

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 728 744**

51 Int. Cl.:

**H04B 10/118** (2013.01)

**H04B 7/185** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.05.2017** E 17169499 (5)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.03.2019** EP 3242417

54 Título: **Dispositivo de comunicación inter-satélites, satélite y constelación de satélites asociados**

30 Prioridad:

**04.05.2016 FR 1600741**

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

**28.10.2019**

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)  
Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade  
Nord  
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**SOTOM, MICHEL;  
LE KERNEC, ARNAUD;  
FRANCASTEL, AGNÈS;  
POTUAUD, DOMINIQUE y  
FERNANDEZ, GILLES**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 728 744 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Dispositivo de comunicación inter-satélites, satélite y constelación de satélites asociados

La presente invención se refiere al campo de la telecomunicación por satélite. La invención se refiere más particularmente a un dispositivo de comunicación inter-satélites para satélites que pertenecen a una constelación de satélites.

La invención puede encontrar su aplicación en las constelaciones de satélites que necesitan enlaces entre satélites de un mismo plano orbital y/o enlaces entre satélites que pertenecen a unos planos orbitales diferentes. A título ilustrativo, la figura 1 representa un ejemplo de constelaciones de satélites 10 de acuerdo con la invención así como sus enlaces inter-satélites 11 (o ISL por "*Inter Satellite Link*" según la terminología anglosajona). De manera no limitativa, se puede tratar de constelaciones de satélite 10 de telecomunicación en órbitas no geoestacionarias tales como unas órbitas bajas (o LEO por "*Low Earth Orbit*" según la terminología anglosajona) o medias (igualmente llamada MEO por "*Medium Earth Orbit*" según la terminología anglosajona) que deben proporcionar unas conexiones a muy alta velocidad y con reducida latencia entre los usuarios en tierra. Estas constelaciones se construyen a partir de varios planos orbitales y, en cada plano orbital, evolucionan varios satélites sobre una órbita cuasi circular. Las constelaciones de satélites pueden ser constelaciones polares o cuasi polares cuyos planos orbitales pasan por los dos polos o en la proximidad de estos últimos. Un sistema de ese tipo se divulga por ejemplo en el documento US 6.246.501 B1.

La figura 2 es una ampliación de la figura 1 ilustrando unos enlaces 11 entre los satélites en el interior de la constelación. Estos enlaces 11 puede ser entre satélites 10 que pertenecen a un mismo plano 25 orbital, hablamos entonces de enlaces 21 intra-plano o entre satélites 10 que pertenecen a unos planos 25 orbitales adyacentes que se denominan enlaces 22 inter-planos. Cada satélite está así en enlace con un máximo de cuatro satélites 10. En la figura 2, si se toma como referencia el sentido de desplazamiento de los satélites, un satélite 10 puede estar en enlace con los dos satélites vecinos que evolucionan en el mismo plano orbital antes y detrás de él y los dos satélites vecinos que evolucionan en los planos 25 orbitales adyacentes a derecha y a izquierda del satélite 10.

Con el fin de establecer los enlaces entre ellos, ciertos satélites 10 comprenden unos terminales de comunicación inter-satélites que utilizan tecnologías de radiofrecuencia. Estos satélites 10 utilizan antenas dedicadas para las comunicaciones 21 intra-plano orbital y 22 inter-planos orbitales. A título ilustrativo, la figura 3 representa un ejemplo de modo de realización de la plataforma 30 de un satélite de ese tipo conocido en la técnica anterior. Esta plataforma comprende dos antenas 32 móviles para los enlaces 22 inter-planos y dos antenas 31 de reducida movilidad para los enlaces 21 intra-plano.

Estos enlaces 11 inter-satélites, de tecnología de radiofrecuencia, plantean varios problemas en el caso de una utilización en el seno de una constelación polar o cuasi polar. Ciertos problemas provienen principalmente del hecho de que el ángulo azimutal de un enlace 22 inter-plano varía constantemente con la latitud en el transcurso de la órbita y la velocidad de variación del ángulo azimutal aumenta grandemente a medida que los dos satélites se aproximan al polo. Otros problemas provienen del hecho de que es necesario evitar posibles interferencias entre el conjunto de los haces presentes en el polo. En la práctica, los enlaces 22 inter-planos orbitales no pueden mantenerse para unas latitudes extremas, típicamente unas latitudes superiores a aproximadamente 60° y unas latitudes inferiores a aproximadamente -60° y deben por tanto interrumpirse. Los terminales de comunicación inter-satélite se colocan y orientan de manera que se establezcan enlaces con el satélite de la derecha o la izquierda (con relación al sentido de desplazamiento) y son capaces de apuntar a un sector angular azimutal dado correspondiente a estas latitudes. Las comunicaciones entre satélites de planos 25 orbitales vecinos no están por tanto disponibles más allá de estos valores de latitud cuando los satélites atraviesan las regiones de los polos.

Una consecuencia es que debe establecerse una nueva conexión 21 inter-planos después del cruce del polo y esta conexión no se realiza con el mismo satélite. En efecto, con referencia a la figura 4, si se considera un satélite 10 evolucionando en el plano 25 orbital central, este satélite 10 está en enlace con los otros satélites 10 colocados en unos planos 25 orbitales vecinos de un lado y otro del plano 25 orbital central. En la región de los polos, los planos 25 orbitales se cruzan y el satélite 10 que se encontraba a la derecha del satélite considerado (tomando como sentido de referencia, el sentido del desplazamiento de los satélites y considerando una vista desde arriba con relación a la Tierra) se encontrará a la izquierda del satélite considerado después del paso por el polo. Esto es lo mismo para satélite 10 que se encontraba a la izquierda antes del paso por el polo. A partir de que el satélite 10 haya atravesado la región de los polos, es decir que su latitud sea superior a aproximadamente 60° o inferior a aproximadamente -60° según el polo atravesado, los terminales de comunicación inter-satélites retoman los enlaces 22 inter-planos orbitales con los satélites 10 del plano 25 orbital vecino. Sin embargo cada terminal readquiere el enlace 22 con un satélite 10 diferente con relación al momento en el que se ha interrumpido dicho enlace 22. Por ejemplo, el terminal de comunicación inter-satélites que estaba situado sobre la plataforma para conectarse con el satélite de la derecha antes del paso del polo deberá readquirir el enlace 22 inter-planos con el nuevo satélite que se encuentra a su derecha y que estaba a su izquierda anteriormente. Esto complica un poco más el procedimiento, tanto más cuanto que estas operaciones de interrupción y de readquisición deben realizarse dos veces por órbita.

Un objetivo de la invención es principalmente corregir todos o parte de los inconvenientes de la técnica anterior

proponiendo una solución que permita evitar la interrupción de los enlaces inter-planos orbitales a la altura de los polos.

5 Con este fin, la invención tiene por objeto un dispositivo de comunicación para satélites configurados para evolucionar en el seno de una constelación de satélites, comprendiendo un satélite una plataforma de satélite, comprendiendo  
 10 dicho dispositivo un grupo de al menos un terminal óptico dedicado, en régimen nominal, a los enlaces de comunicaciones intra-plano orbital y un grupo de al menos un terminal óptico dedicado, en régimen nominal, a los enlaces de comunicaciones inter-planos orbitales, configurándose cada terminal óptico dedicado a las comunicaciones intra-plano orbital para emitir y recibir señales ópticas con un terminal óptico de un mismo satélite que evoluciona en el mismo plano orbital, configurándose cada terminal óptico dedicado a las comunicaciones inter-planos orbitales para  
 15 emitir y recibir señales ópticas con un terminal óptico de un mismo satélite de un plano orbital adyacente a todo lo largo de su revolución sobre su plano orbital y configurándose y disponiéndose cada terminal óptico dedicado a las comunicaciones inter-planos orbitales en el seno del dispositivo de comunicación inter-satélites de manera que presente un campo de visión tal que el semi-ángulo  $\theta_m$  en el vértice de este último sea superior al valor absoluto máximo del ángulo  $\theta$  azimutal del enlace inter-planos orbitales en el transcurso de una revolución alrededor de la  
 20 Tierra.

Según un modo de realización, el dispositivo comprende al menos cuatro terminales ópticos de enlace inter-satélites, situándose un primer grupo de dos terminales ópticos por delante de dicho satélite y situándose un segundo grupo de dos terminales ópticos por detrás de dicho satélite, comprendiendo cada grupo de terminales ópticos un terminal óptico dedicado, en régimen nominal, a los enlaces de comunicaciones intra-plano orbital y un terminal óptico dedicado, en  
 25 régimen nominal, a los enlaces de comunicaciones inter-planos orbitales, estando separados los dos terminales ópticos de enlace inter-satélites del mismo grupo una distancia predeterminada de manera que el haz óptico del enlace de comunicación inter-planos orbitales no quede jamás oculto por otro terminal óptico de la plataforma de satélite en el transcurso de su evolución sobre el plano orbital.

