

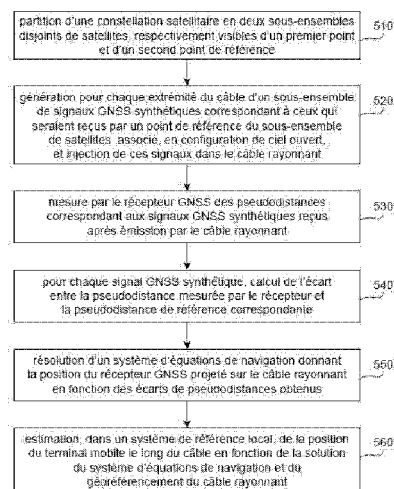
12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

22 Date de dépôt : 13.09.22.	71 Demandeur(s) : SYNTONY société par actions simplifiée — FR.
30 Priorité :	
43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 15.03.24 Bulletin 24/11.	72 Inventeur(s) : GERNOT Cyrille, PATOUT Benjamin et KUCWAJ Jean-Christophe.
56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : Se reporter à la fin du présent fascicule	
60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :	73 Titulaire(s) : SYNTONY société par actions simplifiée.
○ Demande(s) d'extension :	74 Mandataire(s) : BREVALEX.

54 MÉTHODE DE POSITIONNEMENT PAR CÂBLES RAYONNANTS SANS BIAIS DE MESURE.

57 La présente invention concerne une méthode de positionnement d'un terminal mobile le long d'au moins un câble rayonnant situé dans un environnement intérieur. Un premier sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques est injecté en une première extrémité du câble et un second sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques est injecté en une seconde extrémité du câble, les deux sous-ensembles correspondant à des signaux qui seraient reçus de deux sous-ensembles disjoints de satellites qui seraient visibles d'un premier, resp. d'un second point de référence, en configuration de ciel ouvert. Le récepteur GNSS du terminal mobile estime sa position le long du câble à partir des écarts respectifs entre, d'une part, les pseudodistances mesurées pour les différents signaux GNSS synthétiques reçus par le terminal et, d'autre part, les pseudodistances de référence calculées pour les signaux GNSS synthétiques reçus aux points de référence. Un mode de réalisation avec deux câbles rayonnants parallèles est également proposé pour un positionnement bidimensionnel.

Fig. 5



Description

Titre de l'invention : MÉTHODE DE POSITIONNEMENT PAR CÂBLES RAYONNANTS SANS BIAIS DE MESURE

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne de manière générale le domaine des systèmes de positionnement en environnement intérieur (*indoor positioning*), et notamment ceux permettant d'assurer une continuité de service de positionnement avec un environnement extérieur.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

[0002] Les systèmes de positionnement par satellite, également appelé système GNSS (*Global Navigation Satellite System*) sont à ce jour les systèmes de géo-positionnement les plus couramment utilisés. Les différentes constellations satellitaires de type GNSS (GPS, Galileo, Beidou, GLONASS, IRNSS...) émettent des signaux de positionnement satellite récepteur GNSS, de se positionner en tout point du globe terrestre.

[0003] Cependant, l'absence de signaux GNSS dans les environnements intérieurs (*indoor*), et *a fortiori* dans ceux qualifiés d'intérieurs profonds (*deep indoor*), tels que, par exemple, un tunnel souterrain, ne permet pas de positionnement satellite. Cette contrainte a conduit à développer des systèmes de positionnement spécifiques aux environnements intérieurs.

[0004] Un grand nombre de techniques possibles ont été utilisées à cette fin. Par exemple, il est connu de déployer dans un tel environnement des réseaux de balises permettant à un récepteur dédié d'estimer sa position par TDOA (*Time Difference Of Arrival*) ou bien par triangulation à partir de temps d'arrivée, TOA (*Time Of Arrival*). Il est également possible d'utiliser des points d'accès existants, par exemple d'un réseau Wi-Fi pour déterminer la position d'un terminal à partir d'empreintes (*fingerprints*) de mesures de puissance (RSSI).

[0005] Toutefois, les systèmes de positionnement en milieu intérieur précités sont généralement spécifiques à un lieu et nécessitent de disposer d'un équipement de réception dédié. En outre, ils ne permettent pas de passer aisément et sans transition (*seamlessly*) d'un environnement extérieur (*outdoor*) à un environnement intérieur (*indoor*), et vice-versa. En effet, la continuité de service n'est généralement pas garantie entre ces deux milieux, le positionnement en milieu extérieur étant réalisé par l'utilisation de signaux GNSS alors que le positionnement en milieu intérieur est réalisé au moyen de signaux spécifiques.

[0006] Le brevet FR-B-3074921, au nom de la présente Demanderesse, présente un système

de positionnement au moyen d'un câble rayonnant (*leaky feeder*) aux extrémités desquelles sont injectés des signaux GNSS synthétiques, ces signaux étant synchronisés avec des signaux GNSS réels, tels qu'ils seraient reçus dans l'environnement extérieur. Ainsi, un usager doté d'un terminal de réception GNSS peut déterminer sa position le long d'un câble rayonnant disposé dans un environnement intérieur et n'a pas à souffrir d'une rupture de service lorsqu'il entre ou sort de cet environnement.

[0007] Toutefois, les mesures de position obtenues au moyen du système de positionnement précité sont entachées d'un biais dû au fait que les signaux GNSS synthétiques injectés dans le câble rayonnant se propagent le long de ce dernier et que leur vitesse de propagation dans le câble est inférieure à celle en espace libre. Pour réduire le biais de mesure, le brevet précité recourt à un prolongement virtuel du câble, de part et d'autre des extrémités de ce dernier, d'une longueur $\Delta = \frac{l}{2} \left(\frac{c}{v} - 1 \right)$ où l est la longueur du câble rayonnant, c et v étant respectivement la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans le vide et dans le câble. Ce biais n'est toutefois parfaitement compensé que lorsque l'utilisateur se situe en position médiane, à égale distance des extrémités du câble. Cette compensation peut s'avérer insuffisante pour un câble de grande longueur dès lors que l'utilisateur s'éloigne de la position médiane.

[0008] En outre, si la méthode de positionnement divulguée dans le brevet précité se prête bien à un environnement intérieur de forme sensiblement linéaire (tunnel routier ou voie de métro par exemple), elle ne permet pas de déterminer la position de l'utilisateur de manière bidimensionnelle ou tridimensionnelle dans un environnement intérieur de forme quelconque. En effet, si l'on utilise une pluralité de câbles rayonnants dans le système de positionnement du brevet FR-B-3074921, seules les projections respectives de la position de l'utilisateur sur les différents câbles peuvent être déterminées. En revanche, la position de l'utilisateur selon une direction orthogonale à ces câbles ne peut être déterminée.

[0009] Un objet de la présente invention est par conséquent de proposer une méthode et un système de positionnement par câble rayonnant qui permettent à un usager de se positionner dans un environnement intérieur, sans biais de mesure, le cas échéant de manière bidimensionnelle ou tridimensionnelle.

Exposé de l'invention

[0010] La présente invention est définie par une méthode de positionnement d'un terminal mobile dans un environnement intérieur au sein duquel est situé au moins un premier câble rayonnant présentant une première extrémité et une seconde extrémité, ladite méthode de positionnement étant originale en ce que :

- on effectue une partition d'au moins une partie d'une constellation satellitaire en un premier et un second sous-ensembles disjoints de satellites, qui seraient respectivement

visibles d'un premier point et d'un second point de référence, en configuration de ciel ouvert ;

- on génère pour la première (resp. la seconde) extrémité un premier (resp. un second) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques correspondant à ceux qui seraient reçus, en configuration de ciel ouvert, par le premier (resp. le second) point de référence, provenant de satellites appartenant au premier (resp. au second) sous-ensemble, la première (resp. la seconde) extrémité injectant dans le câble rayonnant le premier (resp. le second) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques ainsi générés ;
- le récepteur GNSS du terminal mobile mesure les pseudodistances correspondant aux signaux GNSS synthétiques reçus du câble rayonnant ;
- on détermine pour chaque signal GNSS synthétique du premier (resp. second) sous-ensemble, l'écart entre la pseudodistance mesurée par le récepteur GNSS et une pseudodistance de référence calculée pour le premier (resp. second) point de référence ;
- on estime la position du terminal mobile le long du câble à partir des écarts des pseudodistances ainsi obtenus et d'une courbe géoréférencée, décrivant le câble rayonnant.

[0011] La position du terminal mobile le long du câble rayonnant peut alors être obtenue en résolvant un système d'équations de navigation donnant les écarts des pseudodistances en fonction de ladite position.

[0012] Le système d'équations est avantageusement donné par :

[0013] $\eta_A d_A + y + b = \Delta\rho_{A_1}^j, j = 1, \dots, N_1$

[0014] $\eta_A (L_A - d_A) + y + b = \Delta\rho_{A_2}^j, j = 1, \dots, N_2$

[0015] où η_A est le rapport entre la vitesse de la lumière et la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans le câble rayonnant, d_A est la position du terminal mobile le long du câble rayonnant en prenant la première extrémité comme origine, L_A est la longueur du câble rayonnant, y est la distance au câble rayonnant, b est le décalage d'horloge du récepteur GNSS par rapport à l'horloge ayant servi à générer les signaux GNSS synthétiques, $\Delta\rho_{A_1}^j, j = 1, \dots, N_1$ sont les écarts entre les pseudodistances mesurées par le récepteur GNSS et les pseudodistances de référence correspondantes, obtenus pour les N_1 signaux GNSS synthétiques du premier sous-ensemble, $\Delta\rho_{A_2}^j, j = 1, \dots, N_2$, sont les écarts entre les pseudodistances mesurées par le récepteur GNSS et les pseudodistances de référence correspondantes, obtenus pour les N_2 signaux GNSS synthétiques du second sous-ensemble.

[0016] La position du terminal mobile le long du câble rayonnant peut se déduire de :

[0017]
$$d_A = \frac{(\Delta\rho_{A_1} - \Delta\rho_{A_2})/\eta_A + L_A}{2}$$

[0018] où $\Delta\rho_{A_1} = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} \Delta\rho_{A_1}^j, \Delta\rho_{A_2} = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \Delta\rho_{A_2}^j$ sont respectivement la moyenne des

écarts de pseudodistances sur les premier et second sous-ensembles.

