

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2018/167231 A1

(43) Date de la publication internationale
20 septembre 2018 (20.09.2018)

(51) Classification internationale des brevets :
G01S 5/02 (2010.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2018/056584

(22) Date de dépôt international :
15 mars 2018 (15.03.2018)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1752090 15 mars 2017 (15.03.2017) FR

(71) Déposant : SIGFOX [FR/FR] ; 425, Rue Jean Rostand,
31670 LABEGE (FR).

(72) Inventeur : ISSON, Olivier ; 34 bis rue du Bousquet,
31650 Saint-Orens de Gameville (FR).

(74) Mandataire : RIBEIRO DIAS, Alexandre ; IPSIDE, 6,
Impasse Michel Labrousse, 31100 TOULOUSE (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR,
KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR GEOLOCATING A TERMINAL OF A WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM

(54) Titre : PROCÉDÉ ET SYSTÈME DE GÉOLOCALISATION D'UN TERMINAL D'UN SYSTÈME DE COMMUNICATION SANS FIL

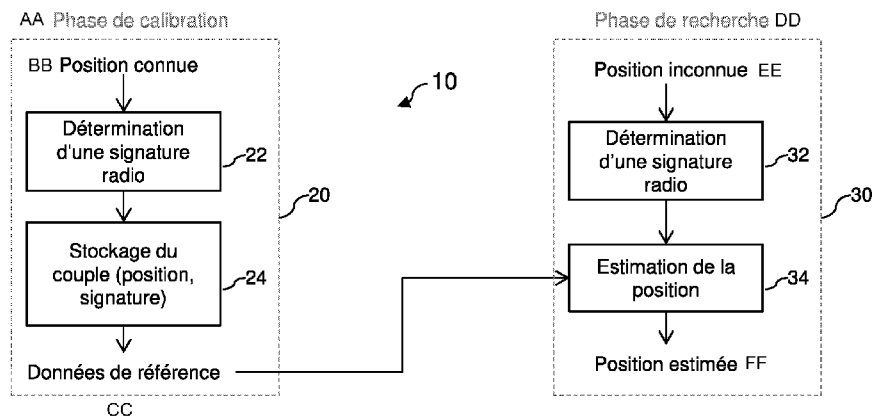


Fig. 2

AA Calibration phase
BB Known position
CC Reference data
DD Search phase
EE Unknown position
FF Estimated position
22 Determining a radio signature
24 Storing the pair (position, signature)
32 Determining a radio signature
34 Estimating the position

(57) Abstract: The invention concerns a method (10) for geolocating a terminal of a wireless communication system, based on a learning method making it possible to estimate the geographical position of a terminal using both a radio signature corresponding to a set of values representative of the quality of radio links existing between the terminal located at the sought position and a plurality of base stations of said wireless communication system, as well as a reference data set associating radio signatures with known geographical positions. To limit the complexity of the learning algorithm and to make it resistant to topology changes of the access network, the geolocation method is characterized in that each radio signature contains a selection of N values among the set of measured values, as well as the geographical positions of the corresponding base stations.



WO 2018/167231 A1

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé (10) de géolocalisation d'un terminal d'un système de communication sans fil basé sur une méthode d'apprentissage permettant d'estimer la position géographique d'un terminal à partir d'une part d'une signature radio correspondant à un ensemble de valeurs représentatives de la qualité de liens radio existant entre le terminal situé à la position recherchée et plusieurs stations de base dudit système de communication sans fil, et d'autre part d'un ensemble de données de référence associant des signatures radio à des positions géographiques connues. Pour limiter la complexité de l'algorithme d'apprentissage et le rendre résistant aux changements de topologie du réseau d'accès, le procédé de géolocalisation est caractérisé en ce que chaque signature radio contient une sélection de N valeurs parmi l'ensemble des valeurs mesurées ainsi que les positions géographiques des stations de base correspondantes.

Procédé et système de géolocalisation d'un terminal d'un système de communication sans fil

DOMAINE TECHNIQUE

5 La présente invention appartient au domaine de la géolocalisation. Notamment, l'invention concerne un procédé de géolocalisation d'un terminal d'un système de communication sans fil. L'invention s'applique particulièrement à la géolocalisation d'un objet connecté à un réseau pour l'Internet des objets.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE

10 Au cours des dernières années, l'utilisation croissante des systèmes de communication sans fil a naturellement conduit à développer des services basés sur la position géographique d'un utilisateur. L'information sur la position d'un objet peut être utilisée pour la sécurité des usagers (par exemple pour
15 l'assistance aux personnes en danger), l'aide à la navigation, la gestion du trafic, le suivi d'acheminement de marchandises, la télérelève d'informations en général, etc.

Les systèmes de positionnement par satellites comme le GPS (*Global Positioning System*) comptent parmi les techniques de géolocalisation les plus
20 connues. Ces systèmes reposent sur l'exploitation par un terminal récepteur de signaux radio émis par des satellites dédiés. La géolocalisation par GPS est particulièrement précise, mais ce système souffre de plusieurs inconvénients majeurs. Notamment, l'intégration d'un récepteur GPS à un objet nécessite du matériel électronique et du logiciel spécifiques, ce qui peut induire une hausse
25 substantielle du coût de l'objet en question. D'autre part, la consommation énergétique d'un tel récepteur est bien souvent rédhibitoire dans le cas d'objets connectés de type IoT (*Internet of Things*) pour lesquels la consommation énergétique doit être réduite au maximum. Enfin, la pénétration des signaux GPS à l'intérieur des bâtiments ou à travers des obstacles est mauvaise, et
30 cela rend l'utilisation du GPS impropre à la géolocalisation d'objets dans des zones fermées ou denses.

D'autres techniques existent pour géolocaliser un terminal à partir de signaux échangés avec les stations de base d'un réseau d'accès auquel il est

connecté. Dans les réseaux cellulaires, comme par exemple le GSM (*Global System for Mobile Communications*), il est connu d'estimer la position d'un terminal comme étant celle de la station de base à laquelle il est actuellement associé, étant entendu qu'un terminal est en général associé à la station de base dont il est le plus proche. Cette méthode présente cependant une
5 précision de géolocalisation médiocre puisque la zone de couverture d'une station de base peut atteindre plusieurs kilomètres, voire plusieurs dizaines de kilomètres de rayon.

D'autres méthodes consistent à estimer les distances qui séparent un
10 terminal de plusieurs stations de base en calculant les temps d'arrivée ou les différences de temps d'arrivée (TOA, *Time Of Arrival* ou TDOA, *Time Difference Of Arrival*) de signaux échangés entre ces entités afin de déterminer la position du terminal par trilatération. Des méthodes analogues se basent sur les angles d'arrivée des signaux (on parle alors de triangulation), ou bien sur
15 des calculs de différence de fréquence d'arrivée des signaux (FDOA, *Frequency Difference Of Arrival*). Cette dernière étant basée sur l'effet Doppler, elle nécessite cependant que le terminal dont on cherche la position soit en mouvement par rapport aux points d'observation. Ces différentes méthodes présentent toutes l'inconvénient de nécessiter du matériel et du logiciel
20 spécifiques. D'autre part elles requièrent souvent une synchronisation coûteuse des différentes stations de base jouant le rôle de points d'observation. En outre, elles sont particulièrement sensibles au phénomène dit de multi-trajet (*multipath* dans la littérature anglo-saxonne) qui correspond à la propagation d'un même signal radio par plusieurs chemins à cause des phénomènes de
25 réflexion, réfraction et diffraction sur les obstacles rencontrés.

D'autres méthodes de géolocalisation se basent sur le niveau de puissance reçue (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) d'un signal échangé entre un terminal et une station de base. Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux systèmes de communication sans fil de type
30 réseaux cellulaires (comme par exemple le GSM) pour lesquels l'information de RSSI est directement disponible car elle est exploitée par le système de communication lui-même. Ces méthodes reposent sur le fait qu'un signal radio est atténué dans l'atmosphère et que le niveau de RSSI d'un signal reçu par un

récepteur varie donc en fonction de la distance qui sépare le récepteur de l'émetteur du signal. Ainsi, il est possible de déterminer la position géographique d'un terminal par trilatération en estimant la distance séparant le terminal des différentes stations de base qui l'entourent à partir des niveaux de RSSI mesurés par les stations de base. L'inconvénient d'une telle méthode de géolocalisation par trilatération basée sur les niveaux de RSSI est son manque de précision dû au fait que les nombreux paramètres qui influent sur l'atténuation du signal (obstacles, interférences radio, mouvement du terminal, etc.) rendent très complexe la fonction qui définit la distance à partir d'un niveau de RSSI.

C'est pour cette raison que de nouveaux procédés de géolocalisation basés sur les niveaux de RSSI ont été développés pour tourner le problème de l'atténuation du signal en un avantage. Ces nouveaux procédés ne mettent pas en œuvre des méthodes de trilatération, et ils ne nécessitent donc pas a priori de connaître la position géographique des stations de base. En revanche, ils se basent sur l'hypothèse que le niveau de RSSI en un point donné est stable dans le temps, et reposent sur des techniques d'apprentissage automatique (*Machine Learning* dans la littérature anglo-saxonne) qui associent une empreinte (*fingerprint*) à une position de la zone géographique considérée. Concrètement, il s'agit de construire dans une première phase de calibration (aussi appelée phase d'apprentissage « hors ligne » ou *offline phase* en anglais), une base de données qui associe à des positions géographiques connues une « signature radio » correspondant à l'ensemble des niveaux de RSSI mesurés pour un terminal à la position considérée pour un ensemble de stations de base du système. Ensuite, pendant une phase de recherche (aussi appelée phase d'apprentissage « en ligne » ou *online stage* en anglais), une signature radio observée pour un terminal situé à une position inconnue est comparée à l'ensemble des signatures de la base de données afin d'estimer la position du terminal à partir de la (ou des) position(s) correspondant à la (aux) signature(s) la (les) plus proche(s).

