

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102011901964556A1

Publication Date

20130118

Applicant

THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Title

SISTEMI DI LOCALIZZAZIONE, NAVIGAZIONE, ESPLORAZIONE E
MONITORAGGIO PER AMBIENTI SCONOSCIUTI E/O DIFFICILI

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"SISTEMI DI LOCALIZZAZIONE, NAVIGAZIONE, ESPLORAZIONE E
MONITORAGGIO PER AMBIENTI SCONOSCIUTI E/O DIFFICILI"

di THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

di nazionalità italiana

con sede: VIA SACCOMURO 24

ROMA (RM)

Inventori: GOTTIFREDI Franco, VARRIALE Enrico

* * *

SETTORE TECNICO DELL'INVENZIONE

La presente invenzione è relativa ad un sistema di localizzazione, ad un sistema di navigazione, ad un sistema di esplorazione e ad un sistema di monitoraggio.

In particolare, i suddetti sistemi sono destinati ad essere utilizzati in ambienti sconosciuti e/o difficili (ovvero impervi), come:

- oggetti (ovvero corpi) celesti, ad esempio pianeti, satelliti naturali, stelle ed asteroidi;
- zone colpite da cataclismi, ad esempio zone colpite da terremoti e/o tsunami e/o alluvioni e/o interessate da eruzioni vulcaniche e/o frane; ed
- ambienti sottomarini.

STATO DELL'ARTE

Com'è noto, al fine di esplorare e/o monitorare

ambienti sconosciuti e/o difficili (ovvero impervi), ad esempio al fine di esplorare un pianeta extraterrestre, o al fine di esplorare e/o monitorare una zona sottomarina, o al fine di monitorare una zona colpita da un cataclisma, attualmente vengono utilizzati veicoli automatici, o controllati da remoto, ad esempio robot, che sono configurati per muoversi in detti ambienti e per acquisire dati sull'ambiente circostante durante il movimento. Ad esempio, nel settore dell'astronautica vengono utilizzati veicoli automatici di superficie chiamati rover.

In tale contesto, l'abilità di un veicolo automatico, o controllato da remoto, di seguito chiamato, per semplicità di descrizione, robot o rover, di determinare la propria posizione mentre si muove, in particolare l'abilità di stimare la propria posizione e di determinare l'accuratezza, ovvero l'affidabilità, di tale stima, risulta essere essenziale per vari motivi.

In primo luogo, spesso ad un robot/rover vengono assegnati obiettivi da raggiungere che sono espressi in termini di posizione. Ad esempio, un robot/rover può ricevere comandi che indicano di raggiungere una specifica posizione, di esplorare una specifica area, di ritornare vicino ad un predefinito punto di riferimento, ecc..

In secondo luogo, la stima della posizione di un robot/rover e l'accuratezza, o affidabilità, di tale stima

sono legate alla navigazione a lungo raggio per la costruzione di mappe globali dell'ambiente esplorato/monitorato, per la ricerca delle traiettorie o dei percorsi che il robot/rover deve seguire e per permettere la supervisione della missione. In particolare, la consistenza spaziale delle mappe generate è fondamentale per l'efficienza e la robustezza dell'operatività del robot/rover ed è proprio la conoscenza della posizione del robot/rover che garantisce tale consistenza.

Infine, l'esecuzione corretta delle traiettorie geometriche fornite da un pianificatore di percorso è legata alla conoscenza accurata del moto del robot/rover.

Pertanto, l'auto-localizzazione del robot/rover è uno dei problemi fondamentali da affrontare nell'ambito della navigazione autonoma.

Nella progettazione di una missione di esplorazione/monitoraggio di ambienti sconosciuti/difficili si può convenientemente tener conto dei sistemi satellitari globali di localizzazione ("Global Navigation Satellite Systems"- GNSSs), come ad esempio i sistemi Galileo, GPS, GLONASS, ecc.. Nell'impiego di tali sistemi, si deve, però, tener conto anche delle possibili interruzioni di servizio di tali sistemi, della degradazione delle prestazioni in determinati ambienti e del fatto che l'accuratezza richiesta nella localizzazione e navigazione di un

robot/rover (a livello del centimetro in certe aree con ostacoli e vincoli) richiede dei sistemi differenziali molto costosi. Anche nell'ambito dell'astronautica, in cui, tra l'altro, le prestazioni sono meno stringenti, si può ipotizzare per il futuro di poter utilizzare una costellazione di satelliti artificiali di tipo GNSS che consenta la localizzazione di un rover.

Attualmente, nelle missioni di esplorazione/monitoraggio di ambienti sconosciuti/difficili vengono utilizzati diversi metodi per l'auto-localizzazione di un robot o di un rover. In particolare, al fine di raggiungere una autonomia nella navigazione di lungo raggio di un robot o di un rover, possono essere usati:

- metodi di stima del movimento;
- metodi di affinamento della posizione; e
- metodi di localizzazione assoluta.

In dettaglio, i metodi di stima del movimento permettono di misurare l'accelerazione, la velocità e gli spostamenti tra due posizioni note integrando dati grezzi (odometria, navigazione inerziale, stima del movimento visuale, ecc.). Nei metodi di stima del movimento, l'errore sulla stima di posizione ottenuta cresce col tempo, qualsiasi sia il tipo di movimento.

I metodi di affinamento della posizione, invece, consentono di stimare la posizione di un robot o di un

rover (o di correggere una stima iniziale di posizione) utilizzando modelli ambientali. Tali modelli possono sia descrivere caratteristiche ambientali utili alla localizzazione del robot/rover, ad esempio punti di riferimento, che rappresentare continuamente la geometria del terreno, come ad esempio i modelli digitali di elevazione ("Digital Elevation Models" - DEMs).

Infine, i metodi di localizzazione assoluta mirano a localizzare un robot od un rover rispetto ad un modello globale iniziale dell'ambiente che può, ad esempio, essere costruito sulla base di immagini acquisite da satellite o di modelli digitali del terreno determinati sulla base di dette immagini.

La seguente tabella riporta sinteticamente il comportamento dell'errore e la frequenza tipica di funzionamento delle tre suddette tipologie di metodi per l'auto-localizzazione di un robot/rover insieme con le tecniche che rientrano nelle tre diverse tipologie.

TABELLA

TIPOLOGIA	COMPORTAMENTO DELL' ERRORE	FREQUENZA TIPICA DELL' ERRORE	TECNICHE
------------------	---------------------------------------	--	-----------------

Metodi di stima del movimento	Crescita dell'errore di stima non limitata	10 Hz	• Navigazione inerziale; • Odometria; • Stima del movimento a visione stereo
Metodi di affinamento della posizione	L'errore cresce quando si esplorano nuove aree, mentre si riduce quando si ri-attraversano aree già visitate	1 Hz	• Localizzazione su punti di riferimento; • Localizzazione basata su DEM; • Indicizzazione di viste panoramiche
Metodi di localizzazione assoluta	Limitato	0,1 Hz	• Localizzazione basata su modelli

OGGETTO E RIASSUNTO DELL' INVENZIONE

La Richiedente ha condotto uno studio molto approfondito sui sistemi di localizzazione attualmente utilizzati per la navigazione di un robot/rover ed, al

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

termine di tale studio, ha sentito la necessità di sviluppare un innovativo sistema di localizzazione per ambienti sconosciuti e/o difficili che risulti operativamente più affidabile e più robusto di quelli attualmente noti e che, quindi, possa essere vantaggiosamente sfruttato per la navigazione di un robot/rover in tali ambienti, per l'esplorazione di tali ambienti e per il monitoraggio di tali ambienti.

Quindi scopo della presente invenzione è quello di fornire un sistema di localizzazione del suddetto tipo.

Il suddetto scopo è raggiunto dalla presente invenzione in quanto essa è relativa ad un sistema di localizzazione, ad un sistema di navigazione, ad un sistema di esplorazione e ad un sistema di monitoraggio, secondo quanto definito nelle rivendicazioni allegate.

In particolare, il sistema di localizzazione secondo la presente invenzione comprende una pluralità di nodi ciascuno dei quali include una rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga. Detti nodi comprendono un nodo principale ed una pluralità di nodi secondari e sono configurati per formare una rete gerarchica di comunicazione in cui:

- il nodo principale è associato ad un livello gerarchico principale ed ogni nodo secondario è associato ad un rispettivo livello gerarchico secondario inferiore al

livello gerarchico principale;

- ogni nodo secondario è configurato per
 - eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure di distanza rispetto a, ed insieme con, altri nodi secondari associati allo stesso livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario, e rispetto a, ed insieme con, altri nodi associati a livelli gerarchici adiacenti al livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario, ed
 - inviare al nodo principale messaggi di integrità che indicano un rispettivo stato di integrità e messaggi di distanza concernenti le misure di distanza eseguite da detto nodo secondario; ed
- il nodo principale è configurato per
 - eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure di distanza rispetto a, ed insieme con, nodi secondari associati ad un livello gerarchico secondario immediatamente inferiore al livello gerarchico principale,
 - calcolare un sistema di coordinate di riferimento sulla base delle misure di distanza

eseguite da detto nodo principale e dei messaggi di distanza ricevuti dai nodi secondari, e

- determinare uno stato di integrità del sistema di localizzazione sulla base dei messaggi di integrità ricevuti dai nodi secondari.

Il sistema di navigazione secondo la presente invenzione comprende il suddetto sistema di localizzazione ed un dispositivo di navigazione che include un'interfaccia radio a banda ultra larga ed è destinato ad essere installato a bordo di un veicolo. In detto sistema di navigazione il nodo principale è configurato per inviare al dispositivo di navigazione primi dati di navigazione concernenti il sistema di coordinate di riferimento e lo stato di integrità del sistema di localizzazione, ed il dispositivo di navigazione è configurato per:

- eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure di distanza rispetto a, ed insieme con, uno o più nodo/i del sistema di localizzazione; e
- calcolare una posizione del veicolo sulla base dei primi dati di navigazione ricevuti dal nodo principale e delle misure di distanza eseguite da detto dispositivo di navigazione.

Il sistema di esplorazione secondo la presente

invenzione comprende il suddetto sistema di navigazione, ed un veicolo di esplorazione a bordo del quale è installato il dispositivo di navigazione.

Il sistema di monitoraggio secondo la presente invenzione comprende il suddetto sistema di localizzazione. In detto sistema di monitoraggio uno o più nodo/i è/sono configurato/i per:

- acquisire dati concernenti un ambiente circostante; ed
- inviare i dati acquisiti al nodo principale.

BREVE DESCRIZIONE DEI DISEGNI

Per una migliore comprensione della presente invenzione, alcune forme preferite di realizzazione, fornite a puro titolo di esempio esplicativo e non limitativo, verranno ora illustrate con riferimento ai disegni annessi (non in scala), in cui:

- la Figura 1 mostra schematicamente esempi di comunicazioni radio realizzate in un sistema di navigazione secondo una forma preferita di realizzazione della presente invenzione;
- la Figura 2 mostra schematicamente l'entrata nell'atmosfera di un pianeta extraterrestre da parte di un veicolo spaziale, e la discesa e l'atterraggio del veicolo spaziale sul pianeta extraterrestre;
- la Figura 3 mostra schematicamente il rilascio di

dispositivi di comunicazione senza fili durante la discesa di un veicolo spaziale su un pianeta extraterrestre secondo una forma preferita di realizzazione della presente invenzione;

- la Figura 4 mostra schematicamente un esempio di protocollo di comunicazione utilizzabile secondo una forma preferita di realizzazione della presente invenzione per attivare e configurare un dispositivo di comunicazione senza fili; e

- la Figura 5 mostra schematicamente un calcolo di coordinate di un dispositivo di comunicazione senza fili secondo una forma preferita di realizzazione della presente invenzione.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DI FORME PREFERITE DI REALIZZAZIONE DELL' INVENZIONE

La seguente descrizione viene fornita per permettere ad un tecnico del settore di realizzare ed usare l'invenzione. Varie modifiche alle forme di realizzazione presentate saranno immediatamente evidenti a persone esperte ed i generici principi qui divulgati potrebbero essere applicati ad altre forme di realizzazione ed applicazioni senza, però, per questo uscire dall'ambito di tutela della presente invenzione.

Quindi, la presente invenzione non deve essere intesa come limitata alle sole forme di realizzazione descritte e

mostrate, ma le deve essere accordato il più ampio ambito di tutela coerentemente con i principi e le caratteristiche qui presentate e definite nelle rivendicazioni allegate.

