

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 619 948**

51 Int. Cl.:

**G01S 5/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.07.2012 E 12176982 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.01.2017 EP 2549286**

54 Título: **Sistema de navegación para explorar y/o monitorizar entornos desconocidos y/o difíciles**

30 Prioridad:

**18.07.2011 IT TO20110645**

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

**27.06.2017**

73 Titular/es:

**THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON  
UNICO SOCIO (100.0%)  
Via Saccomuro, 24  
Roma, IT**

72 Inventor/es:

**GOTTIFREDI, FRANCO y  
VARRIALE, ENRICO**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 619 948 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

Sistema de navegación para explorar y/o monitorizar entornos desconocidos y/o difíciles

### Campo técnico de invención

5 La presente invención se refiere a un sistema de navegación para explorar y/o monitorizar entornos desconocidos y/o difíciles (o inaccesibles), tales como:

- objetos (o cuerpos) celestes, por ejemplo, planetas, satélites naturales, estrellas y asteroides;
- zonas afectadas por desastres, por ejemplo zonas afectadas por terremotos y/o tsunamis y/o inundaciones y/o implicadas en erupciones volcánicas y/o derrumbamientos; y
- entornos submarinos.

### 10 Estado de la técnica

Tal como se conoce, con el fin de explorar y/o monitorizar entornos desconocidos y/o difíciles (o inaccesibles), por ejemplo con el fin de explorar un planeta extraterrestre, o con el fin de explorar y/o monitorizar una zona submarina, o con el fin de monitorizar una zona afectada por un desastre, actualmente se usan vehículos no tripulados o controlados de manera remota, por ejemplo robots, que están configurados para moverse en dichos entornos y para 15 adquirir datos sobre el entorno circundante durante el movimiento. Por ejemplo, en el campo de la astronáutica se usan vehículos terrestres no tripulados denominados rovers.

En este contexto, la capacidad de un vehículo no tripulado o controlado de manera remota, denominados a continuación en el presente documento, por motivos de simplicidad de la descripción, robot o rover, para determinar su posición mientras está moviéndose, en particular la capacidad para estimar su posición y para determinar la exactitud, es decir la fiabilidad, de esta estimación, es esencial por diversos motivos. 20

En primer lugar, a un robot/rover se le asignan con frecuencia objetivos que deben alcanzarse, que se expresan en cuanto a la posición. Por ejemplo, un robot/rover puede recibir órdenes que le indican que alcance una posición específica, que explore una zona específica, que vuelva a las proximidades de un punto de referencia predefinido, etc.

25 En segundo lugar, la estimación de la posición de un robot/rover y la exactitud, o fiabilidad, de esta estimación están vinculadas con la navegación de largo alcance para la construcción de mapas globales del entorno explorado/monitorizado, para hallar las trayectorias o trayectos que debe seguir el robot/rover y para permitir la supervisión de la misión. En particular, la consistencia espacial de los mapas generados es esencial para un funcionamiento eficiente y robusto del robot/rover y es el conocimiento mismo de la posición del robot/rover lo que 30 garantiza esta consistencia.

Finalmente, la correcta ejecución de las trayectorias geométricas proporcionadas por un planificador de trayectos está vinculada con el conocimiento exacto del movimiento del robot/rover.

Por tanto, la autocalización del robot/rover es uno de los problemas fundamentales que deben abordarse en el campo de la navegación autónoma.

35 Cuando se planifica una misión de exploración/monitorización en entornos desconocidos/difíciles, pueden tenerse en cuenta ventajosamente sistemas de satélites de navegación global (GNSS), tales como los sistemas Galileo, GPS, GLONASS y similares. Sin embargo, en el uso de estos sistemas, también es necesario tener en cuenta las posibles interrupciones del servicio de estos sistemas, el deterioro de las prestaciones en algunos entornos y el hecho de que la exactitud requerida en la localización y navegación de robots/rovers (del orden de un centímetro en determinadas 40 zonas con obstáculos y limitaciones) requiere sistemas diferenciales muy costosos. También en el campo de la astronáutica, en el que, además, las prestaciones son menos rigurosas, es posible concebir el uso de una constelación de satélites artificiales de tipo GNSS que permiten la localización de un rover.

Actualmente se usan diferentes métodos para la autocalización de un robot o de un rover en misiones de exploración/monitorización en entornos desconocidos/difíciles. En particular, con el fin de lograr la autonomía en la 45 navegación de largo alcance de un robot o rover, puede usarse lo siguiente:

- métodos de estimación del movimiento;
- métodos de refinamiento de la posición; y
- métodos de localización absoluta.

50 En detalle, pueden usarse métodos de estimación del movimiento para medir la aceleración, velocidad y desplazamientos entre dos posiciones conocidas integrando datos sin procesar (odometría, navegación inercial,

estimación de movimiento visual, etc.). En métodos de estimación del movimiento, el error sobre la estimación de la posición obtenida aumenta a lo largo del tiempo, independientemente del tipo de movimiento.

5 En vez de eso, los métodos de refinamiento de la posición permiten estimar la posición de un robot o rover (o corregir una estimación de posición inicial) usando modelos del entorno. Estos modelos pueden describir características del entorno útiles para la localización del robot/rover, por ejemplo puntos de referencia, y/o representar con continuidad la geometría del terreno, tal como modelos de elevación digitales (DEM).

Finalmente, los métodos de localización absoluta tienen el objetivo de localizar un robot o rover con respecto a un modelo global inicial del entorno que puede construirse, por ejemplo, basándose en imágenes adquiridas por satélites o en modelos digitales del terreno determinados basándose en dichas imágenes.

10 La siguiente tabla resume el comportamiento del error y la frecuencia de funcionamiento típica de los tres tipos mencionados anteriormente de métodos para la autolocalización de un robot/rover junto con las técnicas que se encuentran dentro de los tres tipos diferentes.

TABLA

TIPO	COMPORTAMIENTO DEL ERROR	FRECUENCIA DE ERROR TÍPICA	TÉCNICAS
Métodos de estimación del movimiento	Aumento ilimitado del error de estimación	10 Hz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navegación inercial</li> <li>• Odometría</li> <li>• Estimación de movimiento por visión estereoscópica</li> </ul>
Métodos de refinamiento de la posición	El error aumenta cuando se exploran nuevas zonas, mientras que disminuye cuando se cruzan zonas ya visitadas	1 Hz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización por puntos de referencia;</li> <li>• Localización basada en DEM;</li> <li>• Indexado de vista panorámica</li> </ul>
Métodos de localización absoluta	Limitado	0,1 Hz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización basada en modelos</li> </ul>

15 Además, también se conocen redes móviles *ad hoc* (MANET) que se adaptan a entornos de redes móviles *ad hoc* que cambian de manera dinámica y proporcionan capacidad de conocimiento de la ubicación. Por ejemplo, el documento US 2007/115895 A1 da a conocer una red MANET híbrida y un método de hacer funcionar la misma, que incluye un nodo de red móvil y una pluralidad de nodos de red estáticos distribuidos aleatoriamente a lo largo de una zona de cobertura con una densidad predeterminada. Los nodos de red estáticos forman un esqueleto de infraestructura estática de la red MANET híbrida. La información sobre la posición de los nodos de red estáticos, o bien mediante conocimiento de la posición o bien mediante triangulación con referencia a los otros nodos estáticos, potencia la función de la red. El método rastrea la posición del nodo móvil con un mínimo de sobrecarga debido a la infraestructura fija de nodos estáticos. La infraestructura puede autorrepararse colocando un exceso de nodos estáticos en un estado en hibernación, y activándolos en respuesta al fallo de un nodo estático cercano.

**Objeto y sumario de la invención**

25 El solicitante ha realizado un estudio en profundidad sobre los sistemas de navegación actualmente usados en misiones de exploración/monitorización en entornos desconocidos/difíciles y, al final de este estudio, constató la necesidad de desarrollar un sistema de navegación innovador para entornos desconocidos y/o difíciles que funcione de manera más fiable y sea más robusto que los actualmente conocidos y que posteriormente pueda usarse ventajosamente para la navegación de un robot/rover en estos entornos, para explorar estos entornos y para monitorizar estos entornos.

Por tanto, el objeto de la presente invención es el de proporcionar un sistema de navegación del tipo anteriormente mencionado.

35 El objeto anteriormente mencionado se logra mediante la presente invención ya que se refiere a un sistema de navegación para misiones de exploración y/o monitorización en entornos desconocidos y/o difíciles, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

En particular, la presente invención se refiere a un sistema de navegación para explorar y/o monitorizar entornos desconocidos y/o difíciles, que comprende:

- un módulo de control de misión diseñado para colocarse en un entorno desconocido y/o difícil y para controlar una misión de exploración y/o monitorización de dicho entorno desconocido y/o difícil;
- un vehículo no tripulado que puede hacerse funcionar para llevar a cabo la misión de exploración y/o monitorización de dicho entorno desconocido y/o difícil;

- un nodo primario acoplado al módulo de control de misión y que comprende una interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva; y
  - una pluralidad de nodos secundarios diseñados para desplegarse en dicho entorno desconocido y/o difícil; incluyendo cada nodo secundario una interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva.
- 5 En detalle, el nodo primario y los nodos secundarios están configurados para formar una red de localización y comunicación jerárquica en la que:
- el nodo primario está asociado con un nivel jerárquico primario y cada nodo secundario está asociado con un nivel jerárquico secundario respectivo menor que el nivel jerárquico primario;
- 10 • cada nodo está configurado para enviar y recibir mensajes a través de la red de localización y comunicación jerárquica usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva;
- cada nodo secundario está configurado para
    - llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia con respecto a, y junto con, otros nodos secundarios asociados con el mismo nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario, y con respecto a, y junto con, otros nodos asociados con niveles jerárquicos adyacentes al nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario, y
  - enviar al nodo primario mensajes relacionados con la distancia referentes a las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicho nodo secundario y mensajes relacionados con la integridad que indican un estado respectivo de integridad operativa de dicho nodo secundario; y
- 15
- el nodo primario está configurado para
    - llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia con respecto a, y junto con, nodos secundarios asociados con un nivel jerárquico secundario inmediatamente inferior al nivel jerárquico primario,
    - calcular, basándose en las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicho nodo primario y los mensajes relacionados con la distancia recibidos desde los nodos secundarios, un sistema de coordenadas de referencia local indicativo de las posiciones de los nodos secundarios con respecto al nodo primario, y
    - determinar un estado de integridad global de la red de localización y comunicación jerárquica basándose en los mensajes relacionados con la integridad recibidos desde los nodos secundarios, las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicho nodo primario y los mensajes relacionados con la distancia recibidos desde los nodos secundarios, siendo dicho estado de integridad global de la red de localización y comunicación jerárquica indicativo de los estados de integridad operativa de los nodos secundarios y de niveles de fiabilidad y exactitud de las posiciones de los nodos secundarios en el sistema de coordenadas de referencia local.
- 20
- 25
- 30

Además, el vehículo no tripulado comprende una unidad de control de vehículo que incluye una interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva y una interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva y que está configurada para recibir datos desde el módulo de control de misión usando la interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva.

35

El módulo de control de misión comprende una interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva y está configurado para enviar datos de misión referentes a la misión de exploración y/o monitorización y datos de navegación referentes al sistema de coordenadas de referencia local y el estado de integridad global de la red de localización y comunicación jerárquica a la unidad de control de vehículo usando la interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva.

40

Finalmente, la unidad de control de vehículo está configurada además para:

- llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia con respecto a, y junto con, uno o más nodos de la red de localización y comunicación jerárquica;
  - calcular una posición del vehículo no tripulado en el sistema de coordenadas de referencia local basándose en los datos de navegación recibidos desde el módulo de control de misión y en las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicha unidad de control de vehículo; y
  - pilotar el vehículo no tripulado en dicho entorno desconocido y/o difícil basándose en los datos de misión y en los datos de navegación recibidos desde el módulo de control de misión, las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicha unidad de control de vehículo y la posición del vehículo no tripulado en el sistema de coordenadas de referencia local.
- 45
- 50

#### Breve descripción de los dibujos

Para una mejor comprensión de la presente invención, ahora se ilustrarán algunas realizaciones preferidas, proporcionadas a modo de ejemplo explicativo y no limitativo, con referencia a los dibujos adjuntos (no a escala), en los que:

- 5 • la figura 1 muestra esquemáticamente ejemplos de comunicaciones de radio realizadas en un sistema de navegación según una realización preferida de la presente invención;
- la figura 2 muestra esquemáticamente la entrada de un vehículo espacial en la atmósfera de un planeta extraterrestre, y el descenso y aterrizaje del vehículo espacial en el planeta extraterrestre;
- 10 • la figura 3 muestra esquemáticamente la liberación de dispositivos de comunicación inalámbrica durante el descenso de un vehículo espacial en un planeta extraterrestre según una realización preferida de la presente invención;
- la figura 4 muestra esquemáticamente un ejemplo de protocolo de comunicación que puede usarse según una realización preferida de la presente invención para activar y configurar un dispositivo de comunicación inalámbrica; y
- la figura 5 muestra esquemáticamente un cálculo de coordenadas de un dispositivo de comunicación inalámbrica según una realización preferida de la presente invención.