Plusieurs méthodes d'apprentissage automatique ont été employées dans ce but. Le document *Reliable indoor location prediction using conformal prediction – Khuong An Nguyen, Zhiyuan Luo – Springer Science+Business*

Media Dordrecht 2013 décrit par exemple l'utilisation d'une méthode d'apprentissage automatique supervisée sous deux perspectives différentes. Il présente d'une part le problème sous une approche de « classification » dans laquelle la méthode d'apprentissage va chercher à faire correspondre une signature radio observée à une ou plusieurs signatures radio de la base de données qui sont les plus ressemblantes à la signature observée. D'autre part, il présente le problème sous une approche de « régression » dans laquelle la méthode d'apprentissage va chercher à déterminer, à partir des informations contenues dans la base de données, une fonction qui définit au mieux une position géographique en fonction d'une signature radio. Le document *CellSense : An Accurate Energy-Efficient GSM Position System – Mohamed Ibrahim, Moustafa Youssef – IEEE 2011*, décrit quant à lui une méthode d'apprentissage de classification légèrement différente dans la mesure où elle utilise une approche probabiliste : la zone géographique considérée est divisée en cellules, et pour chaque cellule sont définies les probabilités d'avoir un certain niveau de RSSI pour une station de base donnée. Il s'agit alors de déterminer la cellule pour laquelle la probabilité d'avoir la signature radio observée est maximale.

Toutes ces méthodes d'apprentissage automatique basées sur les niveaux de RSSI présentent les mêmes inconvénients. Tout d'abord, la phase de calibration est particulièrement lourde et coûteuse, surtout si la zone géographique à couvrir est très vaste. Pour réaliser cette phase de calibration, il est connu d'embarquer dans une flotte de véhicules qui parcourent la zone à couvrir des appareils adaptés pour fournir avec précision la position géographique et les niveaux de RSSI pour les stations de base du système de communication en différents points (le terme anglais pour qualifier cette phase est *war-driving*). Plus le nombre de points est important, meilleures seront les performances du procédé de géolocalisation en termes de précision, mais plus la phase de calibration sera longue et coûteuse. Aussi, plus la zone géographique à couvrir est vaste, et plus le nombre de stations de base à prendre en compte dans la base de données est grand, et plus la complexité de l'algorithme d'apprentissage automatique utilisé sera importante. Cela explique pourquoi les méthodes connues de géolocalisation basées sur les

niveaux de RSSI s'appliquent en général à des zones fermées (par exemple à l'intérieur de bâtiments) ou bien sur des zones géographiques restreintes (par exemple des zones urbaines limitées à quelques km²). Enfin, un autre inconvénient majeur réside dans le fait que la signature radio utilisée par les méthodes connues de géolocalisation basées sur les niveaux de RSSI est entièrement dépendante de la topologie du réseau au moment où est réalisée la phase de calibration. En effet, dans de telles méthodes, si q représente le nombre de stations de base du système de communication au moment où est réalisée la phase de calibration, alors la signature radio est un vecteur $s = (s_1, s_2, \dots, s_q)$ où s_i représente le niveau de RSSI pour la station de base i . L'ensemble des stations de base $i \in [1..q]$ qui permet de déterminer une signature radio est donc un ensemble figé défini a priori. Par conséquent, si une station de base n'est temporairement plus opérationnelle (par exemple si elle est en maintenance), la méthode de géolocalisation ne sera potentiellement plus applicable. Aussi, si la topologie du réseau change durablement (déploiement de nouvelles stations de base, suppression ou remplacement de stations existantes) il est nécessaire de reconduire une phase de calibration pour avoir une phase de recherche efficace.

20 EXPOSÉ DE L'INVENTION

La présente invention a pour objectif de remédier à tout ou partie des inconvénients de l'art antérieur, notamment ceux exposés ci-avant.

À cet effet, et selon un premier aspect, l'invention concerne un procédé de géolocalisation d'un terminal, dit « terminal d'intérêt », d'un système de communication sans fil comportant les étapes suivantes :

- détermination de signatures radio associées respectivement à différentes positions géographiques connues, chaque signature radio correspondant à un ensemble de valeurs représentatives de la qualité de liens radio existant entre un dispositif de calibration, situé à une desdites positions géographiques connues, et une pluralité de stations de base dudit système de communication sans fil, les signatures radio et leurs positions géographiques connues

respectives associées formant un ensemble de données de référence,

- détermination d'une signature radio pour ledit terminal d'intérêt situé à une position géographique à estimer,
- 5 - estimation de la position géographique dudit terminal d'intérêt à partir de la signature radio dudit terminal d'intérêt et de l'ensemble de données de référence.

Chaque détermination d'une signature radio comporte les étapes suivantes :

- 10 - mesure, pour chacune de la pluralité de stations de base, d'une valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre le dispositif de calibration ou le terminal d'intérêt et la station de base considérée,
- sélection de N valeurs parmi l'ensemble des valeurs mesurées,
- formation de la signature radio en y incluant les N valeurs
15 sélectionnées et les positions géographiques respectives des N stations de base utilisées pour mesurer lesdites N valeurs sélectionnées.

Ainsi, la complexité de l'algorithme d'apprentissage utilisé pour estimer la position géographique recherchée est réduite car la taille de la signature
20 radio est limitée. En effet, le nombre N de stations de base pour lesquelles les mesures ont été sélectionnées peut être significativement inférieur au nombre total de stations de base du système. Par exemple, il est envisageable de n'utiliser que 10 valeurs mesurées pour un système comptant plusieurs centaines voire plusieurs milliers de stations de base. Le procédé de
25 géolocalisation est ainsi adapté à de vastes zones géographiques.

Le fait d'inclure dans la signature radio les positions géographiques des stations de base dont les mesures ont été sélectionnées permet de pallier le fait que la signature radio ainsi réduite n'est plus déterministe puisque la collection de stations de base utilisées pour la définir n'est plus figée : elle varie
30 en fonction de la position géographique à laquelle la signature radio est observée. En outre, cela rend la méthode d'apprentissage résistante aux changements de topologie du réseau d'accès. En effet, si une station de base est ajoutée, supprimée ou remplacée, une signature radio ainsi déterminée

restera pertinente, contrairement aux méthodes connues d'apprentissage pour lesquelles une signature radio est construite à partir d'un ensemble de stations de base figé, ordonné et défini a priori.

5 Dans des modes particuliers de mise en œuvre, l'invention peut comporter en outre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles.

10 Dans des modes particuliers de mise en œuvre, les N valeurs sélectionnées correspondent aux N valeurs qui représentent les meilleures qualités de lien radio mesurées pour les stations de base, éventuellement ordonnées par ordre décroissant.

15 Dans des modes préférés de mise en œuvre, le lien radio est un lien montant vers les stations de base du système de communication sans fil, et des terminaux du système de communication sans fil équipés d'un système de positionnement jouent le rôle de dispositifs de calibration. Ces terminaux sont alors appelés « terminaux de calibration ». La détermination de la signature radio d'un terminal de calibration situé en une position géographique comporte les étapes suivantes :

- 20 - émission par le terminal de calibration d'un message comportant la position géographique courante, mesurée par le système de positionnement, à destination de la pluralité de stations de base,
- mesure, par chacune de la pluralité de stations de base, d'une valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre ledit terminal de calibration et la station de base considérée à partir du message reçu dudit terminal de calibration,
- 25 - sélection, par un serveur relié aux stations de base, de N valeurs parmi l'ensemble des valeurs mesurées,
- formation, par le serveur, de la signature radio du terminal de calibration situé à ladite position géographique courante en y incluant les N valeurs sélectionnées et les positions géographiques des stations de base utilisées pour mesurer les N valeurs sélectionnées,
- 30 - extraction, par le serveur, de la position géographique contenue dans ledit message.

Ainsi, en supposant que certains terminaux du système de communication ont la capacité de connaître leur position géographique et de la remonter au réseau d'accès dans certains messages, alors la phase de calibration peut se faire de manière complètement automatique, c'est-à-dire sans avoir recours à une méthode coûteuse de « *war-driving* » consistant à embarquer dans une flotte de véhicules des appareils adaptés pour mesurer à la fois une position géographique et la signature radio associée afin d'acquérir des données de référence. De plus, les terminaux de calibration n'interviennent pas nécessairement de manière spécifique dans le procédé de géolocalisation.

5

10 En effet, les messages envoyés par les terminaux de calibration peuvent être émis de manière indépendante au procédé de géolocalisation, c'est-à-dire avec un objectif autre que celui de participer au procédé de géolocalisation. Ainsi, la consommation énergétique et le coût de fabrication des terminaux ne sont pas affectés par le procédé de géolocalisation.

15 Dans des modes particuliers de mise en œuvre, les terminaux de calibration sont mis en œuvre pendant une durée prédéfinie pour former l'ensemble de données de référence, ou bien l'ensemble de données de référence est continuellement enrichi par de nouvelles données provenant des terminaux de calibration.

20 Dans des modes préférés de mise en œuvre la détermination de la signature radio du terminal d'intérêt situé en une position géographique à estimer comporte les étapes suivantes :

- émission par le terminal d'intérêt d'un message à destination de la pluralité de stations de base,
- 25 - mesure, par chacune de la pluralité de stations de base, d'une valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre ledit terminal d'intérêt et la station de base considérée à partir du message reçu dudit terminal d'intérêt,
- sélection, par un serveur relié aux stations de base, de N valeurs
- 30 parmi l'ensemble des valeurs mesurées,
- formation, par le serveur, de la signature radio du terminal d'intérêt en y incluant les N valeurs sélectionnées et les positions géographiques des stations de base utilisées pour mesurer les N

valeurs sélectionnées.

Dans des modes particuliers de mise en œuvre, la position géographique estimée du terminal d'intérêt et la signature radio associée sont ajoutées à l'ensemble de données de référence.