[0019] Selon un second mode de réalisation de la méthode de positionnement d'un terminal mobile, l'environnement intérieur comprend au moins un premier câble rayonnant et un second câble rayonnant, chaque câble rayonnant possédant une première extrémité et une seconde extrémité, la méthode de positionnement étant originale en ce que :

- on effectue une partition d'au moins une partie d'une constellation satellitaire en un premier, un second, un troisième et un quatrième sous-ensembles disjoints de satellites, qui seraient respectivement visibles d'un premier, d'un second, d'un troisième et d'un quatrième de en configuration de ciel ouvert ;

- on génère pour la première (resp. la seconde) extrémité du premier câble un premier (resp. un second) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques correspondant à ceux qui seraient reçus, en configuration de ciel ouvert, par le premier (resp. le second) point de référence, provenant de satellites appartenant au premier (resp. au second) sous-ensemble, la première (resp. la seconde) extrémité du premier câble injectant dans le premier câble rayonnant le premier (resp. le second) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques ainsi générés ;

- on génère pour la première (resp. la seconde) extrémité du second câble un troisième (resp. un quatrième) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques correspondant à ceux qui seraient reçus, en configuration de ciel ouvert, par le troisième (resp. le quatrième) point de référence, provenant de satellites appartenant au troisième (resp. au quatrième) sous-ensemble, la première (resp. la seconde) extrémité du second câble injectant dans le second câble rayonnant le troisième (resp. le quatrième) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques ainsi générés ;

- le récepteur GNSS du terminal mobile mesure les pseudodistances correspondant aux signaux GNSS synthétiques reçus des premier et second câbles rayonnants;

- on détermine pour chaque signal GNSS synthétique du premier (resp. second, troisième, quatrième) sous-ensemble, l'écart entre la pseudodistance mesurée par le récepteur GNSS et une pseudodistance de référence calculée pour le premier (resp. second, troisième, quatrième) point de référence ;

- on estime la position du terminal mobile le long du premier et/ou du second câble et la distance au premier et/ou second câble à partir des écarts des pseudodistances ainsi obtenus et de courbes géoréférencées, décrivant respectivement les premier et second câbles rayonnants.

[0020] La position du terminal mobile le long du et/ou second câble rayonnant et la distance au premier et/ou second câble peut alors être obtenue en résolvant un système d'équations de navigation donnant les écarts des pseudodistances en fonction de la position du terminal mobile, respectivement le long du premier câble et du second câble rayonnant ainsi que de sa distance respectivement au premier câble et au second

câble rayonnant.

[0021] Avantageusement, les premier et second câbles rayonnants sont parallèles et séparés d'une distance H et le système d'équations est donné par :

$$[0022] \quad \eta_A d_A + y + b = \Delta\rho_{A_1}^j, j = 1, \dots, N_1;$$

$$[0023] \quad \eta_A (L_A - d_A) + y + b = \Delta\rho_{A_1}^j, j = 1, \dots, N_2;$$

$$[0024] \quad \eta_B d_B + (H - y) + b = \Delta\rho_{B_1}^j, j = 1, \dots, M_1;$$

[0025] $\eta_B (L_B - d_B) + (H - y) + b = \Delta\rho_{B_2}^j, j = 1, \dots, M_2$; où η_A, η_B est le rapport entre la vitesse de la lumière et la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique respectivement dans le premier et le second câble rayonnant ; d_A, d_B est la position du terminal mobile respectivement le long du premier et du second câble rayonnant en prenant la première extrémité de ces câbles comme origine ; L_A, L_B est la longueur respective du premier et du second câble rayonnant, y est la distance de l'utilisateur au premier câble rayonnant, b est le décalage d'horloge du récepteur GNSS par rapport à l'horloge ayant servi à générer les signaux GNSS synthétiques ; $\Delta\rho_{A_1}^j, j = 1, \dots, N_1$ et $\Delta\rho_{A_2}^j, j = 1, \dots, N_2$ sont les écarts entre les pseudodistances mesurées par le récepteur GNSS et les pseudodistances de référence correspondantes, respectivement obtenus pour les N_1 signaux GNSS synthétiques du premier sous-ensemble et les N_2 signaux GNSS synthétiques du second sous-ensemble ; $\Delta\rho_{B_1}^j, j = 1, \dots, M_1$ et $\Delta\rho_{B_2}^j, j = 1, \dots, M_2$ sont les écarts entre les pseudodistances mesurées par le récepteur GNSS et les pseudodistances de référence correspondantes, respectivement obtenus pour les signaux GNSS synthétiques du troisième sous-ensemble, et les signaux GNSS synthétiques du quatrième sous-ensemble.

[0026] La position du terminal mobile le long du premier, resp. du second câble rayonnant peut être déduite de :

$$[0027] \quad d_A = \frac{(\Delta\rho_{A_1} - \Delta\rho_{A_2})/\eta_A + L_A}{2}$$

$$[0028] \quad d_B = \frac{(\Delta\rho_{B_1} - \Delta\rho_{B_2})/\eta_B + L_B}{2}$$

[0029] où $\Delta\rho_{A_1} = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} \Delta\rho_{A_1}^j, \Delta\rho_{A_2} = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \Delta\rho_{A_2}^j$ sont respectivement la moyenne des écarts de pseudodistances sur les premier et second sous-ensembles, et $\Delta\rho_{B_1} = \frac{1}{M_1} \sum_{j=1}^{M_1} \Delta\rho_{B_1}^j, \Delta\rho_{B_2} = \frac{1}{M_2} \sum_{j=1}^{M_2} \Delta\rho_{B_2}^j$ sont respectivement la moyenne des écarts de pseudodistances sur les troisième et quatrième sous-ensembles.

[0030] La distance du terminal mobile au premier câble rayonnant est donnée par :

$$[0031] \quad y = \frac{(\Delta\rho_{A_1} - \Delta\rho_{B_1}) + (\Delta\rho_{A_2} - \Delta\rho_{B_2}) - (\eta_A L_A - \eta_B L_B) + 2H}{4}$$

[0032] Quel que soit le mode de réalisation, les signaux GNSS synthétiques peuvent être générés au moyen d'un simulateur recevant au moins un signal satellitaire réel d'un satellite de ladite constellation, via une antenne située dans un environnement extérieur, les signaux GNSS synthétiques étant synchronisés par rapport au signal satellitaire réel.

Brève description des dessins

[0033] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture d'un mode de réalisation préférentiel de l'invention, fait en référence aux figures jointes parmi lesquelles :

[0034] [Fig.1] représente de manière schématique un système de positionnement selon un premier mode de réalisation de l'invention ;

[0035] [Fig.2A] et

[0036] [Fig.2B] illustrent de manière schématique un exemple de partition de ciel ouvert pouvant être utilisée dans la mise en œuvre d'une méthode de positionnement selon le mode de réalisation de la [Fig.1] ;

[0037] [Fig.3] représente de manière schématique un système de positionnement selon un second mode de réalisation de l'invention ;

[0038] [Fig.4A] et

[0039] [Fig.4B] illustrent de manière schématique un exemple de partition de ciel ouvert pouvant être utilisée dans la mise en œuvre d'une méthode de positionnement selon le mode de réalisation de la [Fig.3] ;

[0040] [Fig.5] représente de manière schématique une méthode de positionnement selon le premier mode de réalisation de la présente invention ;

[0041] [Fig.6] représente de manière schématique une méthode de positionnement selon le second mode de réalisation de la présente invention.

[0042] EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

[0043] Nous considérons dans la suite un environnement dans lequel la réception de signaux GNSS est quasi-impossible, notamment un environnement en milieu intérieur (*indoor*), voire totalement impossible (environnement dit « *deep indoor* »). Par signaux GNSS (*Global Navigation Satellite System*), nous entendons ici tout type de signaux satellitaires permettant un positionnement quel que soit le système satellitaire considéré (GPS, Galileo, GLONASS, Beidou, etc.). Enfin, nous entendons par récepteur GNSS, des dispositifs de réception de signaux GNSS respectant les normes définies dans les ICDs (*Interface Control Documents*) des systèmes satellitaires en question, permettant d'en extraire des mesures d'observables GNSS tels que des mesures de pseudo-distances.

[0044] Dans la suite, à titre d'illustration seulement et sans perte de généralité, nous sup-

poserons que le système satellitaire est un système GPS. L'environnement intérieur est séparé par une frontière d'un environnement extérieur où la réception des signaux GNSS se fait à ciel ouvert. Les cas d'usage typiques mais non limitatifs de la présente invention sont entre-autres des infrastructures souterraines ou des bâtiments.

[0045] La [Fig.1] représente de manière schématique un système de positionnement selon un premier mode de réalisation de l'invention.

[0046] Ce système, 100, comprend des moyens de génération de signaux synthétiques (encore dénommés dans la suite « simulateur de signaux synthétiques »), 110, recevant au moins un signal GNSS réel (et en règle générale une pluralité de tels signaux GNSS réels) d'une antenne, 120, située dans un environnement extérieur. Ces moyens de génération, détaillés plus loin, fournissent des signaux GNSS synthétiques, synchronisés avec ledit au moins signal GNSS réel, aux extrémités A_1 et A_2 d'un câble rayonnant, 150, situées dans l'environnement intérieur. Par signaux GNSS synthétiques, on entend un ensemble de signaux GNSS simulés correspondant à une réception en une position de référence donnée, c'est-à-dire à des signaux GNSS tels qu'ils seraient reçus dans un environnement extérieur pour une position configurée par les moyens de génération 110. Dans le présent document, on notera O_{A_1} et O_{A_2} , les positions de référence configurées pour la simulation de signaux GNSS satellitaires injectés en chaque extrémité du câble A_1 et A_2 .

[0047] Il convient de noter que les positions de référence configurées pour la simulation des signaux GNSS synthétiques par le moyen de génération 110 ne sont pas nécessairement celles des extrémités du câble. Elles peuvent être de manière générale des positions de référence situées ou non sur le câble.

[0048] Dans un cas particulier les positions de référence configurées par 110 pourront être choisies identiques aux positions des extrémités physiques des câbles rayonnants utilisés comme support d'émission (soit les positions des extrémités A_1 et A_2).

[0049] Par câble rayonnant (*leaky feeder*), on entend typiquement un câble coaxial dont le conducteur extérieur présente des fentes à intervalles réguliers de manière à permettre une émission radiale sur toute sa longueur. De manière équivalente, on pourra utiliser tout guide d'ondes, à fentes ou à ouvertures, présentant une grande extension selon son axe longitudinal et permettant une émission radiale tout au long de cet axe. A noter que le câble rayonnant n'est pas nécessairement rectiligne, il peut être au moins curviligne sur au moins une partie de sa longueur. Toutefois, à titre liminaire et dans un but de simplification de la présentation de l'invention, nous supposons que le câble est rectiligne.