### 15 **Descripción detallada de realizaciones preferidas de la invención**

La siguiente descripción se proporciona para permitir que un experto en el campo realice y use la invención. Diversas modificaciones a las realizaciones presentadas resultarán fácilmente evidentes para los expertos y los principios generales dados a conocer en el presente documento también pueden aplicarse a otras realizaciones y aplicaciones, sin apartarse sin embargo del alcance de protección de la presente invención.

- 20 Por tanto, la presente invención no debe considerarse limitada únicamente a las realizaciones descritas e ilustradas, sino que se le debe conceder el mayor alcance de protección compatible con los principios y características presentados en el presente documento y definidos en las reivindicaciones adjuntas.

25 En particular, a continuación en el presente documento, por motivos de simplicidad de la descripción, se describirá una realización preferida de la presente invención que se refiere a la navegación de un rover, es decir un vehículo terrestre no tripulado, en un planeta extraterrestre, pero, tal como se mencionó anteriormente, la presente invención no debe considerarse limitada únicamente a esta realización preferida. De hecho, la presente invención puede usarse ventajosamente para:

- 30 • la navegación de cualquier tipo de vehículo, no tripulado o controlado de manera remota, que está configurado para moverse sobre superficies y/o por debajo del agua; y
- la localización y/o navegación en y/o exploración y/o monitorización de, cualquier entorno desconocido y/o difícil (o inaccesible), tal como
  - un objeto (o cuerpo) celeste, tal como un planeta, un satélite natural o un asteroide,
  - una zona afectada por un desastre, por ejemplo una zona afectada por un terremoto y/o un tsunami y/o inundación y/o implicada en una erupción volcánica y/o un derrumbamiento,
  - 35 - un entorno submarino, etc.

Tal como se mencionó anteriormente, una realización preferida de la presente invención se refiere a un sistema de navegación para un rover que funciona en un planeta extraterrestre.

En particular, dicho sistema de navegación comprende:

- 40 • un módulo de descenso que, tal como se conoce, es un módulo espacial, o una nave espacial, que desciende y aterriza sobre la superficie de un cuerpo celeste, es decir, en el caso en cuestión, sobre la superficie de un planeta extraterrestre, y que, según la realización preferida de la presente invención, está equipado con una primera interfaz de radio de corto alcance basada en tecnología de banda ultra ancha (UWB) y con una segunda interfaz de radio de largo alcance que también puede basarse en tecnología de banda ultra ancha (UWB) o puede basarse en una tecnología de radiocomunicación diferente;
- 45 • al menos un rover, es decir un vehículo terrestre no tripulado, que está configurado para moverse sobre la superficie del planeta extraterrestre y está equipado con una primera interfaz de radio de corto alcance basada en tecnología de UWB y con una segunda interfaz de radio de largo alcance basada en la misma tecnología de radiocomunicación que la segunda interfaz de radio de largo alcance del módulo de descenso (UWB u otra tecnología de radiocomunicación); y
- 50 • una pluralidad de dispositivos de comunicación inalámbrica que a continuación en el presente documento se

denominarán, por motivos de simplicidad de la descripción, dispositivos inalámbricos, que están equipados cada uno con una interfaz de radio de corto alcance respectiva basada en tecnología de UWB, y que están previstos, en uso, para desplegarse en una zona de la superficie del planeta extraterrestre que representa la zona de funcionamiento del sistema de navegación, es decir la zona en la que el sistema de navegación proporciona al rover el servicio de localización y navegación.

En el texto a continuación, por motivos de simplicidad de la descripción, se hará referencia a un único rover, se entenderá que la descripción referente a la navegación de un único rover puede extenderse a la navegación de una pluralidad de rovers y, más en general, a la navegación de una pluralidad de vehículos no tripulados o controlados de manera remota que están configurados para moverse sobre superficies y/o debajo del agua.

Además, a continuación en el presente documento se describirá en detalle el funcionamiento del sistema de navegación según la realización preferida de la presente invención, presentando las diversas funcionalidades de cada componente de dicho sistema. En particular, a continuación en el presente documento las diversas funcionalidades de cada componente del sistema de navegación se describirán a menudo, por motivos de simplicidad de la descripción, como implementadas por el componente en su conjunto, por ejemplo a continuación en el presente documento a menudo se describirán las funcionalidades implementadas por el módulo de descenso en su conjunto y las funcionalidades implementadas por el rover en su conjunto. Con respecto a esto, es importante entender que, con el fin de definir y proporcionar una comprensión de la presente invención, es esencial describir las funcionalidades implementadas por cada componente y que, tras haberse descrito estas funcionalidades, el tipo de arquitectura de hardware y software que permite que este componente implemente la funcionalidad respectiva quedará claro para el experto en el campo. Por ejemplo, al final de la siguiente descripción quedará claro para el experto en el campo que, con el fin de implementar las funcionalidades respectivas, el módulo de descenso puede comprender ventajosamente:

- un aparato de comunicación que incluye la primera interfaz de radio de corto alcance respectiva basada en tecnología de UWB y la segunda interfaz de radio de largo alcance respectiva, y que está configurado para usar estas interfaces para comunicarse con, enviar órdenes a, e intercambiar datos con, el/los rover(s) y los dispositivos inalámbricos tal como se describirá a continuación en el presente documento;

- una unidad de procesamiento de datos configurada para llevar a cabo el procesamiento y los cálculos que se describirán a continuación en el presente documento en relación al módulo de descenso;

- una unidad de control de misión configurada para monitorizar y controlar la misión del/de los rover(s) basándose en la información proporcionada por el/los rover(s) y en la información obtenida a través del sistema de navegación tal como se describirá a continuación en el presente documento;

- etc.

De la misma manera, al final de la siguiente descripción, quedará claro para el experto en el campo que cada rover, con el fin de implementar las funcionalidades respectivas, puede comprender ventajosamente:

- un aparato de comunicación respectivo que incluye la primera interfaz de radio de corto alcance respectiva basada en tecnología de UWB y la segunda interfaz de radio de largo alcance respectiva, y que está configurado para usar estas interfaces para comunicarse e intercambiar datos con el módulo de descenso y los dispositivos inalámbricos tal como se describirá a continuación en el presente documento;

- una unidad de procesamiento de datos respectiva para llevar a cabo procesamiento y cálculos tal como se describirá a continuación en el presente documento;

- una unidad de control de vehículo respectiva configurada para pilotar el rover basándose en la información obtenida a través del sistema de navegación tal como se describirá a continuación en el presente documento;

- etc.

Volviendo ahora a la descripción del sistema de navegación según la realización preferida de la presente invención, el módulo de descenso y los dispositivos inalámbricos están configurados para formar una red de localización y comunicación jerárquica que funciona como un sistema de localización para el rover. En esta red de localización y comunicación jerárquica el módulo de descenso calcula, tal como se explicará en detalle a continuación en el presente documento, un sistema de referencia local basándose en la distancia o el alcance, mediciones que calcula cada dispositivo inalámbrico con respecto a los dispositivos inalámbricos con los que dicho dispositivo inalámbrico puede establecer una comunicación inalámbrica a través de la interfaz de radio de corto alcance basada en tecnología de UWB (posicionamiento cooperativo). El rover se considera un "nodo dinámico" de la red de localización y comunicación jerárquica y puede recuperar su posición en el sistema de referencia local tanto calculando su posición de manera autónoma como recibiendo información y datos desde la unidad de procesamiento de datos del módulo de descenso.

Más en detalle, el módulo de descenso funciona como nodo primario de la red de localización y comunicación

- jerárquica y representa el origen del sistema de referencia local. El rover se comunica, a través de la interfaz de radio de corto alcance basada en tecnología de UWB, con los dispositivos inalámbricos con el fin de determinar su posición en el sistema de referencia local. En particular, la posición del rover se determina en el sistema de referencia local y, si el módulo de descenso está indicado en un sistema de referencia global, por ejemplo un sistema de referencia planetario, entonces también puede calcularse la posición del rover en el sistema de referencia global. Esta capacidad conduce a la posibilidad de indicar la posición del rover con respecto a un sistema de referencia planetario y, por tanto, a la posibilidad de indicar, con respecto a un sistema de referencia planetario, también la información y los datos, en cuanto a la posición, recopilados por cualquier sensor con el que puedan estar ventajosamente equipados el módulo de descenso, el rover y los dispositivos inalámbricos.
- 5
- 10 El protocolo de comunicación usado por los dispositivos inalámbricos hace posible:
- calcular el sistema de referencia local requerido para la navegación del rover en la zona de funcionamiento del sistema de navegación;
  - dotar al rover de la información útil para calcular su posición en la zona de funcionamiento del sistema de navegación;
- 15
- optimizar el acceso al canal de radio basándose en tecnología de UWB y usar los recursos de radio de los dispositivos inalámbricos;
  - implementar mecanismos que permiten que la red de localización y comunicación jerárquica funcione como red de comunicación de respaldo para la transferencia de datos y/o información entre el rover y el módulo de descenso;
  - monitorizar el estado de los dispositivos inalámbricos individuales;
- 20
- proporcionar los datos necesarios para calcular la integridad del sistema de navegación; e
  - implementar las funcionalidades de barrera lógica para delimitar la zona de funcionamiento del sistema de navegación y para proporcionar alarmas de proximidad al rover con el fin de prevenir colisiones.
- Además, el protocolo de comunicación usado por los dispositivos inalámbricos permite que cada dispositivo inalámbrico se comunique con el módulo de descenso a través de un mecanismo de enrutamiento que usa dispositivos inalámbricos intermedios (mecanismo de enrutamiento de “múltiples saltos”) en el caso en el que el módulo de descenso esté fuera del alcance de comunicación directa de la interfaz de radio de corto alcance basada en tecnología de UWB de dicho dispositivo inalámbrico.
- 25
- El sistema de navegación implementa un concepto de cálculo centralizado con el fin de minimizar el consumo de energía de los dispositivos inalámbricos. De hecho, la unidad de procesamiento de datos del módulo de descenso lleva a cabo cálculos que son más costosos en cuanto al poder de cálculo requerido, tales como:
- 30
- cálculo de la geometría del sistema de referencia local basándose en la información enviada por los dispositivos inalámbricos individuales;
  - cálculo de los trayectos de enrutamiento; y
  - determinación del estado de integridad del sistema de navegación.
- 35
- Además, la unidad de procesamiento de datos del módulo de descenso también puede proporcionar ventajosamente un cálculo auxiliar/complementario de la posición del rover basándose en las señales que recibe el rover desde los dispositivos inalámbricos, por ejemplo en el caso en el que el rover requiera ahorrar energía o en el caso en el que los recursos de cálculo del rover deban desviarse a otras tareas.
- El sistema de navegación usa dos canales de radiocomunicación diferentes:
- 40
- un primer canal de radio basado en tecnología de UWB que se usa para las mediciones de distancia llevadas a cabo por los dispositivos inalámbricos y para comunicaciones entre dispositivos inalámbricos, para las mediciones de distancia llevadas a cabo de manera cooperativa por los dispositivos inalámbricos y por el módulo de descenso, para comunicaciones entre los dispositivos inalámbricos y el módulo de descenso, y para comunicaciones entre los dispositivos inalámbricos y el rover; el primer canal de radio también puede usarse ventajosamente como canal redundante para transferir datos entre el rover y el módulo de descenso; cada dispositivo inalámbrico accede al primer canal de radio usando la interfaz de radio de corto alcance respectiva basada en tecnología de UWB; el módulo de descenso y el rover acceden al primer canal de radio cada uno usando la primera interfaz de radio de corto alcance respectiva basada en tecnología de UWB; y
- 45
- un segundo canal de radio que se usa para comunicaciones entre el módulo de descenso y el rover; el módulo de descenso y el rover acceden al segundo canal de radio usando cada uno la segunda interfaz de radio de largo alcance respectiva; las características del segundo canal de radio (banda, modulación, codificación, potencia, etc.) dependen del tipo de misión y permiten que el módulo de descenso se comunique con el rover en toda la zona cubierta por el
- 50

5 primer canal de radio más un margen de seguridad que depende de los parámetros de la misión (por ejemplo, la  
 10 velocidad del rover, el retardo con el que se procesan órdenes, etc.); dado que la tecnología de UWB también puede  
 usarse para comunicaciones de largo alcance, las segundas interfaces de radio de largo alcance del módulo de  
 descenso y del rover, tal como se describió anteriormente, también pueden basarse en tecnología de UWB y, por  
 15 tanto, el segundo canal de radio también puede basarse en tecnología de UWB; en el caso en el que las segundas  
 interfaces de radio de largo alcance del módulo de descenso y del rover también se basen en tecnología de UWB,  
 estas interfaces no serán adecuadas para realizar mediciones de distancia precisas y por consiguiente no se usarán  
 para este fin; por tanto, con el fin de implementar la presente invención, es posible usar, por motivos de  
 eficiencia/simplicidad del diseño y/o consumo de energía, una infraestructura radiocomunicación de UWB doble: una  
 20 primera infraestructura de radiocomunicación de UWB de corto alcance para mediciones de distancia y  
 comunicaciones de corto alcance, y una segunda infraestructura de radiocomunicación de UWB para  
 comunicaciones de largo alcance y sin necesidad de enrutamiento; además, en el caso en el que las segundas  
 interfaces de radio de largo alcance del módulo de descenso y del rover también se basen en tecnología de UWB,  
 25 pueden usarse ventajosamente diferentes modulaciones y/o diferentes potencias de transmisión en dos canales de  
 radio con el fin de minimizar la interferencia mutua; en cualquier caso, de nuevo tal como se describió anteriormente,  
 las segundas interfaces de radio de largo alcance del módulo de descenso y del rover (y, por tanto, el segundo canal  
 de radio) pueden basarse en una tecnología de radiocomunicación diferente; por ejemplo, las segundas interfaces  
 de radio de largo alcance del módulo de descenso y del rover pueden ser ventajosamente las usadas normalmente  
 en misiones de exploración para el intercambio de datos entre módulo de descenso y rover.