5 Dans des modes préférés de mise en œuvre, l'invention peut comporter en outre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles :

- la valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre un terminal ou un dispositif de calibration et une station de base est un
10 niveau de puissance reçue d'un signal radio échangé entre ladite station de base et ledit terminal ou ledit dispositif de calibration,
- le lien radio est un canal de communication à bande ultra étroite,
- le nombre N de valeurs sélectionnées lors de la détermination d'une signature radio est un entier positif compris entre 5 et 20,
- 15 - l'estimation de la position géographique du terminal d'intérêt utilise un algorithme d'apprentissage supervisé de régression.

Selon un second aspect, l'invention concerne un système de communication sans fil comportant des terminaux et un réseau d'accès comportant une pluralité de stations de base reliées à un serveur. Le système
20 comporte également une base de données mémorisant un ensemble de données de référence, chaque donnée de référence correspondant à une signature radio associée à une position géographique connue, chaque signature radio comprenant N valeurs représentatives de la qualité de liens radio existant entre un dispositif de calibration situé à une desdites positions
25 géographiques connues et N stations de base et les positions géographiques desdites N stations de base. Aussi, le réseau d'accès est configuré pour :

- mesurer une valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre chaque station de base et un terminal dont on cherche à estimer la position, dit « terminal d'intérêt »,
- 30 - sélectionner N valeurs parmi l'ensemble des valeurs mesurées pour ledit terminal d'intérêt,
- former une signature radio correspondant à l'ensemble des N valeurs sélectionnées et des positions géographiques des stations

de base utilisées pour mesurer les N valeurs sélectionnées,

- estimer la position géographique dudit terminal d'intérêt en fonction de la signature radio dudit terminal d'intérêt et de l'ensemble de données de référence mémorisé dans la base de données.

5

PRÉSENTATION DES FIGURES

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description suivante, donnée à titre d'exemple nullement limitatif, et faite en se référant aux figures 1 à 6 qui représentent :

- 10 - Figure 1 : une représentation schématique d'un système de communication sans fil comportant un dispositif de calibration,
- Figure 2 : un diagramme illustrant les étapes principales d'un procédé de géolocalisation d'un terminal d'un système de communication sans fil,
- 15 - Figure 3 : une représentation schématique d'un mode préféré de réalisation où le dispositif de calibration est un terminal équipé d'un système de positionnement,
- Figure 4 : un diagramme illustrant les étapes principales de la phase de calibration d'un mode préféré de mise en œuvre du
- 20 - Figure 5 : un diagramme illustrant les étapes principales de la phase de recherche d'un mode préféré de mise en œuvre du procédé de géolocalisation,
- Figure 6 : un graphique représentant deux courbes de la
- 25 - distribution d'erreur de géolocalisation pour deux valeurs différentes de N.

Dans ces figures, des références identiques d'une figure à une autre désignent des éléments identiques ou analogues. Pour des raisons de clarté, les éléments représentés ne sont pas à l'échelle, sauf mention contraire.

30

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE MODES DE RÉALISATION

Tel qu'indiqué précédemment, la présente invention vise à géolocaliser un terminal, dit « terminal d'intérêt », d'un système de

communication sans fil à l'aide d'une méthode d'apprentissage basée sur des informations représentatives de la qualité de liens radio existant entre ledit terminal et des stations de base dudit système de communication sans fil.

La figure 1 représente schématiquement un système 60 de communication sans fil, comportant plusieurs terminaux 70 et un réseau d'accès 80 comportant plusieurs stations de base 81 reliées à un serveur 82. Dans un tel système, les communications peuvent généralement être bidirectionnelles, c'est-à-dire que des données peuvent être transmises du réseau d'accès vers un terminal sur un lien radio descendant, ou bien d'un terminal vers le réseau d'accès sur un lien radio montant. Aussi, une mesure de la qualité du lien radio existant entre un terminal et une station de base du réseau d'accès peut par exemple être effectuée par l'une ou l'autre de ces entités.

Aussi, il est possible d'introduire dans le système 60 de communication sans fil un ou plusieurs dispositifs 71 de calibration adaptés pour déterminer avec précision la position géographique courante, par exemple avec un système de positionnement tel qu'un récepteur GPS. Ce dispositif de calibration possède en outre des moyens configurés pour permettre la mesure d'une valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre lui et les stations de base du réseau d'accès. Comme indiqué précédemment, cette mesure peut par exemple être faite par le dispositif de calibration lui-même, sur le lien descendant, ou bien par une station de base du réseau d'accès, sur le lien montant. Si la mesure est effectuée par le dispositif de calibration sur le lien descendant, cette mesure peut par exemple être faite sur des signaux radio destinés à d'autres terminaux du système que le dispositif de calibration.

Les valeurs représentatives de la qualité de lien radio existant entre un terminal ou un dispositif de calibration et une station de base peuvent être transmises au serveur 82 afin qu'il mette en œuvre certaines étapes d'un procédé de géolocalisation.

La figure 2 représente les deux principales phases d'un tel procédé de géolocalisation d'un terminal 70 d'intérêt d'un système 60 de communication sans fil.

Une première phase de calibration (aussi appelée phase

d'apprentissage « hors ligne » ou *offline stage* en anglais), comporte :

- 5 - une étape de détermination 22 de signatures radio associées respectivement à des positions géographiques connues, chaque signature radio correspondant à un ensemble de valeurs représentatives de la qualité de liens radio existant entre un dispositif 71 de calibration dont la position géographique est connue et une pluralité de stations de base 81 du réseau d'accès 80 du système 60 de communication sans fil, et
- 10 - une étape de stockage 24 dans un ensemble de données de référence de chaque signature radio déterminée et de la position géographique associée du dispositif 71 de calibration.

Par « position géographique », on entend par exemple un système d'au moins deux coordonnées qui sont le plus souvent la latitude et la longitude, auxquelles peut optionnellement s'ajouter une troisième
15 coordonnée : l'altitude par rapport au niveau moyen de la mer (élévation orthométrique).

En résumé, il s'agit pendant cette phase 20 de calibration de faire une sorte de cartographie radio de la zone géographique considérée.

20 Ensuite, une phase 30 de recherche (aussi appelée phase d'apprentissage « en ligne » ou *online stage* en anglais), comporte :

- une étape de détermination 32 d'une signature radio pour ledit terminal 70 d'intérêt situé à une position géographique à estimer,
- une étape d'estimation 34 de la position géographique dudit terminal d'intérêt à partir de la signature radio déterminée et de
25 l'ensemble des données de référence acquises pendant la phase 20 de calibration.

Dans la suite de la description, on se place à titre d'exemple et de manière non limitative dans le cas d'un système 60 de communication sans fil à bande ultra étroite. Par « bande ultra étroite » (*Ultra Narrow Band* ou UNB
30 dans la littérature anglo-saxonne), on entend que le spectre fréquentiel instantané des signaux radioélectriques émis par les terminaux est de largeur fréquentielle inférieure à deux kilohertz, voire inférieure à un kilohertz. Par « signal radioélectrique », on entend une onde électromagnétique se

propageant via des moyens non filaires, dont les fréquences sont comprises dans le spectre traditionnel des ondes radioélectriques (quelques hertz à plusieurs centaines de gigahertz). De tels systèmes de communication sans fil UNB sont particulièrement adaptés pour des applications du type M2M
5 (acronyme anglo-saxon pour *Machine to Machine*) ou du type IoT (*Internet of Things*).

Dans un tel système 60 de communication sans fil, les échanges de données sont essentiellement monodirectionnels, en l'occurrence sur un lien montant des terminaux 70 vers le réseau d'accès 80 dudit système de
10 communication sans fil. Afin de minimiser les risques de perdre un message émis par un terminal, la planification du réseau d'accès est souvent réalisée de telle sorte qu'une zone géographique donnée est couverte simultanément par plusieurs stations de base 81, de telle manière qu'un message émis par un terminal peut être reçu par plusieurs stations de base.

15 Chaque station de base 81 est adaptée à recevoir des messages des terminaux 70 qui se trouvent à sa portée. Chaque message ainsi reçu est par exemple transmis au serveur 82 du réseau d'accès 80, éventuellement accompagné d'autres informations comme un identifiant de la station de base qui l'a reçu, une valeur représentative de la qualité du signal radio transportant
20 le message, la fréquence centrale sur laquelle le message a été reçu, etc. Le serveur 32 traite par exemple l'ensemble des messages reçus des différentes stations de base 81. Le serveur 32 peut notamment être utilisé pour la mise en œuvre du procédé 10 de géolocalisation d'un terminal du système.

La figure 3 représente schématiquement un mode préféré de
25 réalisation d'un tel système 60 dans lequel certains terminaux 72 du système 60 de communication sans fil, dit « terminaux de calibration », possèdent un système de positionnement (par exemple un récepteur GPS) qui permet d'obtenir avec précision la position géographique du terminal (par exemple quand celui-ci est situé à un endroit où il peut capter les signaux des satellites
30 dudit système de positionnement). Ces terminaux 72 de calibration jouent le rôle des dispositifs 71 de calibration mentionnés précédemment en plus de leurs fonctions courantes dans le système 60 de communication sans fil.

La figure 4 représente les principales étapes de la phase 20 de

calibration d'un mode préféré de mise en œuvre du procédé 10 de géolocalisation d'un terminal 70 d'intérêt d'un système 60 de communication sans fil.

Pour cette phase de calibration, plutôt que de parcourir intentionnellement la zone géographique à couvrir avec un appareil spécifique
5 adapté pour déterminer une position géographique et mesurer des valeurs représentatives de qualité de lien radio à cette position, il est préférable (car moins coûteux et plus rapide) d'utiliser la capacité éventuelle de certains terminaux du système à remplir ce rôle, c'est le cas des terminaux 72 de
10 calibration.

Ainsi, une étape de la phase 20 de calibration consiste en l'émission 220 par un terminal 72 de calibration d'un message contenant la position géographique courante à destination du réseau d'accès 80 du système 60 de communication sans fil. Il est à noter que ce message peut être émis de
15 manière indépendante au procédé de géolocalisation. Par exemple, il peut s'agir d'un message de télérelève d'information conventionnel incluant la position géographique courante et n'ayant pas pour objectif premier de participer à la phase 20 de calibration du procédé 10 de géolocalisation.