[0050] L'ensemble Ω des signaux synthétiques générés par les moyens de génération 110, est partitionné en deux sous-ensembles disjoints Ω_{A_1} , Ω_{A_2} . Le sous-ensemble Ω_{A_1}

(resp. Ω_{A_2}) associé à l'extrémité A_1 (resp. A_2) est constitué de signaux GNSS qui seraient reçus au même instant en un premier (resp. un second) point de référence O_{A_1} (resp. O_{A_2}) dans une configuration de ciel ouvert, c'est-à-dire sans aucun obstacle de propagation entre ce premier (resp. second) point de référence et le ciel. Par exemple, dans le mode de réalisation particulier précité, le sous-ensemble Ω_{A_1} (resp. Ω_{A_2}) de signaux satellitaires générés par 110 et injectés au sein du câble rayonnant par l'extrémité A_1 (resp. A_2), peut être défini par un sous-ensemble de signaux GNSS simulés correspondant à des signaux GNSS satellitaires reçus en un point de référence O_{A_1} (resp. O_{A_2}). Ces signaux satellitaires sont associés aux satellites théoriquement visibles du point O_{A_1} (resp. O_{A_2}) dans un cône de visibilité au-dessus de l'horizon, ayant pour sommet O_{A_1} (resp. O_{A_2}). Les cônes de visibilité de sommets O_{A_1} et O_{A_2} (correspondant aux signaux injectés en A_1 et A_2) sont choisis disjoints. Dans un mode de réalisation particulier on pourra prendre les premier et second points de référence identiques, les sous-ensembles Ω_{A_1} et Ω_{A_2} étant toujours choisis disjoints.

[0051] Avantageusement, on pourra prévoir que les directions des cônes de visibilité présentent entre eux un écart angulaire en azimut et/ou en élévation supérieur à une valeur de seuil.

[0052] Dans la suite, on notera $s_{A_i}^j$, avec $j = 1, \dots, N_i$ et $i = 1, 2$, les signaux GNSS synthétiques simulés pour une position de référence O_{A_i} et injectés à chaque extrémité du câble rayonnant A_i , autrement dit appartenant au sous-ensemble Ω_{A_i} avec $s_{A_i}^j$, $j = 1, \dots, N_i$ les satellites simulés correspondants. On supposera que $N_1, N_2 \geq 1$, autrement dit que chacun des deux sous-ensembles est non vide et que $N_1 + N_2 \geq 4$ pour permettre au récepteur GNSS d'effectuer des mesures de pseudodistances de manière conventionnelle.

[0053] Ainsi, sur la Fig. 1, l'extrémité A_1 reçoit à l'instant t , des moyens de génération 100, les signaux GNSS synthétiques $s_{A_1}^1(t)$, $s_{A_1}^2(t)$ qui seraient reçus en ce même instant par le premier point de référence simulé O_{A_1} , dans une configuration de ciel ouvert. De même, l'extrémité A_2 reçoit à l'instant t , des moyens de génération 100, les signaux GNSS synthétiques $s_{A_2}^1(t)$, $s_{A_2}^2(t)$ qui seraient reçus en ce même instant par le second point de référence simulé O_{A_2} , dans une configuration de ciel ouvert. Dans la suite, on omettra le temps t , étant entendu que les moyens de génération des signaux GNSS synthétiques sont synchronisés avec le temps d'un signal GNSS réel. Plus précisément, l'horloge locale du simulateur 110 est calée sur ledit au moins signal GNSS réel reçu de l'antenne 120, le décalage (offset) entre l'horloge locale du simulateur et le temps GPS étant constant.

- [0054] Il convient également de remarquer, notamment pour un système de positionnement spatialement étendu, que les signaux fournis par les moyens de génération peuvent être décalés dans le temps, afin de compenser les temps de propagation respectifs dans les câbles d'amenée (non représentés) reliant le simulateur et les extrémités A_1 et A_2 .
- [0055] Les signaux GNSS synthétiques $s_{A_1}^j, j = 1, \dots, N_1$ du sous-ensemble Ω_{A_1} sont injectés en A_1 dans le câble rayonnant 150 et s'y propagent en direction de A_2 tout en étant rayonnés radialement le long du câble. De manière similaire, les signaux GNSS synthétiques $s_{A_2}^j, j = 1, \dots, N_2$ du sous-ensemble Ω_{A_2} sont injectés dans le câble rayonnant 150, et s'y propagent en direction de A_1 tout en étant rayonnés radialement le long du câble.
- [0056] Par définition des signaux GNSS synthétiques $s_{A_i}^j, j = 1, \dots, N_i$ du sous-ensemble Ω_{A_i} , un récepteur GNSS synchronisé sur la même horloge interne que le simulateur et recevant ces signaux directement en sortie du simulateur 110, tels qu'injectés en A_i , mesurerait des pseudodistances $\rho_{A_i}^j$ relatives aux distances entre la position de référence simulé O_{A_i} et les satellites simulés $S_{A_i}^j, j = 1, \dots, N_i$.
- [0057] Ces pseudodistances $\rho_{A_i}^j$, peuvent être calculées en chaque instant par le simulateur, à partir des informations d'almanach, d'éphéméride et d'un temps GPS. Les informations d'almanach, d'éphéméride de chaque satellite peuvent être obtenues directement en démodulant les messages de navigation des signaux GNSS réels reçus par le simulateur ou bien par un serveur distant. Le temps GPS peut être donné par l'un des signaux GNSS réels reçus. Ainsi, il n'est pas nécessaire que tous les signaux GNSS réels soient effectivement reçus par l'antenne 120. Les messages de navigation des signaux réels manquants (par exemple émis par des satellites masqués par des obstacles en milieu urbain) peuvent être fournis par un serveur distant.
- [0058] Les pseudodistances $\rho_{A_i}^j, j = 1, \dots, N_{A_i}, i = 1, 2$ sont dénommées dans la suite pseudodistances de référence car calculées sans recourir à des mesures, pour chacun des points de référence $O_{A_i}, i = 1, 2$. Il convient de noter que, pour une constellation satellitaire simulée donnée, les pseudodistances de référence ne dépendent que des positions de référence $O_{A_i}, i = 1, 2$, de la position des satellites $S_{A_i}^j$ et du temps GPS.
- [0059] Un récepteur de signaux GNSS situé au point R , faisant par exemple partie d'un terminal mobile d'un usager, mesure les pseudodistances $\tilde{\rho}_{A_i}^j$ suivantes, relatives aux signaux GNSS synthétiques reçus, $s_{A_i}^j$, par la relation suivante :

[0060] [Math.1]

$$\tilde{\rho}_{A_i}^j = \rho_{A_i}^j + \eta_A d_{A_i} + y + b + w_{A_i}^j$$

(1)

[0061] où d_{A_i} est la distance séparant l'extrémité A_i du câble et la projection orthogonale de R sur le câble rayonnant ; $\eta_A = \frac{c}{v_A}$ est le facteur de célérité dans le câble (rapport de la vitesse de la lumière et de la vitesse de propagation v_A d'une onde dans le câble rayonnant) ; b correspond au décalage entre l'horloge du récepteur GNSS et celle du simulateur 110 ; y est la distance entre la position R du récepteur GNSS et le câble ; $w_{A_i}^j$ est un bruit de mesure de la pseudodistance. Etant donné que les signaux GNSS synthétiques d'un même sous-ensemble Ω_{A_i} suivent un même trajet de propagation, on peut légitimement considérer que les bruits de mesure $w_{A_i}^j$ ne dépendent pas de l'indice du satellite simulé j . Si l'on néglige le bruit de mesure en question, l'écart entre une pseudodistance mesurée, $\tilde{\rho}_{A_i}^j$ par le récepteur GNSS et la pseudodistance de référence $\rho_{A_i}^j$ correspondante n'est fonction que de la distance de propagation dans le câble, de la distance du récepteur GNSS au câble et du décalage d'horloge du récepteur par rapport à au simulateur. Cet écart entre la pseudodistance de référence (ou théorique) associée à A_i et cette même pseudodistance mesurée après propagation du signal dans le câble, noté $\Delta\rho_{A_i}^j$, s'exprime comme suit :

[0062] [Math.2]

$$\Delta\rho_{A_i}^j = \tilde{\rho}_{A_i}^j - \rho_{A_i}^j = \eta_A d_{A_i} + y + b$$

(2)

[0063] Par la suite, on prendra arbitrairement comme référence la première extrémité du câble A_1 . La distance d_A le long du câble n'est autre alors que $d_A = d_{A_1}$ et l'on a $d_{A_2} = L_A - d_A$ où L_A est la longueur du câble.

[0064] Les pseudodistances mesurées $\tilde{\rho}_{A_i}^j$, $j = 1, \dots, N_{A_i}$, $i = 1, 2$ sont directement fournies par le récepteur GNSS du terminal mobile.

[0065] Les pseudodistances de référence $\rho_{A_i}^j$, $j = 1, \dots, N_{A_i}$, $i = 1, 2$ sont par ailleurs connues du terminal mobile. En effet, ces dernières ne dépendent que de la position de référence simulée O_{A_i} et des satellites visibles associés $S_{A_i}^j$. Pour ce faire, différentes variantes sont possibles :

[0066] Selon une première variante, les pseudodistances de référence sont calculées en chaque instant par le simulateur, à partir de messages de navigation reçus des différents satellites et/ou des données d'almanach/éphéméride fournis par un serveur distant, et des positions des points de référence. Dans ce cas, les pseudodistances de référence peuvent être transmises via un canal auxiliaire, au terminal mobile.

[0067] Selon une seconde variante, les pseudodistances de référence sont calculées en

chaque instant par un serveur distant, à partir des données d'almanach/éphéméride des différents satellites, ainsi que des positions des points de référence. Les pseudo-distances de référence ainsi calculées peuvent être transmises au terminal mobile via des points d'accès Wi-Fi situés au sein de l'environnement intérieur ou encore via un système de communication déployé au sein de cet environnement. Selon une troisième variante, les pseudodistances théoriques sont calculées en chaque instant par le terminal mobile lui-même sur la base des données d'almanach/éphéméride des différents satellites, et des positions des points de référence. Pour ce faire, les données d'almanach/éphéméride et les positions de référence peuvent être transmises par un serveur distant, via des points d'accès Wi-Fi ou via tout autre système de communication déployé dans l'environnement intérieur.

[0068] Quelle que soit la variante de réalisation, les coordonnées locales $(x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i})$ des extrémités $A_i, i = 1, 2$ du câble sont connues dans un système de référence cartographique (référentiel géographique, plan de bâtiment ou d'infrastructure) sont connues du terminal mobile, et peuvent être fournies à une application de navigation.