In particolare, nel seguito, per semplicità di descrizione, verrà descritta una forma preferita di realizzazione della presente invenzione che concerne la navigazione di un rover, ovvero un veicolo automatico di superficie, su un pianeta extraterrestre, ma, come appena detto, la presente invenzione non deve essere intesa come limitata solamente a tale forma preferita di realizzazione. Infatti, la presente invenzione può essere vantaggiosamente sfruttata per:

- la navigazione di un qualsiasi tipo di veicolo, automatico o controllato da remoto, che è configurato per muoversi in superficie e/o sottacqua; e

- la localizzazione e/o la navigazione in, e/o l'esplorazione e/o il monitoraggio di, un qualsiasi ambiente sconosciuto e/o difficile (ovvero impervio), come ad esempio

- un oggetto (ovvero corpo) celeste, ad esempio un pianeta, un satellite naturale, o un asteroide,
- una zona colpita da una cataclisma, ad esempio una zona colpita da un terremoto e/o uno tsunami e/o un'alluvione e/o interessata da

- un'eruzione vulcanica e/o una frana,
- un ambiente sottomarino, ecc..

Come appena detto, una forma preferita di realizzazione della presente invenzione concerne un sistema di navigazione di un rover su un pianeta extraterrestre.

In particolare, detto sistema di navigazione comprende:

- un lander che, com'è noto, è un veicolo spaziale ("spacecraft") che discende e poi sosta sulla superficie di un corpo celeste, ovvero, nel presente caso, sulla superficie di un pianeta extraterrestre, e che, secondo la forma preferita di realizzazione della presente invenzione, è equipaggiato con una prima interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia a banda ultra larga ("Ultra Wide Band" - UWB) e con una seconda interfaccia radio a lungo raggio che può essere anch'essa basata su tecnologia a banda ultra larga (UWB) o può essere basata su una differente tecnologia di radiocomunicazione;
- almeno un rover, ovvero un veicolo automatico di superficie, che è configurato per muoversi sulla superficie del pianeta extraterrestre ed è equipaggiato con una prima interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia UWB e con una seconda interfaccia radio a lungo raggio basata sulla stessa tecnologia di radiocomunicazione della seconda interfaccia radio a lungo raggio del lander (UWB o altra tecnologia di radiocomunicazione); ed

- una pluralità di dispositivi di comunicazione senza fili ("wireless") che nel seguito verranno chiamati, per semplicità di descrizione, dispositivi wireless, che sono equipaggiati ciascuno con una rispettiva interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia UWB, e che sono destinati, in uso, ad essere dispiegati in un'area della superficie del pianeta extraterrestre che rappresenta l'area operativa del sistema di navigazione, ovvero l'area in cui il sistema di navigazione fornisce il servizio di localizzazione e navigazione del rover.

Nel seguito, per semplicità di descrizione, si farà riferimento ad un singolo rover, fermo restando che quanto verrà descritto nel seguito relativamente alla navigazione di un singolo rover può essere esteso alla navigazione di una pluralità di rover e, più in generale, alla navigazione di una pluralità di veicoli automatici o controllati da remoto che sono configurati per muoversi in superficie e/o sottacqua.

Inoltre, nel seguito il funzionamento del sistema di navigazione secondo la forma preferita di realizzazione della presente invenzione verrà descritto in dettaglio presentando le varie funzionalità di ogni componente di detto sistema. In particolare, nel seguito le varie funzionalità di ogni componente del sistema di navigazione verranno spesso descritte, per semplicità di descrizione,

come implementate dal componente nel suo complesso, ad esempio nel seguito verranno spesso descritte le funzionalità implementate dal lander nel suo complesso e le funzionalità implementate dal rover nel suo complesso. A tal riguardo è importante sottolineare che, al fine di definire e far comprendere la presente invenzione, risulta fondamentale descrivere le funzionalità implementate da ogni componente e che, una volta che saranno state descritte tali funzionalità, sarà chiaro al tecnico del settore il tipo di architettura hardware e software di ogni componente che consente a tale componente di implementare le rispettive funzionalità. Ad esempio, al termine della seguente descrizione sarà chiaro per il tecnico del settore che il lander, al fine di implementare le rispettive funzionalità, può convenientemente comprendere:

- un apparato di comunicazione che include la rispettiva prima interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia UWB e la rispettiva seconda interfaccia radio a lungo raggio, e che è configurato per usare tali interfacce per comunicare con, inviare comandi a, e scambiare dati con, il/i rover ed i dispositivi wireless in accordo con quanto verrà descritto nel seguito;

- un'unità di elaborazione dati configurata per eseguire le elaborazioni ed i calcoli che saranno descritti nel seguito in relazione al lander;

- un'unità di controllo missione configurata per monitorare e controllare la missione del/i rover sulla base delle informazioni fornite dal/i rover e delle informazioni ottenute grazie al sistema di navigazione in accordo con quanto verrà descritto nel seguito;

- ecc..

Allo stesso modo, al termine della seguente descrizione sarà chiaro per il tecnico del settore che ogni rover, al fine di implementare le rispettive funzionalità, può convenientemente comprendere:

- un rispettivo apparato di comunicazione che include la rispettiva prima interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia UWB e la rispettiva seconda interfaccia radio a lungo raggio, e che è configurato per usare tali interfacce per comunicare e scambiare dati con il lander ed i dispositivi wireless in accordo con quanto verrà descritto nel seguito;

- una rispettiva unità di elaborazione dati configurata per eseguire le elaborazioni ed i calcoli in accordo con quanto verrà descritto nel seguito;

- una rispettiva unità di guida configurata per pilotare il rover sulla base delle informazioni ottenute grazie al sistema di navigazione in accordo con quanto verrà descritto nel seguito;

- ecc..

Tornando ora alla descrizione del sistema di navigazione secondo la forma preferita di realizzazione della presente invenzione, il lander ed i dispositivi wireless sono configurati per formare una rete gerarchica di comunicazione che opera come sistema di localizzazione per il rover. In tale rete gerarchica di comunicazione il lander calcola, come verrà spiegato in dettaglio nel seguito, un sistema di riferimento locale sulla base di misure di distanza, ovvero di ranging, che ogni dispositivo wireless calcola rispetto ai dispositivi wireless con cui detto dispositivo wireless riesce ad instaurare una comunicazione wireless tramite l'interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia UWB (posizionamento cooperativo). Il rover è considerato come un "nodo dinamico" della rete gerarchica di comunicazione e può recuperare la propria posizione nel sistema di riferimento locale sia calcolando autonomamente la propria posizione sia ricevendo informazioni e dati da un'unità di elaborazione dati del lander.

Più dettagliatamente, il lander opera come nodo principale della rete gerarchica di comunicazione e rappresenta l'origine del sistema di riferimento locale. Il rover comunica, tramite l'interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia UWB, con i dispositivi wireless al fine di determinare la propria posizione nel sistema di

riferimento locale. In particolare, la posizione del rover viene determinata nel sistema di riferimento locale e, se il lander è referenziato su un sistema di riferimento globale, ad esempio un sistema di riferimento planetario, allora anche la posizione del rover può essere calcolata nel sistema di riferimento globale. Questa capacità porta alla possibilità di referenziare la posizione del rover rispetto ad un sistema di riferimento planetario e, quindi, alla possibilità di referenziare rispetto ad un sistema di riferimento planetario anche le informazioni e i dati, in termini di posizione, raccolti da eventuali sensori con cui possono essere convenientemente equipaggiati il lander, il rover ed i dispositivi wireless.

Il protocollo di comunicazione utilizzato dai dispositivi wireless consente di:

- calcolare il sistema di riferimento locale necessario per la navigazione del rover all'interno dell'area operativa del sistema di navigazione;
- fornire al rover le informazioni utili per calcolare la propria posizione nell'area operativa del sistema di navigazione;
- ottimizzare l'accesso al canale radio basato su tecnologia UWB e l'uso delle risorse radio dei dispositivi wireless;
- implementare meccanismi che permettono alla rete

gerarchica di comunicazione di funzionare da rete di comunicazione di riserva ("back-up") per il trasferimento di dati e/o informazioni tra il rover ed il lander;

- monitorare lo stato dei singoli dispositivi wireless;

- fornire i dati necessari al calcolo dell'integrità del sistema di navigazione; ed

- implementare le funzionalità di barriera logica per delimitare l'area operativa del sistema di navigazione e per fornire allarmi di prossimità al rover al fine di evitare collisioni.

Inoltre, il protocollo di comunicazione utilizzato dai dispositivi wireless consente ad ogni dispositivo wireless di comunicare con il lander tramite un meccanismo di instradamento("routing") che sfrutta dispositivi wireless intermedi (meccanismo di instradamento "multi-hop") nel caso in cui il lander sia fuori dalla portata diretta di comunicazione dell'interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia UWB di detto dispositivo wireless.

Il sistema di navigazione implementa un concetto di calcolo centralizzato al fine di minimizzare il consumo energetico dei dispositivi wireless. Infatti, l'unità di elaborazione dati del lander svolge i calcoli che risultano più gravosi in termini di potenza di calcolo richiesta, come ad esempio:

- il calcolo della geometria del sistema di riferimento locale basato sulle informazioni inviate dai singoli dispositivi wireless;
- il calcolo dei percorsi di instradamento; e
- la determinazione dello stato di integrità del sistema di navigazione.

Inoltre, l'unità di elaborazione dati del lander può convenientemente fornire anche un calcolo ausiliario/supplementare della posizione del rover in base ai segnali che il rover riceve dai dispositivi wireless, ad esempio nel caso in cui il rover debba risparmiare energia o nel caso in cui le risorse computazionali del rover debbano essere dirottate su altri compiti.

Il sistema di navigazione utilizza due differenti canali di comunicazione radio:

- un primo canale radio basato su tecnologia UWB che viene utilizzato per le misure di distanza realizzate dai dispositivi wireless e per le comunicazioni tra i dispositivi wireless, per le misure di distanza realizzate cooperativamente dai dispositivi wireless e dal lander, per le comunicazioni tra i dispositivi wireless ed il lander, e per le comunicazioni tra i dispositivi wireless ed il rover; il primo canale radio può essere convenientemente utilizzato anche come canale ridondante per il trasferimento di dati tra il rover ed il lander; ogni

dispositivo wireless accede al primo canale radio utilizzando la rispettiva interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia UWB; il lander ed il rover accedono al primo canale radio utilizzando, ciascuno, la rispettiva prima interfaccia radio a corto raggio basata su tecnologia UWB; ed

- un secondo canale radio che viene utilizzato per le comunicazioni tra il lander ed il rover; il lander ed il rover accedono al secondo canale radio utilizzando, ciascuno, la rispettiva seconda interfaccia radio a lungo raggio; le caratteristiche del secondo canale radio (banda, modulazione, codifica, potenza, ecc.) dipendono dalla tipologia di missione e permettono al lander di comunicare con il rover in tutta l'area coperta dal primo canale radio più un margine di sicurezza che dipende dai parametri di missione (ad esempio la velocità del rover, la latenza nell'elaborazione dei comandi, ecc.); poiché la tecnologia UWB può essere utilizzata anche per comunicazioni a lunga distanza, le seconde interfacce radio a lungo raggio del lander e del rover, come precedentemente descritto, possono essere basate anch'esse su tecnologia UWB e, quindi, il secondo canale radio può essere anch'esso basato su tecnologia UWB; nel caso in cui le seconde interfacce radio a lungo raggio del lander e del rover siano basate anch'esse su tecnologia UWB, tali interfacce non sarebbero

comunque indicate per eseguire misure precise di distanza e, quindi, non sarebbero sfruttate a tal fine; pertanto, al fine di realizzare la presente invenzione, è possibile sfruttare, per motivi di efficienza/semplificata progettuale e/o di consumo energetico, una doppia infrastruttura di radiocomunicazione UWB: una prima infrastruttura di radiocomunicazione UWB a corto raggio per le misure di distanza e le comunicazioni a corto raggio, ed una seconda infrastruttura di radiocomunicazione UWB per le comunicazioni a lungo raggio e senza necessità di instradamento; inoltre, nel caso in cui le seconde interfacce radio a lungo raggio del lander e del rover siano basate anch'esse su tecnologia UWB, differenti modulazioni e/o differenti potenze di trasmissione potrebbero essere convenientemente utilizzate sui due canali radio al fine di minimizzare l'interferenza reciproca; in ogni caso, sempre come precedentemente descritto, le seconde interfacce radio a lungo raggio del lander e del rover (e, quindi, il secondo canale radio) possono essere basate su una diversa tecnologia di radiocomunicazione; ad esempio le seconde interfacce radio a lungo raggio del lander e del rover potrebbero convenientemente essere quelle normalmente utilizzate nelle missioni di esplorazione per scambiare dati tra lander e rover.

In figura 1 vengono mostrati schematicamente esempi di comunicazioni radio basate sui due suddetti canali radio.