30 La figura 1 muestra esquemáticamente ejemplos de comunicaciones de radio basados en los dos canales de radio  
 anteriormente mencionados.

En particular, la figura 1 muestra:

- el módulo de descenso (indicado con 11);
  - el rover (indicado con 12);
  - 35 • los dispositivos inalámbricos (indicados con 13) desplegados sobre la superficie del planeta extraterrestre;
  - una primera zona de cobertura de radio (representada por un primer círculo indicado en su conjunto con 14), que  
 40 representa la zona cubierta por el primer canal de radio para las comunicaciones basadas en tecnología de UWB del  
 módulo de descenso 11;
  - una segunda zona de cobertura de radio (representada por un segundo círculo indicado en su conjunto con 15),  
 45 que representa la zona cubierta por el primer canal de radio para las comunicaciones basadas en tecnología de  
 UWB del rover 12;
  - una tercera zona de cobertura de radio (representada por un tercer círculo indicado en su conjunto con 16), que  
 50 representa la zona cubierta por el segundo canal de radio para las comunicaciones de largo alcance entre el módulo  
 de descenso 11 y el rover 12;
  - una primera radiocomunicación bidireccional (representada por una primera flecha de puntos bidireccional) basada  
 55 en tecnología de UWB, es decir llevada a cabo en el primer canal de radio, entre el módulo de descenso 11 y un  
 primer dispositivo inalámbrico 13 que se encuentra dentro de la primera zona de cobertura 14;
  - segundas comunicaciones de radio bidireccionales (representadas por segundas flechas de puntos bidireccionales)  
 basadas en tecnología de UWB, es decir llevadas a cabo en el primer canal de radio, entre segundos dispositivos  
 inalámbricos 13 que se encuentran dentro de la segunda zona de cobertura 15 y entre el rover 12 y dichos segundos  
 dispositivos inalámbricos 13;
  - una tercera radiocomunicación bidireccional (representada por una flecha de puntos y rayas bidireccional) llevada a  
 cabo en el segundo canal de radio entre el módulo de descenso 11 y el rover 12; y
  - cuartas comunicaciones de radio bidireccionales (representadas por flechas de rayas bidireccionales) entre el  
 60 módulo de descenso 11 y los segundos dispositivos inalámbricos 13 que se encuentran dentro de la segunda zona  
 de cobertura 15; dichas cuartas comunicaciones de radio bidireccionales se basan en tecnología de UWB, es decir  
 se llevan a cabo en el primer canal de radio, y se implementan mediante el mecanismo de enrutamiento de múltiples  
 saltos (que se introdujo anteriormente y que se describirá en detalle a continuación en el presente documento) de la  
 red de localización y comunicación jerárquica.
- En la figura 1 puede observarse que algunos dispositivos inalámbricos 13 también pueden estar fuera de la tercera  
 zona de cobertura de radio 16, es decir más allá del límite de cobertura proporcionado por el segundo canal de  
 radio. Esta condición no representa una anomalía ya que el sistema de navegación puede usar estos dispositivos  
 inalámbricos 13 tanto para operaciones normales (las que tienen lugar en el alcance de cobertura del segundo canal  
 de radio), así como de sistema de seguridad para condiciones de emergencia en el caso en el que el rover 12 esté  
 65 ubicado fuera del alcance del segundo canal de radio (por ejemplo, debido a errores en el procesamiento de órdenes

o debido a una disminución en la potencia de transmisión del módulo de descenso 11 y/o del rover 12).

Preferiblemente, los dispositivos inalámbricos se despliegan sobre la superficie del planeta extraterrestre durante el descenso del módulo de descenso en el planeta extraterrestre. Con respecto a esto, la figura 2 muestra, esquemáticamente y simplemente a modo de ejemplo, la entrada del módulo de descenso en la atmósfera del planeta extraterrestre, y el descenso y aterrizaje del módulo de descenso en el planeta extraterrestre.

En particular, la figura 2 muestra:

- una primera etapa (indicada con 21) en la que un módulo espacial que comprende el módulo de descenso entra en la atmósfera del planeta extraterrestre; en esta primera etapa 21 hay 5 minutos hasta tomar tierra y el módulo espacial está a una altura de 125 km desde la superficie del planeta extraterrestre y tiene una velocidad de 6.900 m/s;

- una segunda etapa (indicada con 22) en la que el módulo espacial despliega un paracaídas; en esta segunda etapa 22 quedan 2 minutos hasta tomar tierra y el módulo espacial está a una altura de 8.800 m desde la superficie del planeta extraterrestre y tiene una velocidad de 490 m/s;

- una tercera etapa (indicada con 23) en la que el módulo espacial libera un escudo térmico; en esta tercera etapa 23 quedan 110 segundos hasta tomar tierra y el módulo espacial está a una altura de 7.500 m desde la superficie del planeta extraterrestre y tiene una velocidad de 250 m/s;

- una cuarta etapa (indicada con 24) en la que el módulo de descenso se libera del módulo espacial; en esta cuarta etapa 24 quedan 35 segundos hasta tomar tierra y el módulo de descenso está a una altura de 1.300 m desde la superficie del planeta extraterrestre y tiene una velocidad de 80 m/s; y

- una quinta etapa (indicada con 25) en la que el módulo de descenso aterriza sobre la superficie del planeta extraterrestre con una velocidad de 2,5 m/s.

Tal como se describió anteriormente, los dispositivos inalámbricos se liberan preferiblemente durante el descenso del módulo de descenso en el planeta extraterrestre a diferentes alturas de tal manera que se cubre una zona en tierra de la dimensión necesaria para la misión de exploración del rover. La zona en tierra cubierta por los dispositivos inalámbricos es la zona de funcionamiento, o zona de servicio, en la que el sistema de navegación proporciona sus capacidades para determinar la posición del rover. Además, la red de los dispositivos inalámbricos puede expandirse ventajosamente mediante dispositivos inalámbricos adicionales liberados por el rover durante su movimiento sobre la superficie del planeta extraterrestre con el fin de extender y mejorar la cobertura, prestaciones e integridad del servicio de localización y navegación. Por tanto, en resumen, el despliegue de los dispositivos inalámbricos, que determina la zona de servicio y las prestaciones del sistema de navegación, puede implementarse:

- durante las etapas de entrada, descenso y aterrizaje (EDL) del módulo de descenso; y/o
- por el rover durante su misión de exploración del planeta extraterrestre.

Con respecto a esto, la figura 3 muestra, esquemáticamente y simplemente a modo de ejemplo, la liberación de dispositivos inalámbricos durante el descenso del módulo de descenso sobre el planeta extraterrestre, en particular en una etapa de descenso comprendida entre la segunda etapa 22 y la cuarta etapa 24 mostradas en la figura 2.

En detalle, la figura 3 muestra:

- el módulo espacial (indicado con 31) que comprende el módulo de descenso y que está descendiendo sobre la superficie del planeta extraterrestre; y

- una pluralidad de dispositivos inalámbricos (indicados con 32) liberados por el módulo espacial 31 durante el descenso.

Tal como se describió anteriormente, el despliegue de los dispositivos inalámbricos durante las etapas de EDL determina la zona de servicio del sistema de navegación. Por tanto, al llevar a cabo este despliegue es importante tener en cuenta la distribución geométrica de los dispositivos inalámbricos y su distancia mutua sobre la superficie del planeta extraterrestre.

En particular, la distancia prevista de los dispositivos inalámbricos desde la vertical de la posición del módulo de descenso durante las etapas de EDL puede determinarse ventajosamente de manera preliminar durante la etapa de planificación de la misión con el fin de definir la zona de servicio del sistema de navegación y la densidad de los dispositivos inalámbricos.

Por ejemplo, con el fin de obtener, usando 70 dispositivos inalámbricos, una zona de servicio de aproximadamente 1,5 km de diámetro con una distancia promedio entre dispositivos inalámbricos de aproximadamente 200 m, dichos dispositivos inalámbricos pueden liberarse ventajosamente durante las etapas de EDL del módulo de descenso de la

siguiente manera:

- 30 dispositivos inalámbricos liberados a una altura de 6.000 m desde la superficie del planeta extraterrestre;
  - 20 dispositivos inalámbricos liberados a una altura de 3.000 m desde la superficie del planeta extraterrestre;
  - 15 dispositivos inalámbricos liberados a una altura de 2.000 m desde la superficie del planeta extraterrestre; y
- 5 • 5 dispositivos inalámbricos liberados a una altura de 1.000 m desde la superficie del planeta extraterrestre.

Naturalmente, los números proporcionados anteriormente representan una estimación basta ya que no tienen en cuenta perturbaciones atmosféricas, tales como vientos y fricción, y la conformación del terreno (por ejemplo pendientes, rocas, cráteres, etc.) que pueden desviar/perturbar el aterrizaje de los dispositivos inalámbricos (por ejemplo provocando rebotes, deslizamientos, etc.). Todas estas perturbaciones pueden tenerse ventajosamente en

10 cuenta en la etapa de análisis y definición de la misión para dimensionar el sistema de navegación.

Además, tal como se describió anteriormente, cuando el rover está funcionando y está a punto de alcanzar el borde de la zona de servicio, puede liberar ventajosamente dispositivos inalámbricos adicionales con el fin de extender la zona de servicio del sistema de navegación.

Tras haberse desplegado los dispositivos inalámbricos sobre la superficie del planeta extraterrestre durante las etapas de EDL del módulo de descenso y después de que el módulo de descenso haya aterrizado y haya terminado todas las operaciones preliminares (por ejemplo después de que haya desplegado los paneles solar usados para producir energía), el módulo de descenso comienza, de manera autónoma o en respuesta a una o más órdenes recibidas de manera remota (por ejemplo desde una estación de control en la Tierra o desde una estación espacial que orbita alrededor del planeta extraterrestre), una etapa de inicialización con el objetivo de definir la red de localización y comunicación jerárquica formada por el módulo de descenso y por los dispositivos inalámbricos.

15

20

Al comienzo de esta etapa de inicialización todos los dispositivos inalámbricos, anteriormente colocados sobre el terreno en la zona de funcionamiento, están en modo en espera, es decir esperando de manera pasiva un mensaje de activación transmitido por el módulo de descenso.

La generación y transmisión de mensajes de control en la red de localización y comunicación jerárquica se basa en un sistema jerárquico estructurado en varios niveles identificados por un número natural comprendido entre 0 y NIVEL\_MAX en el que cuanto menor es el número, mayor es la autoridad de los mensajes transmitidos. En esta jerarquía, el módulo de descenso representa el nodo de nivel 0, mientras que todos los dispositivos inalámbricos, antes de la inicialización, están ventajosamente preconfigurados a un nivel igual a NIVEL\_MAX.

25

En la primera fase de la etapa de inicialización el módulo de descenso, es decir el nodo de nivel 0 de la red de localización y comunicación jerárquica, lleva a cabo una búsqueda de los dispositivos inalámbricos adyacentes al mismo en el primer canal de radio, es decir en el canal de radio basado en tecnología de UWB. Según la presente invención y, por tanto, en la siguiente descripción, la adyacencia se define en cuanto a “visibilidad por radio”. En particular, según la presente invención y en la siguiente descripción, se dice que dos nodos de la red de localización y comunicación jerárquica son adyacentes si y sólo si puede establecerse entre ellos una comunicación inalámbrica basada en el uso de tecnología de UWB de corto alcance, es decir basada en el uso del primer canal de radio.