[0069] Le terminal mobile résout un système de $N_1 + N_2$ équations de navigation à trois inconnues, à savoir la coordonnée d_A , la distance au câble y , et l'écart d'horloge b , où les observables sont les pseudodistances $\tilde{\rho}_{A_i}^j$, relatives aux signaux GNSS synthétiques, $s_{A_i}^j$, reçus via le câble rayonnant et $\rho_{A_i}^j$ les pseudodistances théoriques associées :

[0070] [Math.3]

$$\Delta \rho_{A_1}^j = \tilde{\rho}_{A_1}^j - \rho_{A_1}^j = \eta_A d_A + y + b, \quad j = 1, \dots, N_1$$

(3-1)

[0071] [Math.4]

$$\Delta \rho_{A_2}^j = \tilde{\rho}_{A_2}^j - \rho_{A_2}^j = \eta_A (L_A - d_A) + y + b, \quad j = 1, \dots, N_2 \quad (3-2)$$

[0072] La connaissance des coordonnées locales de chaque extrémité de câble et l'élimination de la somme $y + b$ entre les équations permet de déterminer la coordonnée d_A , autrement dit la coordonnée de la position du terminal mobile le long de l'axe du câble en prenant l'extrémité A_1 comme origine. En revanche, ce premier mode de réalisation ne permet pas à lui seul de déterminer séparément l'ordonnée y et l'offset d'horloge b .

[0073] Le système des équations de navigation (3-1), (3-2) peut être résolu de manière classique, par exemple par une méthode des moindres carrés, si le système est sur-déterminé, de manière connue en soi.

[0074] Selon un exemple de réalisation, on pourra simplement moyenner les écarts de pseu-

des distances pour chacun des sous-ensembles Ω_{A_i} :

[0075] [Math.5]

$$\Delta\rho_{A_1} = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} \Delta\rho_{A_1}^j \quad (4-1)$$

[0076] [Math.6]

$$\Delta\rho_{A_2} = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \Delta\rho_{A_2}^j \quad (4-2)$$

[0077] et en déduire la coordonnée d_A de la position du terminal mobile par la relation suivante:

[0078] [Math.7]

$$d_A = \frac{(\Delta\rho_{A_1} - \Delta\rho_{A_2})/\eta_A + L_A}{2} \quad (5)$$

[0079] Connaissant les coordonnées $(x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i})$ des extrémités $A_i, i = 1, 2$ du câble dans un système de coordonnées local, on peut en déduire la position de la projection orthogonale du point R où se trouve l'utilisateur dans ce même système de coordonnées et fournir celle-ci à une application de navigation spécifique (tunnel, réseau routier souterrain, par exemple).

[0080] On a supposé jusqu'ici que le câble rayonnant était rectiligne. L'homme du métier comprendra toutefois que la méthode de positionnement selon le premier mode de réalisation s'applique également à un câble curviligne dont le terminal mobile connaît la courbe dans l'espace. En effet, la coordonnée d_A n'est autre alors que l'abscisse curviligne le long du câble en prenant la première extrémité A_1 comme origine, cette coordonnée donnant la position de la projection orthogonale du point R sur le câble.

[0081] Les [Fig.2A] et 2B illustrent de manière schématique un exemple de partition de ciel ouvert pouvant être utilisée dans la mise en œuvre d'une méthode de positionnement selon le premier mode de réalisation de l'invention.

[0082] On a représenté en 210 une configuration de ciel ouvert en vue de dessus montrant une constellation satellitaire à un instant donné. Cette configuration fait ici l'objet d'une partition en deux parties, 211, 212, correspondant ici à deux directions opposées.

[0083] La Fig. 2B illustre le câble rayonnant dans l'environnement intérieur et l'attribution de satellites/ signaux GNSS à chacune de ses extrémités. On vérifie que les sous-ensembles $\Omega_{A_i}, i = 1, 2$ sont bien disjoints et que chacun d'entre eux comprend au moins un élément.

[0084] La [Fig.3] représente de manière schématique un système de positionnement d'un terminal mobile selon un second mode de réalisation de la présente invention.

- [0085] A la différence du premier système de positionnement illustré en Fig.1, le système de positionnement selon le second mode de réalisation de l'invention comprend deux câbles rayonnants coplanaires parallèles, 350 et 370, situés dans un environnement intérieur, à savoir un premier câble A, 350, de longueur L_A et un second câble B, 370, de longueur L_B . Nous supposons tout d'abord que ces deux câbles sont rectilignes et séparés d'une distance H .
- [0086] Des moyens de génération 310 reçoivent au moins un signal GNSS réel d'une antenne, 320, située dans l'environnement extérieur et fournissent des signaux GNSS synthétiques, synchronisés avec ledit au moins signal GNSS réel, aux extrémités A_1 et A_2 du premier câble rayonnant, 350, d'une part, et aux extrémités B_1 et B_2 du second câble rayonnant, 370, d'autre part.
- [0087] L'ensemble Ω des signaux synthétiques générés par les moyens de génération 310, est partitionné en quatre sous-ensembles disjoints deux à deux, à savoir $\Omega_{A_1}, \Omega_{A_2}$, respectivement associés à un premier et à un second point de référence simulés, notés O_{A_1} et O_{A_2} , les signaux de $\Omega_{A_1}, \Omega_{A_2}$ étant respectivement injectés dans le câble rayonnant en A_1 et A_2 ; et $\Omega_{B_1}, \Omega_{B_2}$, respectivement associés à une troisième et un quatrième point de référence simulés, notés O_{B_1} et O_{B_2} , les signaux de $\Omega_{B_1}, \Omega_{B_2}$ étant respectivement injectés dans le câble rayonnant en B_1 et B_2 .
- [0088] En un instant donné, le sous-ensemble des signaux GNSS associé à un point de référence est constitué de signaux qui seraient reçus au même instant en ce point dans une configuration de ciel ouvert, c'est-à-dire sans aucun obstacle de propagation entre ce point et le ciel.
- [0089] Comme dans le premier mode de réalisation, les sous-ensembles Ω_{A_1} , resp. Ω_{A_2} , et Ω_{B_1} , resp. Ω_{B_2} , peuvent être définis par des sous-ensembles de signaux GNSS reçus de satellites visibles des positions simulées O_{A_1} , resp. O_{A_2} en A_1 , resp. A_2 , et O_{B_1} , resp. O_{B_2} en B_1 , resp. B_2 , dans des cônes de visibilité définis en élévation au-dessus de l'horizon, et en azimut. Les quatre cônes de visibilité étant choisis disjoints 2 à 2.
- [0090] Dans le mode de réalisation particulier précité, le sous-ensemble Ω_{B_1} (resp. Ω_{B_2}) peut être défini par un sous-ensemble de signaux GNSS reçus de satellites visibles du point de référence simulé O_{B_1} (resp. O_{B_2}) dans un cône de visibilité au-dessus de l'horizon, défini en élévation et azimut. Les cônes de visibilité de sommets $O_{A_1}, O_{A_2}, O_{B_1}, O_{B_2}$ correspondant aux simulations de signaux GNSS injectés en A_1, A_2, B_1, B_2 sont choisis disjoints.
- [0091] Avantagusement, on pourra prévoir que les directions des cônes de visibilité présentent entre eux un écart angulaire en azimut et/ou en élévation supérieur à une valeur de seuil.

- [0092] On notera $s_{B_i}^j$, $j = 1, \dots, M_i$, $i = 1, 2$, les signaux GNSS synthétiques injectés à chaque extrémité du câble rayonnant B , c'est-à-dire appartenant au sous-ensemble Ω_{B_i} et $s_{B_i}^j$, $j = 1, \dots, M_i$ les satellites simulés correspondants. On supposera que $M_1, M_2 \geq 1$ et que $N_1 + N_2 + M_1 + M_2 \geq 4$ pour permettre au récepteur GNSS d'effectuer des mesures de pseudodistances de manière conventionnelle.
- [0093] Comme dans le premier mode de réalisation, les moyens de génération 310 des signaux GNSS synthétiques sont synchronisés avec le temps d'un signal GNSS réel. En outre, les signaux fournis par les moyens de génération peuvent être décalés dans le temps, afin de compenser les temps de propagation respectifs dans les câbles d'amenée (non représentés) reliant le simulateur et les extrémités A_1, A_2, B_1, B_2 .
- [0094] Les signaux GNSS synthétiques $s_{B_1}^j$, $j = 1, \dots, M_1$ du sous-ensemble Ω_{B_1} sont injectés dans le câble rayonnant 370 en B_1 et s'y propagent en direction de B_2 tout en étant rayonnés radialement le long du câble. De manière similaire, les signaux GNSS synthétiques $s_{B_2}^j$, $j = 1, \dots, M_2$ du sous-ensemble Ω_{B_2} sont injectés dans le câble rayonnant 370 en B_2 et s'y propagent en direction de B_1 tout en étant rayonnés radialement le long de ce même câble.
- [0095] Par définition des signaux GNSS synthétiques $s_{B_i}^j$, $j = 1, \dots, M_i$, $i = 1, 2$ du sous-ensemble Ω_{B_i} , un récepteur GNSS recevant des signaux GNSS simulés, directement en sortie du simulateur 110, tels qu'injectés en B_i , et pourvu de la même horloge interne que le simulateur, mesurerait des pseudodistances $\rho_{B_i}^j$ relatives aux distances entre la position située au point de référence O_{B_i} et la position des satellites $s_{B_i}^j$, $j = 1, \dots, M_i$ visibles dans le cône de visibilité associé.
- [0096] Ainsi, un récepteur de signaux GNSS situé au point R , faisant par exemple partie d'un terminal mobile d'un usager, mesure les pseudodistances, relatives aux positions de référence simulées O_{A_i} , $i = 1, 2$ et O_{B_i} , $i = 1, 2$, et aux satellites simulés $s_{A_i}^j$, $j = 1, \dots, N_i$ et $s_{B_i}^j$, $j = 1, \dots, M_i$:
- [0097] [Math.8]
- $$\tilde{\rho}_{A_i}^j = \rho_{A_i}^j + \eta_A d_{A_i} + y + b + w_{A_i}^j, \quad j = 1, \dots, N_i \quad (6-1)$$
- [0098] [Math.9]
- $$\tilde{\rho}_{B_i}^j = \rho_{B_i}^j + \eta_B d_{B_i} + (H - y) + b + w_{B_i}^j, \quad j = 1, \dots, M_i \quad (6-2)$$
- [0099] avec les mêmes notations que précédemment et où d_{B_i} est la distance séparant le point B_i et la projection orthogonale de R sur le second câble rayonnant ; $\eta_B = \frac{c}{v_B}$ est le

facteur de célérité du second câble rayonnant, et $w_{B_i}^j$ est un bruit de mesure.