Según un modo de realización, los dos terminales ópticos de cada grupo se colocan en una posición simétrica con relación a un eje paralelo a la dirección de la trayectoria del satélite.  
 30

Según un modo de realización, los terminales ópticos son idénticos e intercambiables.

Según un modo de realización, los enlaces de comunicación intra-plano e inter-planos se transmiten y reciben sobre una banda de longitud de onda dividida en dos sub-bandas, emitiendo los terminales ópticos del primer grupo unos haces ópticos sobre la primera sub-banda y recibiendo unos haces ópticos sobre la segunda sub-banda, emitiendo  
 35 los terminales ópticos del segundo grupo unos haces ópticos sobre la segunda sub-banda y recibiendo unos haces ópticos sobre la primera sub-banda.

Según un modo de realización, los enlaces de comunicación intra-plano e inter-planos se transmiten y reciben con dos polarizaciones diferentes, emitiendo los terminales ópticos del primer grupo unos haces ópticos con un primer tipo de polarización y recibiendo unos haces ópticos con el segundo tipo de polarización, emitiendo los terminales ópticos del  
 40 segundo grupo unos haces ópticos con el segundo grupo de polarización y recibiendo unos haces ópticos con el primer tipo de polarización.

Según un modo de realización, unos haces ópticos se emiten y reciben en la banda óptica C.

Según un modo de realización, unos haces ópticos se emiten y reciben en la banda óptica L.

Según un modo de realización, el satélite evoluciona según una órbita no estacionaria.

40 La invención tiene igualmente por objeto un satélite configurado para evolucionar en el seno de una constelación de satélites repartida sobre varios planos orbitales, comprendiendo dicho satélite una plataforma de satélite sobre la que se dispone un dispositivo de comunicación inter-satélites tal como se ha descrito anteriormente.

La invención tiene igualmente por objeto una constelación de satélites que comprende una pluralidad de satélites tal como se ha descrito anteriormente.

45 Según un modo de realización, los satélites evolucionan según una órbita no estacionaria.

Según un modo de realización, los satélites evolucionan según una órbita baja.

Según un modo de realización, los satélites evolucionan según una órbita media.

Otras particularidades y ventajas de la presente invención se apreciarán con más claridad tras la lectura de la siguiente descripción, aportada a modo ilustrativo y no limitativo y realizada con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- 50
- las figuras 1 y 2, ya presentadas ilustran respectivamente un ejemplo de constelación de satélites y una ampliación de esta última;
  - la figura 3, ya presentada, representa un ejemplo de modo de realización de una plataforma de satélite conocida

de la técnica anterior;

- la figura 4, ya presentada, representa un ejemplo de evolución de los enlaces inter-satélites con ayuda de terminales de radiofrecuencia de enlace inter-satélites, conocidos de la técnica anterior, en la proximidad de un polo;
- 5 - las figuras 5a y 5b representan unos ejemplos de modo de realización de una plataforma de satélite según la invención;
- la figura 5c es una representación gráfica de la amplitud del campo de visión en función de la distancia entre dos terminales ópticos;
- 10 - la figura 6a es una representación gráfica de la evolución del azimut de un enlace inter-planos en función del tiempo;
- la figura 6b ilustra los diferentes ángulos entre dos satélites de la misma constelación;
- la figura 6c es una representación gráfica de la evolución del ángulo entre un enlace inter-planos y un enlace intra-plano de un mismo satélite en función del tiempo;
- 15 - la figura 7 ilustra un ejemplo de evolución de los enlaces inter-satélites con ayuda de terminales ópticos de enlace inter-satélites en el transcurso de una semi-órbita entre una región alrededor del polo Sur y una región alrededor del polo Norte;
- la figura 8 representa un ejemplo de modo de realización de un terminal óptico de enlace inter-satélite con su electrónica asociada;
- 20 - las figuras 9a y 9b representan respectivamente un ejemplo de asignación espectral y un ejemplo de utilización de la banda espectral por los satélites de una constelación;
- la figura 10 representa un ejemplo de modo de realización de una plataforma de satélite según la invención.

A continuación, se considerará una vista desde arriba, con relación a la Tierra y se tomará para referencia el sentido de desplazamiento de los satélites para designar delante y detrás de este último así como su derecha y su izquierda.

25 Un dispositivo de comunicación inter-satélites comprende al menos un terminal óptico dedicado, en régimen nominal, a los enlaces 21 de comunicaciones intra-plano orbital y al menos un terminal óptico dedicado, en régimen nominal, a los enlaces 22 de comunicaciones inter-planos orbitales. Cada terminal óptico dedicado a las comunicaciones 21 intra-plano orbital se configura para emitir y recibir señales ópticas con un terminal óptico de un mismo satélite 10 que evoluciona en el mismo plano 25 orbital y cada terminal óptico dedicado a las comunicaciones 22 inter-planos orbitales se configura para emitir y recibir señales ópticas con un terminal óptico de un mismo satélite 10 de un plano 25 orbital adyacente a todo lo largo de su revolución sobre su plano 25 orbital.

30 Las figuras 5a y 5b representan ejemplos de modo de realización de un dispositivo de comunicación inter-satélites según la invención. Este sistema puede instalarse sobre la plataforma 50 de satélites 10 de telecomunicación, es decir la estructura que reúne los elementos de navegación y de estructura del satélite, Estando configurado dicho satélite para evolucionar en el seno de una constelación de satélites. Esta constelación puede ser una constelación polar o cuasi polar. La constelación comprende varios planos 25 orbitales y cada plano orbital comprende varios satélites 10.

40 Según un modo de realización, el dispositivo de comunicación inter-satélites puede comprender dos grupos G1, G2 de terminales 51 ópticos de enlace 11 inter-satélites. Un primer grupo de dos terminales 51 ópticos puede situarse por delante de la plataforma 50 del satélite 10 y un segundo grupo de terminales 51 puede situarse por detrás de la plataforma 50 del satélite. Cada grupo G1, G2 de terminales 51 ópticos comprende un terminal 51 óptico configurado para establecer, en régimen nominal un enlace 21 de comunicación intra-plano orbital entre el satélite 10 considerado y otro satélite 10 adyacente que evoluciona en el mismo plano 25 orbital así como un terminal 51 óptico de enlace 11 inter-satélites configurado para establecer, en régimen nominal, un enlace de comunicación inter-planos orbitales entre el satélite 10 considerado y otro satélite 10 vecino que evoluciona en un plano 25 orbital adyacente.

45 El terminal 51 óptico del enlace 21 intra-plano colocado por delante de la plataforma del satélite 10 considerado se configura para establecer un enlace de comunicación con el terminal 51 óptico del satélite 10 adyacente que evoluciona delante de él. De igual modo, el terminal 51 óptico del enlace 21 intra-plano colocado por detrás de la plataforma del satélite considerado, para establecer un enlace de comunicación con el terminal 51 óptico de enlace 21 intra-plano del satélite adyacente que evoluciona por detrás de él.

50 Según un modo de realización preferente, los dos terminales 51 ópticos de enlace 11 inter-satélites de cada grupo G1, G2 se colocan en una posición sustancialmente simétrica con relación a un eje 52 paralelo a la dirección de la trayectoria del satélite 10 y que pasa por el centro de la plataforma 50. De manera ventajosa, esta disposición particular de los terminales 51 permite a estos últimos ser redundantes y por tanto efectuar las mismas funciones. Además, esto permite a los terminales 51 tener el mismo campo 53 de visión.

Esta redundancia puede obtenerse igualmente para posiciones ligeramente disimétricas de los terminales 51.

En las figuras 5a y 5b, los terminales 51 ópticos de un mismo grupo G1, G2, están alineados según un eje sustancialmente perpendicular a la dirección de desplazamiento del satélite. Esta dirección no es en ningún caso limitativa y estos terminales pueden desviarse con relación a un eje sustancialmente perpendicular a la dirección de desplazamiento del satélite.

Los dos terminales 51 de cada grupo G1, G2 pueden estar separados una distancia  $d$  predeterminada. El valor de esta distancia  $d$  se elige de manera que el enlace de comunicación entre el terminal 51 óptico del enlace 22 inter-planos considerado y el terminal 51 óptico del satélite adyacente con el que está en enlace no quede jamás oculto y por tanto jamás interrumpido cualquiera que sea la posición de dicho satélite 10 vecino del plano 25 orbital adyacente.