30

35

La búsqueda de los dispositivos de radio adyacentes al módulo de descenso consiste en que el módulo de descenso envíe en difusión un mensaje de activación (es decir dirigido a todos). Los dispositivos inalámbricos que pueden recibir el mensaje de activación responden al módulo de descenso y comienzan a llevar a cabo mediciones de distancia (es decir alcance) desde el módulo de descenso. Estos dispositivos inalámbricos ayudan a determinar el nivel 1 de la red de localización y comunicación jerárquica. En particular, las mediciones de alcance continúan durante un tiempo preestablecido, al final del cual se determinan los dispositivos inalámbricos cuyas distancias cumplen con parámetros predeterminados de estabilidad estadística de las mediciones de alcance; estos dispositivos inalámbricos pasan a ser los nodos de nivel 1 de la red de localización y comunicación jerárquica.

40

Con respecto a esto, la figura 4 muestra esquemáticamente un ejemplo de protocolo de comunicación que puede usarse según una realización preferida de la presente invención para activar y configurar como nodo de nivel 1 un dispositivo inalámbrico adyacente al módulo de descenso.

45

En particular, la figura 4 muestra un diagrama temporal de los mensajes intercambiados en el primer canal de radio entre el módulo de descenso (indicado con 41) y un dispositivo inalámbrico (indicado con 42) adyacente al mismo.

En detalle, la figura 4 muestra esquemáticamente:

- la transmisión por difusión en el primer canal de radio mediante el módulo de descenso 41 de un mensaje de activación que provoca la activación de los dispositivos inalámbricos por los que se recibe y que se recibe por el dispositivo inalámbrico 42 que, por tanto, se activa (este mensaje de activación comprende ventajosamente algunos parámetros, tales como una referencia temporal (“sello de tiempo”) para la sincronización entre el módulo de descenso 41 y el dispositivo inalámbrico 42, la dirección MAC (control de acceso al medio) del módulo de descenso
- 50

41, y el número de identificación del nivel del módulo de descenso 41, es decir el número de identificación del nivel 0);

- el envío en el primer canal de radio desde el dispositivo inalámbrico 42 hasta el módulo de descenso 41 de un mensaje de respuesta (este mensaje de respuesta comprende ventajosamente la dirección MAC del dispositivo inalámbrico 42 y la petición de mediciones de alcance);

- una sesión de determinación del alcance en la que el módulo de descenso 41 y el dispositivo inalámbrico 42 transmiten mutuamente señales de radiofrecuencia en el primer canal de radio, llevan a cabo la determinación del alcance, es decir mediciones de distancia, basándose en la potencia de las señales recibidas respectivamente, intercambian en el primer canal de radio información referente a estas mediciones de distancia y almacenan los resultados de las diversas mediciones realizadas; tras transcurrir un tiempo preestablecido desde el comienzo de la sesión de determinación del alcance, el módulo de descenso 41 determina los nodos de nivel 1 basándose en las mediciones de distancia realizadas;

- el envío en el primer canal de radio desde el módulo de descenso 41 hasta el dispositivo inalámbrico 42 de un mensaje de fin de sesión de determinación del alcance que comprende el número de identificación del nivel asignado al dispositivo inalámbrico 42, es decir el número de identificación de nivel 1; y

- el envío en el primer canal de radio desde el dispositivo inalámbrico 42 hasta el módulo de descenso 41 de un mensaje de confirmación (este mensaje de confirmación comprende ventajosamente información sobre el estado del dispositivo inalámbrico, tal como el nivel de carga de la batería del dispositivo inalámbrico 42).

Al final de la etapa de inicialización de los nodos de nivel 1, los dispositivos inalámbricos identificados como nodos de nivel 1 llevan a cabo mediciones de alcance con todos los demás dispositivos inalámbricos activos (que en esta etapa sólo comprenden el módulo de descenso y los dispositivos inalámbricos de nivel 1). Se envían las mediciones llevadas a cabo de este modo al módulo de descenso que las usa para determinar la geometría, es decir la topología, del sistema de referencia local. En particular, con el fin de determine un sistema de referencia bidimensional, se necesitan al menos dos dispositivos inalámbricos de nivel 1 activos, mientras que para determinar un sistema de referencia tridimensional local se requiere un número mínimo de mediciones más grande.

A partir de ahora, por motivos de simplicidad de la descripción, se describirá un procedimiento de ejemplo que puede usarse para determinar un sistema de referencia cartesiano bidimensional local, entendiéndose que este procedimiento también puede aplicarse, cambiando lo que sea necesario, para determinar un sistema de referencia cartesiano tridimensional local.

La primera etapa en la determinación de un sistema de referencia cartesiano bidimensional local es la selección de un nodo (es decir de un dispositivo inalámbrico) que permite fijar el eje de las abscisas, es decir el eje de las x, del sistema de referencia cartesiano bidimensional. Este eje de las x se identifica mediante el segmento hipotético que une el módulo de descenso y el dispositivo inalámbrico seleccionado. De esta manera, la posición, en el sistema de referencia cartesiano bidimensional, del nodo seleccionado para fijar el eje de las x se determina de manera automática. De hecho, este nodo tiene las coordenadas  $(d(L,k),0)$ , en las que  $d(L,k)$  representa la distancia desde el módulo de descenso L del dispositivo inalámbrico k seleccionado para fijar el eje de las x. De esta manera el eje de ordenadas, es decir el eje de las y, del sistema de referencia cartesiano bidimensional también se determina de manera automática.

El criterio de selección del dispositivo inalámbrico usado para fijar el eje de las x del sistema de referencia cartesiano bidimensional local se basa en el uso de información estadística recopilada durante la etapa de inicialización del nivel 1 de la red de localización y comunicación jerárquica. En particular, se selecciona el nodo (es decir el dispositivo inalámbrico) que tiene, desde un punto de vista estadístico, la medición más estable y robusta. Por ejemplo, para seleccionar el nodo pueden considerarse los siguientes parámetros: la diferencia entre la distancia mínima y máxima medida, y datos estadísticos del primer y del segundo orden (media y varianza) sobre las mediciones de alcance realizadas entre el elemento (es decir el dispositivo inalámbrico) considerado, el módulo de descenso y todos los demás dispositivos inalámbricos adyacentes. Otro parámetro que puede considerarse es el número de dispositivos inalámbricos adyacentes al nodo considerado. El objeto de esta evaluación es seleccionar un nodo que garantice la mayor estabilidad en las mediciones (minimización de la propagación de errores de medición) y que esté en comunicación con el mayor número posible de otros nodos. Esta información proporciona de manera implícita indicaciones sobre la estabilidad en el terreno del nodo y la calidad de la señal (trayecto múltiple, línea de visión (LOS), etc.).

Una vez seleccionado el nodo para fijar el eje de las x del sistema de referencia cartesiano bidimensional local y, por tanto, una vez fijado también de manera automática el eje de las y del sistema de referencia cartesiano bidimensional local, el módulo de descenso usa las mediciones realizadas en la etapa de inicialización del nivel 1 para calcular las coordenadas de los nodos restantes.

En particular, las coordenadas se calculan añadiendo gradualmente, uno a uno, los nodos de nivel 1 a los que aún no se les han asignado coordenadas en el sistema de referencia cartesiano bidimensional local. En detalle, el módulo de descenso calcula las coordenadas de los nodos de nivel 1 basándose en las coordenadas de los nodos

de nivel 1 con coordenadas que ya se han determinado y en las mediciones de alcance realizadas en la etapa de inicialización del nivel 1. En este contexto el módulo de descenso es el nodo con coordenadas (0,0), es decir, representa el origen del sistema de referencia cartesiano bidimensional local.

5 Con respecto a esto, la figura 5 muestra esquemáticamente el cálculo de las coordenadas de un nodo de nivel 1 genérico (es decir dispositivo inalámbrico)  $j$  basándose en las coordenadas del módulo de descenso  $L$  y del nodo  $k$  seleccionado para fijar el eje de las  $x$  del sistema de referencia local, en la distancia del nodo  $k$  desde el módulo de descenso  $L$  calculada en la etapa de inicialización del nivel 1, en la distancia del nodo  $j$  desde el módulo de descenso  $L$  calculada en la etapa de inicialización del nivel 1 y en la distancia del nodo  $k$  desde el nodo  $j$  calculada en la etapa de inicialización del nivel 1.

10 En particular, la figura 5 muestra:

- el módulo de descenso  $L$  que está situado en el punto con coordenadas (0,0), es decir en el origen, del sistema de referencia cartesiano bidimensional local  $xy$ ;
- el nodo  $k$  que se ha seleccionado para fijar el eje de las  $x$  del sistema de referencia cartesiano bidimensional local  $xy$ , que está a una distancia  $d(L,k)$  desde el módulo de descenso  $L$  y que, por tanto, está situado en el punto con coordenadas  $(d(L,k),0)$ ; y
- el nodo genérico  $j$  que está a una distancia  $d(L,j)$  desde el módulo de descenso  $L$  y a una distancia  $d(j,k)$  desde el nodo  $k$ .

15

Las coordenadas  $(j_x, j_y)$  del nodo  $j$  pueden expresarse de manera matemática según las dos fórmulas trigonométricas siguientes:

20

$$j_x = d(L, j) \cdot \cos \beta ,$$

$$j_y = d(L, j) \cdot \sin \beta ,$$

donde  $\beta$  indica el ángulo comprendido entre el eje de las  $x$  y el segmento que une el módulo de descenso  $L$  y el nodo  $j$  y que se encuentra a lo largo de  $d(L,j)$ .

Además, según la ley de cosenos (o teorema de Carnot):

25

$$\beta = \arccos \left( \frac{d(L, j)^2 + d(L, k)^2 - d(j, k)^2}{2 \cdot d(L, k)} \right) .$$

Por tanto, dado que las distancias  $d(L,k)$ ,  $d(L,j)$  y  $d(j,k)$  se calcularon en la etapa de inicialización del nivel 1 y, por tanto, se conocen, es posible determinar  $\beta$  y, por tanto, las coordenadas  $(j_x, j_y)$  del nodo  $j$ .

30

Por tanto, el procedimiento de cálculo de las coordenadas descrito anteriormente se repite por el módulo de descenso para cada dispositivo inalámbrico de nivel 1 al que aún no se le han asignado las coordenadas en el sistema de referencia cartesiano bidimensional local.

35

El procedimiento para definir el sistema de referencia local descrito anteriormente para el caso bidimensional también puede usarse, tal como se mencionó anteriormente, para definir un sistema de referencia tridimensional local. En particular, se necesitan al menos tres dispositivos inalámbricos de nivel 1 activos con el fin de determinar un sistema de referencia tridimensional local. Además, la precisión y fiabilidad de cálculo de la tercera dimensión, es decir de las coordenadas verticales, pueden mejorarse usando una técnica de fusión de datos basada en datos suministrados por sensores acoplados a los dispositivos inalámbricos (y si es necesario también al módulo de descenso), tales como (en el caso en el que el planeta extraterrestre tenga una atmósfera y se conozca el comportamiento atmosférico de dicho planeta extraterrestre) altímetros barométricos, y/o mediante modelos digitales del terreno del planeta extraterrestre obtenidos mediante adquisiciones por radar, sistemas de determinación del alcance por satélite, etc. En cualquier caso, es importante entender que no es necesario conocer la tercera coordenada para el funcionamiento del sistema de navegación según la presente invención, que, por tanto, también puede funcionar ventajosamente con tan sólo dos dimensiones.

40

45

Una vez que los dispositivos inalámbricos de nivel 1 se han activado y el módulo de descenso ha definido el sistema de referencia local y calculado las coordenadas de todos los dispositivos inalámbricos de nivel 1, se repite el mismo procedimiento para los niveles posteriores, es decir para los nodos a los que no pudo alcanzar el módulo de descenso durante la primera etapa.

En particular, los nodos de nivel 1 comienzan el mismo procedimiento comenzado por el módulo de descenso, es decir, transmiten en difusión un mensaje de activación. La diferencia primaria es que la información recopilada se envía por los nodos de nivel 1 al módulo de descenso, en el que se procesa.

En detalle, cada nodo de nivel 1 lleva a cabo mediciones de alcance con todos los nodos adyacentes al mismo aún no activados (es decir cuyo número de identificación de nivel aún no se ha asignado o está establecido al valor máximo NIVEL\_MAX). Entonces se transfieren las mediciones realizadas desde los nodos de nivel 1 hasta el módulo de descenso que las usa para determinar los nodos que van a activarse, a los que, por tanto, se les asigna el número de identificación de nivel 2.

Posteriormente, de la misma manera que para el nivel 1, se lleva a cabo una sesión de medición del alcance mediante los nodos recién activados, a los que responden todos los nodos actualmente activados, es decir, en esta etapa, los nodos de nivel 2 y de nivel 1. Estas mediciones se envían por cada dispositivo inalámbrico de nivel 2, usando un mecanismo de enrutamiento que implica al menos a un nodo de nivel 1 respectivo, al módulo de descenso que las usa para determinar las coordenadas de los dispositivos inalámbricos recién activados.