In particolare, la figura 1 mostra:

- il lander (indicato con 11);
- il rover (indicato con 12);
- i dispositivi wireless (indicati con 13) dispiegati sulla superficie del pianeta extraterrestre;

- una prima area di copertura radio (rappresentata da un primo cerchio indicato nel suo insieme con 14) che rappresenta l'area di copertura del primo canale radio per le comunicazioni basate su tecnologia UWB del lander 11;

- una seconda area di copertura radio (rappresentata da un secondo cerchio indicato nel suo insieme con 15) che rappresenta l'area di copertura del primo canale radio per le comunicazioni basate su tecnologia UWB del rover 12;

- una terza area di copertura radio (rappresentata da un terzo cerchio indicato nel suo insieme con 16) che rappresenta l'area di copertura del secondo canale radio per le comunicazioni a lungo raggio tra il lander 11 ed il rover 12;

- una prima comunicazione radio bidirezionale (rappresentata da una prima freccia puntinata bidirezionale) basata su tecnologia UWB, ovvero realizzata sul primo canale radio, tra il lander 11 ed un primo dispositivo wireless 13 che rientra nella prima area di

copertura 14;

- seconde comunicazioni radio bidirezionali (rappresentate da seconde frecce puntinate bidirezionali) basate su tecnologia UWB, ovvero realizzate sul primo canale radio, tra secondi dispositivi wireless 13 che rientrano nella seconda area di copertura 15 e tra il rover 12 e detti secondi dispositivi wireless;

- una terza comunicazione radio bidirezionale (rappresentata da una freccia tratto-punto bidirezionale) realizzata sul secondo canale radio tra il lander 11 ed il rover 12; e

- quarte comunicazioni radio bidirezionali (rappresentate da frecce tratteggiate bidirezionali) tra il lander 11 ed i secondi dispositivi wireless 13 che rientrano nella seconda area di copertura 15; dette quarte comunicazioni radio bidirezionali sono basate su tecnologia UWB, ovvero sono realizzate sul primo canale radio, e sono realizzate tramite il meccanismo di instradamento multi-hop (che è stato precedentemente introdotto e che verrà descritto in dettaglio nel seguito) della rete gerarchica di comunicazione.

Nella figura 1 è possibile notare come alcuni dispositivi wireless 13 possano trovarsi anche fuori della terza area di copertura radio 16, ovvero oltre il limite della copertura fornita del secondo canale radio. Tale

condizione non rappresenta un'anomalia in quanto il sistema di navigazione è in grado di utilizzare tali dispositivi wireless 13 sia per le normali operazioni (quelle che avvengono nel raggio di copertura del secondo canale radio), che come sistema di sicurezza per condizioni d'emergenza nel caso in cui il rover 12 venga a trovarsi fuori dalla portata del secondo canale radio (ad esempio a causa di errori nell'elaborazione dei comandi o a causa di una diminuzione nella potenza di trasmissione del lander 11 e/o del rover 12).

Preferibilmente, i dispositivi wireless sono dispiegati sulla superficie del pianeta extraterrestre durante la discesa del lander sul pianeta extraterrestre. A tal riguardo in figura 2 vengono mostrate, schematicamente ed a puro titolo di esempio, l'entrata nell'atmosfera del pianeta extraterrestre da parte del lander, e la discesa e l'atterraggio del lander sul pianeta extraterrestre.

In particolare, la figura 2 mostra:

- una prima fase (indicata con 21) in cui un modulo spaziale che comprende il lander entra nell'atmosfera del pianeta extraterrestre; in tale prima fase 21 mancano 5 minuti all'atterraggio ed il modulo spaziale è ad una quota di 125 Km dalla superficie del pianeta extraterrestre ed ha una velocità di 6.900 m/s;
- una seconda fase (indicata con 22) in cui il modulo

spaziale dispiega un paracadute; in tale seconda fase 22 mancano 2 minuti all'atterraggio ed il modulo spaziale è ad una quota di 8.800 m dalla superficie del pianeta extraterrestre ed ha una velocità di 490 m/s;

- una terza fase (indicata con 23) in cui il modulo spaziale sgancia uno scudo termico; in tale terza fase 23 mancano 110 secondi all'atterraggio ed il modulo spaziale è ad una quota di 7.500 m dalla superficie del pianeta extraterrestre ed ha una velocità di 250 m/s;

- una quarta fase (indicata con 24) in cui il lander si sgancia dal modulo spaziale; in tale quarta fase 24 mancano 35 secondi all'atterraggio ed il lander è ad una quota di 1.300 m dalla superficie del pianeta extraterrestre ed ha una velocità di 80 m/s; ed

- una quinta fase (indicata con 25) in cui il lander atterra sulla superficie del pianeta extraterrestre con una velocità di 2,5 m/s.

Come precedentemente descritto, i dispositivi wireless sono preferibilmente rilasciati durante la discesa del lander sul pianeta extraterrestre a differenti quote in maniera tale da coprire un'area a terra della dimensione necessaria alla missione di esplorazione del rover. L'area a terra coperta dai dispositivi wireless è l'area operativa, o area di servizio, in cui il sistema di navigazione fornisce le sue capacità di determinare la

posizione del rover. Inoltre, la rete dei dispositivi wireless può essere convenientemente espansa tramite ulteriori dispositivi wireless rilasciati dal rover durante il suo movimento sulla superficie del pianeta extraterrestre al fine di estendere e migliorare la copertura, le prestazioni e l'integrità del servizio di localizzazione e navigazione. Pertanto, per riassumere, il dispiegamento dei dispositivi wireless, che determina l'area di servizio e le prestazioni del sistema di navigazione, può essere effettuato:

- durante le fasi di entrata, discesa ed atterraggio ("Entry, Descent and Landing" - EDL) del lander; e/o
- dal rover durante la sua missione di esplorazione del pianeta extraterrestre.

A tal riguardo in figura 3 viene mostrato, schematicamente ed a puro titolo di esempio, il rilascio di dispositivi wireless durante la discesa del lander sul pianeta extraterrestre, in particolare in una fase della discesa che è compresa tra la seconda fase 22 e la quarta fase 24 mostrate in figura 2.

In dettaglio, la figura 3 mostra:

- il modulo spaziale (indicato con 31) che comprende il lander e che sta discendendo sulla superficie del pianeta extraterrestre; ed
- una pluralità di dispositivi wireless (indicati con

32) rilasciati dal modulo spaziale 31 durante la discesa.

Come precedentemente descritto, il dispiegamento dei dispositivi wireless durante le fasi EDL determina l'area di servizio del sistema di navigazione. Pertanto, nella realizzazione di tale dispiegamento è importante tener conto della distribuzione geometrica dei dispositivi wireless e della loro distanza reciproca sulla superficie del pianeta extraterrestre.

In particolare, la distanza attesa dei dispositivi wireless dalla verticale della posizione del lander durante le fasi EDL può essere convenientemente determinata in via preliminare durante la fase di pianificazione della missione al fine di definire l'area di servizio del sistema di navigazione e la densità dei dispositivi wireless.

Ad esempio, al fine di ottenere tramite 70 dispositivi wireless un'area di servizio di circa 1,5 Km di diametro con una distanza media tra i dispositivi wireless di circa 200 m, detti dispositivi wireless potrebbero essere convenientemente rilasciati durante le fasi EDL del lander nel seguente modo:

- 30 dispositivi wireless rilasciati ad una quota di 6.000 m dalla superficie del pianeta extraterrestre;
- 20 dispositivi wireless rilasciati ad una quota di 3.000 m dalla superficie del pianeta extraterrestre;
- 15 dispositivi wireless rilasciati ad una quota di

2.000 m dalla superficie del pianeta extraterrestre; e

- 5 dispositivi wireless rilasciati ad una quota di 1.000 m dalla superficie del pianeta extraterrestre.

Ovviamente i numeri appena forniti rappresentano una stima grezza poiché non tengono conto delle perturbazioni atmosferiche, come i venti e l'attrito, e della conformazione del terreno (ad esempio pendenze, rocce, crateri, ecc.) che possono deviare/disturbare l'atterraggio dei dispositivi wireless (ad esempio causando rimbalzi, scivolamenti, ecc.). Tutte queste perturbazioni possono essere convenientemente tenute in conto nella fase di analisi e definizione della missione per il dimensionamento del sistema di navigazione.

Inoltre, come precedentemente descritto, quando il rover è operativo e sta per raggiungere il bordo dell'area di servizio, può convenientemente rilasciare ulteriori dispositivi wireless al fine di estendere l'area di servizio del sistema di navigazione.

Dopo che i dispositivi wireless sono stati dispiegati sulla superficie del pianeta extraterrestre durante le fasi EDL del lander e dopo che il lander è atterrato ed ha terminato tutte le operazioni preliminari (ad esempio dopo che ha dispiegato i pannelli solari usati per produrre energia), il lander avvia, autonomamente o in risposta ad uno o più comando/i ricevuto/i da remoto (ad esempio da una

stazione di controllo sulla Terra o da una stazione spaziale che orbita intorno al pianeta extraterrestre), una fase di inizializzazione ("start-up") finalizzata a definire la rete gerarchica di comunicazione formata dal lander e dai dispositivi wireless.

All'inizio di tale fase di inizializzazione tutti i dispositivi wireless, precedentemente posizionati al suolo nell'area operativa, si trovano in modalità "standby", ovvero in attesa passiva di un messaggio di attivazione trasmesso dal lander.

La generazione e trasmissione di messaggi di controllo nella rete gerarchica di comunicazione si basa su un sistema gerarchico strutturato a più livelli identificati da un numero naturale compreso tra 0 e MAX_LEVEL in cui minore è il numero, maggiore è l'autorità dei messaggi trasmessi. In tale gerarchia, il lander rappresenta il nodo di livello 0, mentre tutti i dispositivi wireless, prima dell'inizializzazione, sono convenientemente preconfigurati su un livello pari a MAX_LEVEL.

Il primo passo della fase di inizializzazione prevede che il lander, ovvero il nodo di livello 0 della rete gerarchica di comunicazione, effettui una ricerca dei dispositivi wireless ad esso adiacenti sul primo canale radio, ovvero sul canale radio basato su tecnologia UWB. Secondo la presente invenzione e, quindi, nella seguente

descrizione, l'adiacenza è definita in termini di "visibilità radio". In particolare, secondo la presente invenzione e nella seguente descrizione, due nodi della rete gerarchica di comunicazione sono detti adiacenti se e solo se è instaurabile tra loro una comunicazione wireless basata sull'uso della tecnologia UWB a corto raggio, ovvero basata sull'uso del primo canale radio.

La ricerca dei dispositivi radio adiacenti al lander consiste nell'invio in broadcast di un messaggio di attivazione (ovvero indirizzato a tutti) da parte del lander. I dispositivi wireless che sono in grado di ricevere il messaggio di attivazione rispondono al lander ed iniziano ad eseguire misure di distanza (ovvero di ranging) con il lander. Tali dispositivi wireless concorrono alla determinazione del livello 1 della rete gerarchica di comunicazione. In particolare, le misure di ranging proseguono per un tempo prefissato al termine del quale vengono determinati i dispositivi wireless le cui distanze rispondono a predeterminati parametri di stabilità statistica delle misure di ranging; tali dispositivi wireless diventano i nodi di livello 1 della rete gerarchica di comunicazione.

A tal riguardo in figura 4 viene mostrato schematicamente un esempio di protocollo di comunicazione utilizzabile secondo una forma preferita di realizzazione

della presente invenzione per attivare e per configurare come nodo di livello 1 un dispositivo wireless adiacente al lander.

In particolare, la figura 4 mostra un diagramma temporale dei messaggi scambiati sul primo canale radio tra il lander (indicato con 41) ed un dispositivo wireless (indicato con 42) ad esso adiacente.

In dettaglio, la figura 4 mostra schematicamente:

- la trasmissione in broadcast sul primo canale radio da parte del lander 41 di un messaggio di attivazione che causa l'attivazione dei dispositivi wireless da cui è ricevuto e che viene ricevuto dal dispositivo wireless 42 che, quindi, si attiva (tale messaggio di attivazione comprende convenientemente alcuni parametri, come ad esempio un riferimento temporale ("timestamp") per la sincronizzazione tra il lander 41 ed il dispositivo wireless 42, l'indirizzo MAC (Media Access Control) del lander 41, e l'identificativo del livello del lander 41, ovvero l'identificativo del livello 0);

- l'invio sul primo canale radio dal dispositivo wireless 42 al lander 41 di un messaggio di risposta (tale messaggio di risposta comprende convenientemente l'indirizzo MAC del dispositivo wireless 42 e la richiesta di misure di ranging);

- una sessione di ranging in cui il lander 41 ed il

dispositivo wireless 42 si trasmettono mutuamente segnali a radiofrequenza sul primo canale radio, effettuano misure di ranging, ovvero di distanza, sulla base della potenza dei segnali rispettivamente ricevuti, si scambiano sul primo canale radio informazioni relative a tali misure di distanza e memorizzano i risultati delle varie misure effettuate; dopo che è trascorso un tempo prefissato dall'inizio della sessione di ranging, il lander 41 determina i nodi di livello 1 sulla base delle misure di distanza effettuate;

- l'invio sul primo canale radio dal lander 41 al dispositivo wireless 42 di un messaggio di fine sessione di ranging che comprende l'identificativo del livello assegnato al dispositivo wireless 42, ovvero l'identificativo del livello 1; e

- l'invio sul primo canale radio dal dispositivo wireless 42 al lander 41 di un messaggio di conferma (tale messaggio di conferma comprende convenientemente informazioni sullo stato del dispositivo wireless, come ad esempio il livello di carica della batteria del dispositivo wireless 42).