[0100] Si l'on néglige les bruits de mesure $w_{B_i}^j$ et $w_{B_i}^j$, et de manière analogue à l'équation (2), les écarts entre les pseudodistances mesurées par le récepteur GNSS et les pseudodistances de référence sont données par :

[0101] [Math.10]

$$\Delta \rho_{A_i}^j = \tilde{\rho}_{A_i}^j - \rho_{A_i}^j = \eta_A d_{A_i} + y + b, \quad j = 1, \dots, N_i \quad (7-1)$$

[0102] [Math.11]

$$\Delta \rho_{B_i}^j = \tilde{\rho}_{B_i}^j - \rho_{B_i}^j = \eta_B d_{B_i} + (H - y) + b, \quad j = 1, \dots, M_i \quad (7-2)$$

[0103] Comme dans le premier mode de réalisation, les pseudodistances mesurées, $\tilde{\rho}_{A_i}^j$ et $\tilde{\rho}_{B_i}^j$ sont directement fournies par le récepteur GNSS, et les pseudodistances de référence, $\rho_{A_i}^j$ et $\rho_{B_i}^j$ sont connues du terminal mobile, les différentes variantes décrites dans le cadre du premier de réalisation trouvant également à s'appliquer au second mode de réalisation.

[0104] Quelle que soit la variante de réalisation, les coordonnées locales $(x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i})$ des extrémités $A_i, i = 1, 2$ du premier câble rayonnant ainsi que celles $(x_{B_i}, y_{B_i}, z_{B_i})$ des extrémités $B_i, i = 1, 2$ du second câble rayonnant sont connues du terminal mobile.

[0105] Le terminal mobile résout un système de $N_1 + N_2 + M_1 + M_2$ équations de navigation où les distances $d_A = d_{A_1}$ (resp. $L_A - d_A = d_{A_2}$), $d_B = d_{B_1}$ (resp. $L_B - d_B = d_{B_2}$), y , et l'écart d'horloge b sont des inconnues :

[0106] [Math.12]

$$\Delta \rho_{A_1}^j = \tilde{\rho}_{A_1}^j - \rho_{A_1}^j = \eta_A d_A + y + b, \quad j = 1, \dots, N_1 \quad (8-1)$$

[0107] [Math.13]

$$\Delta \rho_{A_2}^j = \tilde{\rho}_{A_2}^j - \rho_{A_2}^j = \eta_A (L_A - d_A) + y + b, \quad j = 1, \dots, N_2 \quad (8-2)$$

[0108] [Math.14]

$$\Delta \rho_{B_1}^j = \tilde{\rho}_{B_1}^j - \rho_{B_1}^j = \eta_B d_B + (H - y) + b, \quad j = 1, \dots, M_1 \quad (8-3)$$

[0109] [Math.15]

$$\Delta \rho_{B_2}^j = \tilde{\rho}_{B_2}^j - \rho_{B_2}^j = \eta_B (L_B - d_B) + (H - y) + b, \quad j = 1, \dots, M_2 \quad (8-4)$$

[0110] Le système des équations de navigation (8-1) à (8-4) est un système d'au moins 4

équations à 4 inconnues, d_A , d_B , y , b . Il peut être résolu de manière classique comme dans le premier mode de réalisation.

- [0111] Par exemple, les écarts de pseudodistances, $\Delta\rho_{A_1}^j$ et $\Delta\rho_{A_2}^j$ peuvent être moyennés sur les sous-ensembles Ω_{A_1} et Ω_{A_2} , respectivement associés aux extrémités A_1 et A_2 du premier câble, selon (4-1) et (4-2). De manière similaire, les écarts de pseudodistances $\Delta\rho_{B_1}^j$ et $\Delta\rho_{B_2}^j$ peuvent être moyennés sur les sous-ensembles Ω_{B_1} et Ω_{B_2} , respectivement associés aux extrémités B_1 et B_2 du second câble :

- [0112] [Math.16]

$$\Delta\rho_{B_1} = \frac{1}{M_1} \sum_{j=1}^{M_1} \Delta\rho_{B_1}^j \quad (9-1)$$

- [0113] [Math.17]

$$\Delta\rho_{B_2} = \frac{1}{M_2} \sum_{j=1}^{M_2} \Delta\rho_{B_2}^j \quad (9-2)$$

De manière analogue à l'équation (5), on en déduit alors les abscisses sur les axes des deux câbles rayonnants :

- [0114] [Math.18]

$$d_A = \frac{(\Delta\rho_{A_1} - \Delta\rho_{A_2}) / \eta_A + L_A}{2} \quad (10-1)$$

- [0115] [Math.19]

$$d_B = \frac{(\Delta\rho_{B_1} - \Delta\rho_{B_2}) / \eta_B + L_B}{2} \quad (10-2)$$

- [0116] Toutefois, à la différence du premier mode de réalisation, le second mode permet de déterminer l'ordonnée y et l'écart d'horloge b du récepteur GNSS avec les signaux GNSS synthétiques, à savoir :

- [0117] [Math.20]

$$y = \frac{(\Delta\rho_{A_1} - \Delta\rho_{B_1}) + (\Delta\rho_{A_2} - \Delta\rho_{B_2}) - (\eta_A L_A - \eta_B L_B) + 2H}{4} \quad (10-3)$$

- [0118] [Math.21]

$$b = \frac{(\Delta\rho_{A_1} + \Delta\rho_{B_1} + \Delta\rho_{A_2} + \Delta\rho_{B_2}) - (\eta_A L_A + \eta_B L_B) - 2H}{4} \quad (10-4)$$

- [0119] La présentation du second mode de réalisation a été faite sous l'hypothèse que les deux câbles rayonnants étaient rectilignes, coplanaires et parallèles. Toutefois, l'homme du métier comprendra que ces contraintes peuvent être relâchées et qu'il suffit en pratique que les câbles soient géoréférencés, c'est-à-dire que leurs courbes soient connues dans l'espace. En effet, en application du premier mode de réalisation,

il est possible de déterminer les coordonnées curvilignes des projections orthogonales du point , respectivement sur le premier et le second câble rayonnant. La distance H peut alors être estimée à partir de :

[0120] [Math.22]

$$H = \sqrt{\left(x_{d_A} - x_{d_B}\right)^2 + \left(y_{d_A} - y_{d_B}\right)^2 + \left(z_{d_A} - z_{d_B}\right)^2} \quad (11)$$

[0121] où $(x_{d_A}, y_{d_A}, z_{d_A})$ et $(x_{d_B}, y_{d_B}, z_{d_B})$ sont les coordonnées cartésiennes respectives des projections orthogonales du point R sur les premier et second câbles rayonnants, déduite de l'estimation des distances d_A et d_B .

[0122] Les [Fig.4A] et 4B illustrent de manière schématique un exemple de partition de ciel ouvert pouvant être utilisée dans la mise en œuvre d'une méthode de positionnement selon le second mode de réalisation de l'invention.

[0123] On a représenté en 410 une configuration de ciel ouvert en vue de dessus montrant une constellation satellitaire à un instant donné. Cette configuration fait ici l'objet d'une partition en quatre quadrants, 411, 412, 413, 414 correspondant par exemple respectivement aux directions NO, NE, SO et SE.

[0124] La Fig. 4B illustre les premier et second câbles rayonnants dans l'environnement intérieur et l'attribution de satellites/ signaux GNSS aux extrémités de chacun de ces câbles. On vérifie que les sous-ensembles $\Omega_{A_i}, i = 1, 2$ et $\Omega_{B_j}, j = 1, 2$, sont bien disjoints et que chacun d'entre eux comprend au moins un élément.

[0125] La [Fig.5] représente de manière schématique une méthode de positionnement selon le premier mode de réalisation de la présente invention.

[0126] On se place ici dans le contexte d'un système de positionnement utilisant un câble rayonnant tel que représenté en [Fig.1].

[0127] Dans une première étape, 510, on partitionne une constellation satellitaire C en deux sous-ensembles disjoints, chaque sous-ensemble C_{A_i} étant associé de manière bi-univoque à une extrémité du câble, A_i , les satellites de ce sous-ensemble étant tous visibles du point de référence O_{A_i} , dans une configuration de ciel ouvert.

[0128] A l'étape 520, on génère pour chaque extrémité $A_i, i = 1, 2$, un sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques, $\Omega_{A_i} = \{s_{A_i}^j, j = 1, \dots, N_i\}$, correspondant aux satellites du sous-ensemble C_{A_i} qui seraient reçus au point de référence O_{A_i} à l'instant t , en configuration de ciel ouvert. Les signaux GNSS synthétiques générés sont injectés à chaque extrémité du câble rayonnant A_i associées.

[0129] A l'étape 530, le récepteur GNSS du terminal mobile mesure les pseudodistances, $\tilde{p}_{A_i}^j$, correspondant aux signaux GNSS synthétiques reçus, après propagation dans le câble

rayonnant, soit $s_{A_i}^j$, $j = 1, \dots, N_i$, $i = 1, 2$.

- [0130] A l'étape 540, le terminal mobile calcule les écarts $\Delta\rho_{A_i}^j$ entre les pseudodistances $\tilde{\rho}_{A_i}^j$ mesurées par le récepteur GNSS à l'étape précédente et les pseudodistances de référence correspondantes, $\rho_{A_i}^j$, obtenues par calcul.
- [0131] A l'étape 550, le terminal résout un système d'équations de navigation ((3-1), (3-2)) donnant la position du point R du terminal mobile le long du câble rayonnant, à savoir la distance d_A , en fonction des écarts $\Delta\rho_{A_1}^j$ et $\Delta\rho_{A_2}^j$ entre pseudodistances mesurées et pseudodistances de référence. La distance d_A est la distance séparant la projection orthogonale du point R sur le câble de son extrémité A_1 . Par exemple, la résolution du système d'équations de navigation précité pourra se faire selon (5).
- [0132] A l'étape 560, la position du terminal mobile est estimée à partir de la solution du système d'équations de navigation obtenue à l'étape précédente. Par exemple, si le câble est rectiligne elle pourra être déterminée de manière relative par rapport aux coordonnées des extrémités du câble rayonnant et de la coordonnée de la projection orthogonale de la position R sur ce câble. Si le câble est curviligne, elle pourra être déterminée à partir de la connaissance de la courbe décrite par le câble dans l'espace et la coordonnée curviligne de la projection de la position R sur ce câble.
- [0133] La [Fig.6] représente de manière schématique une méthode de positionnement selon un second mode de réalisation de la présente invention.
- [0134] On se place ici dans le contexte d'un système de positionnement utilisant une paire de câbles rayonnants tel que représenté en [Fig.3].
- [0135] A l'étape 610, on partitionne une constellation satellitaire C en quatre sous-ensembles disjoints, chaque sous-ensemble C_{A_i} (resp. C_{B_i}) étant associé de manière bi-univoque à une extrémité du premier câble rayonnant, A_i (resp. du second câble rayonnant B_i). Les satellites du sous-ensemble associé à une extrémité de câble sont tous visibles d'un point de référence simulé O_{A_i} (resp. O_{B_i}), dans une configuration de ciel ouvert.
- [0136] A l'étape 620, on génère pour chaque extrémité A_i du premier câble, (resp. B_i du second câble) un sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques, $\Omega_{A_i} = \{s_{A_i}^j, j = 1, \dots, N_i\}$ (resp. $\Omega_{B_i} = \{s_{B_i}^j, j = 1, \dots, M_i\}$) correspondant aux satellites du sous-ensemble C_{A_i} , (resp. C_{B_i}) qui serait reçus au point de référence O_{A_i} (resp. O_{B_i}) à l'instant t , en configuration de ciel ouvert. Les signaux GNSS synthétiques générés sont injectés aux extrémités associées A_i (resp. B_i) du premier (resp. second) câble rayonnant.
- [0137] A l'étape 630, le récepteur GNSS du terminal mobile mesure les pseudodistances, $\tilde{\rho}_{A_i}^j$

(resp. $\tilde{\rho}_{B_i}^j$) correspondant aux signaux GNSS synthétiques reçus du premier (resp. second câble rayonnant), soit $s_{A_i}^j, j = 1, \dots, N_{\tilde{p}}, i = 1, 2$ (resp. $s_{B_i}^j, j = 1, \dots, M_{\tilde{p}}, i = 1, 2$).

