre la intensidad de luz. Este convertidor A/D puede manejar independientemente hasta ocho conversiones A/D y también se usa para adquirir las temperaturas del láser y los bloques térmicos de SLM (30 y 31). Los bloques térmicos se implementan por un módulo Peltier modelo 2MC10-081-20 de RMT apropiadamente polarizado desde el SoC SmartFusion 2 generando dos formas de onda PWM que accionan un circuito integrado LMD1820 para cada Peltier. La realimentación de la temperatura se realiza por dos resistencias PT1000, una en cada módulo Peltier, condicionadas por el circuito caracterizado en la figura número 2 de Texas Instruments Application Note AN-1559 titulada RTD Interface Solutions (<http://www.ti.com/lit/an/snoa481b/snoa481b.pdf>) y conectado a dos entradas del convertidor A/D ADS1278.

La electrónica del emisor (12) está conectada a través de una interfaz CAN con el ordenador incorporado del satélite (14), implementada con un microprocesador STM32H743VI, que maneja las comunicaciones ópticas y la interfaz de telemetría y telemundo (TM/TC) con una UHF transceptor de radio (32) conectado a una antena omnidireccional (34).

El ordenador incorporado maneja las comunicaciones con las cargas útiles del satélite y, en particular, con la memoria del satélite, para generar y enviar altas tasas de datos al emisor óptico y TM/TC al transceptor de radio. Para el cronometraje y la estimación de la posición, el ordenador incorporado usa un receptor GPS implementado con un AsteRx4 de Septentrio. La estimación de posición se maneja por el ordenador incorporado que se basa en un algoritmo

SPG4 para propagar su órbita y corregirla usando los datos alimentados por la unidad GPS. El transceptor de radio TM/TC se implementa usando un transceptor ADF7021 IC controlado por un microprocesador STM32F405 que se conecta a el ordenador incorporado por medio de un puerto RS-422. El transceptor IC usa un amplificador RF6886 para producir 0,5 W de potencia de radio para transmisión y un TQP3M9007 para amplificar la potencia de radio de recepción; un interruptor de RF PE4250 controlado por el microprocesador selecciona el modo de comunicación Tx o bien Rx. Los comandos TM/TC se envían y se reciben usando cuatro dipolos de antena flexibles de 500 mm conectados a los lados del satélite.

La estación receptora óptica (110), mostrada en la **figura 2**, se implementa con un sistema similar adecuado para la baja intensidad de luz recibida desde el satélite y la potencia de radio necesaria para alcanzarlo. Un telescopio (50), montado en una montura altacimutal controlada por ordenador (54), recibe la luz láser (18) desde el emisor del satélite y la enfoca en un sensor receptor (52), que en este caso es un fotodiodo de avalancha con un filtro infrarrojo de banda estrecha situado en su foco principal. El espejo parabólico (56) debe tener suficiente capacidad de amplificación de luz para reflejar en la longitud de onda del láser que se encuentra típicamente en el lado infrarrojo del espectro. El ordenador (58) recibe los datos, a través de una interfaz USB, del amplificador de fotodiodo y una fase de conversión de analógico a digital (59) y se comunica con un transmisor de radio o estación de radio (60) para cerrar el bucle de comunicación con el satélite que le permite dirigir el apuntamiento y posterior seguimiento del mismo. El transmisor de radio está conectado a una antena Yagi (62) accionada por un rotador (64), que es básicamente una montura altacimutal simple, conectada un controlador de rotor (66) y un transceptor de radio para comunicarse con el satélite en las bandas UHF o VHF. Se usa un receptor GPS (68) para recibir una señal de temporización para sincronizar las comunicaciones entre la estación y el satélite (100).

En una implementación típica de la estación terrestre, un telescopio Meade ACF-SC 355/3550 355,6 mm (14 pulgadas) UHTC LX200 GoTo monta un fotodetector G6849 MSM de Hamamatsu en su foco con capacidad de detección de radiación infrarroja en la longitud de onda del láser de 1550 nm. Se ajusta un filtro de interferencia de paso de banda con revestimiento duro de 1550 nm de Edmund Optics en la parte superior de la ventana óptica del fotodiodo para incrementar la proporción señal-ruido del receptor. El telescopio mencionado anteriormente incorpora su propia montura altacimutal con posibilidad de conexión a un ordenador PC a través de un COM a USB o wifi por un adaptador SkiFi III.

El fotodiodo consiste en cuatro detectores produciendo cada uno de ellos una corriente proporcional a la luz que incide sobre él y puede responder a pulsos de luz para establecer enlaces de comunicación de hasta 120 MHz. Tener cuatro detectores en el fotodiodo usado tiene la ventaja de usar la intensidad de luz de cada uno de ellos para guiar el apuntamiento del telescopio hacia el emisor.

Cada corriente de fotodiodo se convierte en voltaje por un convertidor de corriente a voltaje implementado con un amplificador operacional LTC6268 y, después de filtrar la polarización de CC, se conforma con un comparador implementado por un LTC6268. A continuación, el voltaje conformado se alimenta a un comparador LTC6754 que lo convierte en una línea LVDS que finalmente se conecta a un SmartFusion 2 SoC que recibe la señal digital. A continuación, esta señal se envía al ordenador de control usando un FTDI como interfaz al puerto USB. El bloque térmico para el fotodiodo receptor se implementa por un módulo 2MC10-081-20 de RMT Peltier apropiadamente polarizado desde el SmartFusion 2 SoC al generar una forma de onda PWM que acciona un circuito integrado LMD1820 conectado al Peltier. La realimentación para el control de temperatura se realiza por una resistencia PT1000 condicionada por el circuito caracterizado en la figura número 2 de Texas Instruments Application Note AN-1559 titulada RTD Interface Solutions y conectada a dos entradas del convertidor ADS1278 A/D.

La antena se implementa como una antena X-Quad de WiMo Antennen en un rotor Alpha Spid BIG-RAS HR conectado a un controlador de rotor MD-01, que está configurado y controlado por el ordenador PC por medio de una interfaz USB. El transceptor de radio se puede implementar por un Kenwood TS-2000 conectado al ordenador a través de un puerto COM por medio de una interfaz COM a USB. El ordenador controla la comunicación por radio con el satélite usando tres paquetes de **software**, como sigue:

- Ham Radio Deluxe Pro satélite telemando y telemetría, corrección doppler y control de rotor.
- Control HDR Rotator para comunicar con el controlador de rotor MD-1.
- HRD Satellite Tracking para seguir el satélite en su órbita y determinar los instantes de contacto y apuntar la montura altacimutal del telescopio al satélite en su paso por la estación terrestre.

Finalmente, el seguimiento del tiempo se obtiene por un receptor de referencia GNSS multifrecuencia Septentrio PolaRx5 conectado al ordenador por medio de USB, que tiene la capacidad de actualizar la información de tiempo cada 10 ms.

En una implementación práctica se implementa el enlace de radio TM/TC en una frecuencia de 437,405 MHz usando 10 W de potencia y un protocolo Data Layer simple basado en las tramas de información no numeradas (UI-Frames) del protocolo AX.25. La referencia de James Miller (G3RUH), "9600 Baud Packet Radio Modem Design" <http://www.amsat.org/amsat/articles/g3ruh/109.html> se usa para implementar las comunicaciones.

Usando la implementación descrita como se muestra en la **figura 2**, es posible establecer un enlace descendente de comunicaciones ópticas en el espacio libre, es decir, desde el satélite a la estación terrestre. La **figura 3** muestra cómo el plano de fase mostrado en el SLM (24) se proyecta en la superficie de la Tierra (40) para crear una imagen (42) donde se representa por un cuadrado, mostrado en la figura para propósitos de aclaración pero no proyectándose realmente sobre la Tierra, cuya longitud de lado, L, se da por la ecuación:

$$L = 2 \cdot \frac{\lambda \cdot h}{sp}$$

Donde,  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz (m) usada para establecer el enlace óptico,  $h$  es la altura de la órbita del satélite y  $sp$  el período espacial mínimo de la fase mostrada en el SLM (24) que se da por cuatro veces el tamaño de píxel (es decir, longitud de lado de cada píxel, m) del SLM. Se elige una frecuencia máxima de cuatro para que el SLM no reduzca la eficacia de la imagen proyectada en la Tierra.

El área circundante del marco (42) no se proyecta realmente y se incluye en la figura 3 para mayor claridad y representa el campo de visión máximo del SLM. Lo que se proyecta en la superficie de la Tierra y por lo tanto se ilumina por la luz láser es el cuadrado (43) (es decir, la imagen), que se puede mover y/o hacer más grande o más pequeño siempre que permanezca dentro del marco de referencia como se explica en el presente documento siendo este uno de los aspectos distintivos de la presente invención.