Al termine della fase di inizializzazione dei nodi di livello 1, i dispositivi wireless identificati come nodi di livello 1 eseguono misure di ranging con tutti gli altri dispositivi wireless attivi (che in questa fase comprendono

solo il lander ed i dispositivi wireless di livello 1). Le misure così raccolte vengono inviate al lander che le utilizza per determinare la geometria del sistema di riferimento locale. In particolare, al fine di determinare un sistema di riferimento bidimensionale locale sono necessari almeno due dispositivi wireless attivi di livello 1, mentre per determinare un sistema di riferimento tridimensionale locale serve un numero minimo di misure superiore.

Nel seguito, per semplicità di descrizione, verrà descritto un procedimento di esempio utilizzabile per determinare un sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale, fermo restando che tale procedimento è applicabile, *mutatis mutandis*, anche per la determinazione di un sistema di riferimento cartesiano tridimensionale locale.

Il primo passo nella determinazione di un sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale è la selezione di un nodo (ovvero di un dispositivo wireless) che consenta di fissare l'asse delle ascisse, ovvero l'asse x , del sistema di riferimento cartesiano bidimensionale. Tale asse x è individuato dall'ipotetico segmento che congiunge il lander ed il dispositivo wireless selezionato. In questo modo viene automaticamente determinata la posizione, nel sistema di riferimento cartesiano bidimensionale, del nodo

scelto per fissare l'asse x . Infatti tale nodo ha le coordinate $(d(L,k),0)$, dove $d(L,k)$ rappresenta la distanza dal lander del dispositivo wireless k scelto per fissare l'asse x . In questo modo viene automaticamente determinato anche l'asse delle ordinate, ovvero l'asse y , del sistema di riferimento cartesiano bidimensionale.

Il criterio di selezione del dispositivo wireless utilizzato per fissare l'asse x del sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale si basa sull'utilizzo di informazioni statistiche raccolte durante la fase di inizializzazione del livello 1 della rete gerarchica di comunicazione. In particolare, viene scelto il nodo (ovvero il dispositivo wireless) che presenta, da un punto di vista statistico, le misure maggiormente stabili e robuste. Ad esempio, per scegliere il nodo possono essere considerati i seguenti parametri: lo scarto tra la minima e la massima distanza misurate, e statistiche del primo e del secondo ordine (media e varianza) sulle misure di ranging effettuate tra l'elemento (ovvero il dispositivo wireless) considerato, il lander e tutti gli altri dispositivi wireless adiacenti. Un altro parametro che può essere considerato è il numero di dispositivi wireless adiacenti al nodo considerato. Lo scopo di questa valutazione è la scelta di un nodo che garantisca la maggior stabilità nelle misure (minimizzazione della propagazione degli errori di

misura) e che sia in comunicazione con il maggior numero possibile di altri nodi. Queste informazioni forniscono implicitamente indicazioni circa la stabilità al suolo del nodo e la qualità del segnale (cammini multipli ("multipath"), linea di vista ("Line of Sight" - LOS), ecc.).

Una volta che è stato scelto il nodo per fissare l'asse x del sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale e, quindi, una volta che è stato fissato automaticamente anche l'asse y del sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale, il lander utilizza le misure raccolte in fase di inizializzazione del livello 1 per calcolare le coordinate dei restanti nodi.

In particolare, le coordinate vengono calcolate in modo incrementale aggiungendo, ad uno ad uno, i nodi di livello 1 a cui non sono state ancora assegnate le coordinate nel sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale. In dettaglio, il lander calcola le coordinate dei nodi di livello 1 sulla base delle coordinate dei nodi di livello 1 di cui già sono state determinate le coordinate e delle misure di ranging raccolte in fase di inizializzazione del livello 1. In questo contesto il lander è il nodo di coordinate $(0,0)$, ovvero rappresenta l'origine del sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale.

A tal riguardo, in Figura 5 viene mostrato

schematicamente il calcolo delle coordinate di un generico nodo (ovvero dispositivo wireless) j di livello 1 sulla base delle coordinate del lander e del nodo k scelto per fissare l'asse x del sistema di riferimento locale, della distanza del nodo k dal lander calcolata in fase di inizializzazione del livello 1, della distanza del nodo j dal lander calcolata in fase di inizializzazione del livello 1 e della distanza del nodo k dal nodo j calcolata in fase di inizializzazione del livello 1.

In particolare, la figura 5 mostra:

- il lander (indicato con L) che è posizionato nel punto di coordinate $(0,0)$, ovvero nell'origine, del sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale xy ;
- il nodo k che è stato scelto per fissare l'asse x del sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale xy , che è ad una distanza $d(L,k)$ dal lander L e che, quindi, è posizionato nel punto di coordinate $(d(L,k),0)$; ed
- il generico nodo j che è ad una distanza $d(L,j)$ dal lander L e ad una distanza $d(j,k)$ dal nodo k .

Le coordinate (j_x, j_y) del nodo j possono essere espresse matematicamente secondo le due seguenti formule trigonometriche:

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

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

dove β indica l'angolo compreso tra l'asse x ed il segmento che congiunge il lander ed il nodo j e che è lungo $d(L,j)$.

Inoltre, per il teorema del coseno (o di Carnot), risulta che:

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

Pertanto, poiché le distanze $d(L,k)$, $d(L,j)$ e $d(j,k)$ sono state calcolate in fase di inizializzazione del livello 1 e, quindi, sono note, è possibile determinare β e, quindi, le coordinate (j_x, j_y) del nodo j.

La procedura di calcolo delle coordinate appena descritta viene, quindi, ripetuta dal lander per ogni dispositivo wireless di livello 1 a cui non sono state ancora assegnate le coordinate nel sistema di riferimento cartesiano bidimensionale locale.

La procedura per definire il sistema di riferimento locale appena descritta per il caso bidimensionale può, come precedentemente detto, essere sfruttata anche per la definizione di un sistema di riferimento locale tridimensionale. In particolare, al fine di determinare un sistema di riferimento tridimensionale locale sono necessari almeno tre dispositivi wireless attivi di livello 1. Inoltre, la precisione e l'affidabilità del calcolo della terza dimensione, ovvero delle coordinate verticali,

possono essere migliorate tramite una tecnica di fusione di dati ("data fusion") basata su dati forniti da sensori accoppiati ai dispositivi wireless (ed eventualmente anche al lander), come ad esempio (nel caso in cui il pianeta extraterrestre abbia un'atmosfera ed il comportamento atmosferico di detto pianeta extraterrestre sia noto) altimetri barometrici, e/o tramite modelli digitali del terreno del pianeta extraterrestre ricavati tramite acquisizioni radar, sistemi di ranging da satellite, ecc.. In ogni caso, è importante sottolineare che la conoscenza della terza coordinata non è necessaria per il funzionamento del sistema di navigazione secondo al presente invenzione che può, quindi, convenientemente lavorare anche con due sole dimensioni.

Una volta che i dispositivi wireless di livello 1 sono stati inizializzati e che il lander ha definito il sistema di riferimento locale ed ha calcolato le coordinate di tutti i dispositivi wireless di livello 1, lo stesso procedimento viene ripetuto per i livelli successivi, ovvero per i nodi che durante la prima fase non erano raggiungibili dal lander.

In particolare, i nodi di livello 1 iniziano la stessa procedura iniziata dal lander, ovvero trasmettono in broadcast un messaggio di attivazione. La differenza principale è che le informazioni raccolte sono inviate dai

nodi di livello 1 al lander dove vengono elaborate.

In dettaglio, ogni nodo di livello 1 esegue misure di ranging con tutti i nodi ad esso adiacenti e non ancora attivi (ovvero il cui identificativo di livello è non assegnato oppure impostato sul valore massimo MAX_LEVEL). Le misure raccolte vengono poi trasferite dai nodi di livello 1 al lander che le utilizza per determinare i nodi da attivare a cui viene, quindi, assegnato l'identificativo del livello 2.

In seguito, analogamente a quanto accaduto per il livello 1, una sessione di misure di ranging viene eseguita dai nodi appena attivati a cui rispondono tutti i nodi attualmente attivi, ovvero, in questa fase, i nodi di livello 2 e livello 1. Tali misure sono inviate da ciascun dispositivo wireless di livello 2, tramite un meccanismo di instradamento che coinvolge almeno un rispettivo nodo di livello 1, al lander che le utilizza per determinare le coordinate dei dispositivi wireless appena attivati.

Lo stesso procedimento viene eseguito per i livelli superiori fino a quando nessun nuovo nodo viene aggiunto alla rete gerarchica di comunicazione. A questo punto la rete gerarchica di comunicazione risulta inizializzata.

Come precedentemente descritto, nella rete gerarchica di comunicazione ogni dispositivo di comunicazione (ovvero ogni nodo) a cui è stato assegnato un rispettivo livello ℓ

(con $1 \leq \ell \leq \text{MAX_LEVEL}$), può comunicare direttamente sul primo canale radio (ovvero sul canale radio basato su tecnologia UWB) solo con i dispositivi wireless (ovvero i nodi) che appartengono al rispettivo livello ℓ , con i nodi che appartengono al livello $\ell-1$ e con i nodi che appartengono al livello $\ell+1$. Pertanto, mentre i nodi di livello 1 sono in comunicazione diretta con il lander, i nodi del livello 2 e dei livelli successivi non possono comunicare direttamente con il lander ed, al fine di raggiungerlo, devono, quindi, utilizzare un protocollo di instradamento che si appoggi ad altri nodi della rete.

Una preferita soluzione al problema di individuazione del cammino di instradamento da un nodo qualsiasi verso il lander prevede l'utilizzo dello stesso approccio incrementale utilizzato per l'attivazione e l'inizializzazione dei nodi della rete gerarchica di comunicazione. Il processo si basa sull'individuazione di almeno un nodo di livello $\ell-1$ di riferimento (dove ℓ indica il livello del nodo per cui si vuole garantire la comunicazione con il lander) che operi da gateway per le comunicazioni verso il lander.

Per i nodi di livello 1 il nodo di riferimento che funziona da gateway per le comunicazioni verso il lander è il lander stesso. Inoltre, i nodi di livello 1 possono operare da gateway verso il lander per i nodi di livello 2.

Allo stesso modo i nodi di livello 2 possono operare da gateway verso il lander per i nodi di livello 3, e così via.

A tal riguardo, si consideri lo scenario in cui la procedura di inizializzazione dei nodi della rete gerarchica di comunicazione sia arrivata al livello $\ell-1$. Ogni nodo di livello $\ell-1$, quindi, è in comunicazione, diretta od indiretta, con il lander. Ciascun nodo di livello $\ell-1$ ripete quindi la procedura di attivazione ed invia in broadcast un messaggio di attivazione. I nodi in stand-by non ancora inizializzati che decodificano correttamente il messaggio di attivazione salvano in un vettore l'indirizzo del mittente come potenziale gateway da scegliere per l'instradamento delle comunicazioni verso il lander. Infatti i mittenti, appartenendo al livello $\ell-1$, hanno già completato la procedura di inizializzazione, per cui devono essere in comunicazione, diretta od indiretta, con il lander, ovvero, anche se non sono in comunicazione diretta con il lander, conoscono un modo per instradare le informazioni verso il lander.

La registrazione di tutti gli indirizzi MAC del livello $\ell-1$ permette ai nodi di scegliere percorsi alternativi di instradamento sia per far fronte a problemi di comunicazione con il gateway scelto, sia per distribuire a rotazione ed in modo uniforme il costo, in termini di

consumo energetico, sui nodi adiacenti.

Altre metodologie di instradamento possono essere convenientemente implementate nella rete gerarchica di comunicazione sia in alternativa alla metodologia appena descritta, sia come metodologie di riserva ("back-up"). In particolare, la metodologia di instradamento più adatta può essere convenientemente scelta in funzione di specifici parametri della missione in cui viene utilizzato il sistema di navigazione (ad esempio in funzione della densità dei nodi, del duty-cycle, della frequenza con cui il sistema dovrà aggiornare il sistema di riferimento locale, ecc.). Ad esempio, possono essere considerate varianti di algoritmi noti di instradamento per reti di dispositivi di comunicazione wireless.

Allo stesso modo, ovvero sfruttando l'approccio incrementale sia del dispiegamento al suolo dei nodi (ovvero dei dispositivi wireless), sia della loro attivazione, il sistema può convenientemente risolvere i problemi di accesso al canale radio tipici di una rete UWB multi-hop allocando codici di trasmissione o, più in generale, i parametri di accesso al canale fisico, a seconda della fase di lancio del dispositivo wireless e/o della sua inizializzazione.