Con referencia a la figura 5b, si se considera que el terminal 51 óptico se define mediante una envolvente cilíndrica, el semi ángulo  $\theta_m$  en el vértice del campo 53 de visión del terminal óptico, con relación a una recta paralela a la dirección de la trayectoria del satélite 10, viene dado en función de la distancia  $d$  que separa los dos terminales ópticos, de su diámetro exterior  $D$  y del diámetro  $\phi$  del haz óptico mediante la expresión:

$$\theta_m = \arccos ((D + \phi)/2d).$$

El valor de la distancia  $d$  que separa los dos terminales 51 ópticos se elige principalmente en función de la órbita, del número de planos 25 orbitales de la constelación y del número de satélites 10 por plano 25 orbital. El valor de esta distancia  $d$  puede determinarse de manera que el campo 53 de visión del término 51 óptico de enlace inter-planos sea el mayor posible y de tal manera que dicho campo 53 de visión permita a dicho terminal 51 óptico mantener su enlace con el satélite vecino principalmente en la región de los polos cuando dicho satélite 10 vecino del plano 25 orbital adyacente pasa de un lado a otro del satélite 10 considerado.

Esta posición particular de los terminales 51 ópticos de enlace 11 inter-satélites permite mantener todos los enlaces 21 intra-plano y 22 inter-planos sin corte particularmente durante el cruce de los satélites 10 en los polos. Esto evita readquirir el enlace 22 inter-planos después de atravesar las regiones polares. Esto evita igualmente tener que actualizar permanentemente la conectividad de la constelación. Cada satélite 10 permanece conectado a los mismos satélites por los mismos terminales 51 ópticos a todo lo largo de su órbita.

Además, cada satélite 10 de la constelación está siempre en relación con los mismos satélites 10 y de ese modo la conectividad del conjunto del sistema permanece siempre la misma. Además, el hecho de mantener los enlaces 11 inter-satélites sin corte permite garantizar siempre una velocidad máxima para el tráfico, las comunicaciones entre los abonados en tierra.

Otra ventaja del dispositivo de comunicación 11 inter-satélites según la invención reside en el hecho de que los dos terminales 51 ópticos de enlace 11 inter-satélites de cada grupo G1, G2 son idénticos y por tanto intercambiables. Cada uno de los dos terminales 51 ópticos puede configurarse para funcionar ya sea como terminal de enlace 22 inter-planos o como un terminal de enlace 21 intra-plano. De este modo, cuando uno de los dos terminales 51 ópticos se avería, el terminal óptico restante puede reconfigurarse para sustituir al terminal 51 óptico defectuoso si este último tiene una función más crítica. Además, como los dos terminales 51 ópticos son idénticos, este cambio de función puede hacerse por medio de la programación y por tanto sin reconfiguración física. Esto permite una reconfiguración más flexible y más ligera que puede realizarse por telecomando a partir de tierra.

A título ilustrativo, la figura 5c representa el valor de la amplitud del semi-ángulo  $\theta_m$  en el vértice del campo de visión en función de la distancia entre dos terminales 51 ópticos para dos configuraciones particulares. En una primera configuración, el diámetro  $D$  exterior del terminal 51 óptico es de 20 cm y el diámetro  $\phi$  del haz óptico es de 12,5 cm. Según una segunda configuración, el diámetro  $D$  exterior del terminal 51 óptico es de 25 cm y el diámetro  $\phi$  del haz óptico es de 15 cm.

La figura 6a es una representación gráfica que ilustra la evolución, en función del tiempo, del azimut de un enlace 22 inter-planos para la constelación dada que posee varios planos 25 orbitales y varios satélites 10 por plano 25 orbital, el ángulo azimutal se define con relación al sentido de desplazamiento de los satélites. En este ejemplo, cada satélite 10 recorre su órbita durante un intervalo de tiempo  $T$  de aproximadamente 110 minutos y el azimut  $\theta$  evoluciona entre aproximadamente  $-75^\circ$  y  $+75^\circ$ . De este modo, para esta configuración, el campo 53 de visión del terminal 51 óptico de enlace 22 inter-planos debe por tanto cubrir al menos este intervalo de valores. El azimut del enlace 22 inter-planos pasa por cero cuando los satélites 10 se cruzan en los polos y por unos extremos cuando el satélite 10 pasa por el ecuador.

Con referencia a la figura 6b, en el caso de satélites de la misma constelación, que están a la misma altitud, sobre planos diferentes, con una inclinación exactamente polar, se puede dar una expresión analítica del ángulo azimutal.

Para ello, se consideran dos satélites situados en las posiciones A y B, en dos planos orbitales consecutivos separados en un ángulo  $\alpha$  y se considera  $\beta/2$  el ángulo de desfase entre satélites. Se define la referencia vinculada a la órbita del satélite A por:

O: Centro de la Tierra,  
 X: dirección del nodo ascendente A,  
 Y: normal a la órbita,  
 Z: normal al plano (X, Y).

5 Si se define el plano (A, Va, Na), en el que Va representa la velocidad del satélite A y Na representa la normal órbita en A y si se define B" como la proyección de B en el plano (A, Va, Na), el ángulo de azimut, indicado por  $\theta$ , entre Va y (AB"), ángulo que define la dirección según la que el satélite B es visto por el satélite A, viene dado entonces por la expresión siguiente:

$$\tan \theta = \frac{\cos(\lambda + \beta/2) * \text{sen}(\alpha)}{\cos \lambda * \text{sen}(\lambda + \beta/2) - \text{sen}(\lambda) * \cos(\lambda + \beta/2) * \cos(\alpha)}$$

10 en la que:

- $\alpha$  es el ángulo de separación entre planos orbitales, dicho de otra manera el ángulo, en el plano ecuatorial (X, Y), entre dos planos orbitales vecinos,
- $\beta/2$  es el ángulo de desfase entre los primeros satélites de dos planos consecutivos,
- A es la posición sobre la órbita del satélite A.

15 Considerando la expresión anterior que define el ángulo de azimut  $\theta$ , se debe señalar, como se ilustra en la figura 6a, que en el transcurso de una revolución alrededor de la Tierra, El azimut  $\theta$  varía entre un valor máximo  $\theta_{\text{Máx}}$  y un valor mínimo  $\theta_{\text{Mín}}$  que son función de las posiciones otorgadas a los diferentes satélites en el seno de la constelación.

20 Como consecuencia, es posible así determinar los valores de los parámetros de dimensionamiento del dispositivo de comunicación inter-satélite según la invención definidos anteriormente, a saber la distancia d que separa los dos terminales ópticos de un mismo grupo (G1 o G2), su diámetro D exterior y el diámetro  $\varphi$  del haz óptico, de manera que el semi-ángulo  $\theta_m$  en el vértice del campo de visión sea siempre superior al ángulo azimutal máximo.

25 De este modo, en el caso de una constelación correspondiente al ejemplo de la figura 6a cada terminal 51 óptico dedicado a las comunicaciones inter-planos 22 orbitales puede, por ejemplo, presentar un campo de visión de modo que el semi-ángulo  $\theta_m$  en el vértice de este último, con relación a una recta paralela a la dirección de la trayectoria del satélite 10, sea superior al ángulo azimutal máximo mientras permanece inferior a aproximadamente  $80^\circ$ . Este es por ejemplo el caso en una u otra de las configuraciones ilustradas por la figura 5c.

30 La figura 6c ilustra la evolución, en función del tiempo, del ángulo entre el haz óptico de un enlace intra-plano y el de un enlace inter-planos para un mismo satélite 10 en una configuración idéntica a la configuración anterior. Este ángulo tiene un valor máximo cuando el satélite 10 se sitúa a la altura del ecuador y tiene un valor mínimo cuando el satélite 10 del plano 25 orbital vecino cruza el satélite considerado en la región de los polos. El gráfico muestra que para esta configuración, cualquiera que sea la posición del satélite 10 considerado sobre su órbita la medida del ángulo entre un enlace 21 intra-plano y un enlace 22 inter-planos no es nunca inferior a un valor comprendido entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ . Teniendo en cuenta la divergencia de los haces ópticos de los terminales 51 de enlace 11 inter-satélites, que es del orden de algunos microrradianes a algunas decenas de microrradianes, esta desviación es suficiente para que los haces ópticos no sean colineales y por tanto no interfieran entre sí. De este modo, los dos enlaces 21, 22 pueden mantenerse simultáneamente en las regiones alrededor de los polos sin que los enlaces intra-plano e inter-planos interfieran entre sí.

35 La figura 7 ilustra un ejemplo de evolución de los enlaces 11 inter-satélites con ayuda de terminales 51 ópticos de enlace inter-satélites según la invención en el transcurso de una semi-órbita entre una región alrededor del polo Sur y una región alrededor del polo Norte.

40 De manera ventajosa, cuando el satélite 10 atraviesa un polo, se mantienen siempre los enlaces 11 inter-satélites. De este modo, no es necesario interrumpir la conexión inter-planos orbitales cuando el satélite se aproxima a la región de un polo y a continuación readquirirla cuando sale de esta región. De este modo, se evita tener que desarrollar una fase de apuntado y de adquisición que puede ser larga, con una probabilidad de fracaso durante el restablecimiento del enlace que no es nula, lo que puede también alargar el procedimiento. Se evita igualmente tener que intercambiar informaciones como la posición relativa de los satélites, las efemérides etc...

