

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique et génie informatique

SYSTÈMES DE LOCALISATION EN TEMPS RÉEL BASÉS SUR LES RÉSEAUX DE COMMUNICATION SANS FIL

Thèse de doctorat
Spécialité : génie électrique et informatique

Mohamed Amine ABID

Jury : Soumaya CHERKAOUI (directrice)
Denis GINGRAS (rapporteur)
Lyes KHOUKHI (examineur)
Abdelhamid MAMMERI (examineur)

À ma mère, à mon père

RÉSUMÉ

Des techniques fiables de radiolocalisation s'avèrent indispensables au développement d'un grand nombre de nouveaux systèmes pertinents. Les techniques de localisation basées sur les réseaux de communication sans-fil (WNS) sont particulièrement adéquates aux espaces confinés et fortement urbanisés. Le présent projet de recherche s'intéresse aux systèmes de localisation en temps réel (RTLS) basés sur les technologies de communication sans-fil existantes. Deux nouvelles techniques de radiolocalisation alternatives sont proposées pour améliorer la précision de positionnement des nœuds sans-fil mobiles par rapport aux méthodes conventionnelles basées sur la puissance des signaux reçus (RSS). La première méthode de type géométrique propose une nouvelle métrique de compensation entre les puissances de signaux reçus par rapport à des paires de stations réceptrices fixes. L'avantage de cette technique est de réduire l'effet des variations du milieu de propagation et des puissances d'émission des signaux sur la précision de localisation. La même métrique est sélectionnée pour former les signatures utilisées pour créer la carte radio de l'environnement de localisation durant la phase hors-ligne dans la deuxième méthode de type analyse de situation. Durant la phase de localisation en temps réel, la technique d'acquisition comprimée (CS) est appliquée pour retrouver les positions des nœuds mobiles à partir d'un nombre réduit d'échantillons de signaux reçus en les comparant à la carte radio préétablie. Le calcul d'algèbre multilinéaire proposé dans ce travail permet l'utilisation de ce type de métrique ternaire, équivalentement la différence des temps d'arrivée (TDOA), pour calculer les positions des cibles selon la technique de CS. Les deux méthodes sont ensuite validées par des simulations et des expérimentations effectuées dans des environnements à deux et à trois dimensions. Les expériences ont été menées dans un bâtiment multi-étages (MFB) en utilisant l'infrastructure sans-fil existante pour retrouver conjointement la position et l'étage des cibles en utilisant les techniques proposées. Un exemple emblématique de l'application des RTLS dans les zones urbaines est celui des systèmes de transport intelligents (ITS) pour améliorer la sécurité routière. Ce projet s'intéresse également à la performance d'une application de sécurité des piétons au niveau des intersections routières. L'accomplissement d'un tel système repose sur l'échange fiable, sous des contraintes temporelles sévères, des données de positionnement géographique entre nœuds mobiles pour se tenir mutuellement informés de leurs présences et positions afin de prévenir les risques de collision. Ce projet mène une étude comparative entre deux architectures d'un système ITS permettant la communication entre piétons et véhicules, directement et via une unité de l'infrastructure, conformément aux standards de communication dans les réseaux ad hoc véhiculaires (VANETs).

Mots-clés : Radiolocalisation, RTLS, WLAN, DSRC, ITS, VANET, Acquisition comprimée

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord Prof. Soumaya Cherkaoui, directrice de cette thèse, pour son implication et son intérêt à ce projet de recherche. Ses conseils et ses apports scientifiques ont été des éléments moteurs dans l'accomplissement de ce travail.

J'adresse mes remerciements aux membres de jury, Prof. Denis Gingras, Prof. Lyes Khoukhi et Dr. Abdelhamid Mammeri qui ont accepté d'évaluer ce travail et de contribuer à l'améliorer par leurs commentaires constructifs.

Il m'est agréable de remercier les membres du groupe de recherche Interlab et tout le personnel du département de génie électrique de la faculté de génie de Sherbrooke pour leur contribution à installer un milieu de travail favorable.