Para un modo de realización de la invención, se puede tener  $\lambda = 1550$  nm,  $h = 600$  km y  $sp = 4 \times 3,74$   $\mu$ m (un período de 4), para el tamaño de pixel de GAEA-2-TELCO-033 de Holoeye; esto da como resultado un tamaño para el campo de visión del SLM de 125 km por lado. Como el GAEA-2-TELCO-033 tiene 2464 píxeles en su lado más pequeño, esto significa que cada píxel en el SLM tiene la capacidad, con una máscara de fase adecuada (41), para proyectarse en un cuadrado de 50 m (43) en la superficie de la Tierra. Para un modo de realización típico de la presente invención, el SLM está configurado para proyectar en la superficie de la Tierra cuadrados de longitud de tamaño 4000 m, 2000 m, 1000 m, 500 m y 200 m, que proporcionan un tamaño de punto razonable (véase a continuación). La **figura 4A** (a) a (e) muestra hologramas de fase que se pueden proyectar en el SLM para compensar los desajustes de colimación dentro del sistema transmisor óptico para crear una imagen centrada, para el satélite en una órbita de 600 km de altura, sobre un cuadrado de dichas dimensiones. Estos hologramas proyectados en la superficie de la Tierra se usan para lograr un apuntamiento preciso del satélite hacia la estación terrestre una vez que se ha localizado.

Para compensar una velocidad orbital del satélite de  $7,6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  para una órbita de 600 km de altura o  $0,72^\circ \cdot \text{s}^{-1}$  vista desde el marco de referencia de la estación terrestre, la desviación del rayo láser por cualquiera de los dos los ángulos programados,  $\theta$  y  $\phi$  [representados por (44) y (46) en la **figura 3**], se puede lograr usando un holograma apropiado en el SLM (24). La proyección de un holograma de patrón de barras repetitivo con un período definido en el SLM modifica el ángulo de incidencia,  $\theta$  [representado por (45) en la **figura 3**], como se da por la ecuación de difracción:

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{sp}$$

en la que  $\lambda$  y  $sp$  tienen el mismo significado como se define previamente. Tomando  $\lambda = 1550$  nm y  $sp = 4 \times 3,74$   $\mu$ m, se tiene un ángulo de desviación de  $\pm 6^\circ$ , es decir, un alcance de proyección de  $12^\circ$ .

Si se quiere proyectar una imagen  $I(x,y)$  sobre la superficie de la Tierra, el microprocesador del transmisor de comunicaciones ópticas creará un holograma para proyectar sobre la superficie del SLM representado por una función  $g'(p,q)$  definiendo los niveles de gris de sus píxeles por la función:

$$g'(p,q) = (g(p,q) + g_{\phi\theta}(p,q)) \bmod(w)$$

en la que

$$g(p,q) = \frac{w}{2 \cdot \pi} \cdot \psi(p,q)$$

y en la que  $\psi(p,q)$  es la función de fase de la transformada inversa de Fourier de dicha imagen, y  $w$  el valor de gris máximo de un píxel (p,q) en el elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser.

Si se asume una deflexión solo en el eje x, se puede obtener cualquier ángulo entre el referido alcance creando un holograma asignando un nivel de gris,  $g_{\phi\theta}(p,q)$ , a cualquier píxel dado en el SLM definido por las coordenadas (p, q) dadas por la ecuación:

$$g_{\phi\theta}(p,q) = \frac{w}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{n} \right) \bmod(2 \cdot \pi) \right]$$

en la que

$$n = \frac{\lambda}{\sin(\theta) \cdot l}$$

donde  $p$  es la coordenada de abscisas de cualquier píxel dado de la matriz de SLM tomando como  $(0,0)$  la coordenada en el centro de la matriz,  $g_{\phi\theta}$  es el nivel de gris del píxel  $(p,q)$ , y  $n$  es la proporción entre  $sp$ , definido antes, y  $l = 3,74 \mu\text{m}$  (tamaño de píxel para el SLM seleccionado). Para una deflexión restringida al eje  $x$ , el correspondiente nivel de gris para cualquier punto  $(p,q)$  con la misma coordenada  $p$  será el mismo, es decir,  $g_{\phi\theta}(p,q) = g(p)$ .

Como ejemplo práctico, la **figura 4B** (a) muestra un patrón de difracción que refleja la luz incidente (28) en la figura 1 cambiando el ángulo -2 grados en la dirección  $x$ , la **figura 4B** (b) refleja el ángulo cambiándolo -1 grado en la dirección  $x$ , **figura 4B** (c) no produce modificación del ángulo, **figura 4B** (d) cambia el ángulo +1 grado, y **figura 4B** (e) cambia el ángulo en +2 grados. La figura 3 muestra cómo la proyección de un holograma adecuado (41) en el SLM desvía la proyección del píxel (43) en un ángulo dado por  $\alpha$  (44) y dirige la luz a la nueva posición (45) sobre la superficie de la Tierra.

El cambio del ángulo en la dirección del eje  $y$  se produce rotando el patrón de difracción en ese ángulo,  $\phi$  (véase la **figura 5A**) como se define por la matriz de rotación que produce un holograma con niveles de gris en el punto  $(p', q')$  del holograma con niveles de gris sin rotación, es decir:

$$\begin{pmatrix} p' \\ q' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix}$$

y ahora  $g_{\phi\theta}(p, q)$  se dará por

$$g_{\phi\theta}(p, q) = g_\theta(p', q')$$

donde  $g_\theta$  se define como:

$$g_\theta(p, q) = \frac{w}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{n} \right) \bmod(2 \cdot \pi) \right]$$

y  $\bmod(2\pi)$  es la operación del módulo sobre la función angular.

La **figura 5B** muestra un ejemplo donde el holograma en la figura 4B (a) que se va a proyectar en el SLM se ha rotado  $30^\circ$ , produciendo por tanto la rotación del píxel proyectado sobre la superficie de la Tierra en  $30^\circ$ , [representado por (46) en la figura 3], sumada a una deflexión de  $2^\circ$  en el eje  $x$ . Procediendo como se describe, se puede direccionar cualquier píxel dentro del campo de visión del sensor (42).

El emisor óptico basado en láser de espacio libre (10) se integra junto con el ordenador incorporado (14), el enlace de radio RF (32) y el módulo GPS dentro de un satélite 6U Cubesat (100), en una implementación propuesta, proporcionando una implementación eficaz para descargar una gran cantidad de datos cada vez que el satélite y la estación terrestre tienen visión directa. El balance del enlace para el enlace descendente asumiendo una potencia láser de 1 W y considerando las siguientes pérdidas en su transmisión hacia la Tierra:

- 50 % de las pérdidas de inserción debidas a los elementos ópticos y SLM en el emisor, lo que representa 3 dB.
- 82 dB de pérdidas geométricas dadas por la proporción de la energía luminosa receptora recibida sobre un cuadrado de 4 km de lado y un telescopio de 355,6 mm (14 pulgadas), como se mide en ISO 80000-3:2006.
- 1 dB de pérdidas debidas a la absorción molecular atmosférica modeladas como un 1 % de la distancia recorrida (en km) a través de la atmósfera terrestre a una altura supuesta de 100 km, como se mide en ISO 80000-3:2006.
- 1 dB como pérdidas de inserción del receptor consideradas como un 20 % de la luz entrante, derivadas de las pérdidas en el telescopio y el filtro de 1550 nm y suponiendo que toda la luz incide en el fotodiodo receptor, como se mide en ISO 80000-3:2006.
- El error al apuntar el telescopio hacia el satélite asumido es de 2 km equivalente a  $12^\circ$  de arco a 600 km, que para el telescopio seleccionado (número  $f$  igual a 5) se traduce en 6 mm en su foco, hace que la posición del fotodetector esté fuera del foco y crea pérdidas de 5 dB, como se mide en ISO 80000-3:2006.

Todas estas pérdidas suman 92 dB, como se mide en ISO 80000-3:2006, y dan como resultado una potencia de recepción en el fotodiodo de 0,6 nW. Como el fotodetector G8931 puede producir señales discernibles al recibir 6 pW, se cuenta con +20 dB de margen para demostrar que la comunicación óptica entre el emisor y el receptor es factible.

El problema del apuntamiento preciso entre el satélite (100) y la estación base en tierra (110) surge porque incluso si la localización de la estación base es conocida con algunos metros de error (ya que no se puede mover con respecto a la superficie de la Tierra y su localización se puede determinar por elementos GPS y mediciones geodésicas) la

determinación de la localización del satélite puede implicar errores que, aunque típicamente son mucho menores que 2 km, en ocasiones pueden ser tan grandes como 2 km para una órbita de satélite típica de 600 km desde Tierra. Este error es  $\leq 0,2^\circ$  en la localización de la estación base, desde el punto de vista del satélite, que se corregir por el transmisor láser en el satélite.