45 No hay necesidad de actualizar permanentemente la conectividad de la constelación con cada paso por un polo y cada terminal 51 óptico permanece siempre conectado al mismo terminal 51 óptico del satélite 10 vecino. Esto puede permitir simplificar la arquitectura del terminal 51 óptico y/o de los equipos que se le asocian y por tanto reducir su coste.

50 De igual modo, el hecho de que los enlaces 11 inter-satélites se mantengan cualquiera que sea la posición del satélite 10 sobre su órbita permite a la constelación proporcionar siempre una velocidad máxima para las comunicaciones entre los abonados en tierra.

La figura 8 es una representación funcional posible de un terminal óptico 51 de enlace 11 inter-satélites según la invención así como del equipo electrónico con el que coopera. El conjunto puede comprender un procesador 81 de telecomunicación (o OBP por "*On Board Processor*" según la terminología anglosajona) configurado para proporcionar las señales de telecomunicación que debe emitir el terminal 51 óptico de enlace 11 inter-satélites y recibir las señales que recibe dicho terminal 51 óptico. Este procesador 81 puede conectarse con una unidad 82 de comunicación láser configurada para transferir las señales en forma óptica. Esta unidad 82 puede comprender elementos de emisión y recepción óptica, elementos de amplificación, de preamplificación, de detección, de modulación, de demodulación, de multiplexado, de demultiplexado... La unidad de comunicación láser se conecta a su vez al terminal 51 óptico de enlace inter-satélites. El terminal 51 comprende el cabezal óptico y los subconjuntos de apuntado del haz, de deflexión y de orientación para la adquisición y el seguimiento (o PAT por "*Pointing, Acquisition and Tracking*" según la terminología anglosajona) del terminal 51 óptico con el que comunica. Para controlar la unidad 82 de comunicación láser y el terminal 51 óptico el conjunto comprende una unidad 83 de control. Esta unidad 83 de control está configurada para realizar la interfaz entre estas unidades y el computador de abordaje, para gestionar las alimentaciones y coordinar las acciones de las diferentes unidades. Por otra parte, existen diferentes maneras de organizar estas funciones en unidades físicas. Por ejemplo, la unidad de control puede ser común a varios terminales ópticos y por tanto controlar varios cabezales ópticos y varias unidades de comunicación láser.

La figura 9a representa un ejemplo de asignación espectral en longitud de onda para los terminales ópticos de un dispositivo de comunicación inter-satélites según la invención. Los terminales 51 ópticos pueden utilizar las bandas ópticas C o L. Cada terminal 51 óptico de enlace 11 inter-satélites realiza unos enlaces bidireccionales, la banda espectral utilizada puede separarse en dos partes, en dos sub-bandas 91, 92. Se deja libre una banda 93 de guarda entre las dos sub-bandas con el fin de evitar cualquier interferencia.

Según una variante de implementación, las dos sub-bandas 91, 92 pueden utilizar diferentes polarizaciones. Por ejemplo, una primera sub-banda puede utilizar una polarización a derecha y la segunda sub-banda una polarización a izquierda o una polarización horizontal y una polarización vertical.

Los terminales 51 ópticos del dispositivo de comunicación inter-satélite según la invención pueden emitir y recibir los haces ópticos de manera diferente. A título de ejemplo, los terminales 51 ópticos de un primer grupo G1, G2 de terminales pueden utilizar una primera sub-banda 91, 92 en emisión y la segunda sub-banda en recepción. Los terminales del segundo grupo por su parte utilizan la segunda sub-banda 92 en emisión y la primera sub-banda 91 en recepción.

Según un modo de implementación, los terminales 51 ópticos del primer grupo G1 utilizan un primer tipo de polarización en emisión y un segundo tipo de polarización en recepción, utilizando los terminales del segundo grupo G2 el segundo tipo de polarización en emisión y el primer tipo de polarización en recepción.

La figura 9b ilustra un ejemplo de utilización de las sub-bandas 91, 92 por los satélites en el interior de la constelación. Si se considera por ejemplo el satélite número 35, los terminales ópticos colocados por delante de la plataforma emiten utilizando la primera sub-banda 91 y los del grupo colocado por detrás de la plataforma emiten utilizando la segunda sub-banda 92. En la recepción, los terminales ópticos colocados por delante utilizan la segunda sub-banda 92 y los colocados por detrás utilizan la primera sub-banda 91.

La invención tiene igualmente por objeto un satélite 10, por ejemplo de telecomunicación, que comprende una plataforma 50 de satélite sobre la que se dispone un dispositivo de comunicación inter-satélites tal como se ha descrito anteriormente. A título ilustrativo, la figura 10 representa un ejemplo de modo de realización de una plataforma de un satélite de ese tipo según la invención. En este ejemplo en ningún caso limitativo, los cuatro terminales de enlace inter-satélite se colocan en las cuatro esquinas de la plataforma 30 de manera que se maximice el campo 53 de visión de los terminales configurados para los enlaces inter-planos orbitales.

Estos satélites pueden configurarse para evolucionar según una órbita no geoestacionaria. Puede tratarse por ejemplo de una órbita baja, típicamente una órbita inferior a aproximadamente 2.000 kilómetros de altitud o de una órbita media es decir una órbita comprendida entre 2.000 y 36.000 kilómetros de altitud.

Otro objeto de la invención es una constelación de satélites 10 de acuerdo con la invención. Esta constelación polar o cuasi polar comprende varios planos 25 orbitales que se cruzan en la región de los polos, comprendiendo cada plano 25 varios satélites 10 conectados entre sí mediante unos enlaces ópticos 21 intra-plano y/o 22 inter-planos.

50

## REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de comunicación inter-satélites para satélites (10) configurados para evolucionar en el seno de una constelación de satélites, comprendiendo un satélite (10) una plataforma (50) de satélite, incluyendo dicho dispositivo al menos un terminal (51) óptico dedicado, en régimen nominal, a los enlaces (21) de comunicaciones intra-plano orbital y al menos un terminal (51) óptico dedicado, en régimen nominal, a los enlaces (22) de comunicaciones inter-planos orbitales, estando configurado un terminal (51) óptico dedicado a las comunicaciones (21) intra-plano orbital para emitir y recibir señales ópticas con un terminal (51) óptico de un mismo satélite (10) que evoluciona en el mismo plano (25) orbital, estando configurado un terminal (51) óptico dedicado a las comunicaciones (22) inter-planos orbitales para emitir y recibir señales ópticas con un terminal (51) óptico de un mismo satélite (10) de un plano (25) orbital adyacente a todo lo largo de su revolución sobre su plano (25) orbital y estando dicho dispositivo **caracterizado porque**, cada terminal (51) óptico está definido por una envolvente cilíndrica de diámetro D exterior y el semi-ángulo  $\theta_m$  en el vértice del campo 53 de visión del terminal óptico, con relación a una recta (52) paralela a la dirección de la trayectoria del satélite (10), siendo definida en función, del diámetro D exterior y del diámetro  $\phi$  del haz óptico mediante la expresión:

$$\theta_m = \arccos((D + \phi)/2d),$$

la distancia d que separa los dos terminales ópticos se define de manera que el semi-ángulo  $\theta_m$  en el vértice sea superior al valor absoluto máximo del ángulo  $\theta$  azimutal en el transcurso de una revolución alrededor de la Tierra.