J'exprime ma gratitude à ma chère mère pour sa patience et ses efforts inestimables. Merci à mon père qui doit être fier de moi, paix à son âme. Je tiens à remercier mon frère, mes sœurs et toute ma famille et mes amis pour leurs encouragements.

Mes remerciements les plus profonds vont à ma chère et tendre épouse pour son amour, sa précieuse aide et son soutien continu, sans oublier mes deux adorables enfants, ma source de bonheur.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES SYMBOLES	xv
LISTE DES ACRONYMES	xvii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte et problématique	2
1.2 Solutions proposées	6
1.3 Contributions de la thèse.....	9
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART.....	15
2.1 La localisation dans les réseaux sans-fil	15
2.2 Critères des systèmes de localisation.....	16
2.2.1 Environnement de localisation	16
2.2.2 Précision de localisation	17
2.2.3 Localisation ascendante ou descendante	17
2.2.4 Position absolue / position relative / position symbolique	18
2.2.5 Ressources	18
2.2.6 Avantages et limitations	19
2.3 Systèmes de localisation et technologies sans-fil	20
2.3.1 Les systèmes de localisation classiques.....	21
2.3.2 Les systèmes de localisation basés sur les réseaux sans-fil.....	22
2.4 Méthodes de localisation géométriques.....	24
2.4.1 Propagation des ondes radio	25
2.4.2 Métriques des signaux et impact sur la localisation	29
2.4.3 Les méthodes géométriques de localisation	32
2.5 Méthodes de proximité	37
2.5.1 Identification de la cellule (Cell-ID)	37
2.5.2 Landmark.....	37
2.6 Méthodes d'analyse de situation.....	38
2.6.1 La phase hors-ligne.....	39
2.6.2 La phase en ligne	44
2.6.3 Application du CS pour la localisation basée sur les signatures	54
2.7 Systèmes de transport intelligents.....	56
2.7.1 Liste de projets ITS	56
2.8 Les réseaux véhiculaires ad hoc.....	57

2.9	Standards de communication dans les VANETs	58
2.9.1	DSRC	59
2.9.2	Protocoles WAVE et IEEE 802.11P	61
2.9.3	Mode de fonctionnement de DSRC	64
2.9.4	CALM	66
CHAPITRE 3 RECEIVED SIGNAL COMPEN- SATION BASED POSITION ESTIMATION OF OUTDOOR RFID NODES		
3.1	Abstract.....	72
3.2	Introduction	73
3.3	Related Works	74
3.4	Radio propagation model and localization technique.....	74
3.4.1	Trilateration.....	77
3.4.2	Compensation Based Localization	78
3.5	Simulation Results.....	81
3.6	Conclusion.....	84
CHAPITRE 4 WIRELESS TECHNOLOGY AGNOSTIC REAL-TIME LOCALIZATION IN URBAN AREAS.....		
4.1	Abstract.....	88
4.2	Introduction	89
4.3	Related work.....	91
4.4	The TR2S2 Technique.....	93
4.4.1	Free space propagation model and TR2S2.....	93
4.4.2	Hata model and TR2S2	94
4.4.3	Probabilistic models and TR2S2.....	95
4.5	Localisation based on TR2S2.....	98
4.5.1	Position estimation from ratio of distances.....	98
4.5.2	Obstructed reference node detection.....	100
4.6	Simulations Results	100
4.6.1	Performance of TR2S2 with Free space path loss model.....	101
4.6.2	Performance of TR2S2 with Hata model	102
4.6.3	Performance of TR2S2 with lognormal model	103
4.6.4	Performance of TR2S2 with Rayleigh distribution:.....	104
4.7	Conclusion.....	104
CHAPITRE 5 3D COMPRESSIVE SENSING FOR NODES LOCALIZATION IN WNS BASED ON RSS		
5.1	Abstract.....	108
5.2	Introduction	109
5.3	Related works on compressive sensing	111
5.3.1	Compressive Sensing background	111
5.3.2	CS in Wireless Networks	111