Les stations de base 81 du réseau d'accès 80 qui ont reçu le signal
20 contenant ledit message font alors une mesure 221 de la qualité du lien radio sur lequel le message a été transmis. Dans un mode préféré de mise en œuvre, et pour la suite de la description à titre d'exemple non limitatif, la valeur représentative de la qualité du lien radio utilisée est le niveau moyen de puissance reçue (RSSI), par exemple exprimé en décibel, par la station de
25 base pour le signal transportant ledit message. Pour les stations de base qui n'ont pas reçu le message, par exemple parce que le terminal est trop éloigné et ne se trouve pas sous leur couverture radio, une valeur par défaut de -160 dB est par exemple utilisée.

Il est à noter que d'autres valeurs représentatives de la qualité du lien
30 radio pourraient être utilisées, comme par exemple l'atténuation du signal, un rapport signal sur bruit du signal (SNR ou *Signal on Noise Ratio* dans la littérature anglo-saxonne) ou bien un indicateur de qualité du canal de communication (CQI ou *Channel Quality Indicator* en anglais).

Les niveaux de RSSI mesurés par les différentes stations de base 81 sont transmis au serveur 82 qui peut alors définir la signature radio observée à la position géographique considérée.

La méthode connue de l'art antérieur pour définir une signature radio
5 est de considérer les valeurs respectives des niveaux de RSSI pour une collection figée et préalablement définie de stations de base du système de communication sans fil dont la couverture radio présente une intersection non nulle avec la zone géographique considérée. Dans le cas où l'on souhaite que le procédé de géolocalisation couvre un pays entier, voire un ensemble de
10 pays, comme cela peut être le cas pour un réseau étendu de type WAN (*Wide Area Network*), il faut s'attendre à devoir considérer plusieurs centaines voire plusieurs milliers de stations de base, et à voir exploser la complexité de l'algorithme d'apprentissage automatique.

Au contraire, la signature radio définie pour le mode de mise en œuvre
15 présentement décrit réduit cette complexité par une étape de sélection 222 de seulement N valeurs parmi les niveaux de RSSI mesurés.

Dans un mode préféré de mise en œuvre, et pour la suite de la description à titre d'exemple non limitatif, les N valeurs sélectionnées correspondent aux N valeurs qui représentent les meilleurs niveaux de RSSI
20 mesurés par les stations de base du système de communication sans fil. Il convient cependant de noter que d'autres méthodes de sélection pourraient être envisagées. Par exemple, la sélection pourrait favoriser les valeurs les plus récemment mesurées, ou bien se faire selon un critère de pertinence visant à utiliser les valeurs les plus discriminantes pour la construction du
25 modèle. Dans un autre exemple, il est envisageable d'ordonner les N valeurs sélectionnées par ordre décroissant.

Cette limitation du nombre de composantes de la signature radio a cependant pour conséquence que sa structure n'est plus déterministe car la collection de stations de base utilisées pour définir une signature radio n'est
30 plus figée : elle varie en fonction de la position géographique à laquelle la signature radio est observée et n'est donc pas nécessairement la même pour deux signatures radio déterminées pour deux positions géographiques différentes. Aussi, il n'est pas possible de comparer une signature radio

directement avec une autre puisque deux signatures radio n'ont pas forcément été construites à partir des mesures provenant des mêmes stations de base. Pour pallier cette perte de déterminisme, il convient d'ajouter une information supplémentaire. C'est pourquoi, dans une étape de formation 223 de la signature radio, les positions géographiques des N stations de base utilisées pour mesurer les N valeurs sélectionnées sont incluses dans la signature radio en plus des N valeurs sélectionnées. La position géographique de chaque station de base 81 du réseau d'accès 80 du système 60 de communication sans fil peut par exemple être transmise au serveur 82 pendant la phase de déploiement du réseau d'accès, et à chaque fois qu'une nouvelle station de base est ajoutée ou déplacée.

Une signature radio est ainsi avantageusement définie par un ensemble de mesures effectuées pour un ensemble de stations de base qui n'est pas défini a priori, et à chaque mesure est associée la position géographique de la station de base utilisée pour la mesure. Par conséquent, même si la topologie du réseau d'accès change, par exemple si des stations de base utilisées pour les mesures d'une signature radio sont supprimées, ou si de nouvelles stations de base sont ajoutées, une signature radio restera pertinente puisqu'elle sera toujours représentative de niveaux de RSSI mesurés pour des stations de base « potentiellement » situées aux positions géographiques considérées.

En considérant à titre d'exemple non limitatif que la position géographique d'une station de base est définie par sa latitude et sa longitude, une signature radio observée en une position géographique donnée peut être représentée par le vecteur S de dimension 3.N :

$$S = (RSSI_1, Lat_1, Lng_1, RSSI_2, Lat_2, Lng_2, \dots, RSSI_N, Lat_N, Lng_N) \quad [1]$$

expression dans laquelle, pour $i \in [1..N]$:

- $RSSI_i$ est la $i^{\text{ème}}$ valeur dans la collection des N niveaux de RSSI les plus grands mesurés par les stations de base,
- Lat_i est la latitude de la station de base ayant mesuré $RSSI_i$, et
- Lng_i est la longitude de la station de base ayant mesuré $RSSI_i$.

Il convient de noter que l'ordre des paramètres de latitude et longitude

dans la signature radio n'a pas forcément d'importance. Par exemple la signature pourrait aussi être représentée par le vecteur S1 :

$$S1 = (RSSI_1, RSSI_2, \dots, RSSI_N, Lat_1, Lng_1, Lat_2, Lng_2, \dots, Lat_N, Lng_N) \quad [2]$$

ou bien par le vecteur S2 :

5
$$S2 = (RSSI_1, RSSI_2, \dots, RSSI_N, Lat_1, Lat_2, \dots, Lat_N, Lng_1, Lng_2, \dots, Lng_N) \quad [3]$$

Dans un mode préféré de mise en œuvre, s'il y a moins que N stations de base qui ont reçu le message, alors la latitude et la longitude associées aux valeurs RSSI de -160 dB incluses dans la signature radio sont mises à la valeur arbitraire zéro. Dans d'autres modes de mise en œuvre, il serait par
10 exemple envisageable d'utiliser les positions géographiques des stations de base les plus proches de celles qui ont reçu le message. Ce choix peut avoir un impact plus ou moins important en fonction de l'algorithme d'apprentissage automatique utilisé.

Le serveur 82 procède aussi à l'extraction 224 de l'information sur la
15 position géographique contenue dans le message émis par le terminal 72 de calibration (pour rappel, ce message a été préalablement transmis au serveur 82 par les stations de base 81 qui l'ont reçu).

Finalement, dans une dernière étape, le couple d'information formé par la position géographique du terminal 72 de calibration et la signature radio associée est ajouté à l'ensemble des données de référence acquises pendant
20 la phase de calibration. Par exemple, cette étape consiste au stockage 24 du couple d'information formé par la position géographique et la signature radio associée dans une base de données mémorisée au sein du serveur 82.

Dans des modes particuliers de mise en œuvre, les étapes de la
25 phase 20 de calibration décrites ci-avant sont répétées pendant une durée prédéfinie, par exemple pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines ou plusieurs mois, pour des terminaux 72 de calibration du système 60 de communication sans fil, ceci afin d'obtenir un ensemble de données de référence contenant un nombre conséquent d'informations, c'est-à-dire une
30 cartographie précise de la zone à couvrir. Dans d'autres exemples, les étapes de la phase 20 de calibration pourraient être répétées jusqu'à obtenir un nombre prédéfini de données de référence.

Dans des modes préférés de mise en œuvre, l'ensemble des données de référence est continuellement enrichi par de nouvelles données provenant des terminaux de calibration. Ainsi, si la topologie du réseau d'accès change (par exemple si des stations de base sont supprimées ou si de nouvelles stations de base sont déployées), alors l'ensemble de données de référence sera mis à jour avec de nouvelles informations qui rendront le modèle plus proche de la réalité et qui augmenteront en conséquence la précision des estimations de la phase de recherche.

Il convient de noter que les terminaux 72 de calibration peuvent être mobiles et ils peuvent par conséquent fournir des données de référence correspondant à différentes positions géographiques.

Il convient également de noter que selon d'autres exemples de mise en œuvre, l'information sur la position géographique courante du terminal 72 de calibration pourrait être émise par un autre système de communication que celui pour lequel sont faites les mesures de RSSI permettant de définir la signature radio dudit terminal de calibration. Par exemple, la position géographique courante du terminal 72 de calibration pourrait être émise au serveur 82 via un réseau de téléphonie mobile du type GSM, UMTS ou LTE, alors que le message pour lequel sont effectuées les mesures de RSSI est émis vers le réseau d'accès 80 du système 60 de communication sans fil UNB de notre exemple. Afin de faciliter, au niveau du serveur 82, l'association de la signature radio déterminée pour le terminal 72 de calibration avec sa position géographique courante, il est envisageable, par exemple, d'horodater le message transportant l'information sur la position géographique courante et le message émis vers le système de communication sans fil UNB.

La figure 5 représente les principales étapes de la phase 30 de recherche pour un mode préféré de mise en œuvre du procédé 10 de géolocalisation d'un terminal 70 d'intérêt d'un système 60 de communication sans fil.

Cette phase 30 de recherche est initiée par l'émission 320 d'un message par un terminal 70 d'intérêt à destination du réseau d'accès 80 du système 60 de communication sans fil. Ce message peut être un message quelconque émis de manière indépendante au procédé de géolocalisation du

terminal. Par exemple, ce message peut être émis à des fins de télérelève d'informations qui n'ont rien à voir avec la géolocalisation du terminal. Alternativement, ce message peut être émis intentionnellement dans le but de géolocaliser le terminal. Dans tous les cas, le contenu du message n'a pas
5 nécessairement d'importance dans la phase 30 de recherche.