5 Una vez se ha corregido este error, el satélite debe llevar a cabo un seguimiento que compense su propio movimiento de 7,6 km/s que, en una órbita de 600 km de altura, corresponde a 0,72°/s. Además, el sistema transmisor de comunicación óptica debe concentrar un máximo de luz en la estación base en tierra y, por tanto, producir la mayor proporción señal/ruido para lograr la velocidad de datos objetivo de, por ejemplo, 100 Mbps.

10 Los tres efectos necesarios para establecer un enlace de comunicación óptica entre un satélite y una estación terrestre, es decir, seguimiento, enfoque y apuntamiento, se pueden lograr por un dispositivo LCOS-SLM. En una implementación práctica, tanto el satélite como la estación terrestre están implicados en un procedimiento para establecer el enlace de comunicación que es novedoso, como se describe en el presente documento. La **figura 6** presenta una situación típica del satélite (100) sobre la estación terrestre (110) situada, a modo de ejemplo, en Nerpio (España), mostrando el círculo de visibilidad del satélite (120), el eje ortonormal x (122) y el correspondiente eje y (124) del campo de visión LCOS-SLM del satélite, el área sombreada (126) que representa el área iluminada por el rayo láser (127) que corresponde a la desconvolución del holograma en el LCOS-SLM, y la dirección de viaje de dicho satélite (128).

15 El procedimiento y sistema para transmitir información desde un transmisor de comunicación óptica (100) a una estación receptora (110) por medio de un rayo láser (18) y para la alineación de dicho rayo láser emitido desde dicho transmisor de comunicación óptica con dicha estación receptora (cabe destacar que dicha alineación implica transmitir información según dicho procedimiento y sistema) implica el establecimiento de un enlace de comunicación óptica como se divulga en la **figura 7**. Esto se produce desde la perspectiva del transmisor de comunicación óptica (satélite, véase la **figura 7A**) y la estación receptora (estación terrestre, véase la **figura 7B**). Los ordenadores tanto del satélite como de la estación terrestre tienen un modelo de la órbita del satélite, en forma de elementos TLE que se propagan usando un algoritmo basado en SPG4, y su vector con respecto a la estación terrestre como sistema de referencia, y por tanto pueden prever el tiempo preciso para los pasos visuales (es decir, mostrando el círculo de visibilidad del satélite) del satélite sobre la estación terrestre [véanse la **figura 7A** (recuadro 200) y la **figura 7B** (recuadro 202), respectivamente]. Antes del contacto visual directo entre el satélite y la estación terrestre:

- 20
- 30 - El ordenador incorporado del satélite (microprocesador) ordena al sistema de actitud del satélite que maniobre usando ruedas de reacción y par de torsión mecánico y realice un apuntamiento aproximado hacia la estación terrestre (recuadro 204 de la **figura 7A**).
  - El ordenador de estación terrestre ordena a la montura altacimutal que apunte el telescopio a la localización del satélite en el cielo (recuadro 206 de la **figura 7B**) y comienza la operación del fotodiodo de detección y la electrónica asociada (recuadro 210 de la **figura 7B**).

25

35 Cuando el satélite calcula que tiene vista directa a la estación terrestre, enciende el emisor láser (recuadro 208) y ajusta un holograma centrado para cubrir un punto de la Tierra (área cuadrada de la superficie de la Tierra) que tiene lados de aproximadamente 4 km de longitud sobre la superficie de la Tierra mientras emite un paquete de datos (recuadro 212 de la **figura 7A**) para indicar la detección. El protocolo para la codificación del paquete de datos es la codificación on-off óptica con modulación de posición de pulso para la capa física. La capa de enlace se construye usando el protocolo CCSDS y la clave de detección se incluye en el campo de datos del paquete del protocolo.

40

45 El tamaño de punto inicial de 4 km se está calculando para representar la inexactitud de la determinación de órbita dada por el algoritmo SPG4, que de acuerdo con los datos proporcionados por la constelación operada por la compañía Planet (disponible públicamente en la página web de la empresa) representa un máximo de 2 km. Tras detectar la iluminación por el detector de fotodiodo de la estación terrestre (recuadro 214 de la **figura 7B**) e identificar el paquete de datos, la estación terrestre emite un paquete de datos de reconocimiento usando la radio RF al satélite para indicar que se ha establecido el primer contacto (recuadro 216 de la **figura 7B**).

50

55 Cuando el satélite recibe el paquete de datos de reconocimiento (recuadro 218 de la **figura 7A**), reduce a la mitad la longitud de dicha área cuadrada (hasta 2000 m) sobre la que se proyecta el rayo láser en la Tierra cambiando el patrón holográfico mostrado en el SLM y comienza a mostrar repetidamente una secuencia de patrones holográficos [los recuadros 220, 222, 224 y 226 de la **figura 7A** se corresponden con los patrones holográficos mostrados en la **figura 8A** (a), (b), (c) y (d), respectivamente], en el SLM del emisor que corresponde a la proyección en la superficie de la Tierra de un cuadrado de la mitad de tamaño del previo centrado en el primer, segundo, tercero y cuarto cuadrantes [**figura 8B** (a), (b), (c) y (d), respectivamente] cada 100 ms mientras emite un paquete de datos etiquetado con la señal horaria del GPS. En la **figura 8A**, el eje 90 y el cuadrado 91 se representan con propósitos de aclaración pero no se incluyen en los hologramas.

La estación terrestre confirmará, por medio de UHF, la recepción de paquetes de datos (recuadros 214 y 216 de la **figura 7B**) marcados con la señal horaria del GPS, lo que indicará el cuadrante donde se localiza la estación terrestre y a continuación reducirá a la mitad la incertidumbre sobre la posición del satélite con respecto a la estación terrestre.

La secuencia de cuadros 220, 222, 224 y 226 de la **figura 7A** se ha de combinar con la desviación del rayo láser cada 100 ms siguiendo el procedimiento descrito en la **figura 3** para compensar la velocidad de su satélite a lo largo de su órbita.

- 5 La reducción a la mitad del tamaño del cuadrado proyectado (cuadro 230 de la **figura 7A**) se debe repetir para tamaños de 1000 m, 500 m y 200 m; cuando se alcanza este último tamaño (cuadro 232 de la **figura 7A**), la estación terrestre se centra dentro del rayo láser y la comunicación puede comenzar transfiriendo datos a 100 Mbps desde el satélite a la estación terrestre usando el enlace óptico de espacio libre. Se puede realizar otro centrado en este punto detectando la iluminación diferencial como se detecta por la matriz de cuatro diodos dentro del fotodiodo G6849 usado en la estación terrestre.
- 10 10 La **figura 9** representa los hologramas proyectados en la superficie del SLM a medida que la comunicación se establece y continúa. Una vez que se enfoca el transmisor de comunicación óptica (por ejemplo, el satélite), se ilumina un cuadrado que tiene lados de 200 m que corresponde a un ángulo de  $\pi/9500$  radianes visto desde el satélite. Como un satélite en una órbita de 600 km de altitud se mueve a  $7,6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , o equivalentemente a  $0,7^\circ\cdot\text{s}^{-1}$  (aproximadamente  $\pi/250$  radianes por segundo) visto desde la estación receptora (por ejemplo, estación terrestre) en coordenadas topocéntricas, el holograma mostrado en el elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser se deberá actualizar cada  $t = 27 \text{ ms}$ , es decir, la frecuencia de refresco de la máscara de seguimiento deberá ser de al menos  $9500/250 \text{ Hz}$ . En la figura 9, se representan los hologramas correspondientes al seguimiento de la estación receptora (en este modo de realización, una estación terrestre) una vez que se ha localizado, lo que compensa el movimiento relativo del transmisor de comunicación óptica (en este modo de realización, un satélite) sobre su órbita con respecto a la estación terrestre estacionaria asumiendo que este desplazamiento se realiza en una dirección que coincide con la coordenada horizontal del elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser. **A.** (a) a (e) indican el cuadrante (en este modo de realización, sobre la superficie de la Tierra) que se ilumina mientras que **B** (a) a (e) muestran respectivamente el holograma proyectado en la superficie del elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser para lograr esto. En particular, (a) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma una vez se localiza la estación terrestre y se enfoca el láser a un ángulo de  $\pi/9500$  radianes; (b) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma proyectado en el LCOS cuando el satélite se ha movido un ángulo de  $\pi/9500$  radianes con respecto a la localización de la estación terrestre en (a); (c) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma proyectado en el LCOS cuando el satélite se ha movido un ángulo de  $2\cdot\pi/9500$  radianes con respecto a la localización de la estación terrestre en (a); (d) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma proyectado en el LCOS cuando el satélite se ha movido un ángulo de  $3\cdot\pi/9500$  radianes con respecto a la localización de la estación terrestre en (a); y (e) corresponde al cuadrante iluminado por el respectivo holograma proyectado en el LCOS cuando el satélite se ha movido un ángulo de  $4\cdot\pi/9500$  radianes con respecto a la localización de la estación terrestre en (a).