5.3.3	Three-dimensional CS	112
5.4	A 3D-CS based target localization Method	113
5.4.1	Problem formulation.....	113
5.4.2	D-CS recovery program.....	114
5.5	Simulations Results.....	117
5.6	Conclusion	120
CHAPITRE 6 3D COMPRESSED SENSING FOR WIRELESS NETWORKS-BASED MULTIPLE NODE LOCALIZATION IN MULTI-FLOOR BUILDINGS		123
6.1	Abstract.....	125
6.2	Introduction.....	125
6.3	Related works on WNs based localization in MFB	127
6.4	Related works on compressed sensing.....	129
6.5	3D-CS based localization in MFB.....	131
6.5.1	Problem formulation.....	132
6.6	Simulations Results.....	136
6.6.1	Localization in MFB with LOS condition	137
6.6.2	Localization in MFB with NLOS condition.....	141
6.7	Experimental Results	144
6.8	Conclusion	150
CHAPITRE 7 PEDESTRIAN COLLISION AVOIDANCE IN VEHICULAR NETWORKS		153
7.1	Abstract.....	154
7.2	Introduction.....	155
7.3	Overview of DSRC and WAVE	156
7.3.1	Dedicated Short Range Communication band.....	156
7.3.2	Wireless Access in Vehicular Environment	157
7.4	Pedestrian collision avoidance system.....	159
7.4.1	Frame format for pedestrian position data.....	159
7.4.2	Intersection collision avoidance with pedestrian participation; System design and architecture	160
7.5	Simulations Results.....	162
7.5.1	P2V case simulations results	163
7.5.2	P2I+I2V case simulations results	165
7.6	Conclusion	166
CHAPITRE 8 CONCLUSIONS.....		169
LISTE DES RÉFÉRENCES.....		173

LISTE DES FIGURES

2.1	Zone de Fresnel	25
2.2	Technique de Trilatération.....	34
2.3	Technique de triangulation	35
2.4	Technique de l'acquisition comprimée	49
2.5	Étapes de localisation basée sur la technique de l'acquisition comprimée	55
2.6	Présentation de la bande DSRC 5.9 GHz	60
2.7	Comparaison entre le modèle OSI et le modèle WAVE	63
2.8	Les différentes technologies de communications supportées par CALM	67
2.9	Architecture CALM et interaction entre ses composants	68
3.1	Reference tags location.....	76
3.2	Difference between Trilateration and CBL method.	79
3.3	Illustration of triangulation and CBL methods.....	79
3.4	Target Tracking Approach.....	80
3.5	Intersection area with the Trilateration based localization method.....	82
3.6	Intersection area with a RSS Based Localization method.....	82
3.7	Intersection area with CBL.....	83
4.1	Example of Rayleigh distribution PDF.	98
4.2	Example of annulus intersection area.....	100
4.3	Location error obtained by TR2S2 and Trilateration based on free space model, with different values of path loss exponent variation.....	101
4.4	Location error obtained by TR2S2 and Trilateration based on Hata model for different heights of BS and MS antennas variation.....	102
4.5	Location error obtained by TR2S2 and Trilateration based on lognormal model with different transmit power variation for different confidence levels.....	103
5.1	Tucker decomposition.	116
5.2	3D-CS localization of targets at discrete positions and no propagation conditions changing	118
5.3	3D-CS localization of targets at continuous positions and no propagation conditions changing	119
5.4	3D-CS localization error as function of standard deviation σ	119
6.1	Tucker decomposition	135
6.2	Recovered target positions using 3D-CS method in ideal conditions	138
6.3	Influence of the propagation medium variation on the localization mean error for 2D-CS and 3DCS methods	139
6.4	Details of recovered positions using RSS and R2S2 metrics with different propagation medium variation levels in LOS condition.....	140
6.5	Reproduction of the MFB plan.....	142
6.6	The localization mean error determined by varying the propagation medium variation and the number of APs using 2D-CS and 3D-CS methods in NLOS condition	143
6.7	Influence of the radio map spacing on the localization mean error.....	144