Similairement à ce qui est fait pour la phase 20 de calibration, les stations de base 81 du réseau d'accès 80 qui ont reçu ledit message procèdent à une mesure 321 du niveau de RSSI du signal transportant le message.

Les niveaux de RSSI mesurés par les différentes stations de base sont
10 transmis au serveur 82 qui peut alors définir la signature radio observée à la position géographique recherchée. La définition de la signature radio pour la phase 30 de recherche est par exemple réalisée de la même manière que pour la phase 20 de calibration : par une étape de sélection 322 de N valeurs correspondant aux valeurs les plus grandes parmi les niveaux de RSSI
15 mesurés, et par une étape de formation 323 de la signature radio en y incluant, outre les N valeurs sélectionnées, les positions géographiques des N stations de base utilisées pour mesurer les N valeurs sélectionnées. Dans le mode préféré de mise en œuvre présentement décrit, la signature radio observée a la même structure que le vecteur S de l'expression [1].

20 L'estimation 34 de la position géographique du terminal 70 ayant émis le message est alors effectuée à partir d'une part de l'ensemble de données de référence acquises pendant la phase 20 de calibration et d'autre part de la signature radio déterminée pour le terminal d'intérêt dont la position géographique doit être estimée.

25 Dans des modes préférés de mise en œuvre, un algorithme d'apprentissage automatique de régression basé sur une technique de forêts d'arbres décisionnels (*Random Forest* dans la littérature anglo-saxonne) est utilisé pour estimer la fonction qui prédit au mieux une position géographique à partir d'une signature radio en se basant sur le modèle correspondant à
30 l'ensemble des données de référence. Il convient de noter que d'autres techniques d'apprentissage automatique pourraient être utilisées (par exemple un algorithme de réseau de neurones, un algorithme de régression linéaire ou polynomiale, un algorithme du type *Ridge Regression*, etc...), et ils ne

constitueraient que des variantes de mise en œuvre de la présente invention.

Autrement dit, si M est le nombre total de données de référence, c'est-à-dire le nombre de couples (P_j, S_j) , $j \in [1..M]$ acquis pendant la phase de calibration, où P_j est une position géographique connue d'un dispositif 71 de calibration et S_j la signature radio associée, avec :

$$S_j = (RSSI_{j,1}, Lat_{j,1}, Lng_{j,1}, \dots, RSSI_{j,k}, Lat_{j,k}, Lng_{j,k}, \dots, RSSI_{j,N}, Lat_{j,N}, Lng_{j,N})$$

$$P_j = (Lat_j, Lng_j)$$

alors l'algorithme de régression fournit la fonction estimée f qui vérifie au mieux l'ensemble des équations matricielles définit par :

$$P_j = f(S_j), \forall j \in [1..M]$$

Dans ces expressions, pour $j \in [1..M]$, $k \in [1..N]$:

- $RSSI_{j,k}$ est la $k^{\text{ème}}$ valeur dans la collection des N niveaux de RSSI les plus grands mesurés par les stations de base pour un terminal situé à la position géographique P_j ,
- $Lat_{j,k}$ est la latitude de la station de base ayant mesuré $RSSI_{j,k}$,
- $Lng_{j,k}$ est la longitude de la station de base ayant mesuré $RSSI_{j,k}$,
- Lat_j est la latitude de la position géographique P_j
- Lng_j est la longitude de la position géographique P_j

Ainsi, à partir d'une signature radio observée S_R pour le terminal d'intérêt situé à une position géographique recherchée P_R , il est possible d'estimer P_R comme étant :

$$P_R = f(S_R)$$

Dans des modes particuliers de mise en œuvre, lorsque la position géographique P_R d'un terminal est estimée pendant la phase 30 de recherche à partir de sa signature radio S_R associée, alors le couple (P_R, S_R) est ajouté à l'ensemble de données de référence. Ainsi, l'ensemble de données de référence est continuellement enrichi avec de nouvelles données qui rendent le modèle plus complet et par conséquent les prédictions ultérieures plus précises.

Des simulations ont été faites pour les modes préférés de réalisation

et de mise en œuvre décrits ci-dessus. Elles mettent en évidence des gains de performance en termes de réduction de complexité et de précision de géolocalisation.

En ce qui concerne la réduction de la complexité, ces simulations
5 montrent en effet que le temps de calcul nécessaire à l'étape d'estimation 34 d'une position géographique d'un terminal varie de manière quasiment linéaire en fonction du nombre N de valeurs sélectionnées pendant les étapes 222 et 322 des étapes de détermination 22 et 32 d'une signature radio. Autrement dit, si le nombre de valeurs sélectionnées est divisé par cent, le temps de calcul
10 est sensiblement divisé par cent aussi.

En ce qui concerne la précision de géolocalisation, les simulations montrent qu'elle augmente significativement avec N jusqu'à la valeur N=10 à partir de laquelle le gain devient négligeable. La valeur N=10 est donc celle qui offre le meilleur compromis entre complexité et précision. Quand N prend des
15 valeurs importantes (par exemple supérieur à quelques centaines), alors la précision de géolocalisation diminue.

En effet, la figure 6 représente deux courbes de la distribution d'erreur de géolocalisation : une courbe 91 correspondant à une valeur N=1000, et une courbe 92 correspondant à une valeur N=10. Les résultats montrent que pour
20 N=1000, l'erreur de géolocalisation est inférieure à 5 kilomètres dans 90% des cas, alors que pour N=10, l'erreur de géolocalisation est inférieure à 3.5 kilomètres dans 90% des cas.

Une précision de géolocalisation de l'ordre du kilomètre est tout à fait acceptable pour un grand nombre d'applications liées au système de
25 communication considéré, comme par exemple le suivi de marchandises à travers un ou plusieurs pays.

Les modes de réalisation et de mise en œuvre décrits ci-dessus résolvent les problèmes énoncés dans la description de l'art antérieur et apportent en outre des avantages supplémentaires.

30 En particulier, en limitant le nombre N de valeurs sélectionnées le procédé de géolocalisation décrit est adapté pour couvrir de très grandes zones géographiques, à savoir un pays entier, voire plusieurs pays, tout en maintenant des performances en termes de complexité (temps de calcul) et de

précision de géolocalisation tout à fait satisfaisantes pour les applications visées.

De plus, en s'affranchissant d'utiliser une collection figée et définie a priori de station de base pour définir la signature radio, et en introduisant dans
5 la signature radio les positions géographiques des stations de base correspondant aux N valeurs sélectionnées, le procédé de géolocalisation est particulièrement résistant aux changements de topologie du réseau d'accès puisque les signatures radio restent pertinentes même si des stations de base sont supprimées ou ajoutées.

10 En outre, la mise en place d'une telle méthode de géolocalisation au sein d'un système de communication sans fil comme celui qui a été décrit à titre d'exemple est particulièrement peu onéreuse. En effet, grâce à l'existence de terminaux équipés d'un système de positionnement dans le système de communication, elle ne nécessite pas de matériel spécifique additionnel au
15 niveau des terminaux ou des stations de base, elle permet d'automatiser entièrement la phase de calibration, et elle n'est quasiment pas impactée par les mises à jour du réseau d'accès (ajout ou suppression de stations de base).

Enfin, il est important de noter que dans les modes préférés de réalisation décrits, le procédé de géolocalisation n'a aucun impact sur la
20 consommation énergétique des terminaux ou des stations de base du système de communication sans fil, puisque les étapes réalisées par les terminaux ou les stations de base et utilisées par le procédé de géolocalisation sont des étapes courantes pour le fonctionnement du système de communication qui ne sont pas nécessairement opérées avec pour objectif premier de participer à la
25 mise en œuvre du procédé de géolocalisation.

Les modes de réalisation et de mise en œuvre de la présente invention ont été décrits à titre d'exemple non limitatif, et des variantes sont possibles.

En particulier, l'invention a été décrite pour un système de
30 communication radio sans fil à bande ultra étroite adapté à des applications du type IoT, mais rien n'empêche de mettre en œuvre le procédé de géolocalisation selon l'invention pour d'autres types de système de communication comme par exemple des réseaux cellulaires GSM, UMTS, LTE,

Wi-Fi, etc.

Les mesures représentatives du niveau de qualité de lien radio utilisées pour former une signature radio peuvent être effectuées par les stations de base, sur un lien radio montant, mais aussi par les terminaux, sur un lien radio descendant. Les mesures sont par exemple transmises à un serveur qui réalise alors les autres étapes du procédé de géolocalisation. Selon d'autres exemples, les mesures représentatives du niveau de qualité de lien radio pourraient être effectuées par le serveur lui-même, à partir d'informations reçues des terminaux ou des stations de base.

Comme indiqué précédemment, la valeur représentative de la qualité de lien radio peut être différente du niveau de RSSI. Cela peut être par exemple, un niveau d'atténuation du signal, un rapport signal sur bruit, ou bien un autre indicateur de qualité de canal radio. Cette valeur est cependant supposée stable dans le temps pour le système considéré à une position géographique donnée.

Différents algorithmes d'apprentissage automatique peuvent être utilisés pour estimer la position géographique d'un terminal à partir de sa signature radio et de l'ensemble des données de référence. Le fait d'utiliser l'un ou l'autre de ces algorithmes ne constitue qu'une variante de mise en œuvre de l'invention.

Enfin, la méthode de sélection et le nombre N de mesures sélectionnées pour déterminer une signature radio de manière optimale peuvent varier en fonction du système de communication considéré. Les exemples correspondants utilisés dans la description ne doivent en conséquence pas être considérés comme étant limitatifs.