- 35 Como aspecto final de este modo de realización ejemplificado de la presente invención, el establecimiento de la comunicación se usó tanto por el satélite como por la estación terrestre para refinar los datos TLE para realizar los cálculos para el siguiente paso y reducir el error al estimar la posición de cada uno. Para este propósito, la estación terrestre y el satélite usan *software* producido a partir de los códigos fuente ELFIND, SATFIT, ELCORD y DPFIT disponibles en <http://sat.belastro.net/satelliteorbitdetermination.com/>.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para transmitir información desde un transmisor de comunicación óptica (100) a una estación receptora (110) por medio de un rayo láser (18) y para la alineación de dicho rayo láser emitido desde dicho transmisor de comunicación óptica con dicha estación receptora, en el que

5 - dicho transmisor de comunicación óptica se desplaza con respecto a dicha estación receptora y comprende un láser (16), un receptor de radio (32), un microprocesador (14) y un modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio (24) que comprende un elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, con lo que dicho rayo láser se emite desde dicho láser y se proyecta sobre un área por difracción y reflexión usando dicho modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio, en el que dicho láser y dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser se controlan por dicho microprocesador, en el que dicho rayo láser tiene un eje longitudinal paralelo a la trayectoria de propagación de dicho rayo láser, con lo que el desplazamiento de la estación receptora con respecto a dicho transmisor de comunicación óptica es una componente del vector que representa el movimiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a dicha estación receptora, en el que dicha componente está en el plano perpendicular a una línea entre dicha estación receptora y dicho transmisor de comunicación óptica,

10 - dicha estación receptora comprende un receptor de fotodiodo (52) para detectar dicho rayo láser transmitido y un transmisor de radio (60), y

15 - dicho procedimiento comprende las siguientes etapas:

20 (i) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora por difracción y reflexión usando dicho modulador de luz espacial;

25 (ii) dividir dicho rayo láser proyectado en cuadrantes que se cruzan en el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado;

30 (iii) interrumpir la proyección de cada cuadrante de dicho rayo láser durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por pulsación de dicho rayo láser usando modulación de amplitud y por distorsión del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, para cada intervalo de dicho conjunto, en el que cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que otros cuadrantes de dicho rayo láser se proyectan y en el que dicho cuadrante se proyecta exclusivamente sobre al menos un intervalo de dicho subconjunto,

35 en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado son las mismas para todos los cuadrantes sobre los que se proyecta dicho rayo láser, y en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos un intervalo de dicho conjunto de intervalos son diferentes de la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos otro intervalo de dicho conjunto de intervalos;

40 (iv) identificar el cuadrante de dicho rayo láser proyectado que se detecta en dicho receptor de fotodiodo en la estación receptora determinando la frecuencia de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta el cuadrante de dicho rayo láser, y comunicar esta información a dicho transmisor de comunicación óptica por medio de dicho transmisor de radio y dicho receptor de radio;

45 (v) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre el área sobre la que se proyectó el cuadrante del rayo láser identificado en la etapa (iv) distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido desde el láser usando la máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, que proyectó exclusivamente dicho cuadrante del rayo láser en la etapa (iii); y

50 (vi) repetir las etapas (ii) a (v) al menos otras tres veces o hasta que el ángulo entre el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (v) y dicho eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (ii) sea menor que  $\pi/9500$  radianes,

en el que la dirección en la que se apunta el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en las etapas (i) a (v) se cambia cada  $t$  segundos como una función del desplazamiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido por el láser usando una máscara de difracción de seguimiento que se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser,

en el que los intervalos tienen una frecuencia de valor  $r$  de entre 10 y 500 Hz, los pulsos tienen una frecuencia de valor  $f$  de entre 0,1 kHz y 100 MHz, y  $t$  está entre 0,001 y 10 segundos,

en el que cada máscara de difracción de seguimiento se usa:

(a) sola en la etapa (i) y en la primera iteración de la etapa (ii); y

5 (b) en combinación con una máscara de difracción de apuntamiento en las etapas (iii) a (v) y en iteraciones posteriores de la etapa (ii),

y en el que:

10 (c) cada máscara de difracción de seguimiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que, cuando se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, difracta y refleja el rayo láser que se emite desde dicho láser, y proyecta el rayo láser proyectado sobre el área que se proyectó usando la máscara de difracción de seguimiento usada inmediatamente antes de esto,

15 (d) cada combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que, cuando se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, difracta y refleja el rayo láser que se emite desde dicho láser, y proyecta el rayo láser proyectado:

20 - sobre el área sobre la que se proyectó usando la combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento usada inmediatamente antes de esto, cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son las mismas; o bien

- sobre un subconjunto del área sobre la que se proyectó usando:

la máscara de difracción de seguimiento usada antes de esto cuando dicha combinación es la primera combinación usada después de usar una máscara de seguimiento; o

25 la combinación de la máscara de difracción de seguimiento y la máscara de difracción de apuntamiento usada antes de esto cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son diferentes.

2. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la etapa (i) de proyectar dicho rayo láser sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora comprende las etapas de:

30 (a) estimar la posición del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora y estimar la posición de la estación receptora con respecto al transmisor de comunicación óptica;

(b) apuntar el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en una dirección A hacia la posición de la estación receptora estimada en la etapa (a) cambiando la actitud del transmisor de comunicación óptica usando al menos un actuador;

35 (c) apuntar dicho receptor de fotodiodo en una dirección B hacia la posición del transmisor de comunicación óptica estimada en la etapa (a) cambiando los ángulos de acimut y/o altitud de dicho receptor de fotodiodo, en el que dicha dirección B es perpendicular al plano focal de dicho receptor de fotodiodo y paralela a dicha dirección A; y

(d) repetir las etapas (b) y (c) hasta que se detecte el rayo láser proyectado en la etapa (b) usando dicho receptor de fotodiodo.

40 3. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, en el que el procedimiento comprende una etapa adicional (vii) después de la etapa (vi) de transmitir otra información a dicha estación receptora controlando la modulación de intensidad y amplitud de dicho rayo láser proyectado, en el que la dirección en la que se proyecta el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado se cambia distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido por el láser usando una máscara de difracción de seguimiento en combinación con dicha máscara de difracción de apuntamiento generada en la última iteración de la etapa (v).

4. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el ángulo sobre el que se proyecta dicho rayo láser en la etapa (i) está entre  $\pi/18850$  y  $\pi/180$  radianes.

5. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que cada máscara de difracción o combinación de máscaras de difracción que se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser distorsiona el frente de onda del rayo láser y proyecta una imagen  $I(x,y)$  (42) sobre dicha área, en el que dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser comprende una matriz de píxeles, estando definido

5

cada píxel por una coordenada p y una coordenada aq, en el que el píxel (p,q) = (0,0) es el píxel en el centro de dicha matriz, y en el que dicha máscara de difracción o combinación de máscaras de difracción está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que se calcula en un microprocesador y se muestra en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, en el que cada píxel (p,q) de dicha matriz se asigna un nivel de gris,  $g'(p,q)$  entre 0 y w calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$g'(p,q) = (g(p,q) + g_{\varphi\theta}(p,q)) \bmod(w)$$

en la que:

$$g(p,q) = \frac{w}{2 \cdot \pi} \cdot \psi(p,q)$$

y

10

$$g_{\varphi\theta}(p,q) = g_{\theta}(p',q')$$

en la que  $g_{\theta}(p',q')$  se calcula a partir de  $g_{\theta}(p, q)$  usando la siguiente matriz de rotación:

$$\begin{pmatrix} p' \\ q' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix}$$

en la que:

$$g_{\theta}(p,q) = \frac{w}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{n} \right) \bmod(2 \cdot \pi) \right]$$

15

en la que:

- p es la coordenada de abscisas del píxel (p,q);
- q es la coordenada de ordenadas del píxel (p,q);
- w es el valor de gris que proporciona modulación de fase  $2\pi$  en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser;
- 20 - mod(w) es la operación del módulo sobre w;
- $\psi(p, q)$  es la función de fase de la transformada inversa de Fourier de dicha imagen y se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$A(p,q) e^{i \cdot \psi(p,q)} = \text{FT}^{-1}[I(x,y)]$$

en la que:

25

$\text{FT}^{-1}[I(x,y)]$  = transformada inversa de Fourier de dicha imagen

$A(p,q)$  = es la amplitud de la transformada inversa de Fourier de dicha imagen  $i$  = unidad imaginaria

- $\phi$  es el ángulo de deflexión acimutal en radianes con respecto al eje longitudinal;
- n se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{\lambda}{\sin(\theta) \cdot l}$$

30

en la que:

- $\lambda$  es la longitud de onda en metros del rayo láser;
- $l$  es la longitud de un lado del píxel en metros; y
- $\theta$  es el ángulo de deflexión cenital en radianes con respecto al eje longitudinal; y
- mod( $2\pi$ ) es la operación del módulo sobre la función angular.