6.8 Plan of the third floor of MFB and APs placement.....	145
6.9 Influence of the number of APs on localization mean error determined by experimental results	147
6.10 Influence of the radio map spacing on the localization mean error determined by experimental results.....	148
7.1 DSRC Frequency Spectrum and channel allocation	157
7.2 WAVE Standard architecture.....	158
7.3 Pedestrian location data frame format.....	159
7.4 IEEE802.11a data frame format.....	160
7.5 Pedestrian collision avoidance system architecture	161
7.6 Traffic view and mobility pattern.....	162
7.7 Delay function of CD in CCH and SCH with Low Priority (LP) and High Priority (HP) in P2V case.....	164
7.8 PRR function of CD in CCH and SCH with LP and HP in P2V case	165
7.9 Delay function of CD in CCH and SCH with LP and HP in P2I+I2V case.....	166
7.10 PRR function of CD in CCH and SCH with LP and HP in P2I+I2V case.....	166

LISTE DES TABLEAUX

1.1 Scénarios de simulation pour le système d'anticollision avec les piétons	9
2.1: Table de correspondance position/signature	44
2.2: Comparaison entre 802.11p et 802.11a	65
3.1: Relationship between intersection area and C values.....	81
3.2: Localization improvement	83
4.1: Confidence level and location error with Rayleigh distribution	104
5.1. Execution time details	120
6.1: Comparison between the proposed 3D-CS method and existing localization techniques	149
7.1: Simulation parameters	163

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
$P(.)$	Distribution de probabilité
$P(. .)$	Probabilité conditionnelle
$\ .\ _n$	Norme n
$\langle ., . \rangle$	Produit scalaire
$(.)^T$	Matrice transposée
$(.)^\dagger$	Pseudo-inverse de matrice

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
AOA	Angle Of Arrival
CALM	Communication Architecture for Land Mobile
CBL	Compensation Based Localization
CCH	Control Channel
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
DSRC	Dedicated Short Range Communication
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communication Commission
GES	Gaz à Effet de Serre
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IPv6	Internet Protocol version 6
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transportation System
LBS	Location-based Services
LOS	Line Of Sight
MANET	Mobile Ad Hoc Network
MFB	Multi-Floor Building
NEMO	Network Mobility
NLOS	Non Line Of Sight
NS	Network Simulator
OBU	On Board Unit
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PL	Path Loss
PRR	Packet Reception Rate
RFID	Radio Frequency Identification
RIP	Restricted Isometry Property
RSS	Received Signal Strength
RSU	Road Side Unit
RTLS	Real Time Localization System
R2S2	Ratio of Received Signal Strength
SCH	Service Channel
SNR	Signal Noise Ratio
SOM	Self-Organizing Map
TDOA	Time Difference Of Arrival
TOA	Time Of Arrival
UWB	Ultra Wide Band
VANET	Vehicular Ad Hoc Network

WAVE	Wireless Access in Vehicular Environment
WBSS	WAVE Basic Service Set
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WN	Wireless Network
WSMP	WAVE Short Message Protocol
WSN	Wireless Sensor Network

LISTE DES ACRONYMES

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le présent projet de recherche s'intéresse aux techniques de radiolocalisation basées sur les réseaux de communication sans-fil dans les environnements confinés. Il convient de préciser tout d'abord que les systèmes de localisation satellitaires tels que le système de positionnement global (GPS) ne sont pas applicables dans ce type d'environnement. Le phénomène de trajets multiples, dû aux réflexions subies par les ondes émises par les satellites avant d'atteindre le récepteur, engendre souvent des interférences destructives et des positions erronées en conséquence. En plus, dans le cas de masquage des satellites par des obstacles (p. ex. toits, tunnels), la perte totale de connexion avec le récepteur mène au dysfonctionnement du système. Les systèmes de localisation basés sur la vidéo présentent des solutions intéressantes pour des applications spécifiques. En présence d'éclairage ou en utilisant des caméras avec la vision nocturne associé à des algorithmes de traitement d'images, cette technique est très précise pour les systèmes de surveillance, de détection d'obstacle et d'aide à la navigation. Le coût élevé des équipements de capture et la nécessité de capacités de calcul importantes limitent l'utilisation de cette technique dans des applications grand public. L'intérêt s'est détourné vers les systèmes de localisation en temps réel (Real Time Localization System, RTLS) [Hightower, 2001] basés sur les réseaux de communications sans-fil (Wireless Networks, WNs). Les avancées des technologies de l'information et de la communication durant les dernières décennies soutenues par la présence massive des infrastructures réseaux dans les villes ont permis l'émergence des nouveaux services basés sur la position. Les applications de services géo dépendant (Location Based Service, LBS) pour les individus sont souvent de type commercial ou personnel. Pour une application dans le domaine commercial, une localisation grossière suffit généralement pour acheminer par exemple les annonces/offres aux individus dans le voisinage. Dans les applications personnelles pour l'aide à la navigation ou pour assurer la sécurité des individus, une plus grande précision est requise afin d'atteindre ces objectifs.