Se lleva a cabo el mismo procedimiento para los niveles superiores hasta que no se añade ningún nodo nuevo a la red de localización y comunicación jerárquica. En este punto, la red de localización y comunicación jerárquica se ha inicializado.

Tal como se describió anteriormente, en la red de localización y comunicación jerárquica cada dispositivo de comunicación (es decir cada nodo) al que se le ha asignado un nivel respectivo  $\ell$  (con  $1 \leq \ell \leq \text{NIVEL\_MAX}$ ), puede comunicarse directamente en el primer canal de radio (es decir en el canal de radio basado en tecnología de UWB) únicamente con los dispositivos inalámbricos (es decir los nodos) que pertenecen al nivel respectivo  $\ell$ , con los nodos que pertenecen al nivel  $\ell-1$  y con los nodos que pertenecen al nivel  $\ell+1$ . Por tanto, mientras que los nodos de nivel 1 están en comunicación directa con el módulo de descenso, los nodos de nivel 2 y los de los niveles posteriores no pueden comunicarse directamente con el módulo de descenso y, con el fin de alcanzarlo, deben usar por tanto un protocolo de enrutamiento que se depende de otros nodos de red.

Una solución preferida al problema de identificación del trayecto de enrutamiento desde un nodo cualquiera hacia el módulo de descenso implica el uso del mismo enfoque gradual usado para la activación e inicialización de los nodos de la red de localización y comunicación jerárquica. El procedimiento se basa en la identificación de al menos un nodo de referencia de nivel  $\ell-1$  (en el que  $\ell$  indica el nivel del nodo para el que debe garantizarse la comunicación con el módulo de descenso) que funciona como pasarela para comunicaciones con el módulo de descenso.

Para los nodos de nivel 1, el nodo de referencia que actúa como pasarela para comunicaciones con el módulo de descenso es el propio módulo de descenso. Además, los nodos de nivel 1 pueden actuar como pasarela para el módulo de descenso para los nodos de nivel 2. De la misma manera, los nodos de nivel 2 pueden funcionar como pasarela para el módulo de descenso para los nodos de nivel 3, y así sucesivamente.

Con respecto a esto, se considera la situación en la que el procedimiento de inicialización de los nodos de la red de localización y comunicación jerárquica ha alcanzado el nivel  $\ell-1$ . Por tanto, cada nodo de nivel  $\ell-1$  está en comunicación directa o indirecta con el módulo de descenso. Cada nodo de nivel  $\ell-1$  repite entonces el procedimiento de activación y envía un mensaje de activación en difusión. Los nodos en modo en espera, es decir que aún no se han inicializado, que descodifican correctamente el mensaje de activación guardan la dirección del remitente en un vector como posible pasarela que va a seleccionarse para el enrutamiento de la comunicación hacia el módulo de descenso. De hecho, los remitentes, que pertenecen al nivel  $\ell-1$ , ya han completado el procedimiento de inicialización, y, por tanto, deben estar en comunicación directa o indirecta con el módulo de descenso, es decir, aunque no estén en comunicación directa con el módulo de descenso, conocen una manera de encaminar información hacia el módulo de descenso.

Grabar todas las direcciones MAC de nivel  $\ell-1$  permite que los nodos seleccionen trayectos de enrutamiento alternativos tanto para abordar problemas de comunicación con la pasarela seleccionada como para distribuir, en rotación y de manera uniforme, el coste, en cuanto al consumo de energía, en los nodos adyacentes.

Otros métodos de enrutamiento pueden implementarse ventajosamente en la red de localización y comunicación jerárquica tanto de manera alternativa al método descrito anteriormente así como métodos de respaldo. En particular, el método de enrutamiento más adecuado puede seleccionarse ventajosamente en función de parámetros específicos de la misión en la que se usa el sistema de navegación (por ejemplo en función de la densidad de los nodos, del ciclo de trabajo, de la frecuencia con la que el sistema debe actualizar el sistema de referencia local, etc.). Por ejemplo, pueden considerarse variantes de algoritmos de enrutamiento conocidos para redes de dispositivos de comunicación inalámbrica.

De la misma manera, es decir usando el enfoque gradual tanto de despliegue de los nodos (es decir de los dispositivos inalámbricos) en el terreno como de activación de los mismos, el sistema puede resolver ventajosamente problemas de acceso al canal de radio típicos de una red de múltiples saltos de UWB asignando códigos de transmisión, o, más generalmente, los parámetros de acceso al canal físico, según la etapa de lanzamiento del dispositivo inalámbrico y/o su inicialización.

Al final del procedimiento de inicialización de la red de localización y comunicación jerárquica (el tiempo requerido para terminar este procedimiento puede depender de muchos factores, entre ellos el número de dispositivos inalámbricos, el radio de comunicación de las interfaces de radio de corto alcance basadas en tecnología de UWB y

la dimensión de la zona por la que se extienden los dispositivos inalámbricos) el estado del sistema de navegación puede resumirse de la siguiente manera:

- los dispositivos inalámbricos disponibles están activos y se han asignado coordenadas del sistema de referencia local a cada uno de ellos;
- 5     • el sistema de navegación está estructurado, es decir cada nodo tiene asignado un determinado nivel y conoce el método para enviar información al módulo de descenso; además la estructuración en niveles permite que cada nodo y el sistema de navegación, en su conjunto, conozca los límites de la zona de uso (barreras lógicas); y,
- como consecuencia del método para la determinación de las distancias mutuas, los dispositivos inalámbricos están sincronizados entre sí (exactitud mínima del orden de milisegundos).
- 10    Tras la inicialización de la red de localización y comunicación jerárquica, se llevan a cabo las siguientes etapas con el fin de hacer que el sistema de navegación esté en funcionamiento:
- se inicializa el primer canal de radio (es decir el canal de radiocomunicación basado en tecnología de UWB) y se verifica por medio de intercambio de datos y llevando a cabo algunas sesiones de medición del alcance con el módulo de descenso; y
- 15     • se transmite la topología de la red de localización y comunicación jerárquica (es decir las coordenadas de cada dispositivo inalámbrico en el sistema de referencia local), usando ambos canales de radio, desde el módulo de descenso hasta el rover que la almacena.

20    No es necesario que el rover determine una tabla de pasarelas propia si requiere usar la red de localización y comunicación jerárquica para comunicarse con el módulo de descenso, ya que su punto de acceso a esta red puede ser uno cualquiera de los dispositivos inalámbricos adyacentes al rover en la posición en la que está ubicado en ese momento. De hecho, cada dispositivo inalámbrico, activo y en funcionamiento, constituye un punto de acceso válido a la red de localización y comunicación jerárquica. Por tanto, el rover puede comunicarse con el módulo de descenso a través de la red de localización y comunicación jerárquica usando un dispositivo inalámbrico adyacente como punto de acceso a esta red.

25    En la etapa de funcionamiento del sistema de navegación, el rover se mueve dentro de la zona de funcionamiento y lleva a cabo periódicamente mediciones de alcance con los dispositivos inalámbricos adyacentes al mismo. Usando estas mediciones junto con la información sobre la topología de la red de localización y comunicación jerárquica transmitida por el módulo de descenso, el rover calcula su posición dentro de la zona de funcionamiento con respecto al sistema de referencia local.

30    Es importante observar que el sistema de impulso del rover debe tener en cuenta la información de proximidad de los dispositivos inalámbricos para evitar colisionar con los mismos. En particular, un desplazamiento significativo de la posición de los dispositivos inalámbricos puede requerir el cálculo de un nuevo sistema de referencia local. Por tanto, el rover está ventajosamente configurado para evitar colisionar con los dispositivos inalámbricos (por ejemplo deteniéndose y/o recalculando la trayectoria a lo largo de la cual está moviéndose) basándose en su posición, en

35    información sobre la topología de la red de localización y comunicación jerárquica transmitida por el módulo de descenso y en las mediciones de alcance llevadas a cabo por dicho rover. En otras palabras, los dispositivos inalámbricos se usan de manera intrínseca como balizas de radio, es decir, para proporcionar al rover información de proximidad, con el fin de facilitar el regreso del rover a la zona de funcionamiento del sistema de navegación si dicho rover sale de la misma y con el fin de prevenir que la colisión entre el rover y los dispositivos inalámbricos

40    haga necesaria una actualización frecuente del sistema de coordenadas de referencia.

Durante la etapa de funcionamiento el módulo de descenso periódicamente activa un procedimiento de verificación del estado de integridad del sistema de navegación, en particular de la red de localización y comunicación jerárquica, de tal manera que:

- se comprueba el estado de los dispositivos inalámbricos (nivel de carga de batería, velocidad de gasto de la batería, variaciones significativas en la calidad de las señales recibidas, y otros parámetros relevantes); y
  - se detecta cualquier variación de la topología de la red de localización y comunicación jerárquica, por ejemplo debido a
    - variaciones en la posición de los dispositivos inalámbricos (detectadas observando cambios significativos en las mediciones de alcance realizadas por nodos adyacentes), por ejemplo debido a viento, hundimiento del terreno, impacto accidental con el rover u otros fenómenos del entorno, y/o
    - deterioro de la exactitud de la posición de los dispositivos inalámbricos (evaluado en términos estadísticos mediante recálculo periódico de la posición de los dispositivos inalámbricos).
- 50

La información referente al estado de integridad del sistema de navegación, es decir de la red de localización y comunicación jerárquica, se transmite desde el módulo de descenso hasta el rover que puede modificar su

comportamiento en función de dicho estado de integridad (por ejemplo puede reducir la velocidad, puede esperar a condiciones más estables para realizar actividades que requieren una alta fiabilidad de la información de posición, etc.) hasta el caso límite en el que el módulo de descenso comunica al rover la necesidad de reinicializar la red de localización y comunicación jerárquica. Por tanto, el rover está ventajosamente configurado para modificar su comportamiento de funcionamiento (por ejemplo deteniéndose) si el estado de integridad del sistema de navegación no satisface condiciones predeterminadas. El sistema de navegación puede proporcionar un posicionamiento con exactitud por debajo de un metro y también está configurado para implementar funcionalidades de monitorización y control. En particular, la imposibilidad de prever y contrarrestar cualquier variación del entorno (tormentas de arena, actividad tectónica, inestabilidad del terreno) y cualquier fallo en los dispositivos inalámbricos (anomalías de fuente de alimentación debidas a condiciones meteorológicas contingentes, errores de circuito, etc.) se compensan mediante módulos para automonitorizar y determinar el estado de integridad del sistema de navegación, es decir de la red de localización y comunicación jerárquica. La información de integridad se pone a disposición de los rovers para usarse en combinación con sus "planes de funcionamiento" (por ejemplo, algunas etapas de funcionamiento pueden requerir exactitud o fiabilidad específicas). Además, en el caso de averías graves, el sistema de control de misión central puede incluso decidir detener los rovers hasta que se restauren las condiciones de funcionamiento nominales del sistema de navegación.

El sistema de navegación proporciona esta monitorización del estado de integridad mediante su funcionalidad primaria, es decir, mediante el cálculo automático de la topología de la red de localización y comunicación jerárquica y mediante la determinación del sistema de referencia local.

El sistema de referencia local representa el requisito de alto nivel más importante para cada sistema de navegación. Por este motivo, la primera etapa de funcionamiento establecida para el sistema de navegación según la realización preferida de la presente invención es la determinación del sistema de referencia local y de la posición de cada dispositivo inalámbrico en este sistema de referencia local. Tal como se describió anteriormente, el sistema de referencia local depende de la posición de cada dispositivo inalámbrico y, por tanto, no puede suponerse que sea estático. El mayor punto fuerte del sistema de integridad del sistema de navegación es el uso de su funcionalidad primaria no sólo para la inicialización preliminar, sino también como servicio continuo para el suministro de información diferencial referente a la exactitud y validez del sistema de referencia local. Esta información se difunde a los dispositivos inalámbricos y a los rovers con el fin de permitirles realizar e implementar acciones específicas dependiendo de su estado específico.

Esta característica hace que el sistema de navegación según la realización preferida de la presente invención sea un sistema con gran flexibilidad y capacidad de configuración. Además, el mecanismo autónomo para determinar la topología de la red de localización y comunicación jerárquica es de bajo coste y representa una manera sencilla y directa de devolver el sistema completo hacia un estado estacionario, permitiendo por tanto una recuperación de fallos principales volviendo a utilizar principalmente las funciones operativas.

Las prestaciones actuales del sistema de navegación según la realización preferida de la presente invención pueden depender de diversos factores, incluyendo:

- el número de dispositivos inalámbricos;
- las dimensiones de la zona de funcionamiento;
- la distancia entre dispositivos inalámbricos (de hecho, la exactitud de mediciones de alcance disminuye con la distancia);
- la potencia de transmisión disponible de los dispositivos inalámbricos y la velocidad del primer canal de radio, es decir del canal de radiocomunicación basado en tecnología de UWB; y
- la duración de la misión del sistema de navegación.