- [0138] A l'étape 640, le terminal mobile calcule les écarts $\Delta\rho_{A_i}^j$ (resp. $\Delta\rho_{B_i}^j$) entre les pseudodistances $\tilde{\rho}_{A_i}^j$ (resp. $\tilde{\rho}_{B_i}^j$) mesurées par le récepteur GNSS à l'étape précédente et les pseudodistances de référence correspondantes, $\rho_{A_i}^j$ (resp. $\rho_{B_i}^j$), obtenues par calcul.
- [0139] A l'étape 650, le récepteur GNSS le terminal résout un système d'équations de navigation ((8-1) à (8-4)) donnant, d'une part, les positions du point R du terminal mobile le long des premier et second câbles rayonnants et, d'autre part, les distances du point R à ces câbles, en fonction des écarts $\Delta\rho_{A_1}^j, \Delta\rho_{A_2}^j, \Delta\rho_{B_1}^j, \Delta\rho_{B_2}^j$ entre les pseudodistances observées et les pseudodistances de référence et de la distance H séparant les deux câbles. Par exemple, la résolution du système d'équations de navigation pourra se faire selon les relations (10-1) à (10-4).
- [0140] Enfin, à l'étape 660, la position du terminal mobile est estimée à partir de la solution du système d'équations de navigation obtenue à l'étape précédente. Par exemple, elle pourra être déterminée de manière relative par rapport à une première origine prise en une extrémité du premier câble (ou du second câble).
- [0141] Comme mentionné précédemment, le second mode de réalisation s'étend au cas de câbles rayonnants curvilignes, les coordonnées de d_{A_i}, d_{B_i} de la projection de la position du terminal mobile sur les axes des câbles étant remplacées par les coordonnées curvilignes le long de ces câbles.
- [0142] L'homme du métier comprendra que l'invention s'étend également au cas d'au moins trois câbles rayonnants non coplanaires, permettant d'estimer la position tridimensionnelle du récepteur en question.

Revendications

[Revendication 1]

Méthode de positionnement d'un terminal mobile dans un environnement intérieur au sein duquel est situé au moins un premier câble rayonnant présentant une première extrémité et une seconde extrémité, caractérisée en ce que :

- on effectue (510) une partition d'au moins une partie d'une constellation satellitaire en un premier et un second sous-ensembles disjoints de satellites, qui seraient respectivement visibles d'un premier point et d'un second point de référence, en configuration de ciel ouvert ;
- on génère pour la première (resp. la seconde) extrémité (520) un premier (resp. un second) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques correspondant à ceux qui seraient reçus, en configuration de ciel ouvert, par le premier (resp. le second) point de référence, provenant de satellites appartenant au premier (resp. au second) sous-ensemble, la première (resp. la seconde) extrémité injectant dans le câble rayonnant le premier (resp. le second) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques ainsi générés ;
- le récepteur GNSS du terminal mobile mesure (530) les pseudodistances correspondant aux signaux GNSS synthétiques reçus du câble rayonnant ;
- on détermine (540) pour chaque signal GNSS synthétique du premier (resp. second) sous-ensemble, l'écart entre la pseudodistance mesurée par le récepteur GNSS et une pseudodistance de référence calculée pour le premier (resp. second) point de référence ;
- on estime la position du terminal mobile (550-560) le long du câble à partir des écarts des pseudodistances ainsi obtenus et d'une courbe géoréférencée, décrivant le câble rayonnant.

[Revendication 2]

Méthode de positionnement d'un terminal mobile selon la revendication 1, caractérisée en ce que la position du terminal mobile le long du câble rayonnant est obtenue en résolvant (550) un système d'équations de navigation donnant les écarts des pseudodistances en fonction de ladite position.

[Revendication 3]

Méthode de positionnement d'un terminal mobile selon la revendication 2, caractérisée en ce que le système d'équations est donné par :

$$\eta_A d_A + y + b = \Delta\rho_{A_1}^j, j = 1, \dots, N_1$$

$$\eta_A (L_A - d_A) + y + b = \Delta\rho_{A_2}^j, j = 1, \dots, N_2$$

où η_A est le rapport entre la vitesse de la lumière et la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans le câble rayonnant, d_A est la position du terminal mobile le long du câble rayonnant en prenant la première extrémité comme origine, L_A est la longueur du câble rayonnant, y est la distance au câble rayonnant, b est le décalage d'horloge du récepteur GNSS par rapport à l'horloge ayant servi à générer les signaux GNSS synthétiques, $\Delta\rho_{A_1}^j$, $j = 1, \dots, N_1$ sont les écarts entre les pseudodistances mesurées par le récepteur GNSS et les pseudodistances de référence correspondantes, obtenus pour les N_1 signaux GNSS synthétiques du premier sous-ensemble, $\Delta\rho_{A_2}^j$, $j = 1, \dots, N_2$, sont les écarts entre les pseudodistances mesurées par le récepteur GNSS et les pseudodistances de référence correspondantes, obtenus pour les N_2 signaux GNSS synthétiques du second sous-ensemble.

[Revendication 4] Méthode de positionnement d'un terminal mobile selon la revendication 3, caractérisée en ce que la position du terminal mobile le long du câble rayonnant est donnée par :

$$d_A = \frac{(\Delta\rho_{A_1} - \Delta\rho_{A_2})/\eta_A + L_A}{2}$$

où $\Delta\rho_{A_1} = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} \Delta\rho_{A_1}^j$, $\Delta\rho_{A_2} = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \Delta\rho_{A_2}^j$ sont respectivement la moyenne des écarts de pseudodistances sur les premier et second sous-ensembles.

[Revendication 5] Méthode de de positionnement d'un terminal mobile dans un environnement intérieur au sein duquel sont situés au moins un premier câble rayonnant et un second câble rayonnant, chaque câble rayonnant possédant une première extrémité et une seconde extrémité, caractérisée en ce que :

- on effectue (610) une partition d'au moins une partie d'une constellation satellitaire en un premier, un second, un troisième et un quatrième sous-ensembles disjoints de satellites, qui seraient respectivement visibles d'un premier, d'un second, d'un troisième et d'un quatrième de en configuration de ciel ouvert ;
- on génère (620) pour la première (resp. la seconde) extrémité du premier câble un premier (resp. un second) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques correspondant à ceux qui seraient reçus, en configuration de ciel ouvert, par le premier (resp. le second) point de référence, provenant de satellites appartenant au premier (resp. au

second) sous-ensemble, la première (resp. la seconde) extrémité du premier câble injectant dans le premier câble rayonnant le premier (resp. le second) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques ainsi générés ;

- on génère (620) pour la première (resp. la seconde) extrémité du second câble un troisième (resp. un quatrième) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques correspondant à ceux qui seraient reçus, en configuration de ciel ouvert, par le troisième (resp. le quatrième) point de référence, provenant de satellites appartenant au troisième (resp. au quatrième) sous-ensemble, la première (resp. la seconde) extrémité du second câble injectant dans le second câble rayonnant le troisième (resp. le quatrième) sous-ensemble de signaux GNSS synthétiques ainsi générés ;
- le récepteur GNSS du terminal mobile mesure (630) les pseudo-distances correspondant aux signaux GNSS synthétiques reçus des premier et second câbles rayonnants;
- on détermine (640) pour chaque signal GNSS synthétique du premier (resp. second, troisième, quatrième) sous-ensemble, l'écart entre la pseudodistance mesurée par le récepteur GNSS et une pseudodistance de référence calculée pour le premier (resp. second, troisième, quatrième) point de référence ;
- on estime la position du terminal mobile (650-660) le long du premier et/ou du second câble et la distance au premier et/ou second câble à partir des écarts des pseudodistances ainsi obtenus et de courbes géoréférencées, décrivant respectivement les premier et second câbles rayonnants.

[Revendication 6]

Méthode de positionnement d'un terminal mobile selon la revendication 5, caractérisée en ce que la position du terminal mobile le long du et/ou second câble rayonnant et la distance au premier et/ou second câble est obtenue en résolvant (650) un système d'équations de navigation donnant les écarts des pseudodistances en fonction de la position du terminal mobile, respectivement le long du premier câble et du second câble rayonnant ainsi que de sa distance respectivement au premier câble et au second câble rayonnant.