1.1 Contexte et problématique

Dans le contexte d'applications grand public, le défi de la radiolocalisation est d'estimer de manière fiable les positions des nœuds mobiles avec le minimum de ressources, idéalement en utilisant les équipements existants tout en réduisant la charge d'entretien.

Les techniques de triangulation se basent sur les mesures des paramètres des signaux reçus (métriques), notamment la puissance, le temps, l'angle et la phase d'arrivée pour estimer la position d'une cible avec un calcul géométrique. Ces techniques sont mieux adaptées pour les conditions de propagation en ligne de vue (Line of Sight, LOS), autrement dit lorsqu'un trajet direct entre l'émetteur et le récepteur existe. Un minimum de trois stations de base avec des positions fixes et connues, prises comme des références, est requis pour estimer par triangulation la position d'une cible équipée d'un dispositif radio. Une synchronisation stricte entre les différentes stations et la cible, toutes munies d'horloges de haute précision, est nécessaire lorsque la mesure du temps d'arrivée du signal (Time of Arrival, TOA) est utilisée pour calculer la distance, spécialement dans des surfaces de localisation réduites. L'angle d'arrivée des signaux (Angle of Arrival, AOA) est mesuré par des antennes sophistiquées, généralement non utilisées dans les infrastructures des WNs. Ces contraintes techniques limitent l'utilisation des deux dernières métriques dans les RTLS en milieux confinés pour des applications grand public. Tel que constaté dans la littérature, la majorité des travaux proposent d'utiliser la puissance de signaux reçus (Received Signal Strength, RSS) en se basant sur les nombreuses modélisations mathématiques proposées pour appréhender le profil de propagation des signaux, difficile à cerner. Cependant la précision de localisation obtenue avec cette métrique est affectée par plusieurs sources d'erreurs internes relatives aux instruments de mesure et externes telles que les bruits et les interférences dans le milieu de propagation. En plus de la position de l'émetteur et la puissance d'émission du signal supposées connues, certains modèles de propagation requièrent des informations additionnelles telles que la hauteur des antennes ou les indices d'atténuation relatifs à la zone d'intérêt.

Depuis deux décennies, les méthodes de localisation de type analyse de situation ont fait le sujet de nombreuses études. La mise en œuvre de ce système consiste à mesurer ou à calculer un comportement spécifique des signaux reçus à un nombre significatif de positions dispersées sur la totalité de la zone de localisation. La signature d'un emplacement est la combinaison unique

d'un ensemble de mesures prises par rapport aux multiples stations de référence existantes. Les signatures relatives à chacun des points d'observation (positions connues) sont sauvegardées dans une banque de données appelée la carte radio de la zone de localisation, durant la phase préparatoire. Lors de la localisation en temps réel, le même type de comportement des signaux reçus par une cible à localiser, est mesuré pour former sa propre signature (empreinte). La signature de la cible est ensuite comparée à celles dans la banque de données à l'aide d'un algorithme de jumelage pour retrouver la plus semblable et en déduire la position de la cible, en supposant que le canal de propagation est stationnaire ou quasi-stationnaire. Le principe général demeure le même, alors que les types de signatures et les méthodes d'estimation de la position proposés sont nombreux. Le temps de calcul est un critère très important pour le choix de l'algorithme de jumelage. Il est toujours sujet d'un compromis entre la taille de la banque de données, le temps de calcul et la précision de localisation. En effet, la précision de localisation dépend du nombre et de l'espacement des points d'observation répertoriés dans la banque de données. À cause du caractère imprévisible de la propagation des signaux et la dynamique du milieu de propagation, des signatures moins sensibles aux changements qui peuvent survenir en temps réel sont aussi importantes que les algorithmes de jumelage pour l'amélioration de la précision.