2. Dispositivo según la reivindicación 1, en el que dicho dispositivo comprende al menos cuatro terminales (51) ópticos de enlace (11) inter-satélites, formando dichos terminales un primer grupo (G1) de dos terminales (51) ópticos situado por delante de dicho satélite (10) y un segundo grupo (G2) de dos terminales (51) ópticos situado por detrás de dicho satélite (10), cada grupo (G1, G2) de terminales ópticos comprende un terminal (51) óptico dedicado, en régimen nominal, a los enlaces de comunicaciones (21) intra-plano orbital y un terminal (51) óptico dedicado, en régimen nominal, a los enlaces (22) de comunicaciones inter-planos orbitales, estando los dos terminales ópticos que forman un mismo grupo (G1, G2) alineados según un eje sustancialmente perpendicular a la dirección de desplazamiento del satélite.
3. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que los dos terminales (51) ópticos de cada grupo (G1, G2) están colocados en una posición simétrica con relación a un eje (52) paralelo a la dirección de la trayectoria del satélite (10) y que pasa por el centro de la plataforma (50).
4. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que los terminales (51) ópticos son idénticos e intercambiables.
5. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que los enlaces de comunicación (21) intra-plano y (22) inter-planos se transmiten y reciben sobre una banda de longitud de onda dividida en dos sub-bandas (91, 92), emitiendo los terminales (51) ópticos del primer grupo (G1) unos haces ópticos sobre la primera sub-banda (91) y recibiendo unos haces ópticos sobre la segunda sub-banda (92), emitiendo los terminales (51) ópticos del segundo grupo (G2) unos haces ópticos sobre la segunda sub-banda (92) y recibiendo unos haces ópticos sobre la primera sub-banda (91).
6. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que los enlaces de comunicación (21) intra-plano y (22) inter-planos se transmiten y reciben con dos polarizaciones diferentes, emitiendo los terminales (51) ópticos del primer grupo (G1) unos haces ópticos con un primer tipo de polarización y recibiendo unos haces ópticos con el segundo tipo de polarización, emitiendo los terminales (51) ópticos del segundo grupo (G2) unos haces ópticos con el segundo tipo de polarización y recibiendo unos haces ópticos con el primer tipo de polarización.
7. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se emiten y reciben unos haces ópticos sobre la banda óptica C.
8. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que se emiten y reciben unos haces ópticos sobre la banda óptica L.
9. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el satélite evoluciona según una órbita no estacionaria.
10. Satélite (10) configurado para evolucionar en el seno de una constelación de satélites (10) repartidas sobre varios planos orbitales **caracterizado porque** comprende una plataforma (50) de satélite en la que está dispuesto un dispositivo de comunicación inter-satélites según una de las reivindicaciones anteriores.
11. Constelación de satélites **caracterizada porque** comprende una pluralidad de satélites (10) según la reivindicación anterior.

12. Constelación según la reivindicación anterior, en la que dichos satélites (10) evolucionan según una órbita no estacionaria.
13. Constelación según una de las reivindicaciones 11 o 12, en la que dichos satélites (10) evolucionan según una órbita baja.
- 5 14. Constelación según una de las reivindicaciones 11 o 12, en la que dichos satélites (10) evolucionan según una órbita media.

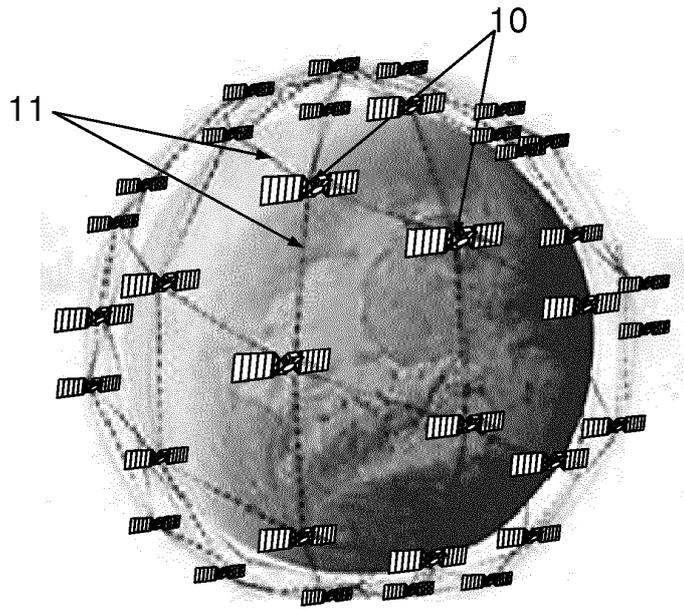


FIG. 1

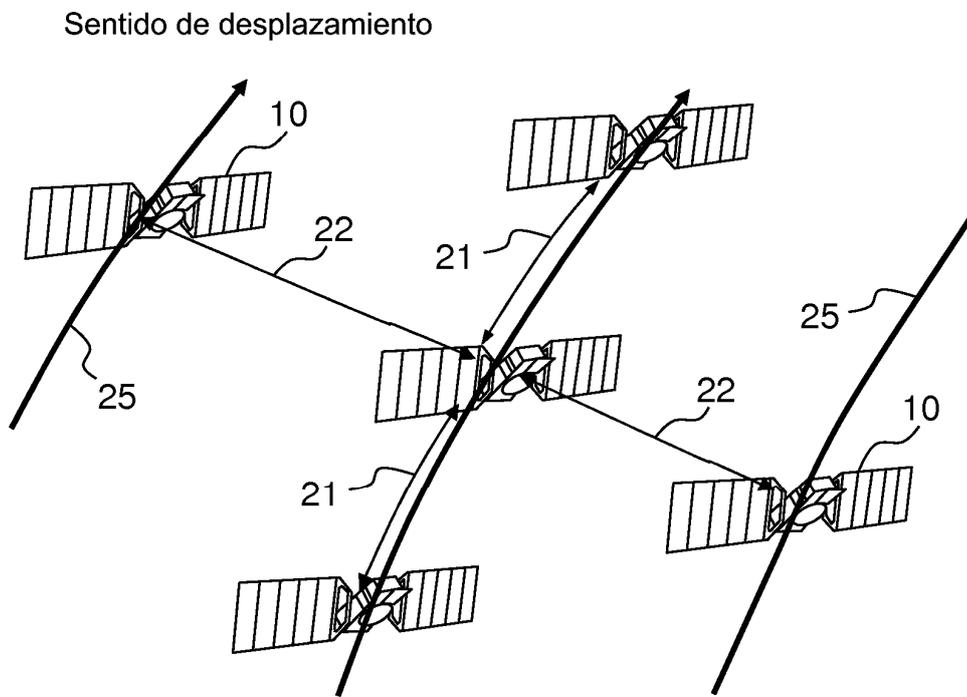
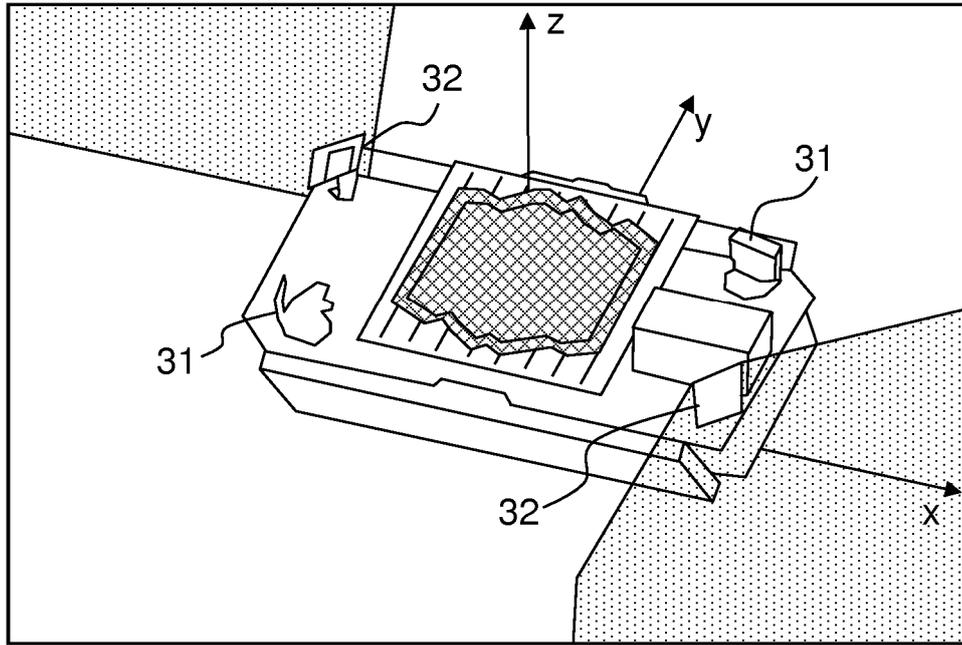