Al termine della procedura di inizializzazione della rete gerarchica di comunicazione (il tempo richiesto per

terminare tale procedura può dipendere da molti fattori tra cui il numero di dispositivi wireless, il raggio di comunicazione delle interfacce radio a corto raggio basate su tecnologia UWB e la dimensione dell'area su cui sono dislocati i dispositivi wireless) lo stato del sistema di navigazione può essere riassunto come segue:

- i dispositivi wireless disponibili sono attivi e a ciascuno di essi sono state assegnate coordinate del sistema di riferimento locale;

- il sistema di navigazione è strutturato, ovvero ogni nodo è assegnato ad un determinato livello e conosce il modo per inviare informazioni al lander; inoltre la strutturazione a livelli permette a ciascun nodo ed al sistema di navigazione, nel suo complesso, di conoscere i confini dell'area d'utilizzo (barriere logiche); e,

- come conseguenza della metodologia di determinazione delle distanze reciproche, i dispositivi wireless risultano sincronizzati tra loro (accuratezza minima dell'ordine dei millisecondi).

Dopo aver inizializzato la rete gerarchica di comunicazione, vengono eseguiti i seguenti passi al fine di rendere operativo il sistema di navigazione:

- il primo canale radio (ovvero il canale di comunicazione radio basato su tecnologia UWB) viene inizializzato e verificato mediante lo scambio di dati e

l'effettuazione di alcune sessioni di misure di ranging con il lander; e

- la topologia della rete gerarchica di comunicazione (ovvero le coordinate di ciascun dispositivo wireless nel sistema di riferimento locale) viene trasmessa, utilizzando entrambi i canali radio, dal lander al rover che la memorizza.

Non è necessario che il rover determini una sua tabella di gateway nel caso necessiti di utilizzare la rete gerarchica di comunicazione per comunicare con il lander in quanto il suo punto di accesso a tale rete può essere uno qualunque dei dispositivi wireless adiacenti al rover nella posizione in cui si trova di volta in volta. Infatti, ogni dispositivo wireless, attivo e funzionante, costituisce un punto di accesso valido alla rete gerarchica di comunicazione. Pertanto, il rover può comunicare con il lander tramite la rete gerarchica di comunicazione utilizzando come punto di accesso a tale rete un dispositivo wireless adiacente.

Nella fase operativa del sistema di navigazione, il rover si muove all'interno dell'area operativa ed esegue periodicamente misure di ranging con i dispositivi wireless ad esso adiacenti. Utilizzando queste misure congiuntamente alle informazioni sulla topologia della rete gerarchica di comunicazione trasmesse dal lander, il rover calcola la

propria posizione all'interno dell'area operativa rispetto al sistema di riferimento locale.

E' importante notare che il sistema di guida del rover deve tener conto delle informazioni di prossimità dei dispositivi wireless per evitare di urtarli. In particolare, uno spostamento significativo della posizione dei dispositivi wireless potrebbe richiedere il calcolo di un nuovo sistema di riferimento locale. Pertanto, il rover è convenientemente configurato per evitare di urtare i dispositivi wireless (ad esempio arrestandosi e/o ricalcolando la traiettoria lungo cui si sta spostando) sulla base della propria posizione, delle informazioni sulla topologia della rete gerarchica di comunicazione trasmesse dal lander e delle misure di ranging eseguite da detto rover. In altre parole, i dispositivi wireless sono intrinsecamente sfruttati come radio-fari, ovvero per fornire al rover informazioni di prossimità, al fine di agevolare il rientro del rover nell'area operativa del sistema di navigazione qualora detto rover ne esca ed al fine di evitare che l'urto tra il rover ed i dispositivi wireless costringa a frequenti aggiornamenti del sistema di coordinate di riferimento.

Durante la fase operativa il lander attiva periodicamente una procedura di verifica dello stato di integrità del sistema di navigazione, in particolare della

rete gerarchica di comunicazione, in modo tale da:

- verificare lo stato dei dispositivi wireless (livello di carica della batteria, tasso di scarico della batteria, variazioni significative della qualità dei segnali ricevuti, e altri parametri rilevanti); e

- rivelare eventuali variazioni della topologia della rete gerarchica di comunicazione, ad esempio dovute a:

- variazioni nella posizione dei dispositivi wireless (rilevate tramite osservazione di cambiamenti significativi delle misure di ranging effettuate dai nodi adiacenti), ad esempio a causa di vento, cedimenti del suolo, impatto accidentale con il rover o altri fenomeni ambientali; e/o
- una degradazione dell'accuratezza della posizione dei dispositivi wireless (valutata in termini statistici mediante ri-calcolo periodico della posizione dei dispositivi wireless).

Le informazioni relative allo stato di integrità del sistema di navigazione, ovvero della rete gerarchica di comunicazione, sono trasmesse dal lander al rover il quale può modificare il suo comportamento in funzione di detto stato di integrità (ad esempio può ridurre la velocità, può attendere condizioni più stabili per l'esecuzione di

attività che richiedono un'elevata affidabilità dell'informazione di posizione, ecc.) fino al caso limite in cui il lander comunica al rover la necessità di re-inizializzare la rete gerarchica di comunicazione. Pertanto, il rover è convenientemente configurato per modificare il proprio comportamento operativo (ad esempio arrestandosi) se lo stato di integrità del sistema di navigazione non soddisfa predeterminate condizioni.

Il sistema di navigazione è in grado di fornire un posizionamento con accuratezza sotto il metro ed è configurato per implementare anche funzionalità di monitoraggio e controllo. In particolare, l'impossibilità di prevedere e contrastare eventuali variazioni ambientali (tempeste di sabbia, attività tettoniche, instabilità del terreno) ed eventuali guasti dei dispositivi wireless (anomalie di alimentazione per condizioni meteorologiche contingenti, errori circuitali, ecc.) sono compensate da moduli per l'auto-monitoraggio e la determinazione dello stato di integrità del sistema di navigazione, ovvero della rete gerarchica di comunicazione. Le informazioni di integrità sono rese disponibili ai rover in modo da essere utilizzate in unione con i loro "piani operativi" (ad esempio per alcune fasi operative potrebbe essere richiesta un'accuratezza o un'affidabilità specifica). Inoltre, in caso di gravi malfunzionamenti, il sistema centrale di

controllo missione può addirittura decidere di fermare i rover fino al ritorno alle condizioni nominali operative del sistema di navigazione.

Il sistema di navigazione fornisce tale monitoraggio dello stato di integrità tramite la sua funzionalità principale, ovvero tramite il calcolo automatico della topologia della rete gerarchica di comunicazione e tramite la determinazione del sistema di riferimento locale.

Il sistema di riferimento locale rappresenta il requisito di alto livello più importante per ogni sistema di navigazione. Per tale ragione, la prima fase operativa prevista per il sistema di navigazione secondo la forma preferita di realizzazione della presente invenzione è la determinazione del sistema di riferimento locale e della posizione di ogni dispositivo wireless in tale sistema di riferimento locale. Come precedentemente descritto, il sistema di riferimento locale dipende dalla posizione di ogni dispositivo wireless e, perciò, non si può assumere come statico. La forza maggiore del sistema di integrità del sistema di navigazione è l'uso della sua funzionalità principale non solo per l'inizializzazione preliminare, ma anche come servizio continuo di fornitura di informazioni differenziali riguardanti l'accuratezza e la validità del sistema di riferimento locale. Tali informazioni sono disseminate ai dispositivi wireless ed ai rover al fine di

permettere loro di compiere e attuare azioni specifiche dipendenti dal loro specifico stato.

Questa caratteristica rende il sistema di navigazione secondo la forma preferita di realizzazione della presente invenzione un sistema dotato di grande flessibilità e configurabilità. Inoltre, il meccanismo autonomo di determinazione della topologia della rete gerarchica di comunicazione è a basso costo e rappresenta un modo semplice e diretto per riportare l'intero sistema verso uno stato stabile permettendo, così, il recupero di guasti maggiori ri-utilizzando principalmente le funzioni operative.

Le effettive prestazioni del sistema di navigazione secondo la forma preferita di realizzazione della presente invenzione possono dipendere da vari fattori, tra cui:

- il numero di dispositivi wireless;
- le dimensioni dell'area operativa;
- la distanza tra i dispositivi wireless (infatti l'accuratezza delle misure di ranging decresce con la distanza);
- la potenza disponibile per la trasmissione dei dispositivi wireless e la velocità del primo canale radio, ovvero del canale di comunicazione radio basato su tecnologia UWB; e
- la durata della missione del sistema di

navigazione.

Tali fattori non sono tra loro indipendenti e le loro interazioni vanno considerate in fase di definizione dei requisiti di missione. Ad esempio, il numero di dispositivi wireless dipende dalla dimensione dell'area operativa e dal raggio di comunicazione UWB tra due dispositivi wireless e, naturalmente, anche dalle capacità di carico del lander. A sua volta la distanza di comunicazione UWB tra due dispositivi wireless dipende dalla potenza utilizzabile in trasmissione e dalla durata fissata per la missione.

La possibilità del sistema di navigazione di operare contestualmente il trasferimento di informazioni e la determinazione della posizione permette una elevata flessibilità nella definizione di istanze specializzate del sistema a copertura di un ampio insieme di possibili scenari applicativi. In ogni caso, le funzionalità e le prestazioni di base del sistema di navigazione sono garantite a prescindere dalla specifica specializzazione e dall'adattamento ad una specifica missione.

Di seguito vengono riportate le principali funzionalità e caratteristiche ed alcune prestazioni indicative del sistema di navigazione sia a livello di sistema che a livello di singolo dispositivo wireless.

In particolare, le principali funzionalità e caratteristiche a livello di sistema sono:

- una sola rete (ovvero la rete gerarchica di comunicazione) sia per la navigazione che per il trasferimento di dati (ad esempio per le operazioni di monitoraggio e controllo dell'integrità);

- la determinazione autonoma della topologia della rete gerarchica di comunicazione (sistema di coordinate di riferimento);

- il monitoraggio dinamico della topologia della rete gerarchica di comunicazione;

- la robustezza nel caso di modifiche alla topologia della rete gerarchica di comunicazione durante le operazioni (ad esempio in caso di guasto di uno o più dispositivo/i wireless, di spostamento accidentale dei nodi, ecc.);

- la sincronizzazione implicita della rete gerarchica di comunicazione e la possibilità di sincronizzazione esplicita per applicazioni specifiche (ad esempio tramite l'utilizzo di algoritmi ottimizzati e tramite l'utilizzo della stima degli errori di sincronizzazione per la valutazione dell'integrità); e

- la determinazione dello stato di integrità del sistema (il tempo di calcolo dell'integrità dipende da parametri come la dimensione dell'area operativa, la densità di dispositivi wireless, la velocità del primo canale radio, ovvero del canale di comunicazione radio

basato su tecnologia UWB).

Inoltre, il sistema di navigazione può essere convenientemente configurato per realizzare un calcolo pesato dei livelli di integrità in funzione delle priorità di missione.

Per quanto riguarda, invece, le prestazioni a livello di sistema, l'accuratezza del posizionamento nel piano è funzione dell'accuratezza nella determinazione delle coordinate dei dispositivi wireless, dell'accuratezza delle misure di ranging eseguite dai rover, della distanza del rover dal lander (gli errori di misura si propagano man mano che sale il livello dei dispositivi wireless) e della distribuzione geometrica dei dispositivi wireless adiacenti al rover (diluizione della precisione ("Dilution Of Precision" - DOP). In uno scenario di esempio in cui si ipotizzano 5 livelli di distanza dal lander, un'accuratezza sulle misure di ranging di 10 cm ed una DOP geometrica ("Geometric Dilution Of Precision" - GDOP), ovvero la diluizione di precisione dovuta alla configurazione geometrica dei nodi, costante minore di 4,5, sono ottenibili accuratèzze di posizionamento inferiori ad un metro (1-sigma). L'accuratezza del posizionamento in altezza dipende anche dalle caratteristiche del contesto operativo e dalla disponibilità di informazioni aggiuntive.

Inoltre, le principali funzionalità e caratteristiche a

livello di singolo dispositivo wireless sono:

- la possibilità di monitoraggio dei parametri operativi di ciascun dispositivo wireless (carica residua delle batterie, numero di trasmissioni per secondo, gradiente di consumo delle batterie, matrice di adiacenza di altri dispositivi wireless, ecc.);
- la modularità; infatti i dispositivi wireless possono essere convenientemente equipaggiati con vari tipi di sensori per la creazione di nodi multi-funzionali (ad esempio per la raccolta di parametri ambientali); e
- le caratteristiche del segnale UWB che rendono i dispositivi wireless particolarmente adatti ad operare in ambienti con condizioni ambientali sfavorevoli (ad esempio per la presenza di ostacoli, di un fondo elettromagnetico con interferenze, ecc.).