35

6. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que en la etapa (iii) cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta exclusivamente sobre cada intervalo de dicho subconjunto.

7. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que las etapas (iii) y (iv) comprenden lo siguiente:

5 (iii) interrumpir la proyección de cada cuadrante de dicho rayo láser durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por pulsación de dicho rayo láser usando modulación de amplitud y por distorsión del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, para cada intervalo de dicho conjunto, en el que cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que otros cuadrantes de dicho rayo láser se proyectan y en el que dicho cuadrante se proyecta exclusivamente sobre al menos un intervalo de dicho subconjunto,

10 en el que la frecuencia y/o duración de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado son las mismas para todos los cuadrantes sobre los que se proyecta dicho rayo láser, y en el que la frecuencia y/o duración de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos un intervalo de dicho conjunto de intervalos son diferentes de la frecuencia y/o duración de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos otro intervalo de dicho conjunto de intervalos;

15 (iv) identificar el cuadrante de dicho rayo láser proyectado que se detecta en dicho receptor de fotodiodo en la estación receptora determinando la frecuencia y/o duración de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta el cuadrante de dicho rayo láser, y comunicar esta información a dicho transmisor de comunicación óptica por medio de dicho transmisor de radio y dicho receptor de radio;

20 en el que los intervalos tienen una frecuencia de valor  $r$  de entre 10 y 500 Hz, y una duración menor que o igual a  $r^1$ , los pulsos tienen una frecuencia de valor  $f$  de entre 0,1 kHz y 100 MHz, y una duración menor que o igual a  $f^1$ , y  $t$  está entre  $r^1$  y 10.

25 8. Dispositivo de comunicación óptica para transmitir información desde un transmisor de comunicación óptica (100) a una estación receptora (110) por medio de un rayo láser (18) y para la alineación de dicho rayo láser emitido desde dicho transmisor de comunicación óptica con dicha estación receptora, en el que dicho dispositivo comprende los siguientes componentes:

30 - un láser (16),  
- un receptor de radio (32),  
- un modulador de luz espacial de cristal líquido sobre silicio (24) que comprende un elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser que se emite desde dicho láser, y  
- un microprocesador (14),

35 en el que dicho láser y dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser se controlan por dicho microprocesador,  
**caracterizado por que** dichos componentes están dispuestos para llevar a cabo las siguientes etapas:

40 (i) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre un área en la que se localiza dicha estación receptora por difracción y reflexión usando dicho modulador de luz espacial;

45 (ii) dividir dicho rayo láser proyectado en cuadrantes que se cruzan en el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado;

50 (iii) interrumpir la proyección de cada cuadrante de dicho rayo láser durante cada intervalo de un conjunto de intervalos consecutivos por pulsación de dicho rayo láser usando modulación de amplitud y por distorsión del frente de onda de dicho rayo láser usando una máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, para cada intervalo de dicho conjunto, en el que cualquier cuadrante dado de dicho rayo láser proyectado se proyecta sobre un subconjunto de dicho conjunto de intervalos que es diferente del subconjunto de dicho conjunto de intervalos sobre el que otros cuadrantes de dicho rayo láser se proyectan y en el que dicho cuadrante se proyecta exclusivamente sobre al menos un intervalo de dicho subconjunto,

55 en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante cualquier intervalo dado son las mismas para todos los cuadrantes sobre los que se proyecta dicho rayo láser, y en el que la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos un intervalo de dicho conjunto de intervalos son diferentes de la frecuencia de los pulsos de dicho rayo láser de amplitud modulada que se emiten durante al menos otro intervalo de dicho conjunto de intervalos;

- 5 (iv) identificar el cuadrante de dicho rayo láser proyectado que se detecta en dicho receptor de fotodiodo en la estación receptora determinando la frecuencia de los pulsos del subconjunto del conjunto de intervalos sobre los que se proyecta el cuadrante de dicho rayo láser, y comunicar esta información a dicho transmisor de comunicación óptica por medio de dicho transmisor de radio y dicho receptor de radio;
- 10 (v) proyectar dicho rayo láser en intervalos consecutivos sobre el área sobre la que se proyectó el cuadrante del rayo láser identificado en la etapa (iv) distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido desde el láser usando la máscara de difracción de apuntamiento generada en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, que proyectó exclusivamente dicho cuadrante del rayo láser en la etapa (iii); y
- 15 (vi) repetir las etapas (ii) a (v) al menos otras tres veces o hasta que el ángulo entre el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (v) y dicho eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en la etapa (ii) sea menor que  $\pi/9500$  radianes,
- 20 en el que la dirección en la que se apunta el eje longitudinal de dicho rayo láser proyectado en las etapas (i) a (v) se cambia cada  $t$  segundos como una función del desplazamiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a la estación receptora distorsionando el frente de onda del rayo láser emitido por el láser usando una máscara de difracción de seguimiento que se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, con lo que el desplazamiento de la estación receptora con respecto a dicho transmisor de comunicación óptica es una componente del vector que representa el movimiento del transmisor de comunicación óptica con respecto a dicha estación receptora, en el que dicha componente está en el plano perpendicular a una línea entre dicha estación receptora y dicho transmisor de comunicación óptica,
- 25 en el que los intervalos tienen una frecuencia de valor  $r$  de entre 10 y 500 Hz, los pulsos tienen una frecuencia de valor  $f$  de entre 0,1 kHz y 100 MHz, y  $t$  está entre 0,001 y 10 segundos, en el que cada máscara de difracción de seguimiento se usa:
- 30 (a) sola en la etapa (i) y en la primera iteración de la etapa (ii); y
- (b) en combinación con una máscara de difracción de apuntamiento en las etapas (iii) a (v) y en iteraciones posteriores de la etapa (ii),
- 35 y en el que:
- 30 (c) cada máscara de difracción de seguimiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que, cuando se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, difracta y refleja el rayo láser que se emite desde dicho láser, y proyecta el rayo láser proyectado sobre el área que se proyectó usando la máscara de difracción de seguimiento usada inmediatamente antes de esto,
- 35 (d) cada combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento está comprendida en un patrón holográfico en escala de grises que, cuando se genera en dicho elemento para difractar y reflejar dicho rayo láser, difracta y refleja el rayo láser que se emite desde dicho láser, y proyecta el rayo láser proyectado:
- 40 - sobre el área sobre la que se proyectó usando la combinación de máscara de difracción de seguimiento y máscara de difracción de apuntamiento usada inmediatamente antes de esto, cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son las mismas; o bien
- 45 - sobre un subconjunto del área sobre la que se proyectó usando:
- 45 la máscara de difracción de seguimiento usada antes de esto cuando dicha combinación es la primera combinación usada después de usar una máscara de seguimiento; o
- 45 la combinación de la máscara de difracción de seguimiento y la máscara de difracción de apuntamiento usada antes de esto cuando las máscaras de difracción de apuntamiento usadas en cada combinación son diferentes.