FIG. 2



**FIG.3**  
Técnica anterior

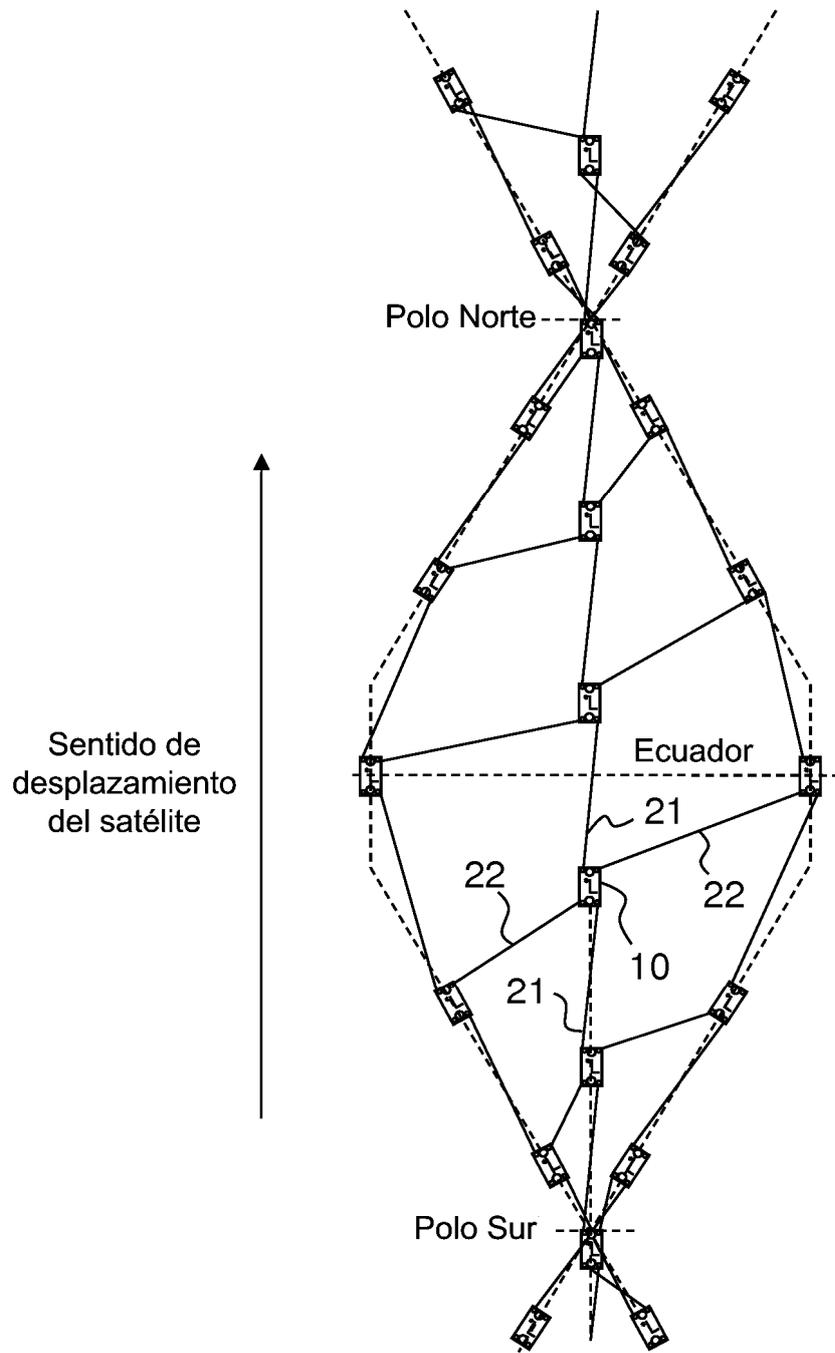


FIG.4

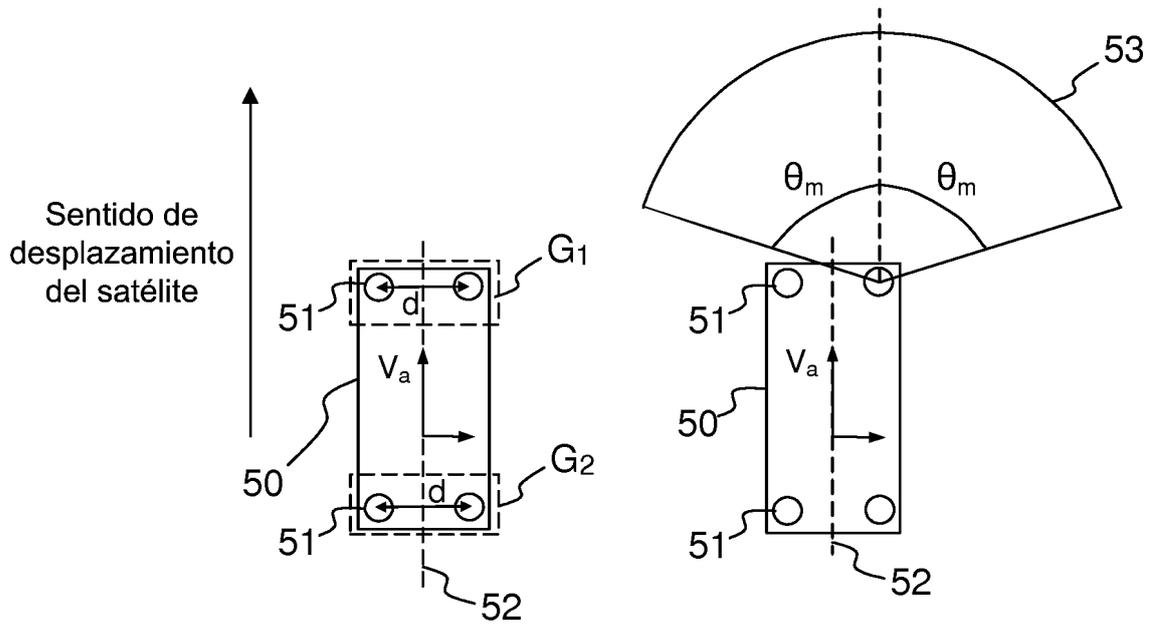
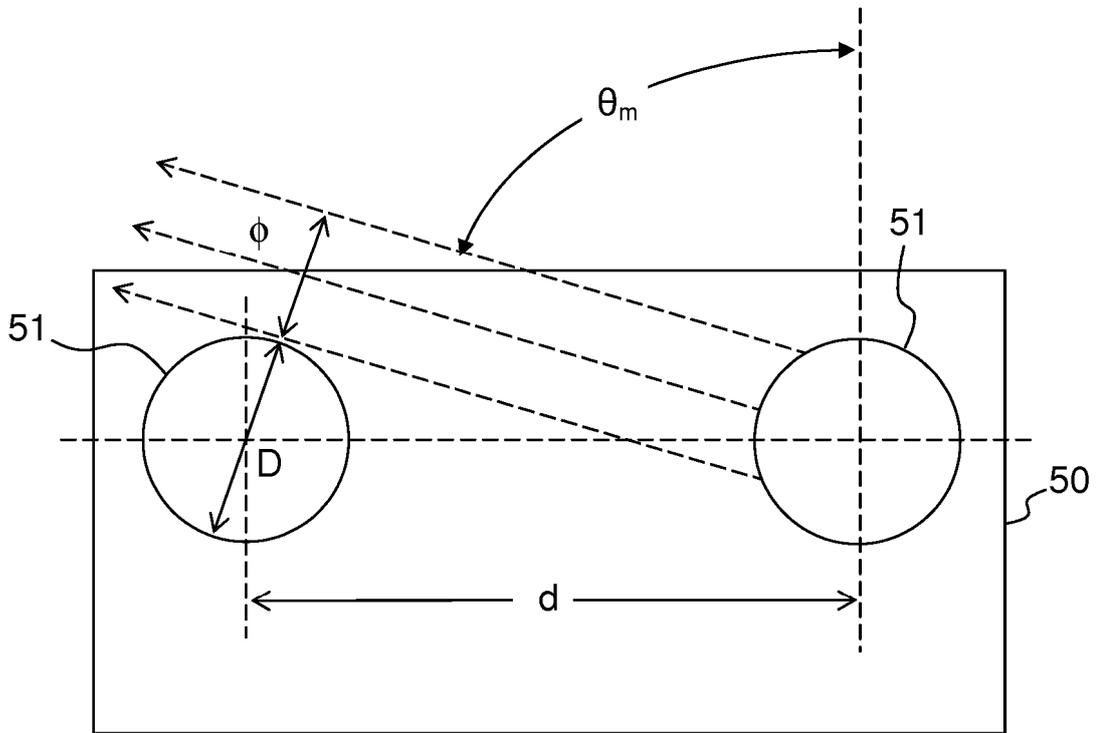