REVENDICATIONS

1. Procédé (10) de géolocalisation d'un terminal (70), dit « terminal d'intérêt », d'un système (60) de communication sans fil comportant :
- 5 - une détermination (22) de signatures radio associées respectivement à différentes positions géographiques connues, chaque signature radio correspondant à un ensemble de valeurs représentatives de la qualité de liens radio existant entre un dispositif (71) de calibration, situé à une desdites positions géographiques connues, et une pluralité de stations de base (81) dudit système (60) de communication sans fil, les signatures radio et leurs positions géographiques connues respectives associées formant un ensemble de données de référence,
 - 10 - une détermination (32) d'une signature radio pour ledit terminal d'intérêt situé à une position géographique à estimer,
 - 15 - une estimation (34) de la position géographique dudit terminal d'intérêt à partir de la signature radio dudit terminal d'intérêt et de l'ensemble de données de référence,
- ledit procédé (10) de géolocalisation étant **caractérisé en ce que** chaque détermination (22, 32) d'une signature radio comporte :
- 20 - une mesure (221, 321), pour chacune de la pluralité de stations de base (81), d'une valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre le dispositif (71) de calibration ou le terminal (70) d'intérêt et la station de base considérée,
 - une sélection (222, 322) de N valeurs parmi l'ensemble des valeurs mesurées,
 - 25 - une formation (223, 323) de la signature radio en y incluant les N valeurs sélectionnées et les positions géographiques respectives des N stations de base utilisées pour mesurer lesdites N valeurs sélectionnées.
2. Procédé (10) de géolocalisation selon la revendication 1 dans lequel les N valeurs sélectionnées correspondent aux N valeurs qui représentent les meilleures qualités de lien radio mesurées pour les stations de base (81).
- 30

3. Procédé (10) de géolocalisation selon la revendication 2 dans lequel les N valeurs sélectionnées sont classées par ordre décroissant de la qualité de lien radio.
4. Procédé (10) de géolocalisation selon l'une des revendications précédentes dans lequel le lien radio est un lien montant vers les stations de base (81) du système (60) de communication sans fil.
5. Procédé (10) de géolocalisation selon la revendication 4 dans lequel un dispositif (71) de calibration est un terminal (72) du système (60) de communication sans fil, dit « terminal de calibration », et la détermination (22) de la signature radio du terminal de calibration situé en une position géographique connue comporte les étapes suivantes :
- émission (220) par le terminal (72) de calibration d'un message à destination de la pluralité de stations de base (81),
 - mesure (221), pour chacune de la pluralité de stations de base (81), d'une valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre ledit terminal de calibration et la station de base considérée à partir du message reçu dudit terminal de calibration,
 - sélection (222), par un serveur (82) relié aux stations de base, de N valeurs parmi l'ensemble des valeurs mesurées,
 - formation (223), par le serveur (82), de la signature radio du terminal de calibration en y incluant les N valeurs sélectionnées et les positions géographiques des stations de base utilisées pour mesurer les N valeurs sélectionnées.
6. Procédé (10) selon la revendication 5, dans lequel, le terminal (72) de calibration étant équipé d'un système de positionnement, la détermination (22) de la signature radio du terminal (72) de calibration comporte des étapes de :
- inclusion, dans le message émis par le terminal (72) de calibration à destination de la pluralité de stations de base (81), de la position géographique courante du terminal de calibration mesurée par le système de positionnement,
 - extraction (224), par le serveur (82), de la position géographique contenue dans ledit message.

7. Procédé (10) de géolocalisation selon l'une des revendications 5 à 6 dans lequel plusieurs terminaux (72) de calibration sont mis en œuvre pendant une durée prédéfinie pour former l'ensemble de données de référence.
8. Procédé (10) de géolocalisation selon l'une des revendications 5 à 6 dans lequel l'ensemble de données de référence est continuellement enrichi par de nouvelles données provenant de terminaux (72) de calibration.
9. Procédé (10) de géolocalisation selon l'une des revendications 4 à 8 dans lequel la détermination (32) de la signature radio du terminal d'intérêt situé en une position géographique à estimer comporte les étapes suivantes :
- émission (320) par le terminal (70) d'intérêt d'un message à destination de la pluralité de stations de base (81),
 - mesure (321), pour chacune de la pluralité de stations de base (81), d'une valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre ledit terminal d'intérêt et la station de base considérée à partir du message reçu dudit terminal d'intérêt,
 - sélection (322), par un serveur (82) relié aux stations de base, de N valeurs parmi l'ensemble des valeurs mesurées,
 - formation (323), par le serveur (82), de la signature radio du terminal d'intérêt en y incluant les N valeurs sélectionnées et les positions géographiques des stations de base utilisées pour mesurer les N valeurs sélectionnées.
10. Procédé (10) de géolocalisation selon l'une des revendications précédentes dans lequel la valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre un terminal (70, 72) ou un dispositif (71) de calibration et une station de base (81) est un niveau de puissance reçue d'un signal radio échangé entre ladite station de base et ledit terminal (70, 72) ou ledit dispositif (71) de calibration.
11. Procédé (10) de géolocalisation selon l'une des revendications précédentes dans lequel le lien radio est un canal de communication à bande ultra étroite.
12. Procédé (10) de géolocalisation selon l'une des revendications précédentes dans lequel la position géographique estimée du terminal d'intérêt et la

signature radio associée sont ajoutées à l'ensemble de données de référence.

- 5 **13.** Procédé (10) de géolocalisation selon l'une des revendications précédentes dans lequel le nombre N de valeurs sélectionnées lors de la détermination d'une signature radio est un entier positif compris entre 5 et 20.
- 14.** Procédé (10) de géolocalisation selon l'une des revendications précédentes dans lequel l'estimation de la position géographique du terminal d'intérêt utilise un algorithme d'apprentissage supervisé de régression.
- 10 **15.** Système (60) de communication sans fil comportant des terminaux (70) et un réseau d'accès (80) comportant une pluralité de stations de base (81) reliées à un serveur (82), ledit système étant **caractérisé en ce qu'il** comporte une base de données mémorisant un ensemble de données de référence, chaque donnée de référence correspondant à une signature radio associée à une position géographique connue, chaque signature radio
- 15 comprenant N valeurs représentatives de la qualité de liens radio existant entre un dispositif (71) de calibration situé à une desdites positions géographiques connues et N stations de base (81) et les positions géographiques desdites N stations de base, et en ce que le réseau d'accès (80) est configuré pour :
- 20 - mesurer une valeur représentative de la qualité du lien radio existant entre chaque station de base (81) et un terminal (70) dont la position géographique doit être estimée, dit « terminal d'intérêt »,
- sélectionner N valeurs parmi l'ensemble des valeurs mesurées pour ledit terminal d'intérêt,
- 25 - former une signature radio correspondant à l'ensemble des N valeurs sélectionnées et des positions géographiques des stations de base utilisées pour mesurer les N valeurs sélectionnées,
- estimer la position géographique dudit terminal d'intérêt en fonction de la signature radio dudit terminal d'intérêt et de l'ensemble de
- 30 données de référence mémorisé dans la base de données.