Plus récemment, la nouvelle technique d'acquisition comprimée (Compressed Sensing, CS) a été appliquée pour capturer une signature compressée de la cible en temps réel. Ensuite, un algorithme de minimisation est utilisé pour retrouver la position de la cible, représentée par un vecteur parcimonieux, dans un temps polynomial. En raison des considérations théoriques intrinsèques à la technique de CS, son utilisation est restée accaparée aux signatures binaires qui considèrent un émetteur et un récepteur à la fois. Autrement dit, une métrique ternaire telle que la différence de temps d'arrivée (Time Difference of Arrival, TDOA) utilisée avec le GPS n'a pas été appliquée avec cette méthode.

Les changements démographiques font augmenter le nombre des agglomérations, multiplier le nombre des bâtiments de grande hauteur et leur nombre d'étages. Le besoin de nouvelles méthodes de localisation fiables et faciles à déployer dans les bâtiments multi-étages (Multi-Floors Building, MFB) se fait de plus en plus sentir. Certains travaux se limitent à l'estimation de l'étage, alors que d'autres divisent le problème en un ensemble de sous-problèmes de localisation pour chacun des étages. Les attentes d'un seul RTLS basé sur l'infrastructure du

réseau sans-fil existante pour estimer simultanément et avec le même niveau de précision l'étage et la position d'une cible dans un MFB sont à combler pour répondre à ce nouveau besoin.

La détection de piétons par les véhicules en mouvement est un défi industriel à l'origine. L'industrie de l'automobile est le secteur industriel le plus avancé sur le plan des techniques de détection de piétons. Continuellement en quête de perfectionnement, les constructeurs automobiles s'intéressent au développement de nouveaux systèmes de sécurité basés sur la géolocalisation (p. ex. système d'anticollision, détection des obstacles et freinage automatique). Toutefois, il s'agit de détecter le piéton dans le champ de perception des capteurs installés sur le véhicule. La localisation des piétons par un RTLS au niveau de l'infrastructure routière (p. ex. une intersection) et la mise à disposition de cette information dans un réseau ad hoc véhiculaire (Vehicular Ad Hoc Network, VANET) est une deuxième alternative en cours d'étude dans le domaine des communications véhiculaires. Pour les systèmes installés au niveau des infrastructures routières, deux approches différentes se présentent, nommément les systèmes de détection de piéton basés sur la vidéo et les systèmes basés sur les technologies de communication sans-fil. La compatibilité supérieure de la deuxième approche avec les nouveaux systèmes de LBS entre autres les applications des systèmes de transport intelligent (Intelligent Transportation System, ITS) utilisant les VANETs [USDOT, 2010b] [TC, 2010], couplée avec la prolifération des assistants numériques personnels et les téléphones intelligents laissent croire à l'avenir prometteur de cette approche. L'exploitation des équipements de télécommunication et les mesures des caractéristiques des signaux échangés entre les différents nœuds sans-fil pour la radiolocalisation, sans nécessiter des équipements dédiés, est un des avantages de cette deuxième approche. Ce travail se situe dans cette lignée.

Les données de positionnement retournées par un RTLS sont des données brutes à exploiter convenablement pour réaliser toute application géo-dépendante. Dans une application d'aide à la navigation ou d'assistance, une deuxième couche logicielle est nécessaire pour livrer les informations utiles à l'utilisateur. Dans une application ITS de sécurité, les considérations pour tirer profit des données de positionnement sont d'autant plus grandes. Les RTLS existants ne sont pas assez fiables et précis pour satisfaire aux exigences des applications de sécurité automobile. Les applications de sécurité dans les nouveaux ITS s'intéressent à l'échange des messages de sécurité, basés principalement sur les données de positionnement géographiques, entre des nœuds se déplaçant avec des vitesses distinctes allant de très faible (piétons) à très

élevée (véhicules) dans un VANET selon les standards de communication établis. En effet, deux scénarios sont à envisager selon les équipements et les capacités de communications des différents nœuds mobiles intervenants. Dans le premier scénario, les piétons disposent des capacités pour communiquer directement dans le VANET. Il s'ensuit de transformer les données de localisation fournies par le RTLS dans un format supporté par le VANET et de définir le schéma de communication qui permet la meilleure performance en terme de taux de réception de paquets (Packet Reception Rate, PRR), de délai de transmission et de congestion du réseau.