[Revendication 7]

Méthode de positionnement d'un terminal mobile selon la revendication 6, caractérisée en ce que les premier et second câbles rayonnants sont parallèles et séparés d'une distance H et que le système d'équations est donné par :

$$\eta_A d_A + y + b = \Delta\rho_{A_1}^j, j = 1, \dots, N_1;$$

$$\eta_A (L_A - d_A) + y + b = \Delta\rho_{A_2}^j, j = 1, \dots, N_2;$$

$$\eta_B d_B + (H - y) + b = \Delta\rho_{B_1}^j, j = 1, \dots, M_1;$$

$$\eta_B (L_B - d_B) + (H - y) + b = \Delta\rho_{B_2}^j, j = 1, \dots, M_2;$$

où η_A, η_B est le rapport entre la vitesse de la lumière et la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique respectivement dans le premier et le second câble rayonnant ; d_A, d_B est la position du terminal mobile respectivement le long du premier et du second câble rayonnant en prenant la première extrémité de ces câbles comme origine ; L_A, L_B est la longueur respective du premier et du second câble rayonnant, y est la distance de l'utilisateur au premier câble rayonnant, b est le décalage d'horloge du récepteur GNSS par rapport à l'horloge ayant servi à générer les signaux GNSS synthétiques ; $\Delta\rho_{A_1}^j, j = 1, \dots, N_1$ et $\Delta\rho_{A_2}^j, j = 1, \dots, N_2$ sont les écarts entre les pseudodistances mesurées par le récepteur GNSS et les pseudodistances de référence correspondantes, respectivement obtenus pour les N_1 signaux GNSS synthétiques du premier sous-ensemble et les N_2 signaux GNSS synthétiques du second sous-ensemble ; $\Delta\rho_{B_1}^j, j = 1, \dots, M_1$ et $\Delta\rho_{B_2}^j, j = 1, \dots, M_2$ sont les écarts entre les pseudodistances mesurées par le récepteur GNSS et les pseudodistances de référence correspondantes, respectivement obtenus pour les signaux GNSS synthétiques du troisième sous-ensemble, et les signaux GNSS synthétiques du quatrième sous-ensemble.

[Revendication 8]

Méthode de positionnement d'un terminal mobile selon la revendication 7, caractérisée en ce que la position du terminal mobile le long du premier, resp. du second câble rayonnant est donnée par :

$$d_A = \frac{(\Delta\rho_{A_1} - \Delta\rho_{A_2})/\eta_A + L_A}{2}$$

$$d_B = \frac{(\Delta\rho_{B_1} - \Delta\rho_{B_2})/\eta_B + L_B}{2}$$

où $\Delta\rho_{A_1} = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} \Delta\rho_{A_1}^j, \Delta\rho_{A_2} = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \Delta\rho_{A_2}^j$ sont respectivement la moyenne des écarts de pseudodistances sur les premier et second sous-

ensembles, et $\Delta\rho_{B_1} = \frac{1}{M_1} \sum_{j=1}^{M_1} \Delta\rho_{B_1}^j$, $\Delta\rho_{B_2} = \frac{1}{M_2} \sum_{j=1}^{M_2} \Delta\rho_{B_2}^j$ sont respectivement la moyenne des écarts de pseudodistances sur les troisième et quatrième sous-ensembles.

[Revendication 9] Méthode de positionnement d'un terminal mobile selon la revendication 8, caractérisée en ce que la distance du terminal mobile au premier câble rayonnant est donnée par :

$$y = \frac{(\Delta\rho_{A_1} - \Delta\rho_{B_1}) + (\Delta\rho_{A_2} - \Delta\rho_{B_2}) - (\eta_A L_A - \eta_B L_B) + 2H}{4}$$

[Revendication 10] Méthode de de positionnement d'un terminal mobile selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que les signaux GNSS synthétiques sont générés au moyen d'un simulateur recevant au moins un signal satellitaire réel d'un satellite de ladite constellation, via une antenne située dans un environnement extérieur, les signaux GNSS synthétiques étant synchronisés par rapport au signal satellitaire réel.

[Fig. 1]

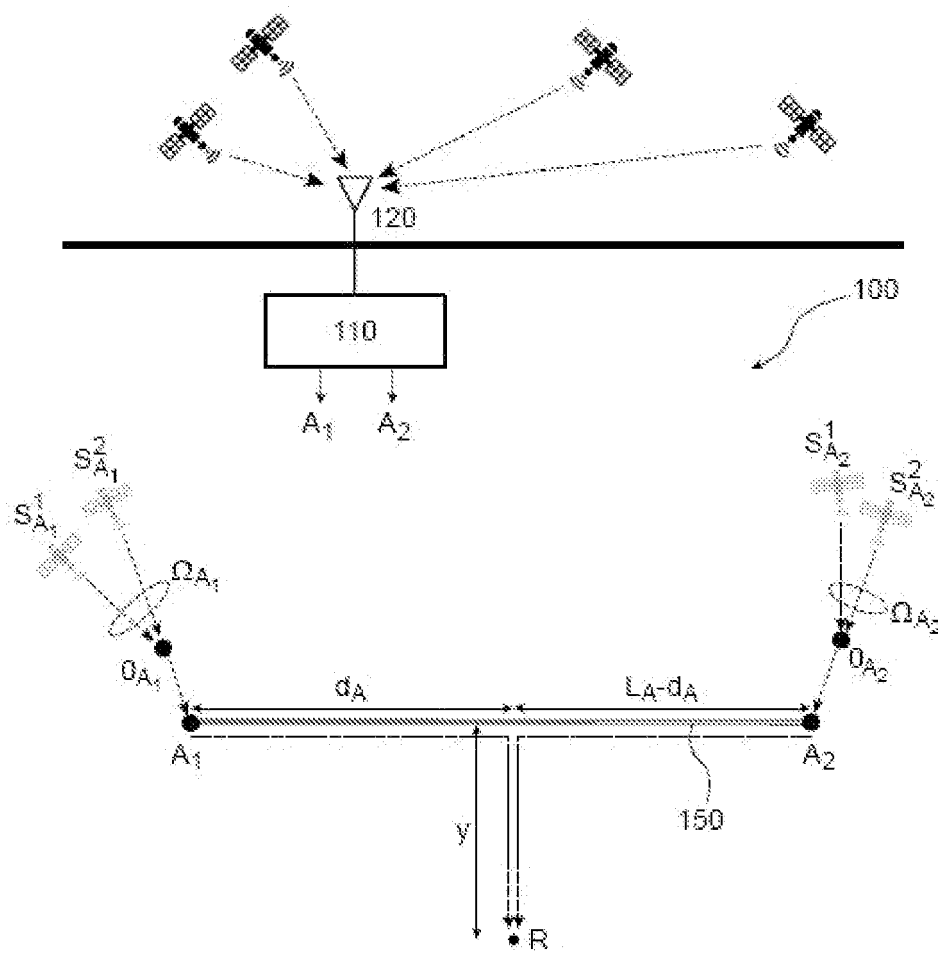


FIG. 1

[Fig. 2A]

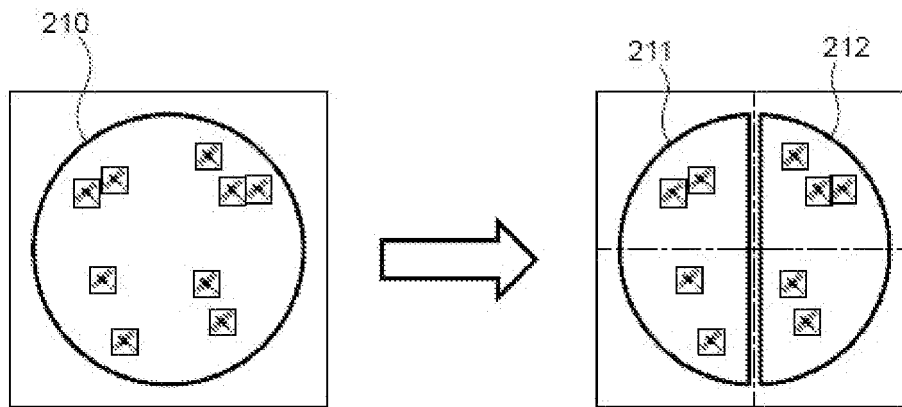


FIG. 2A

[Fig. 2B]

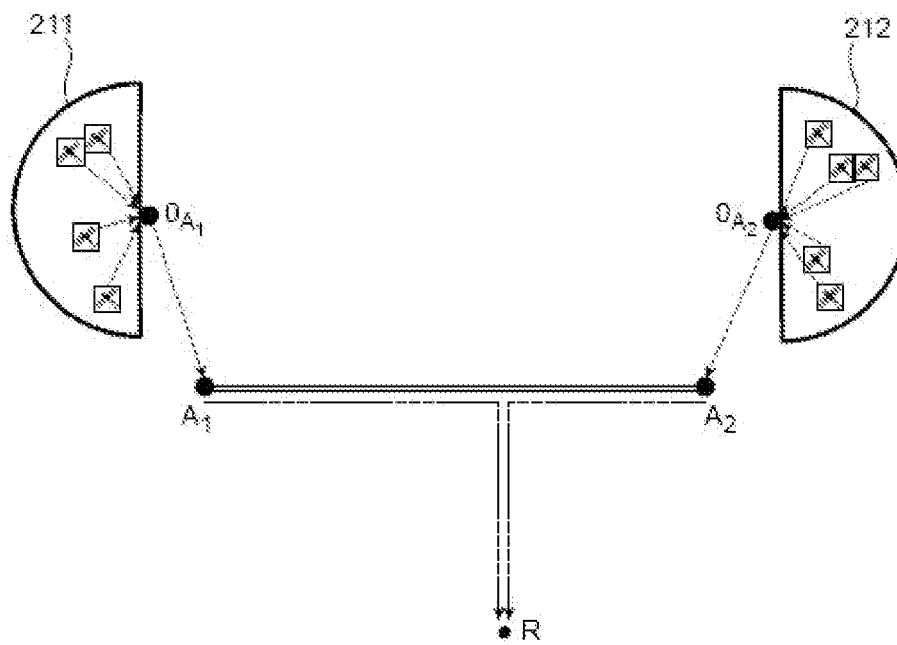


FIG. 2B

[Fig. 4A]

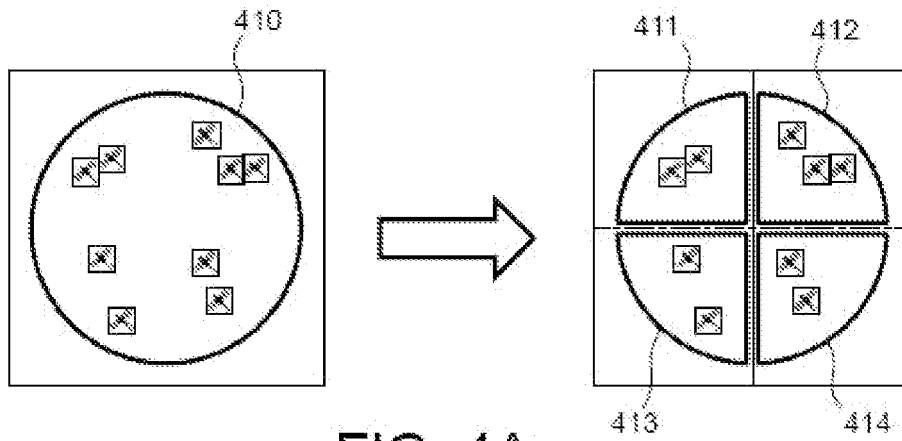


FIG. 4A

[Fig. 4B]