Inoltre, per quanto riguarda le prestazioni a livello di singolo dispositivo wireless, l'accuratezza delle misure di ranging dipende dal numero di misure effettuate, dalla distanza dei dispositivi wireless, dall'ampiezza di banda del primo canale radio, dalle condizioni di fondo elettromagnetico, ovvero dal rapporto segnale-rumore ("Signal-to-Noise Ratio" - SNR), e dalle condizioni di linea di vista ("Line Of Sight" - LOS). In uno scenario di esempio in cui si ipotizzano due dispositivi wireless posizionati a 30 metri di distanza, un media su 10 misure

di ranging, l'uso, in campo aperto ed in condizioni di visibilità diretta (LOS), di un sistema Time-Hopping Impulse-Radio Ultra-WideBand (TH-IR-UWB) con SNR di 0 dB e banda da 1,5 GHz, è possibile ottenere un'accuratezza delle misure di ranging minore di 10 cm (1-sigma).

Pertanto, per riassumere alcuni dei vantaggi del sistema di navigazione, la rete gerarchica di comunicazione basata su tecnologia UWB consente di:

- avere un'indicazione sulla propagazione degli errori di posizionamento;
- implementare strategie di risparmio energetico nell'instradamento delle informazioni da trasferire al lander e/o ai rover; e
- comunicare in ambienti elettromagnetici molto disturbati e, contemporaneamente, effettuare misure di ranging molto accurate.

Dalla precedente descrizione si può immediatamente comprendere come la presente invenzione possa essere vantaggiosamente sfruttata per realizzare:

- un sistema di localizzazione basato sulla rete gerarchica di comunicazione precedentemente descritta;
- un sistema di navigazione per un qualsiasi tipo di veicolo, automatico o controllato da remoto, che è configurato per muoversi in superficie e/o sottacqua;
- un sistema di esplorazione basato sul sistema di

navigazione precedentemente descritto; ed

- un sistema di monitoraggio basato sul sistema di navigazione precedentemente descritto in cui il lander e/o uno o più rover e/o uno o più dispositivo/i wireless è/sono convenientemente equipaggiato/i con uno o più sensore/i configurato/i per acquisire, ovvero rilevare, parametri dell'ambiente circostante, ovvero dati e/o informazioni sull'ambiente circostante, ad esempio la temperatura esterna, la pressione atmosferica, ecc.

Inoltre, dalla precedente descrizione si può anche comprendere come la presente invenzione possa essere vantaggiosamente sfruttata per realizzare la localizzazione e/o la navigazione in, e/o l'esplorazione e/o il monitoraggio di, un qualsiasi ambiente sconosciuto e/o difficile (ovvero impervio), come ad esempio:

- un oggetto (ovvero corpo) celeste, ad esempio un pianeta, un satellite naturale, o un asteroide;
- una zona colpita da una cataclisma, ad esempio una zona colpita da un terremoto e/o uno tsunami e/o un'alluvione e/o interessata da un'eruzione vulcanica e/o una frana;
- un ambiente sottomarino; ecc..

Infine, risulta chiaro che varie modifiche possono essere apportate alla presente invenzione, tutte rientranti nell'ambito di tutela dell'invenzione come definito nelle rivendicazioni allegate.

RIVENDICAZIONI

1. Sistema di localizzazione comprendente una pluralità di nodi ciascuno dei quali include una rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga; detti nodi comprendendo un nodo principale ed una pluralità di nodi secondari ed essendo configurati per formare una rete gerarchica di comunicazione in cui:

- il nodo principale è associato ad un livello gerarchico principale ed ogni nodo secondario è associato ad un rispettivo livello gerarchico secondario inferiore al livello gerarchico principale;

- ogni nodo secondario è configurato per
 - eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure di distanza rispetto a, ed insieme con, altri nodi secondari associati allo stesso livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario, e rispetto a, ed insieme con, altri nodi associati a livelli gerarchici adiacenti al livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario, ed
 - inviare al nodo principale messaggi di integrità che indicano un rispettivo stato di integrità e messaggi di distanza concernenti le misure di distanza eseguite da detto nodo

secondario; ed

- il nodo principale è configurato per
 - eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure di distanza rispetto a, ed insieme con, nodi secondari associati ad un livello gerarchico secondario immediatamente inferiore al livello gerarchico principale,
 - calcolare un sistema di coordinate di riferimento sulla base delle misure di distanza eseguite da detto nodo principale e dei messaggi di distanza ricevuti dai nodi secondari, e
 - determinare uno stato di integrità del sistema di localizzazione sulla base dei messaggi di integrità ricevuti dai nodi secondari.

2. Il sistema di localizzazione della rivendicazione 1, in cui ogni nodo secondario è configurato per:

- eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure iniziali di distanza rispetto a, ed insieme con, altri nodi secondari associati allo stesso livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario, e rispetto a, ed insieme con, altri nodi associati a livelli gerarchici adiacenti al livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo

secondario;

- eseguire periodicamente, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure attuali di distanza rispetto a, ed insieme con, altri nodi secondari associati allo stesso livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario, e rispetto a, ed insieme con, altri nodi associati a livelli gerarchici adiacenti al livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario; ed

- inviare al nodo principale messaggi iniziali di distanza concernenti le misure iniziali di distanza eseguite da detto nodo secondario, e messaggi attuali di distanza concernenti le misure attuali di distanza eseguite periodicamente da detto nodo secondario;

ed in cui il nodo principale è configurato per:

- eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure iniziali di distanza rispetto a, ed insieme con, i nodi secondari associati al livello gerarchico secondario immediatamente inferiore al livello gerarchico principale;

- eseguire periodicamente, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure attuali di distanza rispetto a, ed insieme con, i nodi secondari associati al livello gerarchico secondario immediatamente inferiore al livello gerarchico principale;

- calcolare il sistema di coordinate di riferimento sulla base delle misure iniziali di distanza eseguite da detto nodo principale e dei messaggi iniziali di distanza ricevuti dai nodi secondari;

- aggiornare il sistema di coordinate di riferimento sulla base delle misure attuali di distanza eseguite periodicamente da detto nodo principale e dei messaggi attuali di distanza ricevuti dai nodi secondari.

3. Il sistema di localizzazione secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui ogni nodo secondario è configurato per:

- determinare un rispettivo stato iniziale di integrità;

- determinare periodicamente un rispettivo stato attuale di integrità;

- inviare al nodo principale un messaggio iniziale di integrità che indica il rispettivo stato iniziale di integrità, e messaggi attuali di integrità che indicano il rispettivo stato attuale di integrità;

ed in cui il nodo principale è configurato per:

- determinare lo stato di integrità del sistema di localizzazione sulla base dei messaggi iniziali di integrità ricevuti dai nodi secondari; ed

- aggiornare lo stato di integrità del sistema di localizzazione sulla base dei messaggi attuali di integrità

ricevuti dai nodi secondari.

4. Il sistema di localizzazione secondo una qualsiasi rivendicazione precedente, in cui il nodo principale è configurato per:

- eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure preliminari di distanza rispetto a, ed insieme con, primi specifici nodi secondari che sono candidati ad essere associati ad un livello gerarchico secondario immediatamente inferiore al livello gerarchico principale; ed

- associare uno o più di detti primi specifici nodi secondari a detto livello gerarchico secondario immediatamente inferiore al livello gerarchico principale sulla base delle misure preliminari di distanza eseguite da detto nodo principale;

in cui ciascuno di dati nodi secondari associati ad un primo dato livello gerarchico è configurato per:

- eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure preliminari di distanza rispetto a, ed insieme con, secondi specifici nodi secondari che sono candidati ad essere associati ad un secondo dato livello gerarchico secondario immediatamente inferiore al primo dato livello gerarchico secondario; ed

- inviare al nodo principale messaggi preliminari di distanza concernenti le misure preliminari di distanza

eseguite da detto dato nodo secondario;

ed in cui il nodo principale è configurato per associare uno o più di detti secondi specifici nodi secondari a detto secondo dato livello gerarchico secondario sulla base dei messaggi preliminari di distanza ricevuti dai dati nodi secondari.

5. Il sistema di localizzazione della rivendicazione 4, in cui il nodo principale è configurato per trasmettere, tramite la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, messaggi di notifica ciascuno dei quali è indirizzato ad uno o più specifico/i nodo/i secondario/i ed indica un livello gerarchico secondario a cui detto/i specifico/i nodo/i secondario/i è/sono stato/i associato/i da detto nodo principale;

ed in cui ogni nodo secondario è configurato per:

- se riceve tramite la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga un messaggio di notifica indirizzato a detto nodo secondario, assumere come rispettivo livello gerarchico secondario il livello gerarchico secondario indicato in detto messaggio di notifica ricevuto; e,

- se riceve tramite la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga un messaggio di notifica che è indirizzato ad uno o più altro/i nodo/i secondario/i e che indica un livello gerarchico secondario inferiore al livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo

secondario, ritrasmettere tramite la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga il messaggio di notifica ricevuto instradandolo verso uno o più nodo/i secondario/i associato/i ad un livello gerarchico inferiore al livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario.

6. Il sistema di localizzazione secondo una qualsiasi rivendicazione precedente, in cui ogni nodo secondario è configurato per:

- inviare al nodo principale i messaggi di integrità che indicano il rispettivo stato di integrità ed i messaggi di distanza concernenti le misure di distanza eseguite da detto nodo secondario trasmettendo detti messaggi tramite la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga; e,

- se riceve tramite la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga un messaggio di distanza o un messaggio di integrità trasmesso da un altro nodo secondario associato ad un livello gerarchico secondario inferiore al livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario, ritrasmettere tramite la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga il messaggio di distanza ricevuto o il messaggio di integrità ricevuto instradandolo verso uno o più nodo/i associato/i ad un livello gerarchico superiore al livello gerarchico secondario a cui è associato detto nodo secondario.

7. Sistema di navigazione comprendente:

- il sistema di localizzazione rivendicato in una qualsiasi rivendicazione precedente; ed

- un dispositivo di navigazione che include un'interfaccia radio a banda ultra larga ed è destinato ad essere installato a bordo di un veicolo;

in cui il nodo principale è configurato per inviare al dispositivo di navigazione primi dati di navigazione concernenti il sistema di coordinate di riferimento e lo stato di integrità del sistema di localizzazione;

ed in cui il dispositivo di navigazione è configurato per:

- eseguire, utilizzando la rispettiva interfaccia radio a banda ultra larga, misure di distanza rispetto a, ed insieme con, uno o più nodo/i del sistema di localizzazione; e

- calcolare una posizione del veicolo sulla base dei primi dati di navigazione ricevuti dal nodo principale e delle misure di distanza eseguite da detto dispositivo di navigazione.

8. Il sistema di navigazione della rivendicazione 7, in cui il dispositivo di navigazione è configurato per inviare al nodo principale secondi dati di navigazione concernenti le misure di distanza eseguite da detto dispositivo di navigazione;

ed in cui il nodo principale è configurato per:

- calcolare una posizione del veicolo sulla base del sistema di coordinate di riferimento e dei secondi dati di navigazione ricevuti dal dispositivo di navigazione; ed
- inviare al dispositivo di navigazione terzi dati di navigazione concernenti la posizione calcolata del veicolo.

9. Il sistema di navigazione secondo la rivendicazione 7 o 8, in cui il nodo principale include anche una ulteriore interfaccia radio, in cui il dispositivo di navigazione include anche una ulteriore interfaccia radio, ed in cui il nodo principale ed il dispositivo di navigazione sono configurati per inviare/ricevere i dati di navigazione tramite le rispettive ulteriori interfacce radio.

10. Il sistema di navigazione secondo una qualsiasi rivendicazione 7-9, in cui il nodo principale ed il dispositivo di navigazione sono configurati per inviare/ricevere i dati di navigazione tramite la rete gerarchica di comunicazione.

11. Il sistema di navigazione secondo una qualsiasi rivendicazione 7-10, in cui il dispositivo di navigazione è configurato per:

- arrestare il veicolo se lo stato di integrità del sistema di localizzazione non soddisfa predeterminate condizioni; ed

- evitare che il veicolo urti i nodi del sistema di localizzazione sulla base della posizione del veicolo, dei primi dati di navigazione ricevuti dal nodo principale e delle misure di distanza eseguite da detto dispositivo di navigazione.

12. Sistema di esplorazione comprendente:

- il sistema di navigazione rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 7-11; ed
- un veicolo di esplorazione a bordo del quale è installato il dispositivo di navigazione.

13. Il sistema di esplorazione della rivendicazione 12, destinato ad esplorare un oggetto celeste e comprendente un lander a bordo del quale è installato il nodo principale; in cui il veicolo di esplorazione è un rover.

14. Sistema di monitoraggio comprendente il sistema di localizzazione rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 1-6, in cui uno o più nodo/i è/sono configurato/i per:

- acquisire dati concernenti un ambiente circostante;

ed

- inviare i dati acquisiti al nodo principale.