Figura 1

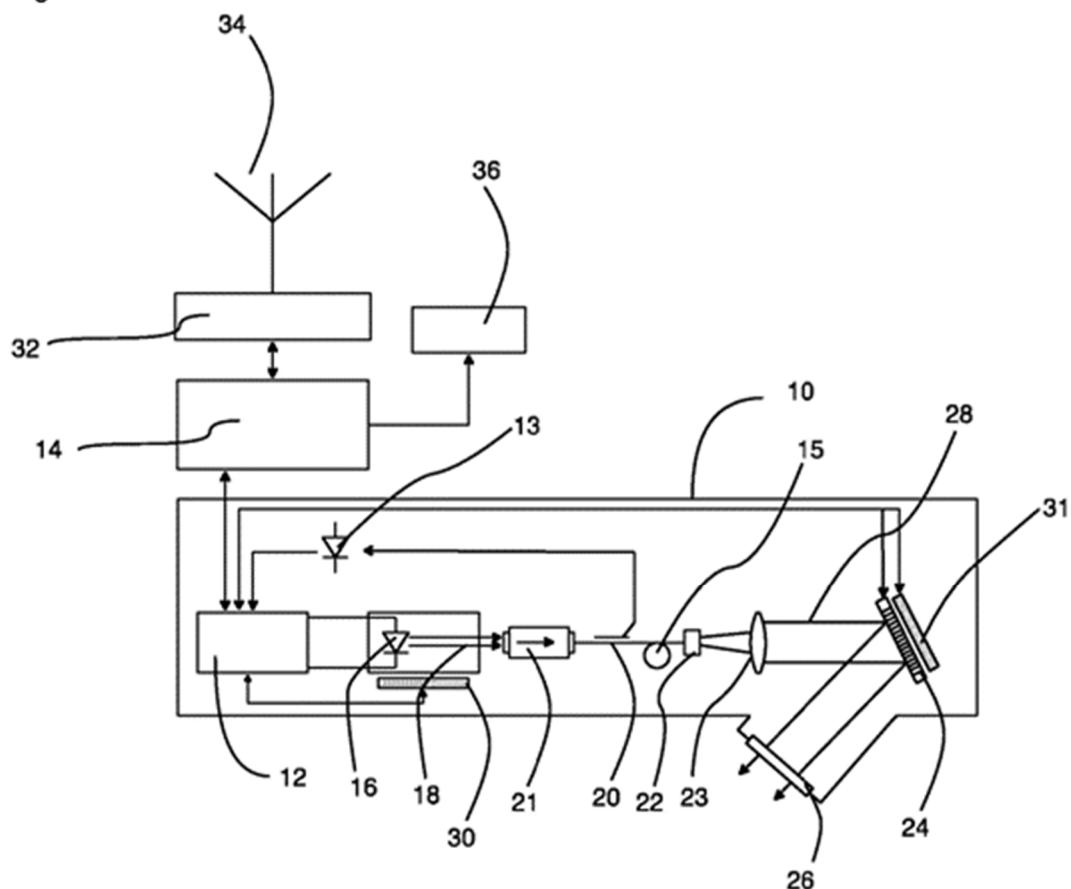


Figura 2

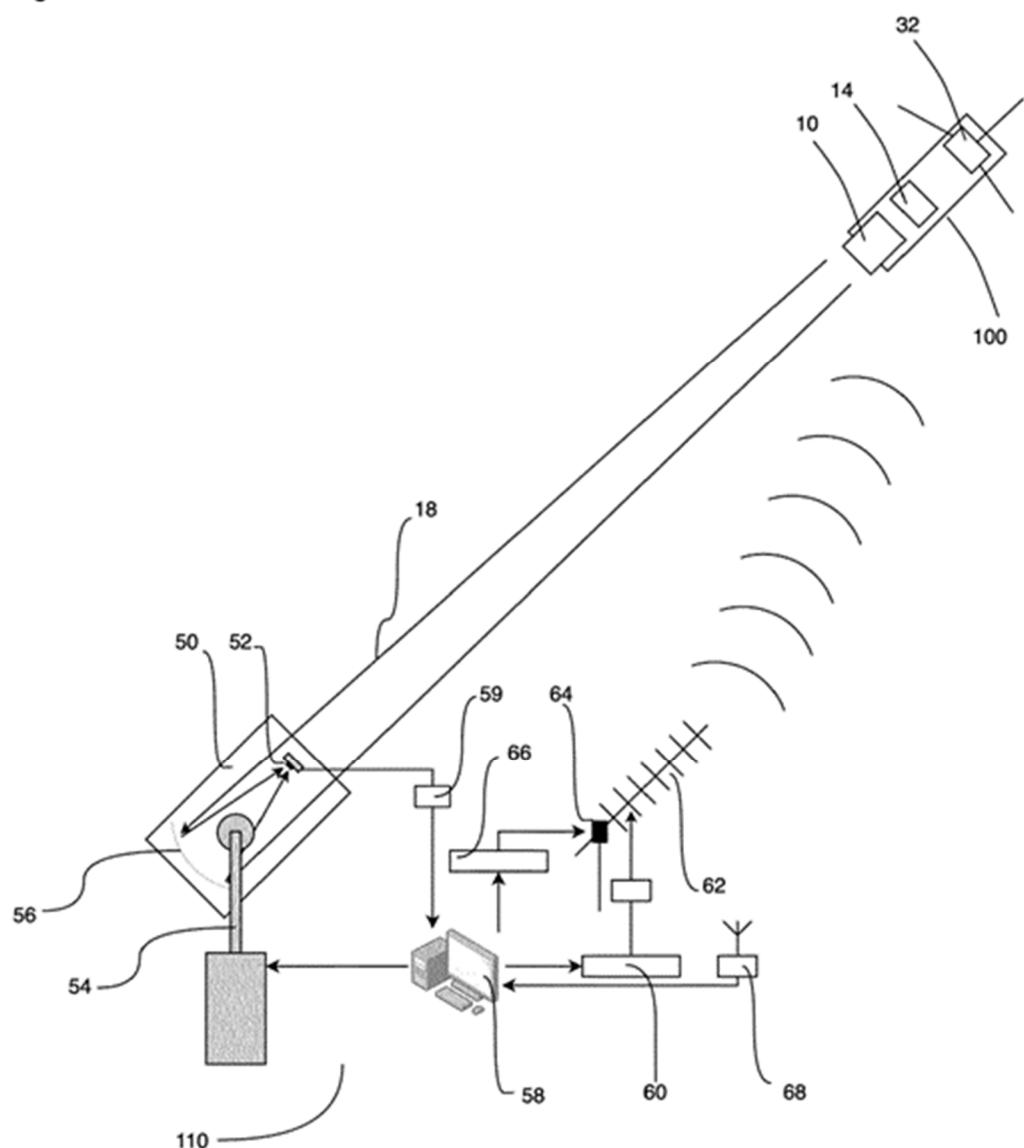
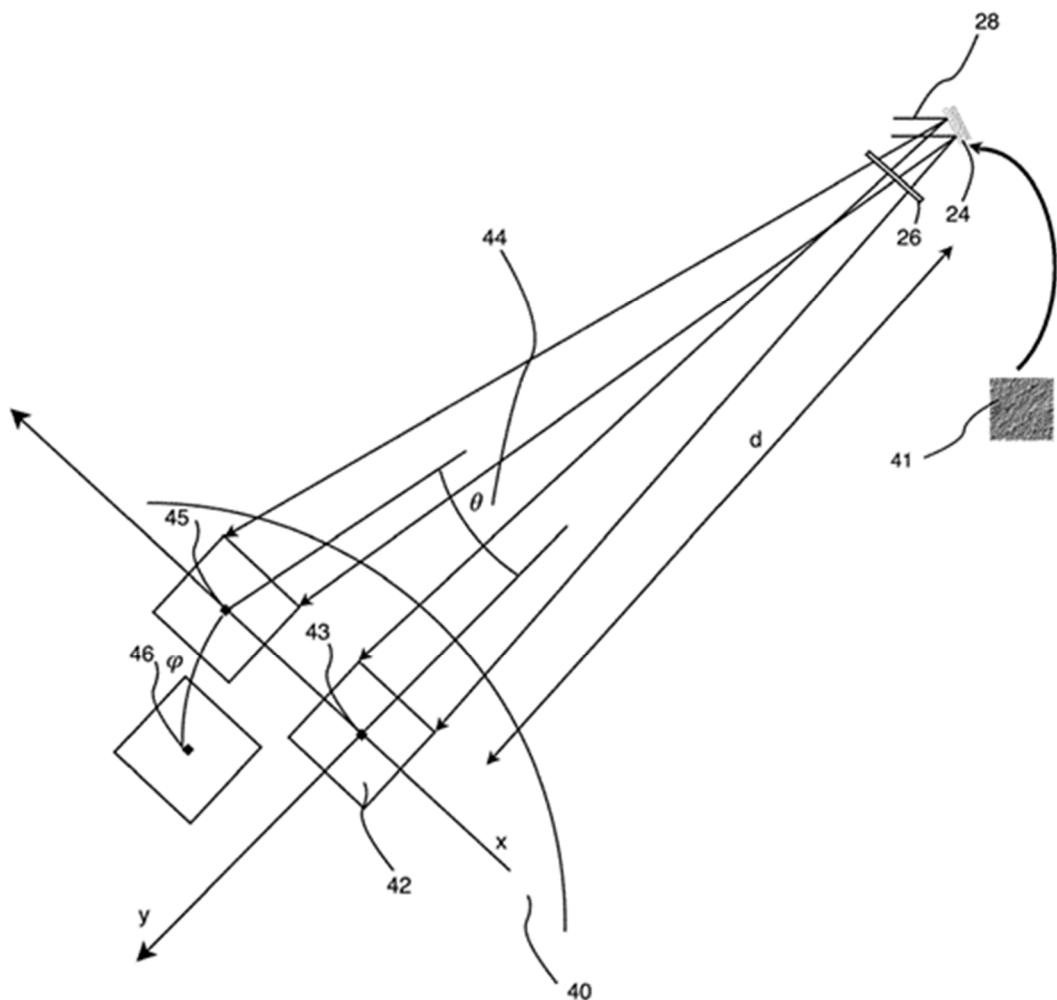
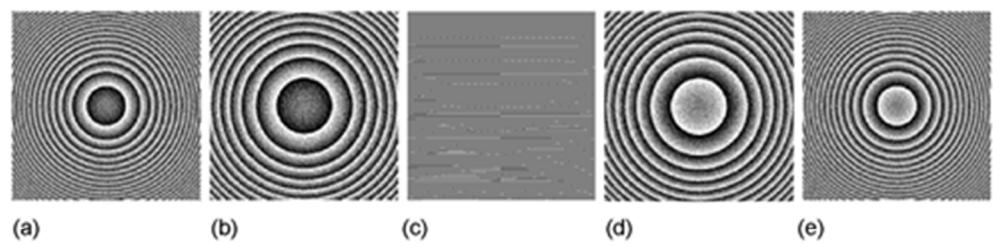