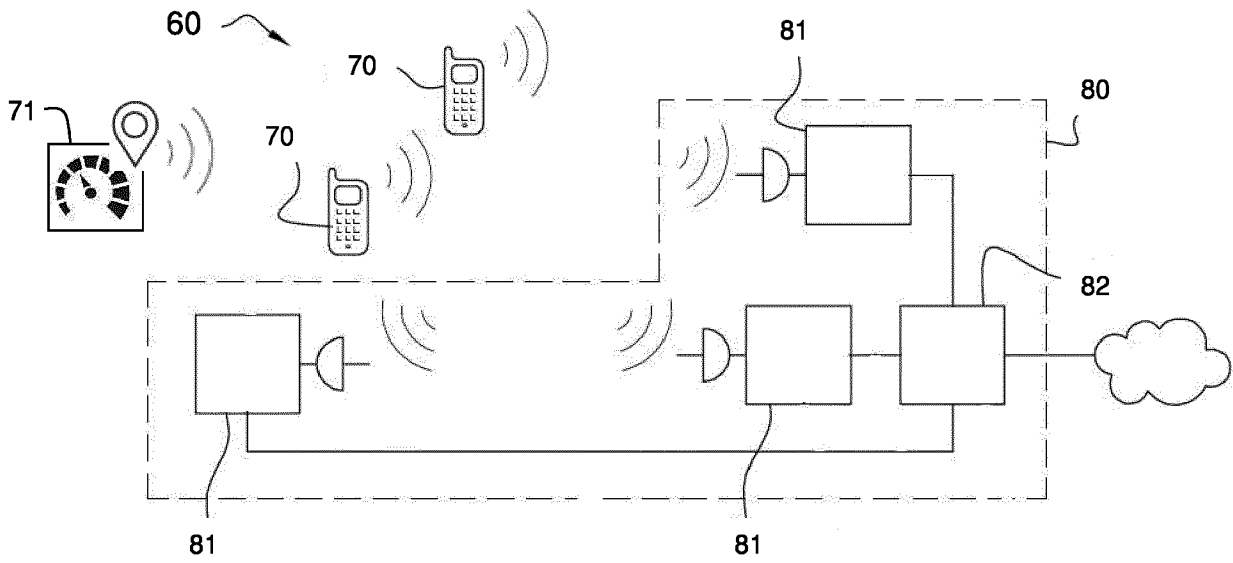


Fig. 1

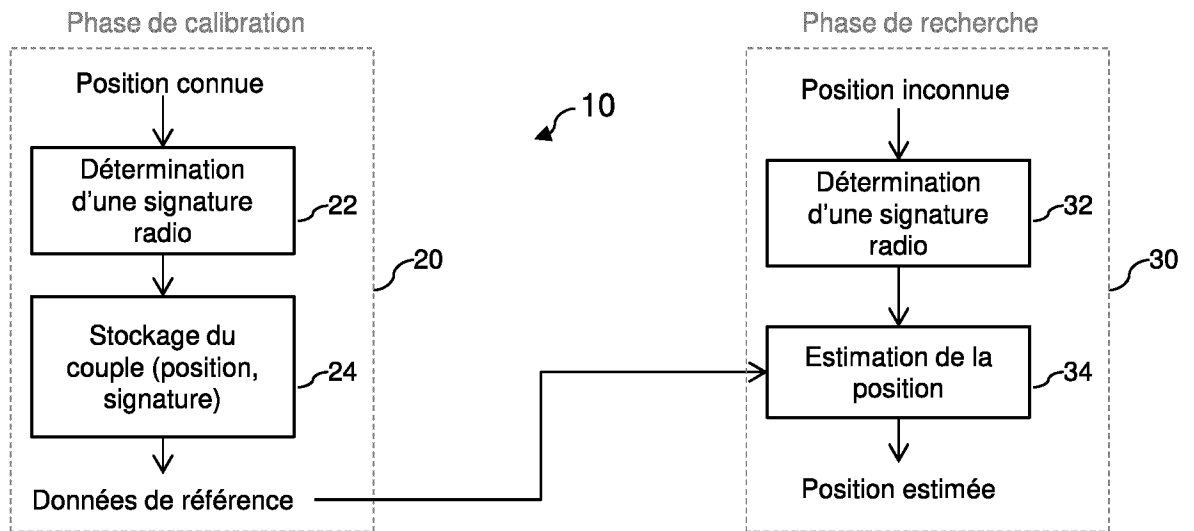


Fig. 2

2/3

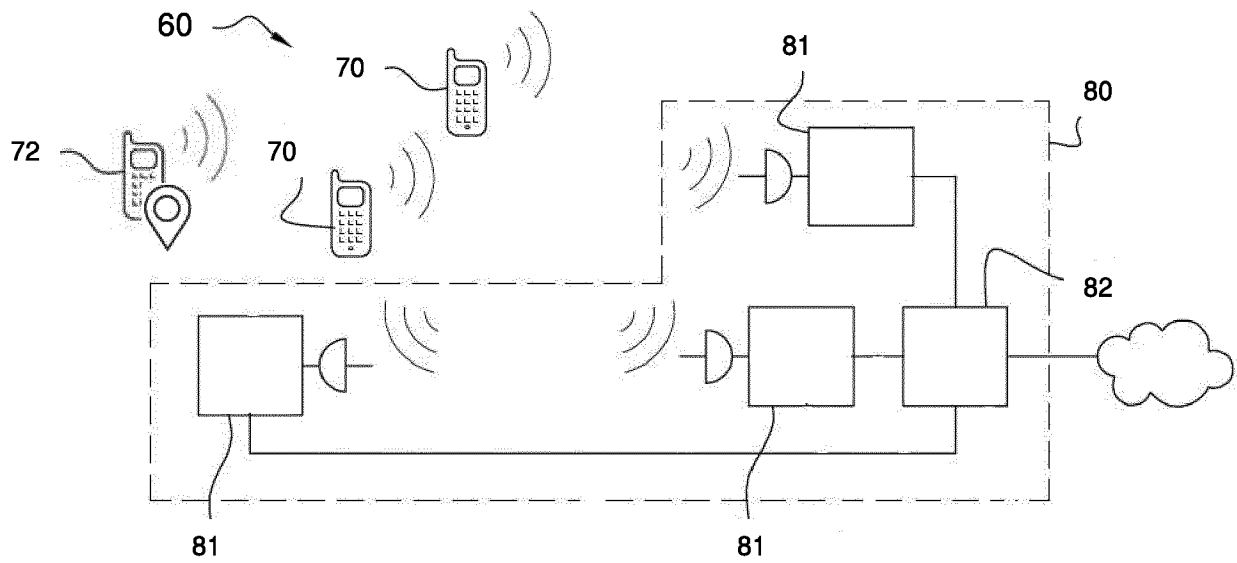


Fig. 3

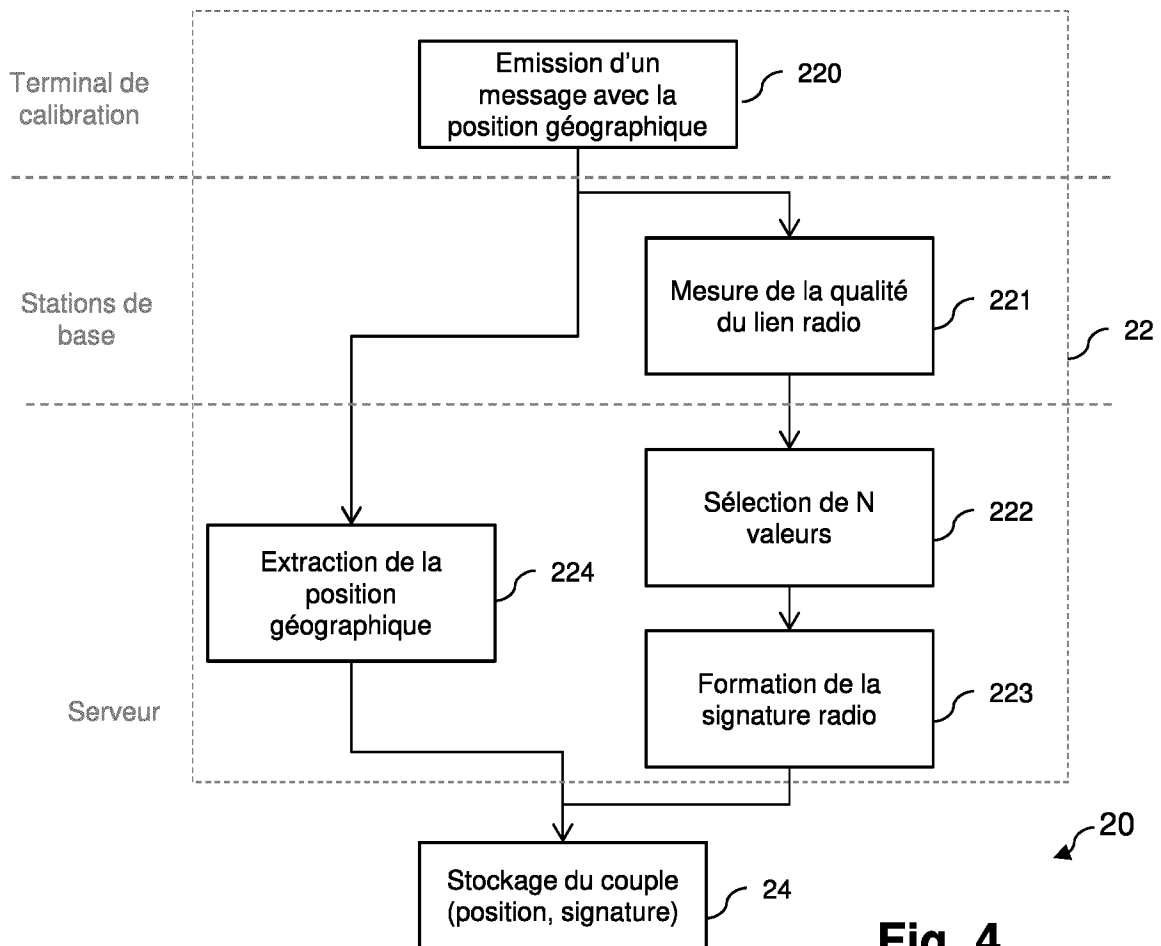


Fig. 4

3/3

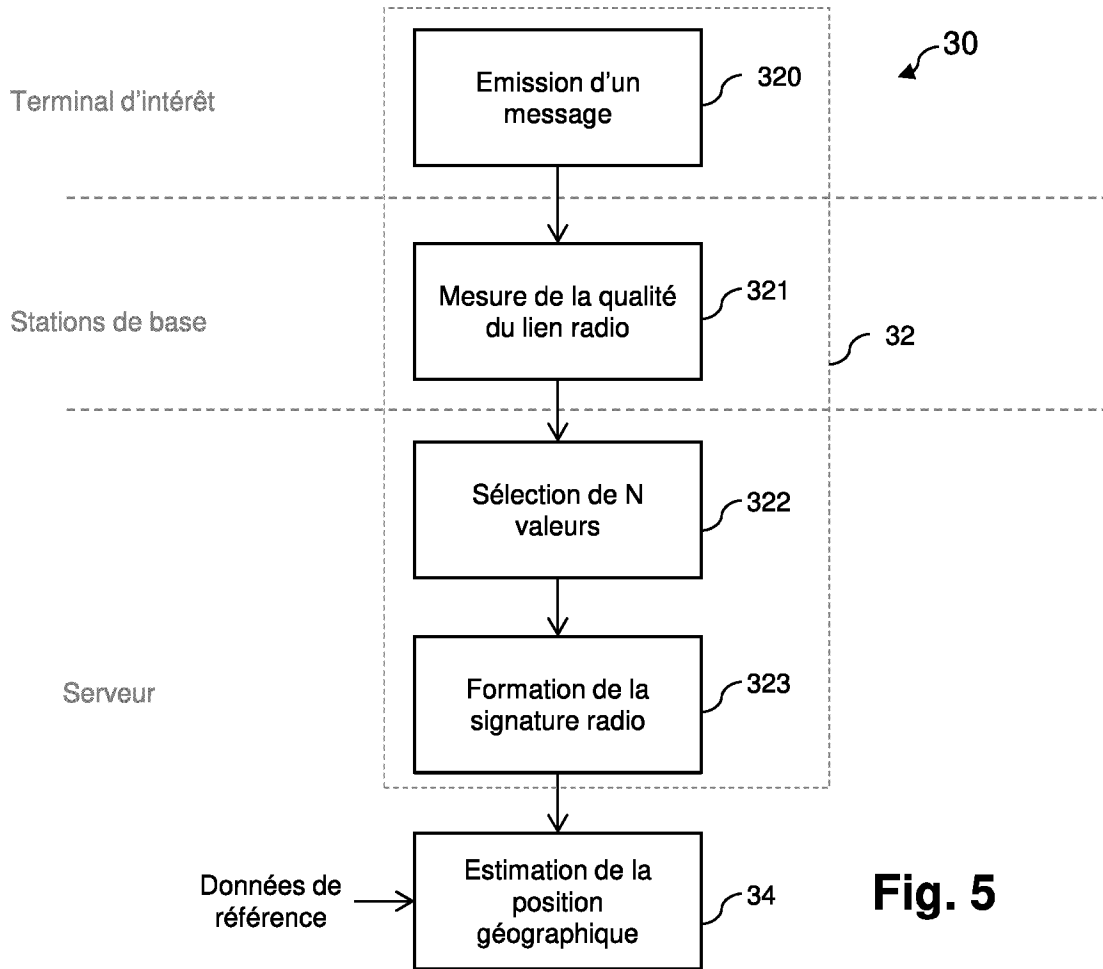


Fig. 5

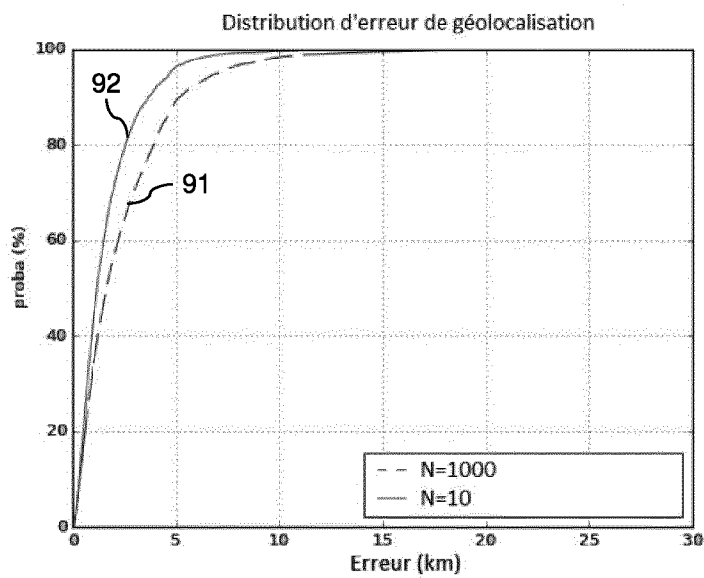


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/056584

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01S5/02
ADD.
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2016/191775 A1 (NAGUIB AYMAN FAWZY [US] ET AL) 30 June 2016 (2016-06-30) paragraph [0005] - paragraph [0006] paragraph [0009] paragraph [0035] - paragraph [0065] figures 1, 3	1-15
X	US 2011/090081 A1 (KHORASHADI BEHROOZ [US] ET AL) 21 April 2011 (2011-04-21) abstract paragraph [0002] - paragraph [0014] paragraph [0030] - paragraph [0031] ----- -/--	1-15

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 4 June 2018	Date of mailing of the international search report 13/06/2018
--	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Haugg, Sabine
--	-------------------------------------

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/056584

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2011/144966 A1 (NOKIA CORP [FI]; NOKIA INC [US]; WIROLA LAURI [FI]; SYRJAERINNE JARI []) 24 November 2011 (2011-11-24) paragraph [0001] paragraph [0024] - paragraph [0026] paragraph [0035] - paragraph [0038] paragraph [0048] -----	1-15
A	GB 2 498 801 A (TOSHIBA RES EUROP LTD [GB]) 31 July 2013 (2013-07-31) abstract page 3, line 11 - line 21 page 7, line 4 - line 6 -----	1-15
A	US 2012/072106 A1 (HAN DONG SOO [KR] ET AL) 22 March 2012 (2012-03-22) abstract paragraph [0012] - paragraph [0013] paragraph [0045] - paragraph [0061] paragraph [0114] - paragraph [0133] -----	1-15
A	WO 2013/062462 A1 (ERICSSON TELEFON AB L M [SE]; SIOMINA IANA [SE]; WIGREN TORBJOERN [SE]) 2 May 2013 (2013-05-02) page 12, line 1 - page 13, line 17 -----	1-15
A	KHUONG AN NGUYEN ET AL: "Reliable indoor location prediction using conformal prediction", ANNALS OF MATHEMATICS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE., vol. 74, no. 1-2, 27 October 2013 (2013-10-27), pages 133-153, XP055429272, CH ISSN: 1012-2443, DOI: 10.1007/s10472-013-9384-4 cited in the application chapitre 3.3 -----	1-15
A	MOHAMED IBRAHIM ET AL: "CellSense: An Accurate Energy-Efficient GSM Positioning System", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 61, no. 1, 1 January 2012 (2012-01-01), pages 286-296, XP011397241, ISSN: 0018-9545, DOI: 10.1109/TVT.2011.2173771 cited in the application chapitre III.A -----	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No PCT/EP2018/056584

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
US 2016191775	A1	30-06-2016	CN 107110949 A	29-08-2017
			EP 3241037 A1	08-11-2017
			JP 2018504039 A	08-02-2018
			US 2016191775 A1	30-06-2016
			WO 2016109428 A1	07-07-2016

US 2011090081	A1	21-04-2011	TW 201140120 A	16-11-2011
			US 2011090081 A1	21-04-2011
			WO 2011050057 A1	28-04-2011

WO 2011144966	A1	24-11-2011	CN 102960036 A	06-03-2013
			EP 2572542 A1	27-03-2013
			US 2013201365 A1	08-08-2013
			WO 2011144966 A1	24-11-2011

GB 2498801	A	31-07-2013	GB 2498801 A	31-07-2013
			JP 5624636 B2	12-11-2014
			JP 2013156257 A	15-08-2013
			US 2013194135 A1	01-08-2013

US 2012072106	A1	22-03-2012	CN 103119470 A	22-05-2013
			EP 2597486 A2	29-05-2013
			US 2012072106 A1	22-03-2012
			WO 2012011690 A2	26-01-2012

WO 2013062462	A1	02-05-2013	EP 2772111 A1	03-09-2014
			US 2013109405 A1	02-05-2013
			WO 2013062462 A1	02-05-2013

<p>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01S5/02 ADD.</p>		
<p>Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB</p>		
<p>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</p>		
<p>Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01S</p>		
<p>Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche</p>		
<p>Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data</p>		