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO

TITLE: "SYSTEMS OF LOCALIZATION, NAVIGATION, EXPLORATION,
AND MONITORING FOR UNKNOWN AND/OR DIFFICULT ENVIRONMENTS"

CLAIMS

1. A localization system comprising a plurality of nodes each of which comprises a respective ultra-wideband radio interface; said nodes comprising a primary node and a plurality of secondary nodes and being configured to form a hierarchical communication network in which:

- the primary node is associated with a primary hierarchical level and each secondary node is associated with a respective secondary hierarchical level lower than the primary hierarchical level;

- each secondary node is configured to
 - carry out, using the respective ultra-wideband radio interface, distance measurements with respect to, and together with, other secondary nodes associated with the same secondary hierarchical level with which said secondary node is associated, and with respect to, and together with, other nodes associated with hierarchical levels adjacent to the secondary hierarchical level with which said secondary node is associated, and
 - send to the primary node integrity-related messages indicating a respective state of

integrity and distance-related messages concerning the distance measurements carried out by said secondary node; and

- the primary node is configured to
 - carry out, using the respective ultra-wideband radio interface, distance measurements with respect to, and together with, secondary nodes associated with a secondary hierarchical level immediately lower than the primary hierarchical level,
 - compute a reference coordinate system on the basis of the distance measurements carried out by said primary node and the distance-related messages received from the secondary nodes, and
 - determine a state of integrity of the localization system on the basis of the integrity-related messages received from the secondary nodes.

2. The localization system of claim 1, wherein each secondary node is configured to:

- carry out, using the respective ultra-wideband radio interface, initial distance measurements with respect to, and together with, other secondary nodes associated with the same secondary hierarchical level with which said secondary node is associated, and with respect to, and

together with, other nodes associated with hierarchical levels adjacent to the secondary hierarchical level with which said secondary node is associated;

- periodically carry out, using the respective ultra-wideband radio interface, current distance measurements with respect to, and together with, other secondary nodes associated with the same secondary hierarchical level with which said secondary node is associated, and with respect to, and together with, other nodes associated with hierarchical levels adjacent to the secondary hierarchical level with which said secondary node is associated; and

- send to the primary node initial distance-related messages concerning the initial distance measurements carried out by said secondary node, and current distance-related messages concerning the current distance measurements periodically carried out by said secondary node;

and wherein the primary node is configured to:

- carry out, using the respective ultra-wideband radio interface, initial distance measurements with respect to, and together with, the secondary nodes associated with the secondary hierarchical level immediately lower than the primary hierarchical level;

- periodically carry out, using the respective ultra-wideband radio interface, current distance measurements

with respect to, and together with, the secondary nodes associated with the secondary hierarchical level immediately lower than the primary hierarchical level;

- compute the reference coordinate system on the basis of the initial distance measurements carried out by said primary node and of the initial distance-related messages received from the secondary nodes; and

- update the reference coordinate system on the basis of the current distance measurements periodically carried out by said primary node and of the current distance-related messages received from the secondary nodes.

3. The localization system according to claim 1 or 2, wherein each secondary node is configured to:

- determine a respective initial state of integrity;
- periodically determine a respective current state of integrity; and

- send to the primary node an initial integrity-related message indicating the respective initial state of integrity, and current integrity-related messages indicating the respective current state of integrity;

and wherein the primary node is configured to:

- determine the state of integrity of the localization system on the basis of the initial integrity-related messages received from the secondary nodes; and

- update the state of integrity of the localization

system on the basis of the current integrity-related messages received from the secondary nodes.

4. The localization system according to any preceding claim, wherein the primary node is configured to:

- carry out, using the respective ultra-wideband radio interface, preliminary distance measurements with respect to, and together with, first specific secondary nodes that are candidate for being associated with a secondary hierarchical level immediately lower than the primary hierarchical level; and

- associate one or more of said first specific secondary nodes with said secondary hierarchical level immediately lower than the primary hierarchical level on the basis of the preliminary distance measurements carried out by said primary node;

wherein each of given secondary nodes associated with a first given secondary hierarchical level is configured to:

- carry out, using the respective ultra-wideband radio interface, preliminary distance measurements with respect to, and together with, second specific secondary nodes that are candidate for being associated with a second given secondary hierarchical level immediately lower than the first given secondary hierarchical level; and

- send to the primary node preliminary distance-

related messages concerning the preliminary distance measurements carried out by said given secondary node;

and wherein the primary node is configured to associate one or more of said second specific secondary nodes with said second given secondary hierarchical level on the basis of the preliminary distance-related messages received from the given secondary nodes.

5. The localization system of claim 4, wherein the primary node is configured to transmit, by means of the respective ultra-wideband radio interface, notification messages each of which is addressed to one or more specific secondary node(s) and indicates a secondary hierarchical level with which said specific secondary node(s) has/have been associated by said primary node;

and wherein each secondary node is configured to:

- if it receives by means of the respective ultra-wideband radio interface a notification message addressed to said secondary node, assume as respective secondary hierarchical level the secondary hierarchical level indicated in said received notification message; and,

- if it receives by means of the respective ultra-wideband radio interface a notification message that is addressed to one or more other secondary node(s) and that indicates a secondary hierarchical level lower than the secondary hierarchical level with which said secondary node

is associated, retransmit by means of the respective ultra-wideband radio interface the received notification message routing it to one or more secondary node(s) associated with a secondary hierarchical level lower than the secondary hierarchical level with which said secondary node is associated.

6. The localization system according to any preceding claim, wherein each secondary node is configured to:

- send to the primary node the integrity-related messages indicating the respective state of integrity and the distance-related messages concerning the distance measurements carried out by said secondary node by transmitting said messages by means of the respective ultra-wideband radio interface; and,

- if it receives by means of the respective ultra-wideband radio interface a distance-related message or an integrity-related message transmitted by another secondary node associated with a secondary hierarchical level lower than the secondary hierarchical level with which said secondary node is associated, retransmit by means of the respective ultra-wideband radio interface the received distance-related message or the received integrity-related message routing it to one or more node(s) associated with a hierarchical level higher than the secondary hierarchical level with which said secondary node is associated.

7. A navigation system comprising:

- the localization system claimed in any preceding claim; and

- a navigation device which comprises an ultra-wideband radio interface and is intended to be installed on board a vehicle;

wherein the primary node is configured to send to the navigation device first navigation data concerning the reference coordinate system and the state of integrity of the localization system;

and wherein the navigation device is configured to:

- carry out, utilizing the respective ultra-wideband radio interface, distance measurements with respect to, and together with, one or more node(s) of the localization system; and

- compute a position of the vehicle on the basis of the first navigation data received from the primary node and of the distance measurements carried out by said navigation device.

8. The navigation system of claim 7, wherein the navigation device is configured to send to the primary node second navigation data concerning the distance measurements carried out by said navigation device;

and wherein the primary node is configured to:

- compute a position of the vehicle on the basis of

the reference coordinate system and of the second navigation data received from the navigation device; and

- send to the navigation device third navigation data concerning the computed position of the vehicle.

9. The navigation system according to claim 7 or 8, wherein the primary node comprises also a further radio interface, wherein the navigation device comprises also a further radio interface, and wherein the primary node and the navigation device are configured to send/receive the navigation data by means of the respective further radio interfaces.

10. The navigation system according to any claim 7-9, wherein the primary node and the navigation device are configured to send/receive the navigation data through the hierarchical communication network.

11. The navigation system according to any claim 7-10, wherein the navigation device is configured to:

- stop the vehicle if the state of integrity of the localization system does not meet predetermined conditions; and

- prevent the vehicle from hitting the nodes of the localization system on the basis of the position of the vehicle, of the first navigation data received from the primary node and of the distance measurements carried out by said navigation device.

12. An exploration system comprising:

- the navigation system claimed in any claim 7-11; and
- an exploration vehicle on board which the navigation device is installed.

13. The exploration system of claim 12, intended to explore a celestial object and comprising a lander on board which the primary node is installed; wherein the exploration vehicle is a rover.

14. A monitoring system comprising the localization system claimed in any claim 1-6, wherein one or more node(s) is/are configured to:

- acquire data concerning a surrounding environment;
- and
- send the acquired data to the primary node.

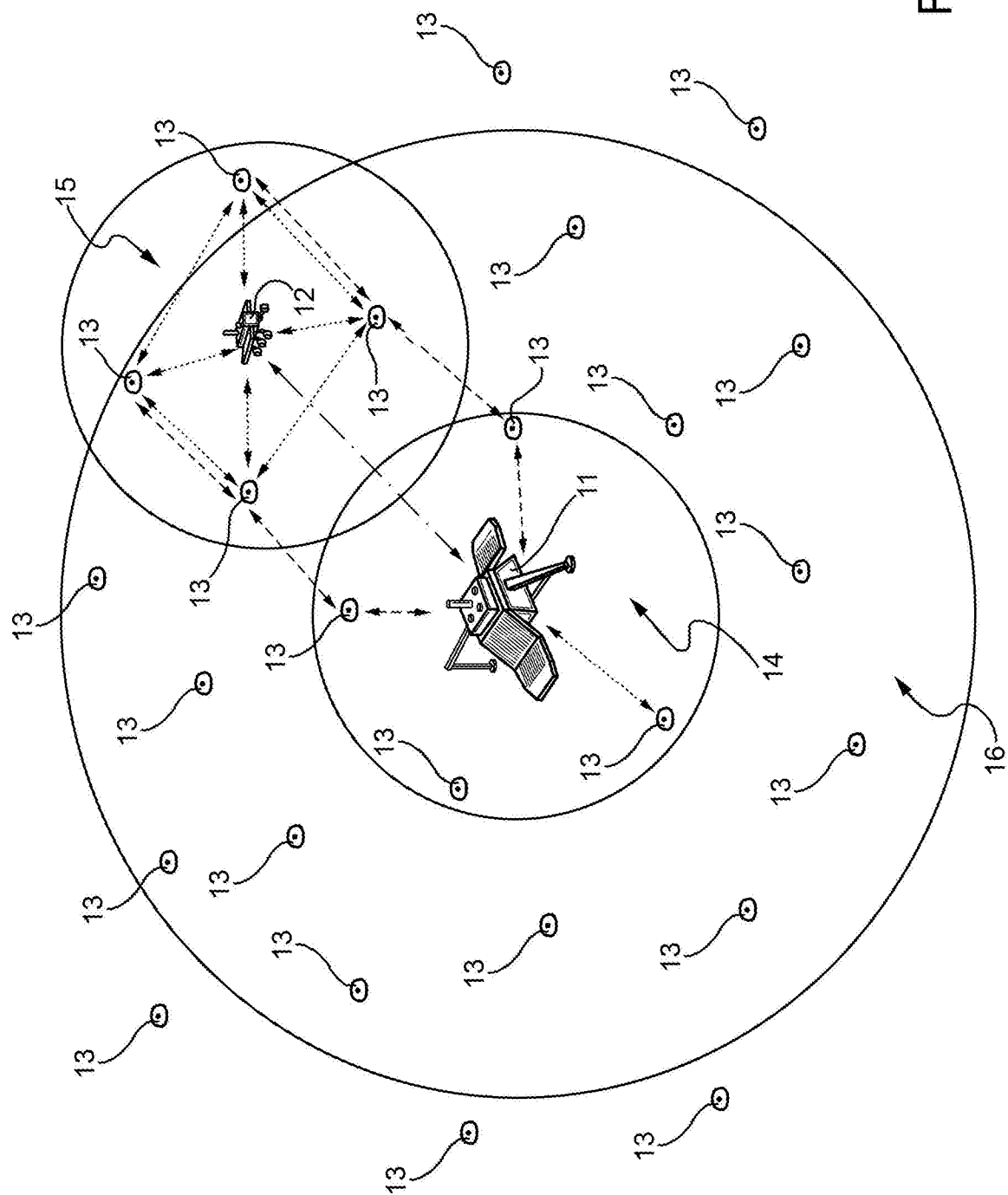
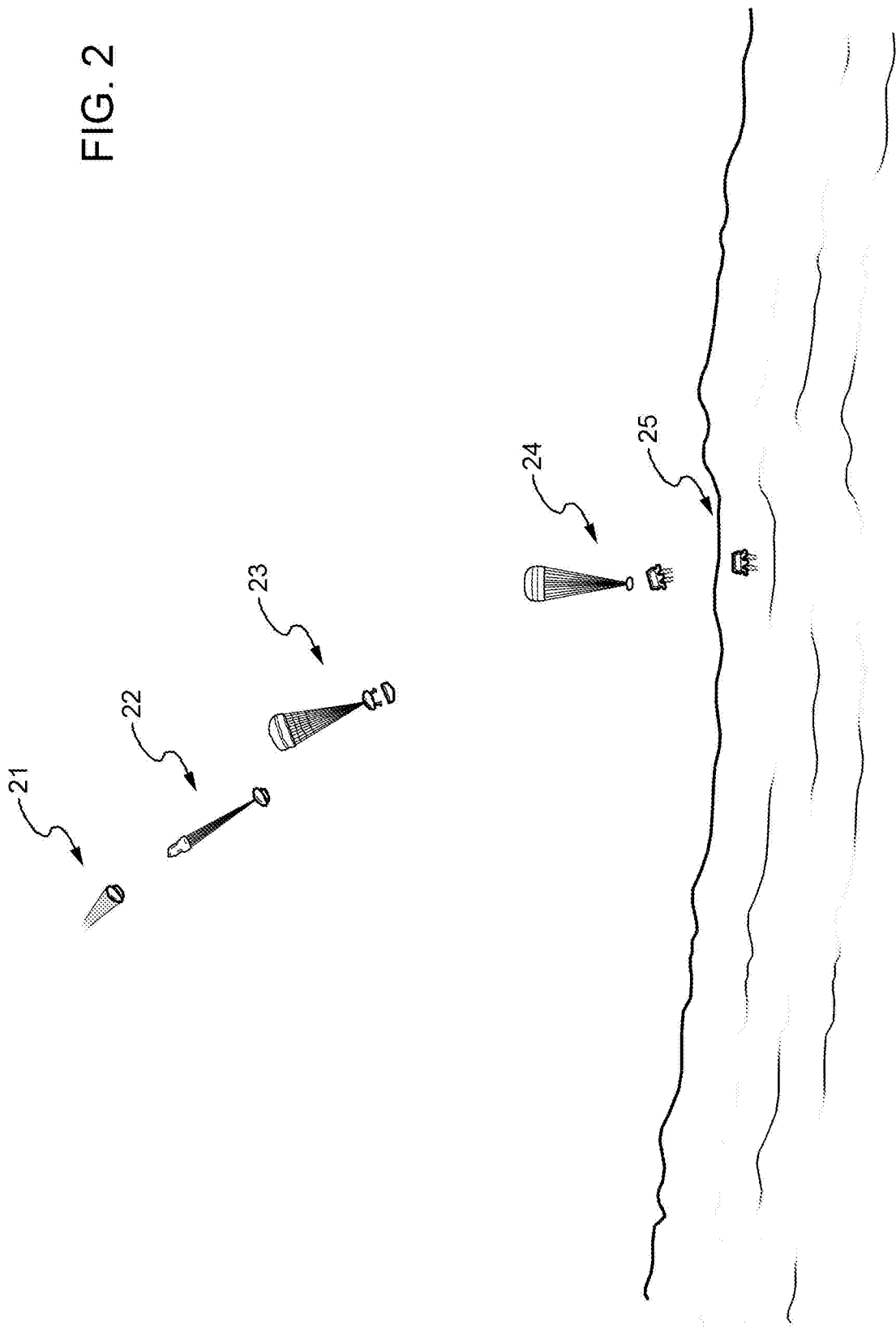