Estos factores no son independientes unos de otros y deben considerarse sus interacciones durante la definición de los requisitos de la misión. Por ejemplo, el número de dispositivos inalámbricos depende de la dimensión de la zona de funcionamiento y del radio de comunicación de UWB entre dos dispositivos inalámbricos y, naturalmente, también de la capacidad de carga del módulo de descenso. A su vez, la distancia de comunicación de UWB entre dos dispositivos inalámbricos depende de la potencia de transmisión que puede usarse y de la duración establecida para la misión.

La capacidad del sistema de navegación para transferir simultáneamente información y determinar la posición permite una alta flexibilidad en la definición de casos especializados del sistema para cubrir una amplia gama de posibles situaciones de aplicación. En cualquier caso, las funcionalidades y las prestaciones básicas del sistema de navegación se garantizan independientemente de la especialización específica y adaptación a una misión específica.

A continuación se indican las funcionalidades y características primarias y algunas prestaciones indicativas del sistema de navegación, tanto a nivel de sistema como a nivel de dispositivo inalámbrico individual.

En particular, las funcionalidades y características primarias a nivel de sistema son:

- una única red (es decir, la red de localización y comunicación jerárquica) tanto para la navegación como para la transferencia de datos (por ejemplo para operaciones de monitorización y comprobación de la integridad);
- 5 • determinación autónoma de la topología de la red de localización y comunicación jerárquica (sistema de coordenadas de referencia);
- monitorización dinámica de la topología de la red de localización y comunicación jerárquica;
- robustez en el caso de modificaciones de la topología de la red de localización y comunicación jerárquica durante operaciones (por ejemplo en el caso de un fallo en uno o más dispositivos inalámbricos, de desplazamiento accidental de los nodos, etc.);
- 10 • sincronización implícita de la red de localización y comunicación jerárquica y la posibilidad de sincronización explícita para aplicaciones específicas (por ejemplo, mediante el uso de algoritmos optimizados y mediante el uso de la estimación de errores de sincronización para la evaluación de la integridad); y
- determinación del estado de integridad del sistema (el tiempo para el cálculo de la integridad depende de parámetros tales como la dimensión de la zona de funcionamiento, la densidad de dispositivos inalámbricos, la velocidad del primer canal de radio, es decir del canal de radiocomunicación basado en tecnología de UWB).
- 15

Además, el sistema de navegación puede estar ventajosamente configurado para realizar un cálculo ponderado de los niveles de integridad en función de las prioridades de la misión.

- En vez de eso, con respecto a las prestaciones a nivel de sistema, la exactitud del posicionamiento en el plano es una función de la exactitud en la determinación las coordenadas de los dispositivos inalámbricos, de la exactitud de las mediciones de alcance realizadas por los rovers, de la distancia del rover desde el módulo de descenso (los errores de medición se propagan a medida que aumenta el nivel de los dispositivos inalámbricos) y de la distribución geométrica de los dispositivos inalámbricos adyacentes al rover (dilución de la precisión, DOP). En una situación de ejemplo con 5 niveles de distancia desde el módulo de descenso, una exactitud en las mediciones de alcance de 10 cm y una DOP geométrica (dilución de precisión geométrica, GDOP), es decir la dilución de la precisión debida a la configuración geométrica de los nodos, constante inferior a 4,5, es posible obtener exactitudes de posicionamiento inferiores a un metro (1-sigma). La exactitud de posicionamiento en altura depende de las características del contexto de funcionamiento y de la disponibilidad de información adicional.

Además, las funcionalidades y características primarias a nivel de dispositivo inalámbrico individual son:

- la capacidad para monitorizar los parámetros de funcionamiento de cada dispositivo inalámbrico (carga de batería residual, número de transmisiones por segundo, velocidad de consumo de las baterías, matriz adyacente de otros dispositivos inalámbricos, etc.);
- 30 • modularidad; de hecho los dispositivos inalámbricos pueden estar ventajosamente equipados con diversos tipos de sensores para crear nodos multifuncionales (por ejemplo para recopilar parámetros del entorno); y
- las características de la señal de UWB que hacen que los dispositivos inalámbricos sean particularmente adecuados para funcionar en entornos con condiciones de entorno desfavorables (por ejemplo debido a la presencia de obstáculos, de un trasfondo electromagnético con interferencias, etc.).
- 35

- Además, con respecto a prestaciones al nivel de dispositivo inalámbrico individual, la exactitud de las mediciones de alcance depende del número de mediciones realizadas, de la distancia de los dispositivos inalámbricos, del ancho de banda del primer canal de radio, de las condiciones de trasfondo electromagnético, es decir de la relación señal-ruido (SNR) y de las condiciones de línea de visión (LOS). En una situación de ejemplo con dos dispositivos inalámbricos situados a una distancia de 30 metros, un promedio entre 10 mediciones de alcance, el uso, en campo abierto y en condiciones de LOS, de un sistema de saltos temporales, de radio por impulsos, de banda ultra ancha, (TH-IR-UWB) con una SNR de 0 dB y una banda de 1,5 GHz, es posible obtener una exactitud de medición del alcance inferior a 10 cm (1-sigma).

- 40 Por tanto, para resumir algunas de las ventajas del sistema de navegación, con la red de localización y comunicación jerárquica basada en tecnología de UWB es posible:

- obtener una indicación de la propagación de errores de posicionamiento;
- implementar estrategias de ahorro de energía en el enrutamiento de información que va a transferirse al módulo de descenso y/o a los rovers; y
- 45 • comunicarse en entornos con perturbaciones electromagnéticas considerables y, simultáneamente, llevar a cabo mediciones de alcance con mucha exactitud.
- 50

A partir de la descripción anterior puede entenderse fácilmente cómo puede usarse ventajosamente la presente invención para realizar:

- un sistema de localización basado en la red de localización y comunicación jerárquica descrita anteriormente;
- 5 • un sistema de navegación para cualquier tipo de vehículo, no tripulado o controlado de manera remota, que está configurado para moverse sobre superficies y/o por debajo del agua;
- un sistema de exploración basado en el sistema de navegación descrito anteriormente; y
- 10 • un sistema de monitorización basado en el sistema de navegación descrito anteriormente en el que el módulo de descenso y/o uno o más rovers y/o uno o más dispositivos inalámbricos están ventajosamente equipados con uno o más sensores configurados para adquirir, es decir para detectar, parámetros de/a partir del entorno circundante, es decir datos y/o información sobre el entorno circundante, por ejemplo la temperatura exterior, la presión atmosférica, etc.

Además, a partir de la descripción anterior también puede entenderse cómo puede usarse ventajosamente la presente invención para realizar la localización y/o navegación en, y/o exploración y/o monitorización de, cualquier entorno desconocido y/o difícil (es decir inaccesible), tal como:

- 15 • un objeto (o cuerpo) celeste, por ejemplo, un planeta, un satélite natural o un asteroide;
- una zona afectada por un desastre, por ejemplo una zona afectada por un terremoto y/o un tsunami y/o una inundación y/o implicada en una erupción volcánica y/o un derrumbamiento;
- un entorno submarino; etc.

20 Finalmente, se entiende que pueden realizarse diversas modificaciones a la presente invención, todas las cuales se encuentran dentro del alcance de protección de la invención, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Sistema de navegación para explorar y/o monitorizar un entorno, que comprende:
- un nodo primario que comprende una interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva;
  - una pluralidad de nodos secundarios (13) diseñados para desplegarse en dicho entorno, incluyendo cada nodo secundario (13) una interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva;
- 5 en el que el nodo primario y los nodos secundarios (13) están configurados para formar una red de localización y comunicación jerárquica en la que:
- el nodo primario está asociado con un nivel jerárquico primario y cada nodo secundario (13) está asociado con un nivel jerárquico secundario respectivo menor que el nivel jerárquico primario;
  - cada nodo está configurado para enviar y recibir mensajes a través de la red de localización y comunicación jerárquica usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva;
  - cada nodo secundario (13) está configurado para
    - llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia con respecto a, y junto con, otros nodos secundarios (13) asociados con el mismo nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario (13), y con respecto a, y junto con, otros nodos asociados con niveles jerárquicos adyacentes al nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario (13), y
    - enviar al nodo primario mensajes relacionados con la distancia referentes a las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicho nodo secundario (13);
  - el nodo primario está configurado para
    - llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia con respecto a, y junto con, nodos secundarios (13) asociados con un nivel jerárquico secundario inmediatamente inferior al nivel jerárquico primario,
    - calcular, basándose en las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicho nodo primario y los mensajes relacionados con la distancia recibidos desde los nodos secundarios (13), un sistema de coordenadas de referencia local indicativo de las posiciones de los nodos secundarios (13) con respecto al nodo primario;
  - un módulo de control de misión (11) acoplado al nodo primario y diseñado para colocarse en dicho entorno y para controlar una misión de exploración y/o monitorización en dicho entorno;
  - un vehículo no tripulado (12) que puede hacerse funcionar para llevar a cabo la misión de exploración y/o monitorización en dicho entorno;
  - en el que
 

el vehículo no tripulado (12) comprende una unidad de control de vehículo que incluye una interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva y una interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva y que está configurada para recibir datos desde el módulo de control de misión (11) usando la interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva;

    - en el que
 

la unidad de control de vehículo está configurada además para

      - llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia con respecto a, y junto con, uno o más nodos de la red de localización y comunicación jerárquica,
      - calcular una posición del vehículo no tripulado (12) en el sistema de coordenadas de referencia local basándose en los datos de navegación recibidos desde el módulo de control de misión (11) y en las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicha unidad de control de vehículo, y
      - pilotar el vehículo no tripulado (12) en dicho entorno basándose en los datos de misión y en los datos de navegación recibidos desde el módulo de control de misión (11), las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicha unidad de control de vehículo y la posición del vehículo no tripulado (12) en el sistema de coordenadas de referencia local;
- estando el sistema de navegación caracterizado porque:

- cada nodo secundario (13) está configurado para enviar al nodo primario mensajes relacionados con la integridad que indican un estado respectivo de integridad operativa de dicho nodo secundario (13);
  - el nodo primario está configurado para determinar un estado de integridad global de la red de localización y comunicación jerárquica basándose en los mensajes relacionados con la integridad recibidos desde los nodos secundarios (13), las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicho nodo primario y los mensajes relacionados con la distancia recibidos desde los nodos secundarios (13), siendo dicho estado de integridad global de la red de localización y comunicación jerárquica indicativo de los estados de integridad operativa de los nodos secundarios (13) y de niveles de fiabilidad y exactitud de las posiciones de los nodos secundarios (13) en el sistema de coordenadas de referencia local; y
  - el módulo de control de misión (11) comprende una interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva y está configurado para enviar datos de misión referentes a la misión de exploración y/o monitorización y datos de navegación referentes al sistema de coordenadas de referencia local y el estado de integridad global de la red de localización y comunicación jerárquica a la unidad de control de vehículo usando la interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva.
2. Sistema de navegación según la reivindicación 1, en el que cada nodo secundario (13) está configurado para:
- llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia inicial con respecto a, y junto con, otros nodos secundarios (13) asociados con el mismo nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario (13), y con respecto a, y junto con, otros nodos asociados con niveles jerárquicos adyacentes al nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario (13);
  - llevar a cabo periódicamente, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia actual con respecto a, y junto con, otros nodos secundarios (13) asociados con el mismo nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario (13), y con respecto a, y junto con, otros nodos asociados con niveles jerárquicos adyacentes al nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario (13); y
  - enviar al nodo primario mensajes relacionados con la distancia inicial referentes a las mediciones de distancia inicial llevadas a cabo por dicho nodo secundario (13) y mensajes relacionados con la distancia actual referentes a las mediciones de distancia actual llevadas a cabo periódicamente por dicho nodo secundario (13);
- y en el que el nodo primario está configurado para:
- llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia inicial con respecto a, y junto con, los nodos secundarios (13) asociados con el nivel jerárquico secundario inmediatamente inferior al nivel jerárquico primario;
  - llevar a cabo periódicamente, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia actual con respecto a, y junto con, los nodos secundarios (13) asociados con el nivel jerárquico secundario inmediatamente inferior al nivel jerárquico primario;
  - calcular el sistema de coordenadas de referencia local basándose en las mediciones de distancia inicial llevadas a cabo por dicho nodo primario y en los mensajes relacionados con la distancia inicial recibidos desde los nodos secundarios (13); y
  - actualizar el sistema de coordenadas de referencia local basándose en las mediciones de distancia actual llevadas a cabo periódicamente por dicho nodo primario y en los mensajes relacionados con la distancia actual recibidos desde los nodos secundarios (13).
3. Sistema de navegación según la reivindicación 2, en el que cada nodo secundario (13) está configurado para:
- determinar un estado inicial respectivo de integridad operativa;
  - determinar periódicamente un estado actual respectivo de integridad operativa; y
  - enviar al nodo primario un mensaje relacionado con la integridad inicial que indica el estado inicial respectivo de integridad operativa y mensajes relacionados con la integridad actual que indican el estado actual respectivo de integridad operativa;
- y en el que el nodo primario está configurado para:

- determinar el estado de integridad global de la red de localización y comunicación jerárquica basándose en los mensajes relacionados con la integridad inicial recibidos desde los nodos secundarios (13), en las mediciones de distancia inicial llevadas a cabo por dicho nodo primario y en los mensajes relacionados con la distancia inicial recibidos desde los nodos secundarios (13); y
- 5
- actualizar el estado de integridad global de la red de localización y comunicación jerárquica basándose en los mensajes relacionados con la integridad actual recibidos desde los nodos secundarios (13), en las mediciones de distancia actual llevadas a cabo periódicamente por dicho nodo primario y en los mensajes relacionados con la distancia actual recibidos desde los nodos secundarios (13).
4. Sistema de navegación según cualquier reivindicación anterior, en el que el nodo primario está configurado para:
- 10
- llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia preliminar con respecto a, y junto con, primeros nodos secundarios específicos (13) que son candidatos para estar asociados con un nivel jerárquico secundario inmediatamente inferior al nivel jerárquico primario; y
- 15
- asociar uno o más de dichos primeros nodos secundarios específicos (13) con dicho nivel jerárquico secundario inmediatamente inferior al nivel jerárquico primario basándose en las mediciones de distancia preliminar llevadas a cabo por dicho nodo primario;
- en el que cada uno de los nodos secundarios dados (13) asociados con un primer nivel jerárquico secundario dado está configurado para:
- 20
- llevar a cabo, usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mediciones de distancia preliminar con respecto a, y junto con, segundos nodos secundarios específicos (13) que son candidatos para estar asociados con un segundo nivel jerárquico secundario dado inmediatamente inferior al primer nivel jerárquico secundario dado; y
- 25
- enviar al nodo primario mensajes relacionados con la distancia preliminar referentes a las mediciones de distancia preliminar llevadas a cabo por dicho nodo secundario dado (13);
- y en el que el nodo primario está configurado para asociar uno o más de dichos segundos nodos secundarios específicos con dicho segundo nivel jerárquico secundario dado basándose en los mensajes relacionados con la distancia preliminar recibidos desde los nodos secundarios dados (13).
5. Sistema de navegación según la reivindicación 4, en el que el nodo primario está configurado para transmitir, a través de la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva, mensajes de notificación cada uno de los cuales se dirige a uno o más nodos secundarios específicos (13) e indica un nivel jerárquico secundario con el que se ha(n) asociado dicho(s) nodo(s) secundario(s) específico(s) por dicho nodo primario;
- 30
- y en el que cada nodo secundario (13) está configurado para:
- 35
- si recibe a través de la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva un mensaje de notificación dirigido a dicho nodo secundario (13), adoptar como nivel jerárquico secundario respectivo el nivel jerárquico secundario indicado en dicho mensaje de notificación recibido; y,
- 40
- si recibe a través de la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva un mensaje de notificación que está dirigido a uno o más de otros nodos secundarios (13) y que indica un nivel jerárquico secundario inferior al nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario (13), retransmitir a través de la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva el mensaje de notificación recibido encaminándolo hacia uno o más nodos secundarios (13) asociados con un nivel jerárquico inferior al nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario.
6. Sistema de navegación según cualquier reivindicación anterior, en el que cada nodo secundario (13) está configurado para:
- 45
- enviar a dicho nodo primario los mensajes relacionados con la integridad que indican el estado respectivo de integridad operativa y los mensajes relacionados con la distancia referentes a las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicho nodo secundario (13) transmitiendo dichos mensajes a través de la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva; y,
- 50
- si recibe a través de la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva un mensaje relacionado con la distancia o un mensaje relacionado con la integridad transmitido por otro nodo secundario (13) asociado con un nivel jerárquico secundario inferior al nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario (13), retransmitir a través de la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva el mensaje relacionado con la distancia recibido o el mensaje relacionado con la integridad recibido

encaminándolo hacia uno o más nodos asociados con un nivel jerárquico superior al nivel jerárquico secundario con el que está asociado dicho nodo secundario (13).

- 5 7. Sistema de navegación según cualquier reivindicación anterior, en el que la unidad de control de vehículo está configurada para enviar al módulo de control de misión (11), usando la interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva, primeros datos de localización referentes a las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicha unidad de control de vehículo;
- en el que el módulo de control de misión (11) está configurado para:
- calcular una posición del vehículo no tripulado (12) en el sistema de coordenadas de referencia local basándose en los primeros datos de localización recibidos desde la unidad de control de vehículo; y
- 10 • enviar segundos datos de localización referentes a la posición del vehículo no tripulado (12) en el sistema de coordenadas de referencia local a la unidad de control de vehículo usando la interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva;
- y en el que la unidad de control de vehículo está configurada para pilotar el vehículo no tripulado (12) en dicho entorno basándose también en los segundos datos de localización recibidos desde el módulo de control de misión (11).
- 15
8. Sistema de navegación según la reivindicación 7, en el que la unidad de control de vehículo está configurada para enviar los primeros datos de localización al módulo de control de misión (11) también a través de la red de localización y comunicación jerárquica usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva; y en el que el módulo de control de misión (11) está configurado para recibir los primeros datos de localización desde la unidad de control de vehículo y enviar los segundos datos de localización a la unidad de control de vehículo también a través de la red de localización y comunicación jerárquica usando el nodo primario.
- 20
9. Sistema de navegación según cualquier reivindicación anterior, en el que el módulo de control de misión (11) está configurado para enviar los datos de misión y los datos de navegación a la unidad de control de vehículo también a través de la red de localización y comunicación jerárquica usando el nodo primario; y en el que la unidad de control de vehículo está configurada para recibir los datos de misión y los datos de navegación desde el módulo de control de misión (11) también a través de la red de localización y comunicación jerárquica usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva.
- 25
10. Sistema de navegación según cualquier reivindicación anterior, en el que la unidad de control de vehículo está configurada para:
- 30
- detener el vehículo no tripulado (12) si el estado de integridad global de la red de localización y comunicación jerárquica no satisface condiciones predeterminadas; y
  - prevenir que el vehículo no tripulado (12) colisione con los nodos de la red de localización y comunicación jerárquica basándose en la posición del vehículo no tripulado (12) en el sistema de coordenadas de referencia local, en los datos de navegación recibidos desde el módulo de control de misión (11) y en las mediciones de distancia llevadas a cabo por dicha unidad de control de vehículo.
- 35
11. Sistema de navegación según cualquier reivindicación anterior, en el que al menos un nodo secundario (13) comprende uno o más sensores diseñados para adquirir datos referentes al entorno, y está configurado para enviar los datos adquiridos al nodo primario.
- 40
12. Sistema de navegación según cualquier reivindicación anterior, en el que el vehículo no tripulado (12) comprende uno o más sensores diseñados para adquirir datos referentes al entorno, y en el que la unidad de control de vehículo está configurada para enviar los datos adquiridos por dicho(s) sensor(es) al módulo de control de misión (11) usando la interfaz de radiocomunicación predefinida respectiva.
- 45
13. Sistema según la reivindicación 12, en el que la unidad de control de vehículo está configurada para enviar los datos adquiridos por dicho(s) sensor(es) al módulo de control de misión (11) también a través de la red de localización y comunicación jerárquica usando la interfaz de radio de banda ultra ancha respectiva.

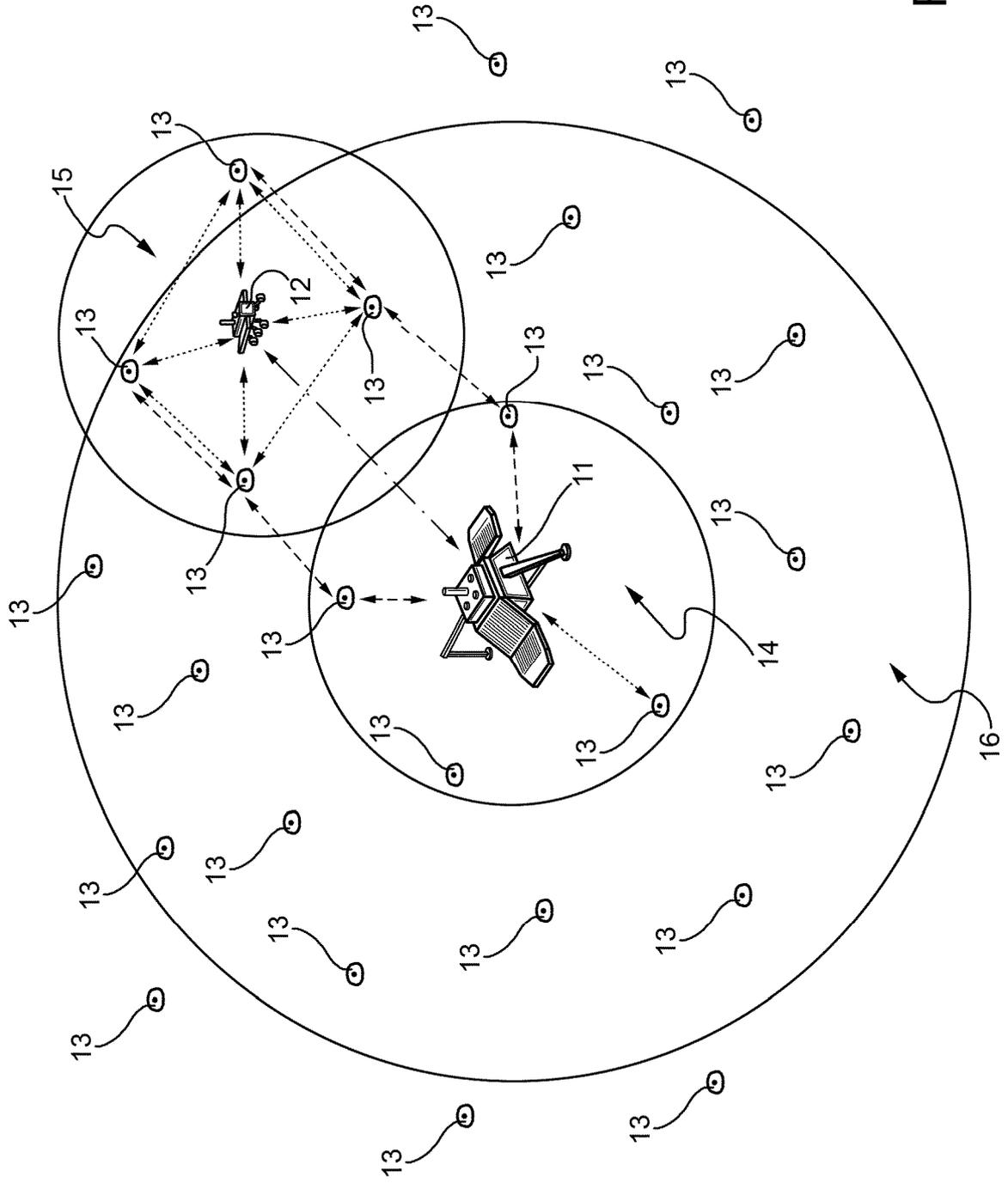
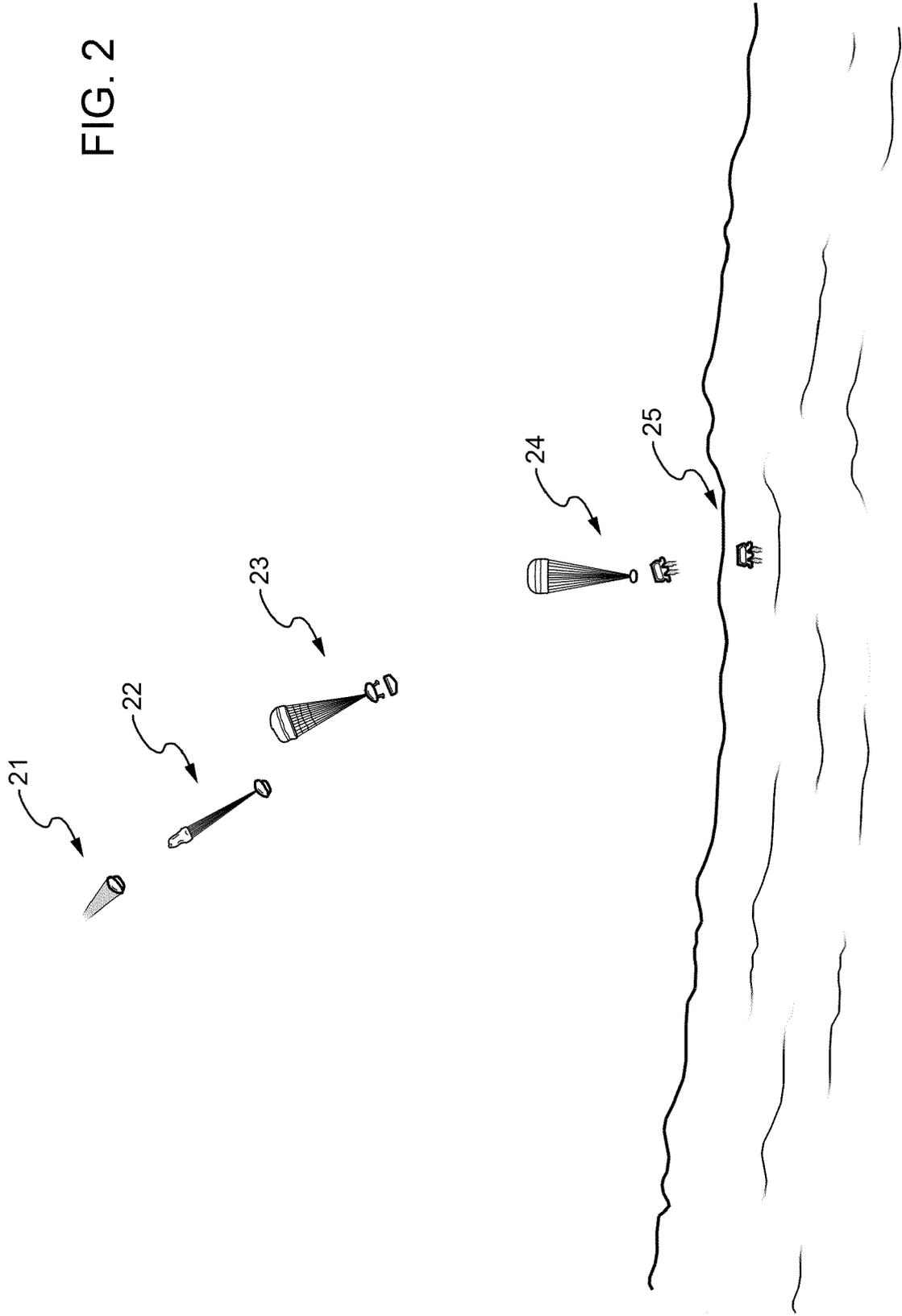