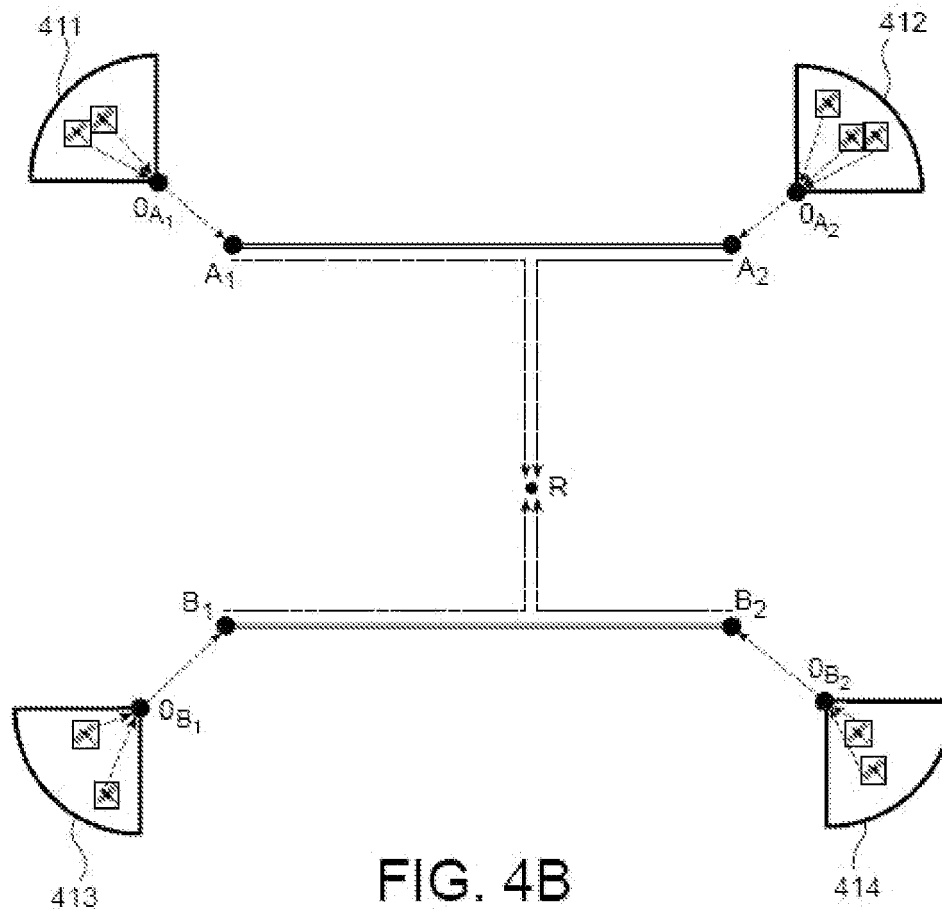


FIG. 4B

[Fig. 5]

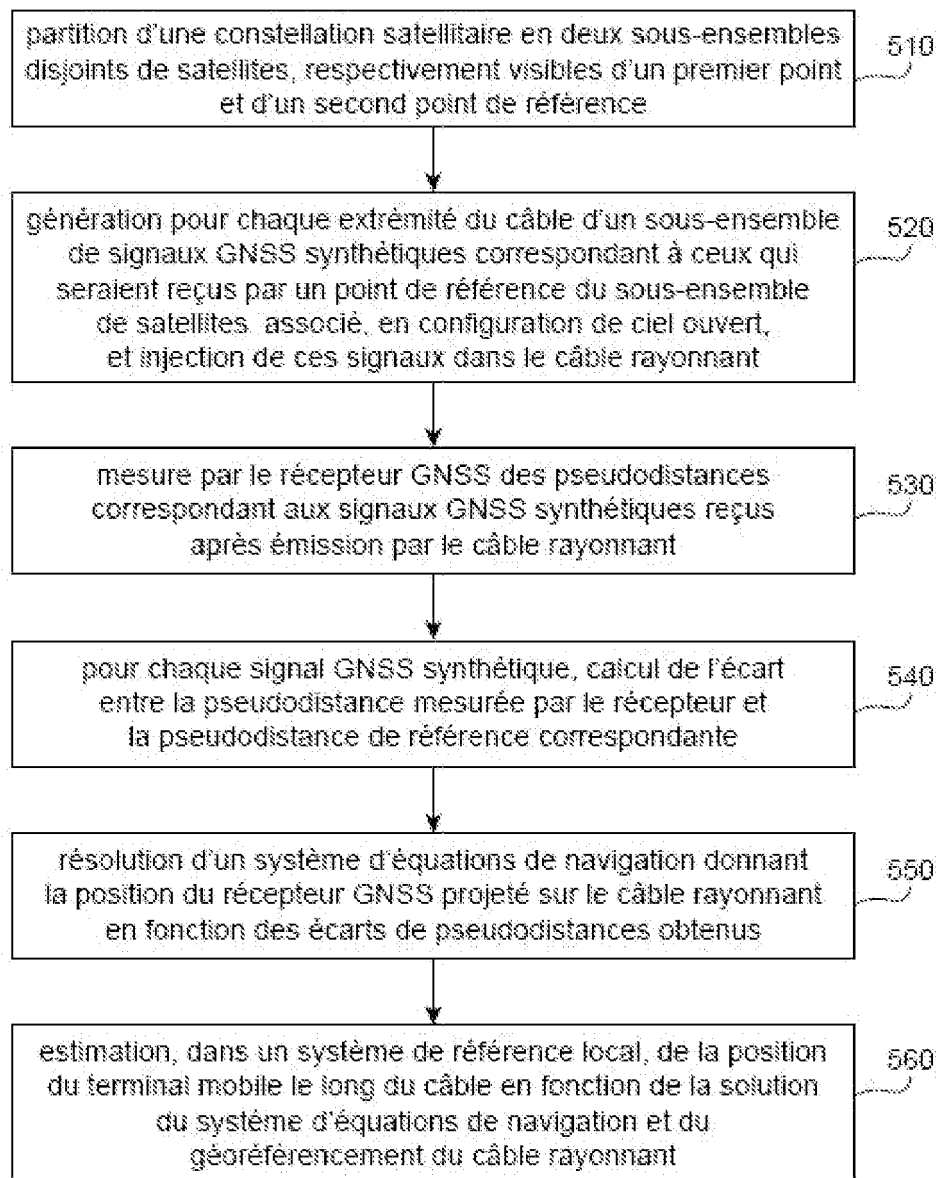


FIG. 5

[Fig. 6]

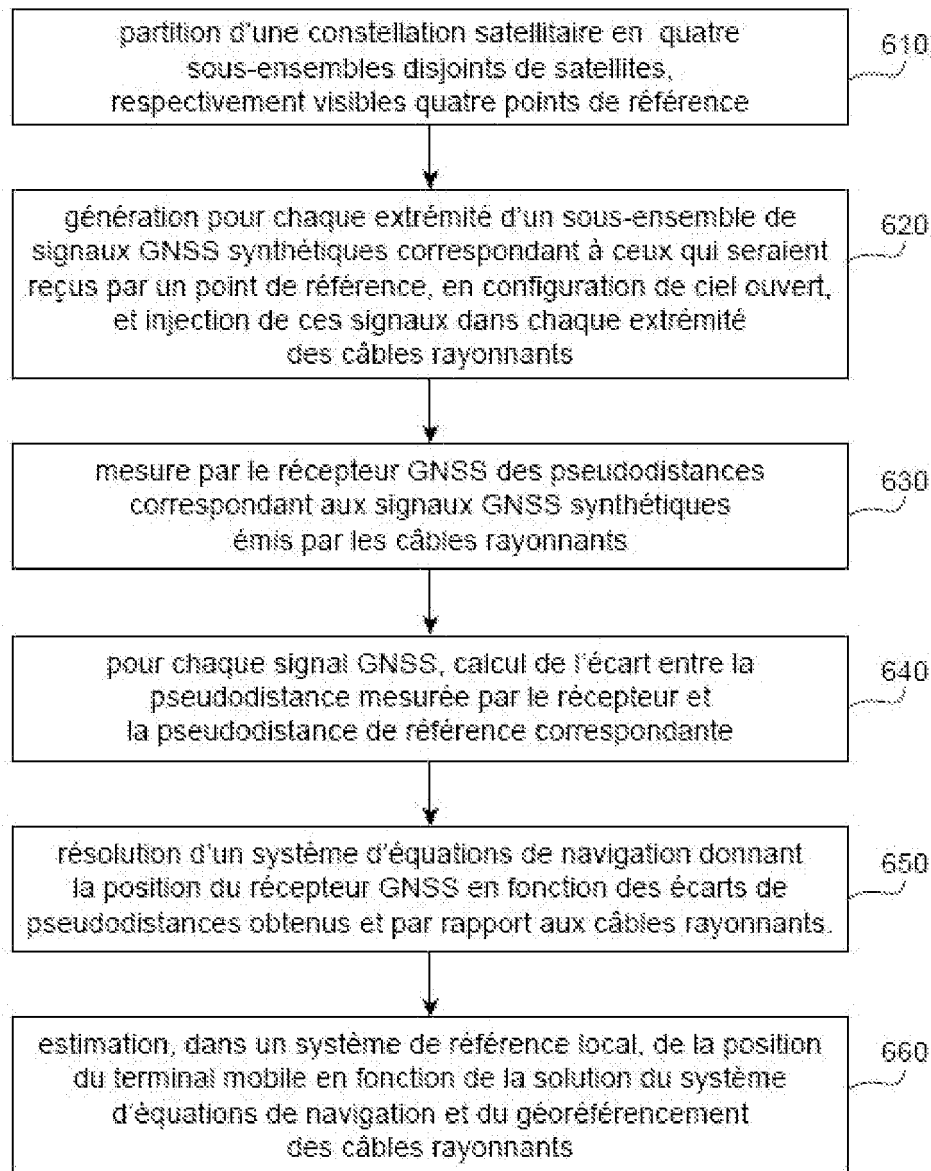


FIG. 6

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2209208 FA 912756**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **24-04-2023**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication		Membre(s) de la famille de brevet(s)		Date de publication
FR 3074921	A1	14-06-2019	AU	2018379631 A1		11-06-2020
			CA	3084845 A1		13-06-2019
			CN	111448480 A		24-07-2020
			EP	3698173 A1		26-08-2020
			FR	3074921 A1		14-06-2019
			JP	7190501 B2		15-12-2022
			JP	2021505922 A		18-02-2021
			KR	20200097298 A		18-08-2020
			US	2019179035 A1		13-06-2019
			WO	2019110938 A1		13-06-2019