FIG.5a



$$\theta_m = \arccos((D + \Phi) / 2d)$$

FIG.5b

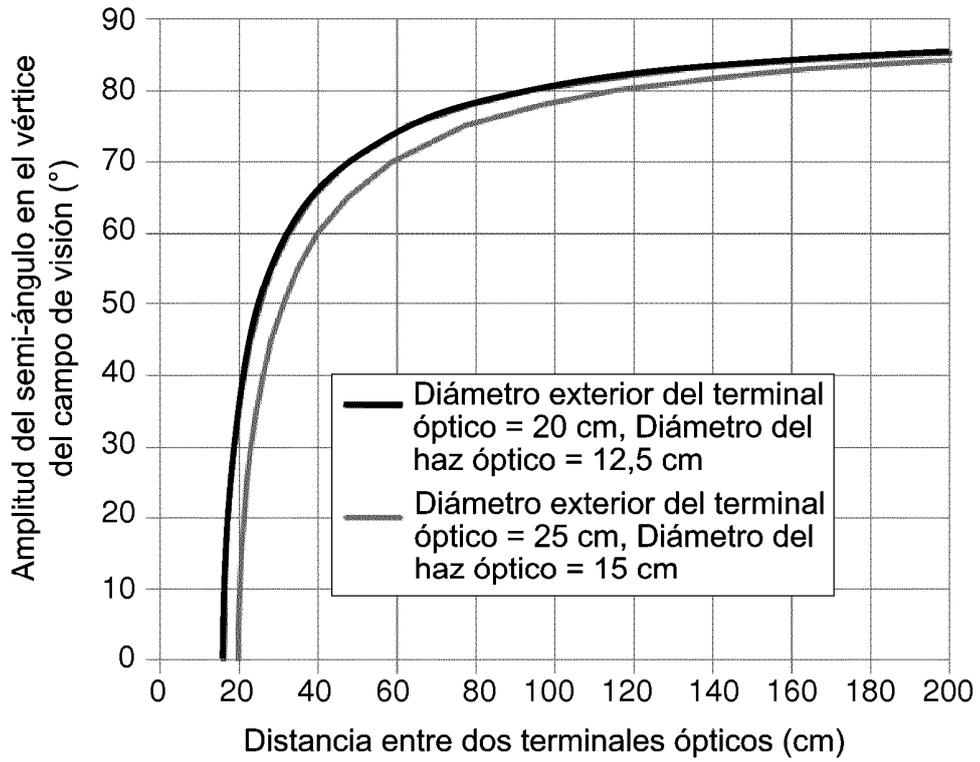


FIG.5c

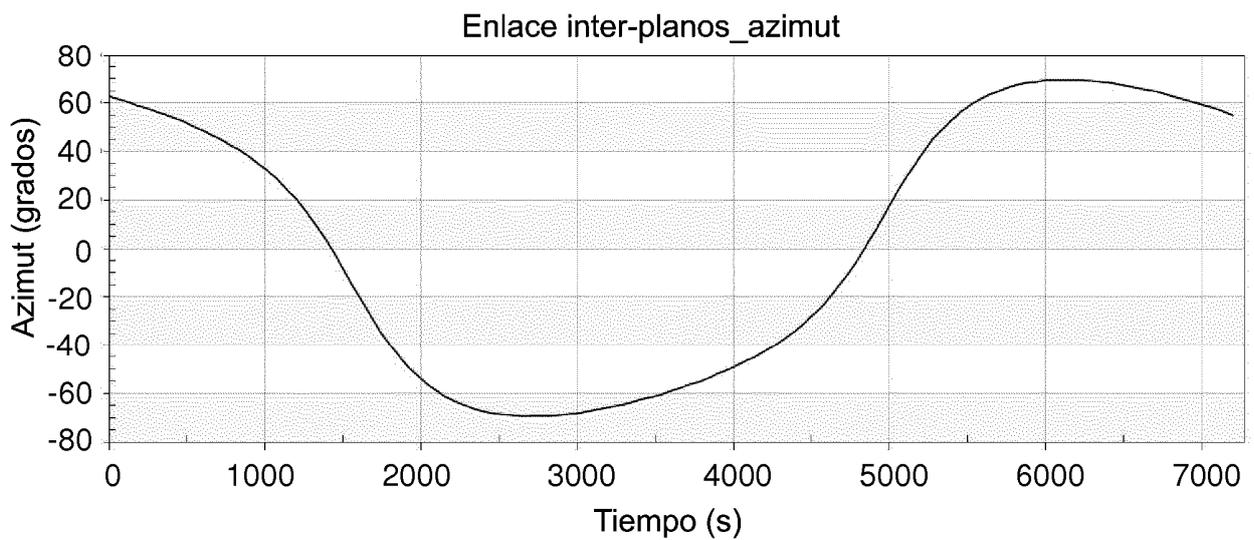


FIG.6a

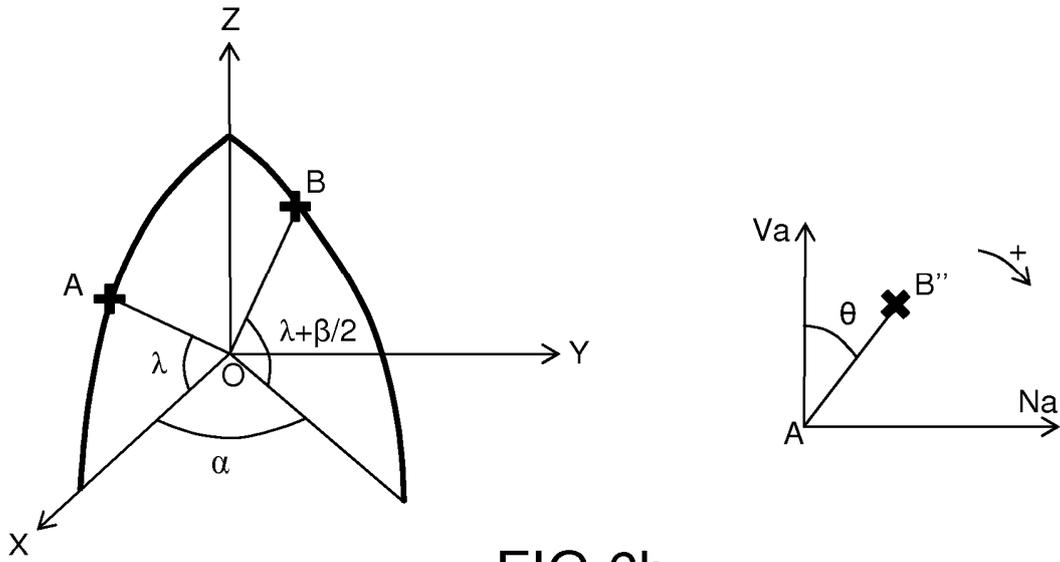


FIG.6b

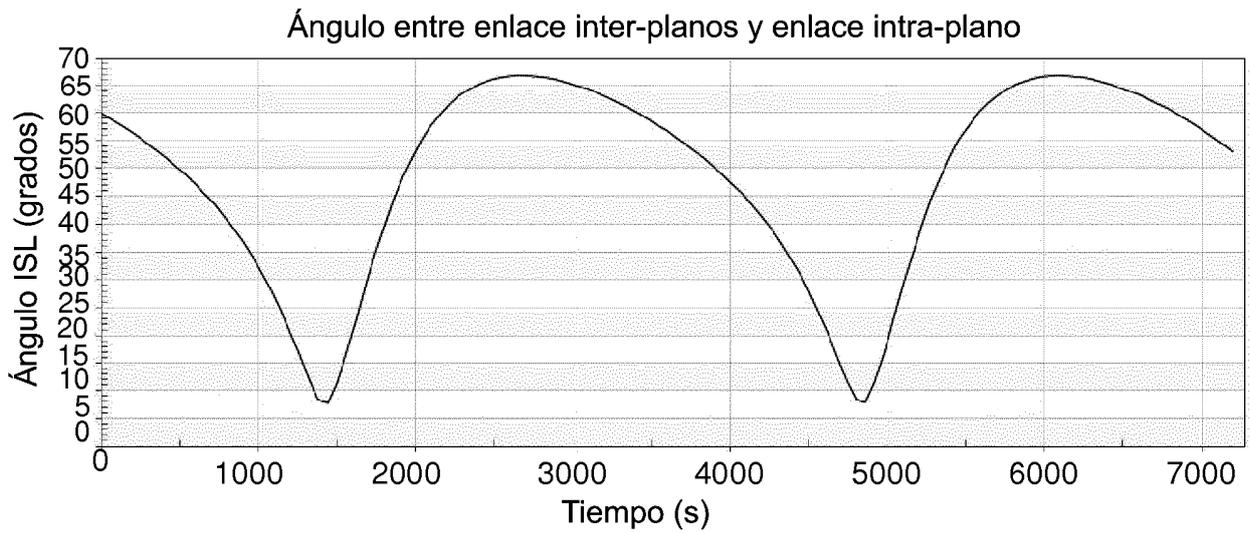