FIG. 1

FIG. 2



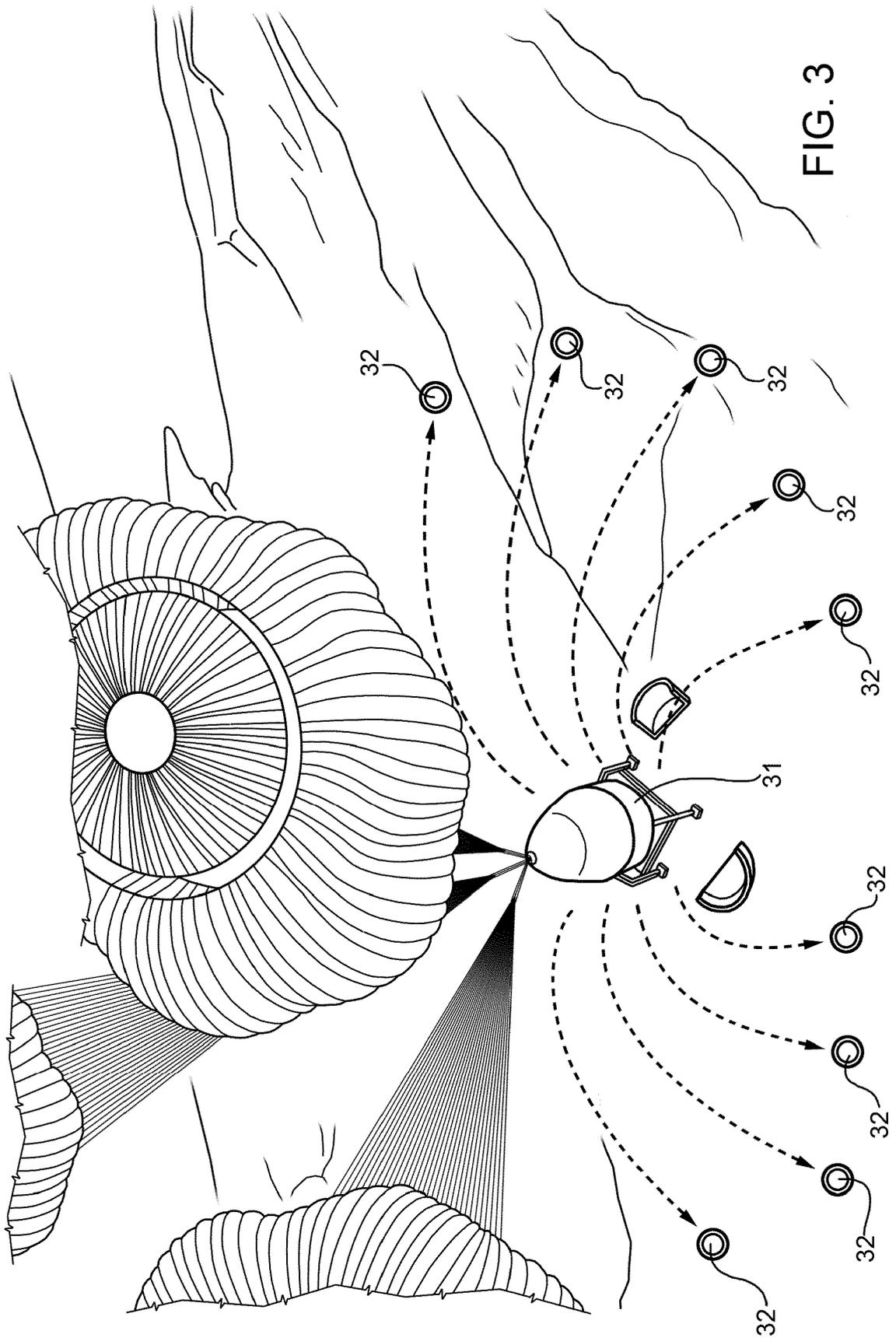


FIG. 3

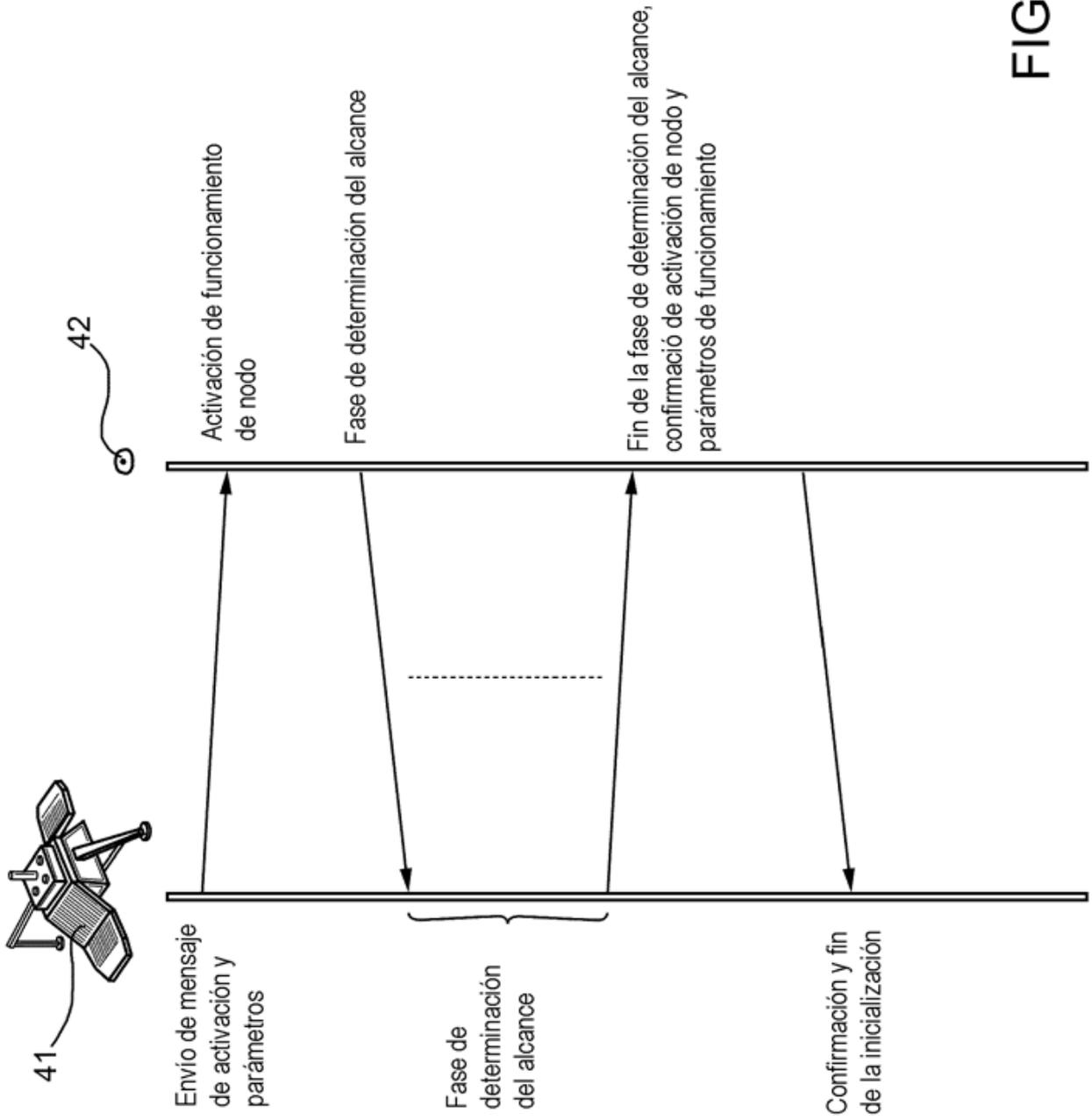


FIG. 4

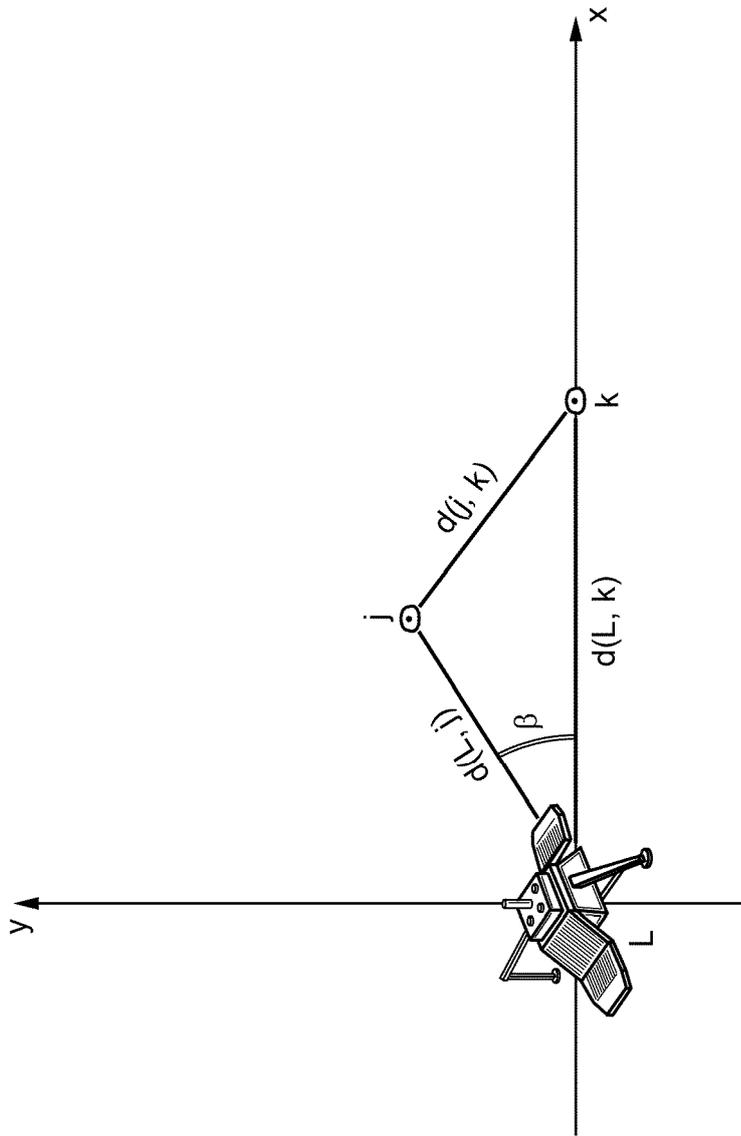


FIG. 5