FIG. 1

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO
 Mirko BERGADANO
 (Iscrizione Albo nr. 843/BM)

FIG. 2



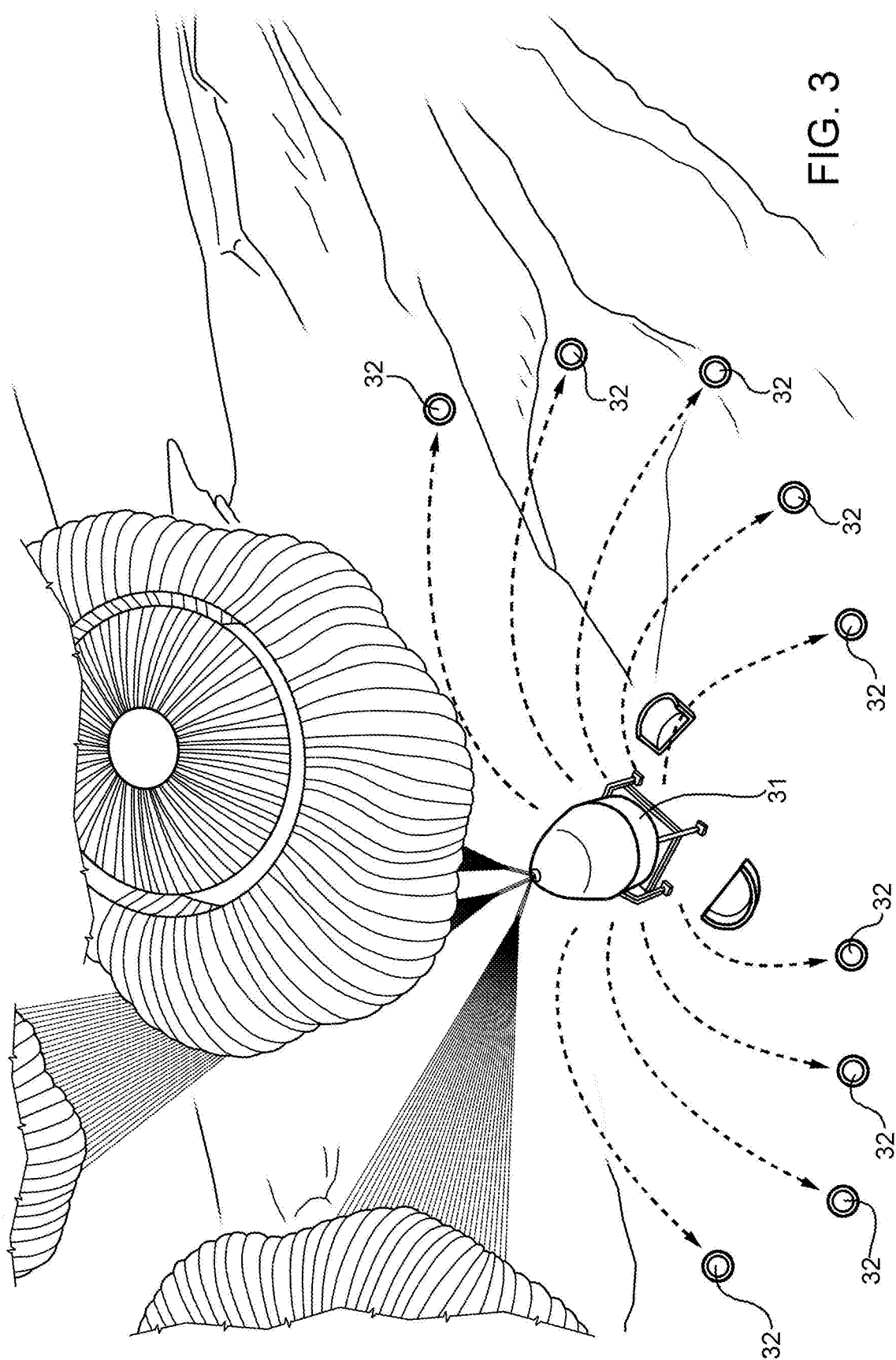


FIG. 3

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

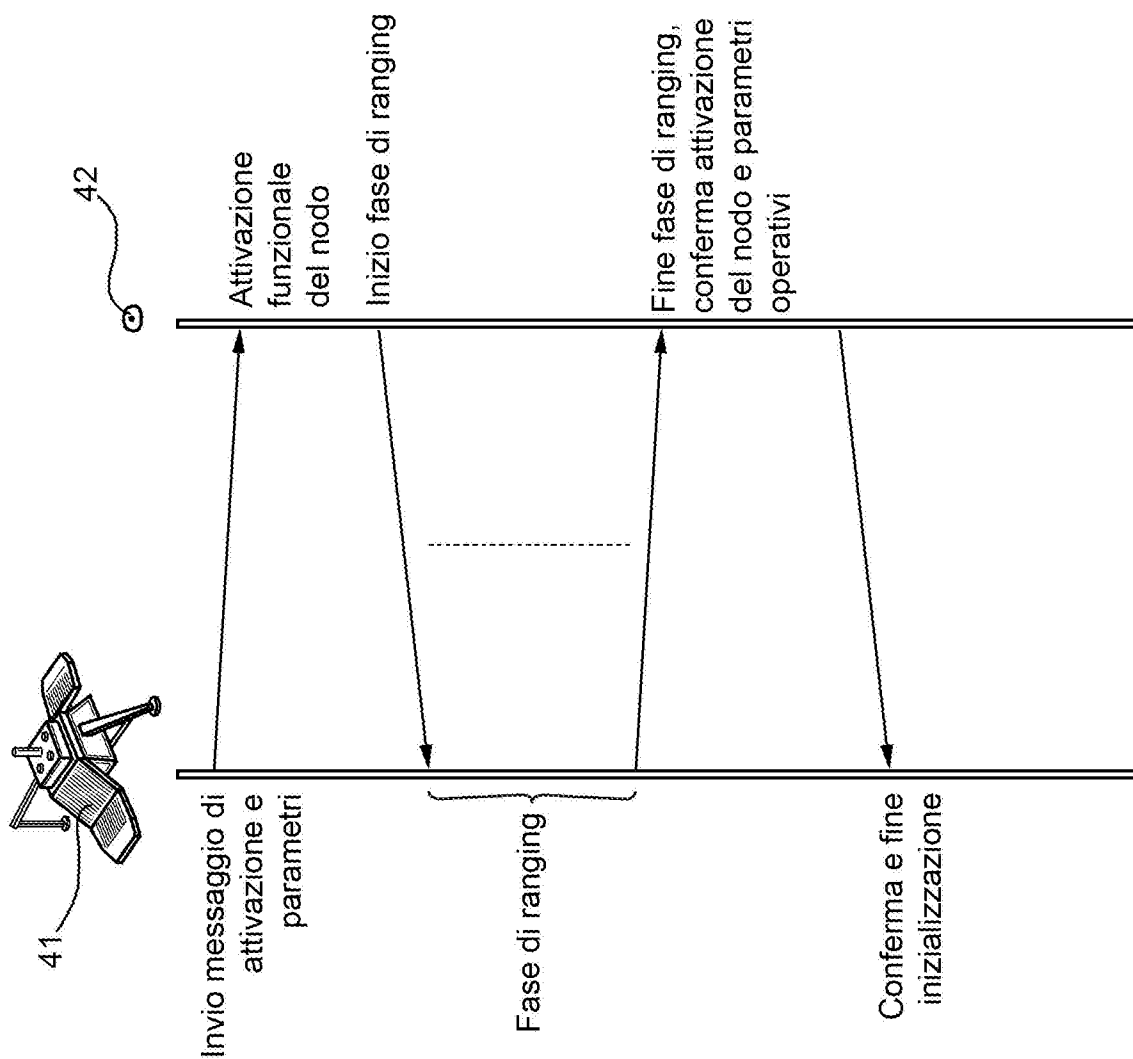


FIG. 4

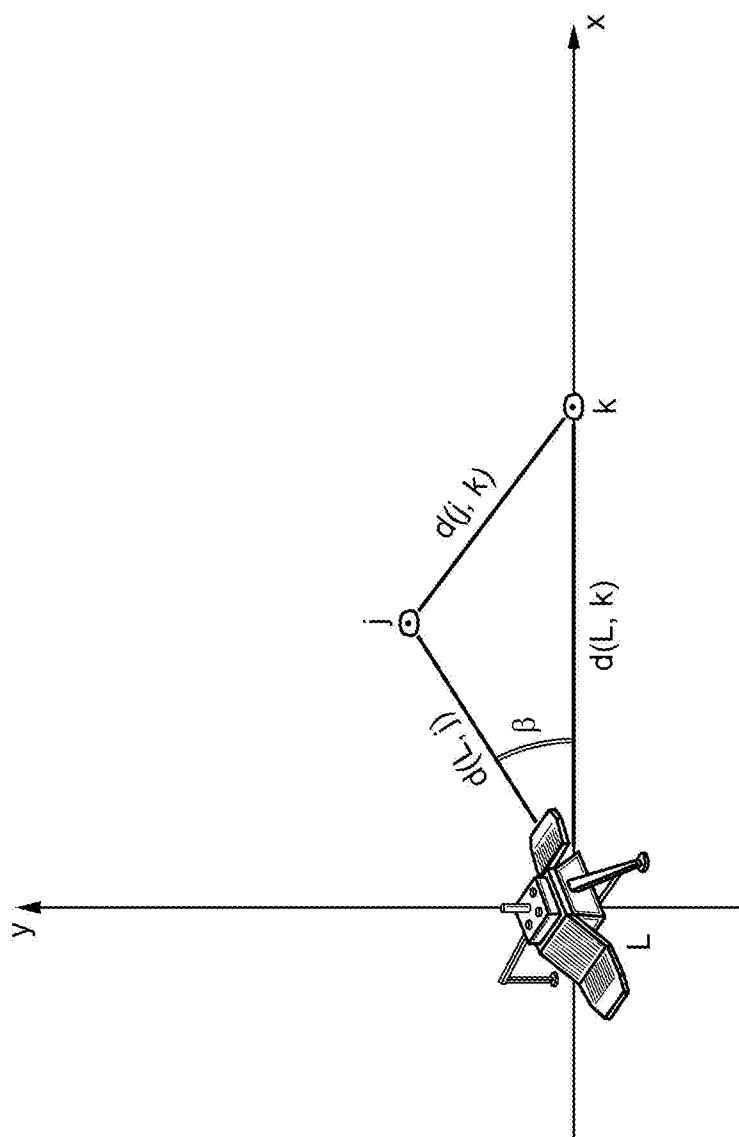


FIG. 5

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)