Figura 3

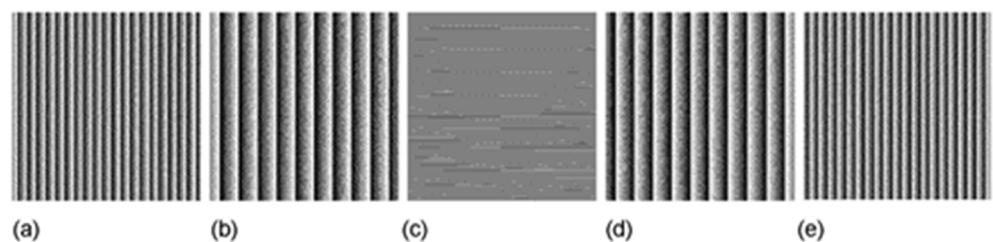


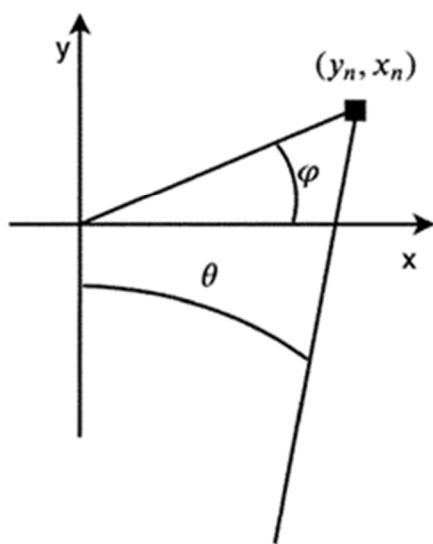
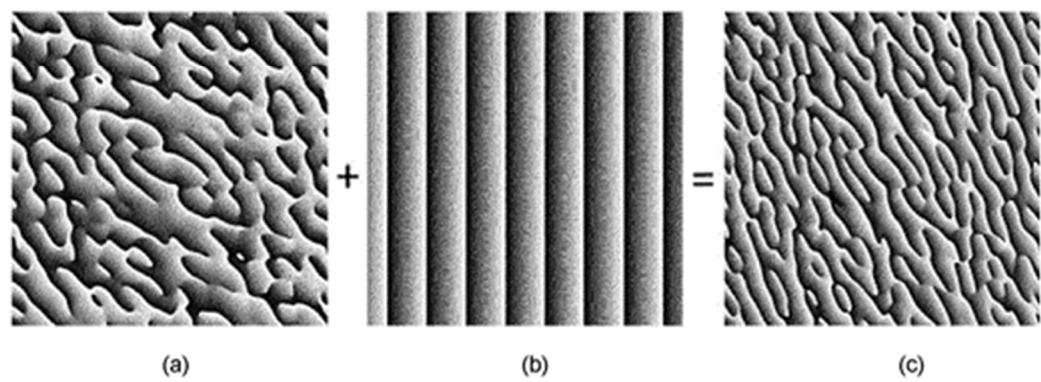
**Figura 4**

**A**



**B**



**Figura 5****A****B**

(a)

(b)

(c)

Figura 6

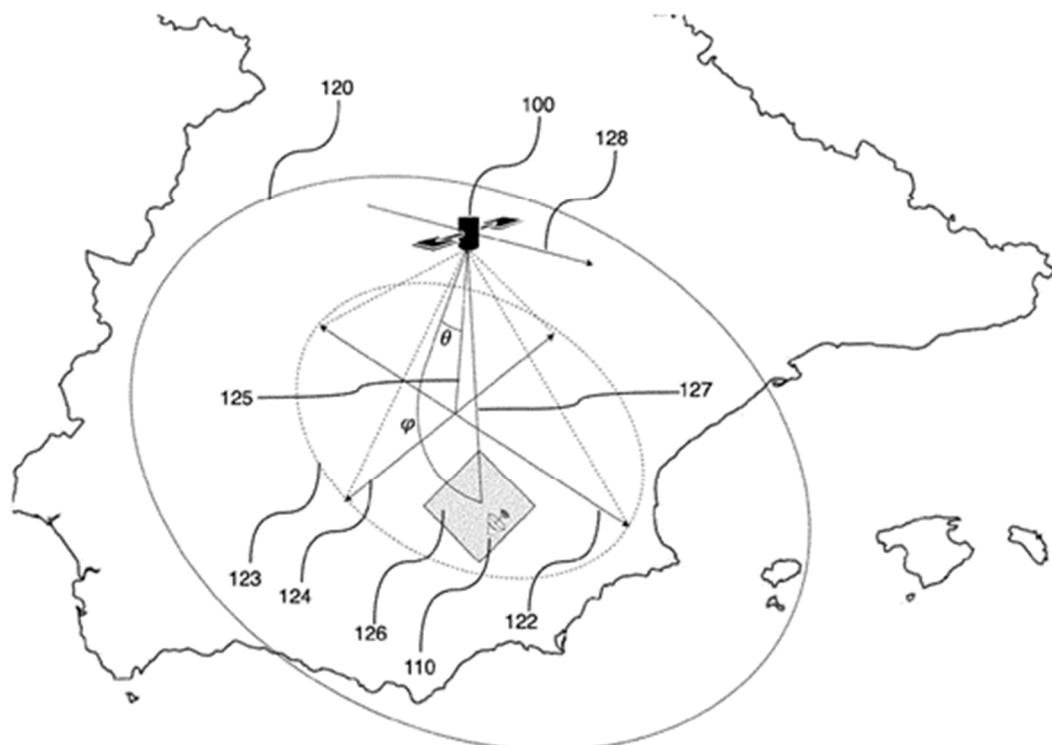


Figura 7

A

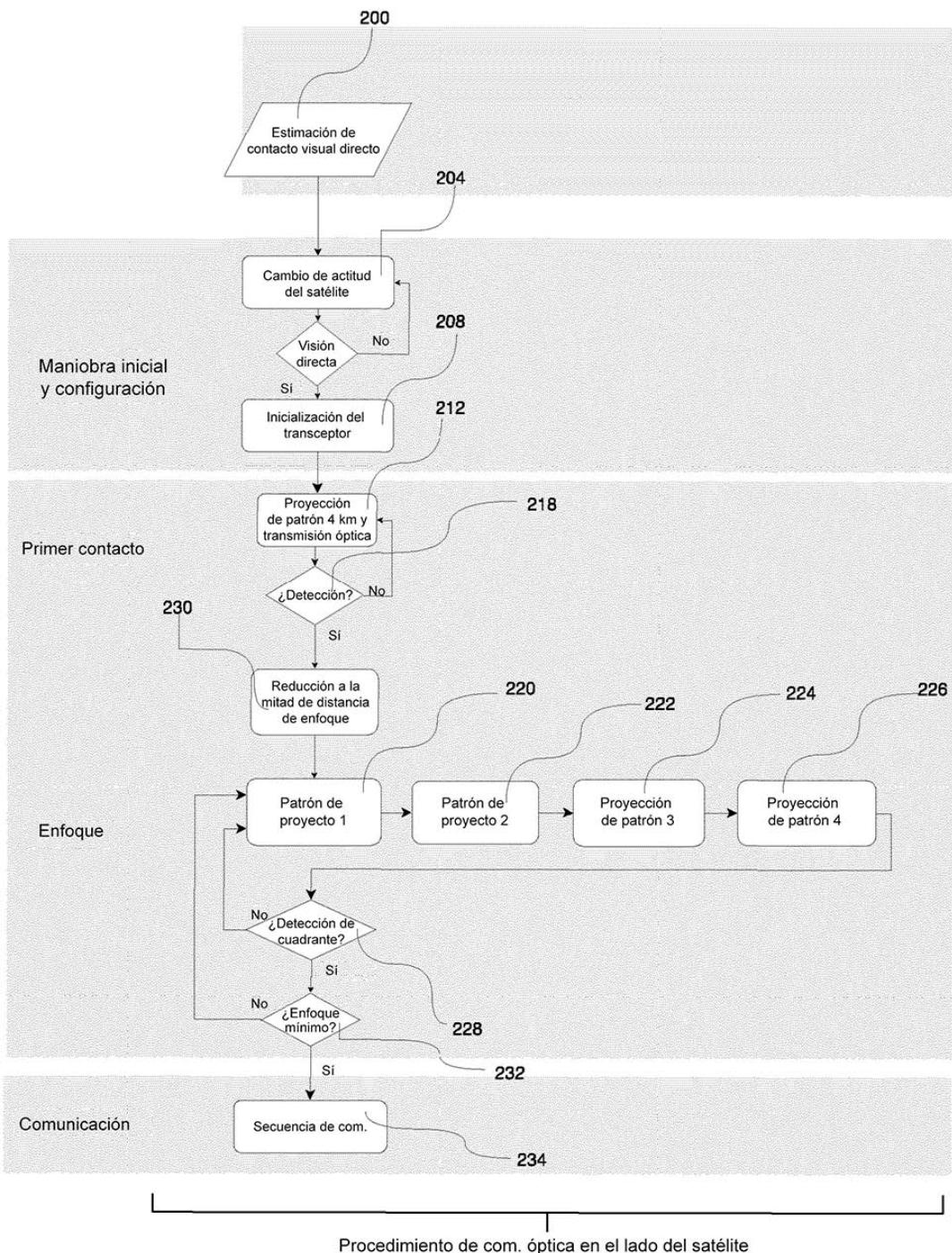


Figura 7 (cont.)