<p>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</p>		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2016/191775 A1 (NAGUIB AYMAN FAWZY [US] ET AL) 30 juin 2016 (2016-06-30) alinéa [0005] - alinéa [0006] alinéa [0009] alinéa [0035] - alinéa [0065] figures 1, 3	1-15
X	US 2011/090081 A1 (KHORASHADI BEHROOZ [US] ET AL) 21 avril 2011 (2011-04-21) abrégé alinéa [0002] - alinéa [0014] alinéa [0030] - alinéa [0031]	1-15
	----- -/--	
<p><input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents</p>		
<p><input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</p>		
<p>* Catégories spéciales de documents cités:</p>		
<p>"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)</p> <p>"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p>	<p>"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention</p> <p>"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément</p> <p>"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier</p> <p>"&" document qui fait partie de la même famille de brevets</p>	
<p>Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée</p> <p style="text-align: center;">4 juin 2018</p>		<p>Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale</p> <p style="text-align: center;">13/06/2018</p>
<p>Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale</p> <p style="text-align: center;">Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016</p>		<p>Fonctionnaire autorisé</p> <p style="text-align: center;">Haugg, Sabine</p>

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	<p>WO 2011/144966 A1 (NOKIA CORP [FI]; NOKIA INC [US]; WIROLA LAURI [FI]; SYRJAERINNE JARI []) 24 novembre 2011 (2011-11-24) alinéa [0001] alinéa [0024] - alinéa [0026] alinéa [0035] - alinéa [0038] alinéa [0048]</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15
A	<p>GB 2 498 801 A (TOSHIBA RES EUROP LTD [GB]) 31 juillet 2013 (2013-07-31) abrégé page 3, ligne 11 - ligne 21 page 7, ligne 4 - ligne 6</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15
A	<p>US 2012/072106 A1 (HAN DONG SOO [KR] ET AL) 22 mars 2012 (2012-03-22) abrégé alinéa [0012] - alinéa [0013] alinéa [0045] - alinéa [0061] alinéa [0114] - alinéa [0133]</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15
A	<p>WO 2013/062462 A1 (ERICSSON TELEFON AB L M [SE]; SIOMINA IANA [SE]; WIGREN TORBJOERN [SE]) 2 mai 2013 (2013-05-02) page 12, ligne 1 - page 13, ligne 17</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15
A	<p>KHUONG AN NGUYEN ET AL: "Reliable indoor location prediction using conformal prediction", ANNALS OF MATHEMATICS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE., vol. 74, no. 1-2, 27 octobre 2013 (2013-10-27), pages 133-153, XP055429272, CH ISSN: 1012-2443, DOI: 10.1007/s10472-013-9384-4 cité dans la demande chapitre 3.3</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15
A	<p>MOHAMED IBRAHIM ET AL: "CellSense: An Accurate Energy-Efficient GSM Positioning System", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 61, no. 1, 1 janvier 2012 (2012-01-01), pages 286-296, XP011397241, ISSN: 0018-9545, DOI: 10.1109/TVT.2011.2173771 cité dans la demande chapitre III.A</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2018/056584

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2016191775	A1	30-06-2016	CN 107110949 A	29-08-2017
			EP 3241037 A1	08-11-2017
			JP 2018504039 A	08-02-2018
			US 2016191775 A1	30-06-2016
			WO 2016109428 A1	07-07-2016

US 2011090081	A1	21-04-2011	TW 201140120 A	16-11-2011
			US 2011090081 A1	21-04-2011
			WO 2011050057 A1	28-04-2011

WO 2011144966	A1	24-11-2011	CN 102960036 A	06-03-2013
			EP 2572542 A1	27-03-2013
			US 2013201365 A1	08-08-2013
			WO 2011144966 A1	24-11-2011

GB 2498801	A	31-07-2013	GB 2498801 A	31-07-2013
			JP 5624636 B2	12-11-2014
			JP 2013156257 A	15-08-2013
			US 2013194135 A1	01-08-2013

US 2012072106	A1	22-03-2012	CN 103119470 A	22-05-2013
			EP 2597486 A2	29-05-2013
			US 2012072106 A1	22-03-2012
			WO 2012011690 A2	26-01-2012

WO 2013062462	A1	02-05-2013	EP 2772111 A1	03-09-2014
			US 2013109405 A1	02-05-2013
			WO 2013062462 A1	02-05-2013