FIG.6c

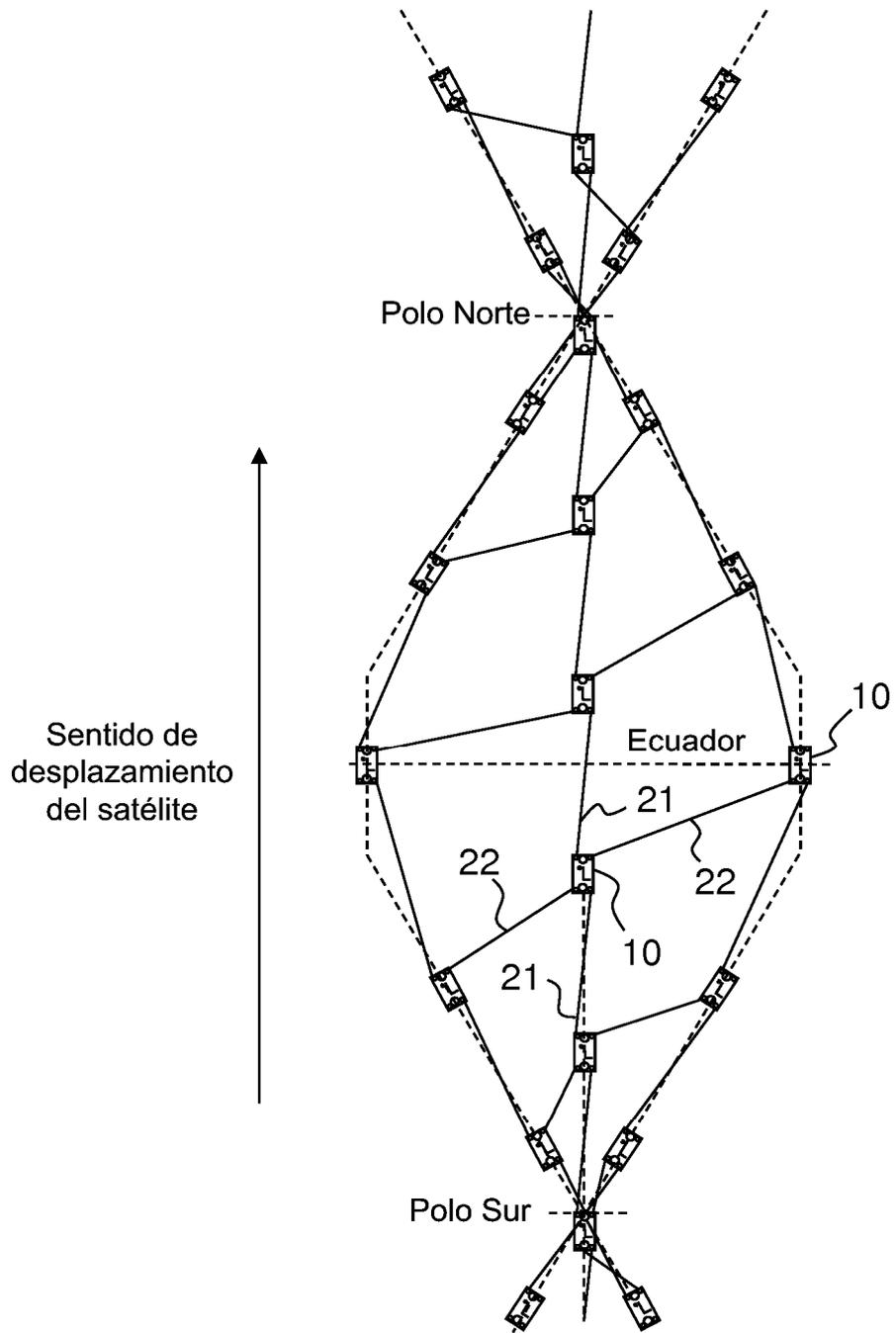


FIG.7

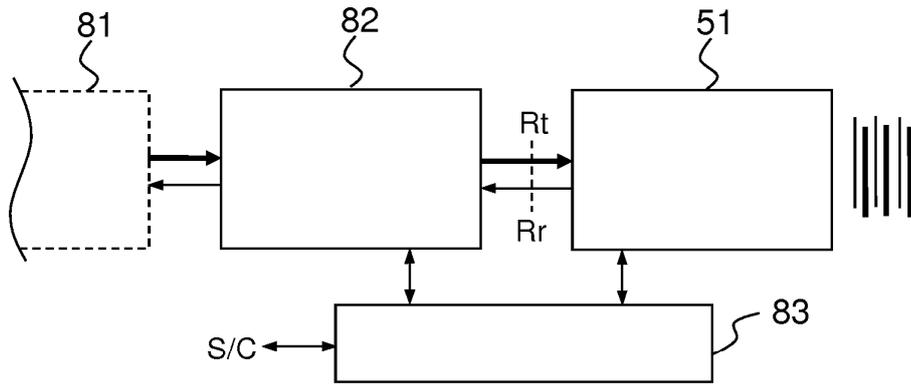


FIG.8

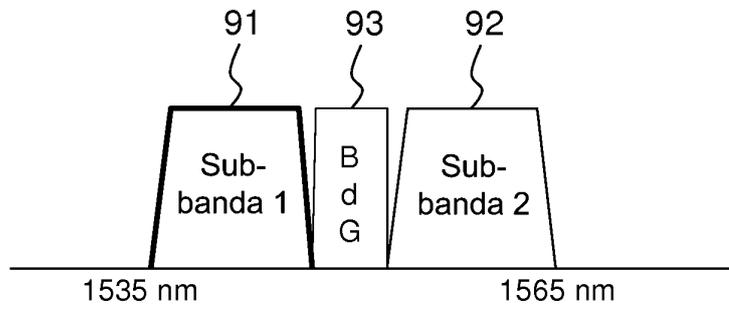


FIG.9a

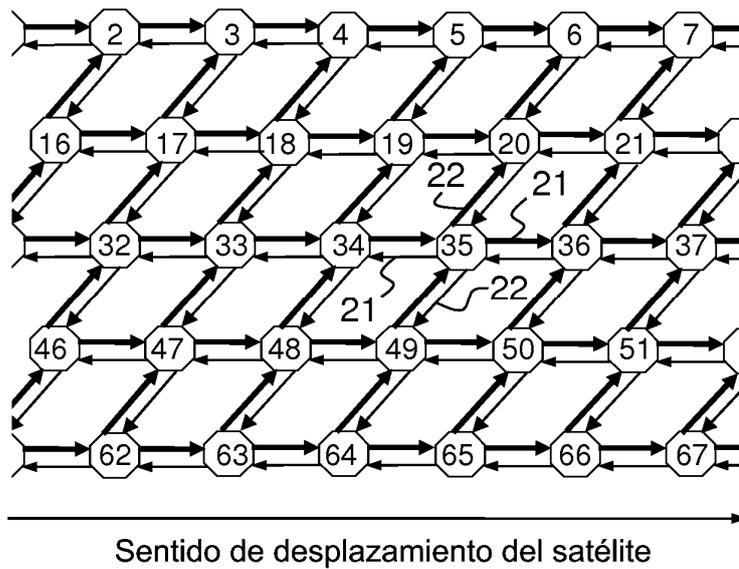


FIG.9b

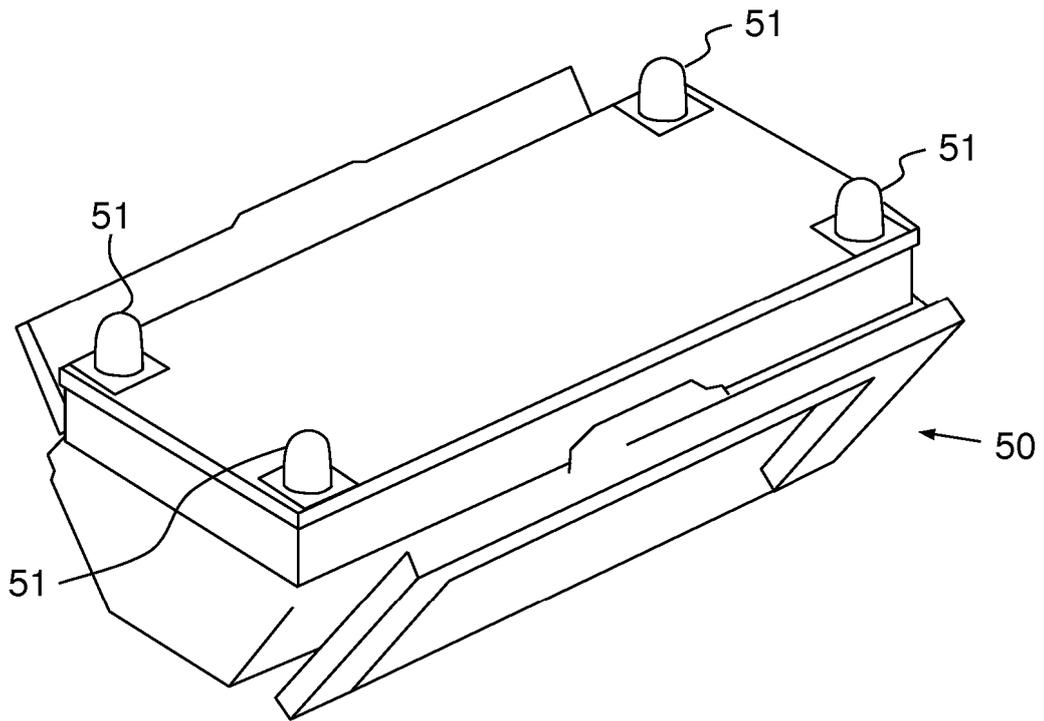


FIG.10