B

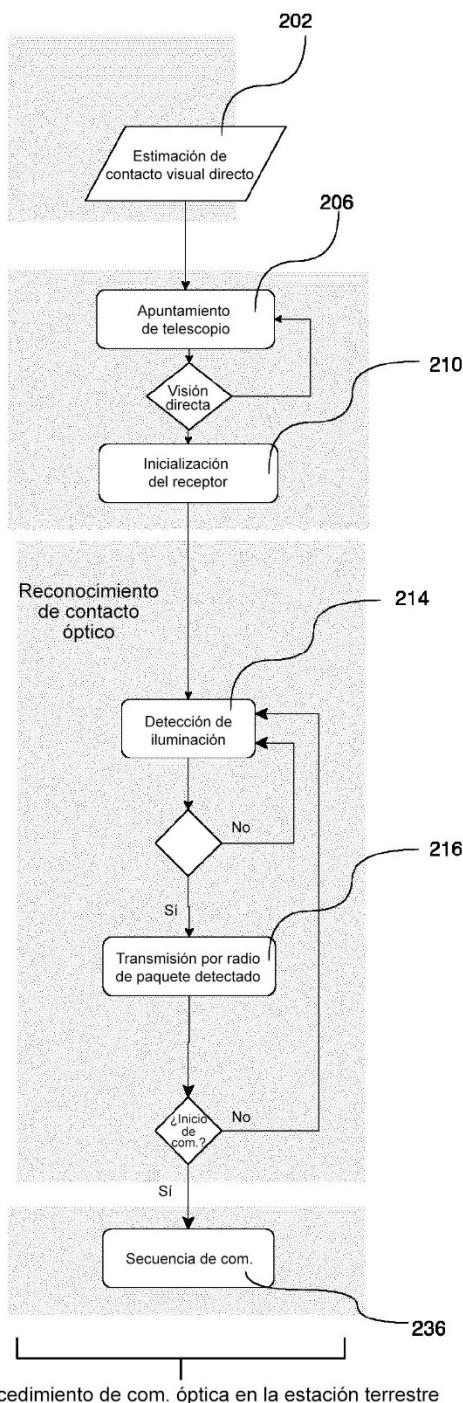


Figura 8

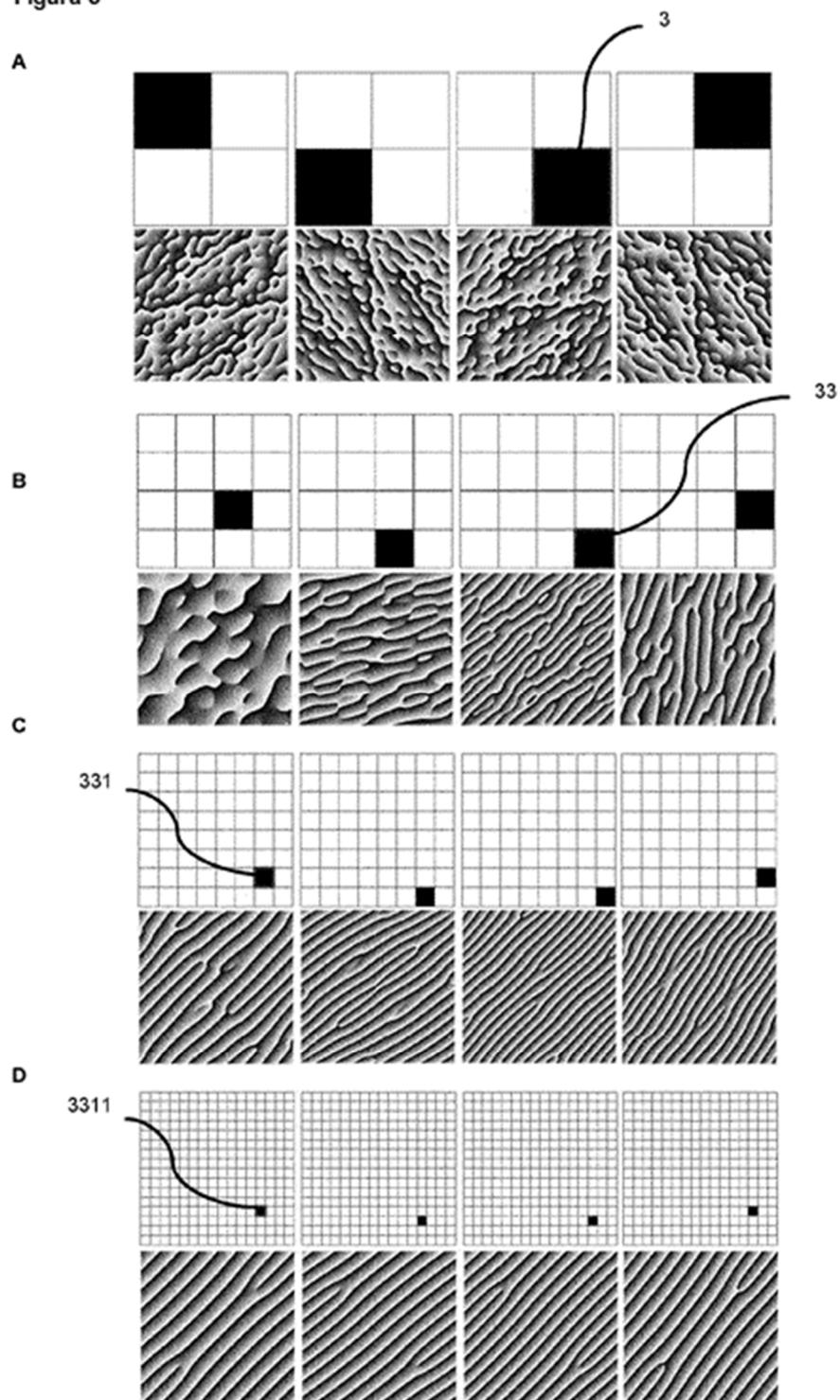
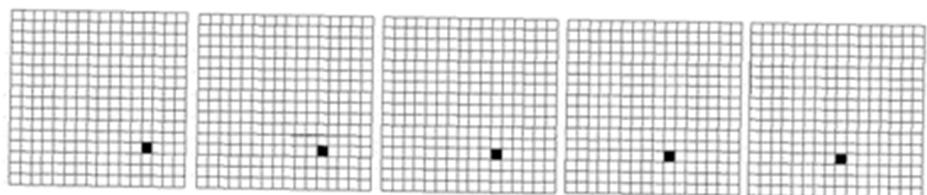
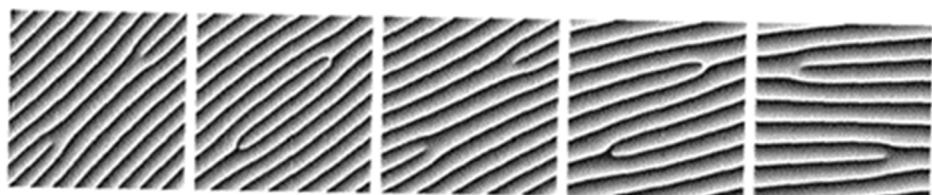


Figura 9

A.



B.



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

**REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCION**

La lista de referencias citadas por el solicitante es, únicamente, para conveniencia del lector. No forma parte del documento de patente europea. Si bien se ha tenido gran cuidado al recopilar las referencias, no pueden excluirse errores u omisiones y la OEP declina toda responsabilidad a este respecto.

**Documentos de patente citados en la descripción**

- WO 2016022579 A1 [0003]
- US 5475520 A [0004]