Dans le deuxième scénario, les piétons ne disposent pas des capacités de communication dans un VANET. Une station de l'infrastructure est requise pour faire le relai entre les deux technologies de communication, 802.11b (Wi-Fi) et 802.11p (WAVE/DSRC). Les contraintes temporelles sont plus sévères lorsqu'il s'agit d'intégrer différents types de nœuds et de combiner des technologies différentes dans une application de sécurité. L'étude des différentes techniques d'accès, scénarios et schémas de communication possibles selon les standards de communication dans les VANETs est indispensable pour le développement de ces nouveaux systèmes. L'analyse des résultats des études en fonction de différents niveaux de densité du réseau et patrons de mobilité permet d'évaluer les performances possibles et cerner les problèmes à surmonter.

Un RTLS doit satisfaire aux exigences de l'application visée en termes de précision de localisation et du coût alloué. La précision de localisation se trouve souvent altérée par les erreurs internes (équipements de mesure) et externes (p. ex. le bruit). En plus, les phénomènes de propagation des ondes radio (p. ex. variations du canal, présence d'obstacles et propagation multi-trajets) sont difficiles à caractériser, ce qui augmente l'erreur de localisation lorsque la position estimée est calculée en fonction des mesures des signaux reçus. Pour atteindre une meilleure précision, les solutions existantes tendent à employer des équipements sophistiqués dédiés à la localisation (p. ex. infrastructure dédiée, accéléromètre et gyroscope) qui engendrent des coûts supplémentaires. La précision de localisation et le coût du système sont les critères à optimiser, sur lesquels les techniques de localisation ont un impact considérable.

Le présent projet s'intéresse principalement aux RTLS basés sur les réseaux de communications sans fil (p. ex. Wi-Fi, RFID, Bluetooth, téléphonie mobile). Les zones de localisation considérées sont les environnements à deux ou à trois dimensions, intérieurs ou extérieurs

fortement urbanisés. Les deux conditions de propagation en ligne de vue et en absence de ligne de vue sont considérées pour satisfaire aux différents types d'environnements. Un intérêt particulier est accordé à la localisation dans les MFB (estimation de la position et de l'étage d'une cible) vu la tendance de constructions en hauteur dans les grandes villes. En effet, les MFB hébergent des habitations et des lieux de travail dans lesquels une personne passe jusqu'à 80% de son temps.

L'objectif de ce travail est de proposer des techniques de localisation qui permettent de : i) réaliser des RTLS omniprésents et plus adaptés aux applications grand public, ii) améliorer la précision de localisation, iii) minimiser le coût du système en utilisant l'infrastructure sans fil existante et se basant uniquement sur la puissance des signaux, sans requérir d'équipements dédiés à la localisation.

1.2 Solutions proposées

Deux nouvelles méthodes de radiolocalisation sont proposées dans ce projet de recherche dans le but d'améliorer la précision de positionnement des nœuds sans-fil mobiles. Les deux méthodes se basent uniquement sur l'infrastructure des WNs existante sans faire usage d'équipements additionnels pour la localisation. L'autre avantage des deux méthodes proposées, est de permettre un déploiement facile et un minimum de maintenance des systèmes de localisation, des critères très importants pour des applications grand public. Les deux méthodes sont destinées à la localisation dans des milieux intérieurs ou extérieurs urbains, d'étendue limitée, couverts par un réseau sans-fil indépendamment de la technologie de communication.

La première méthode géométrique exploite le phénomène naturel de l'homogénéité du milieu de propagation dans une zone géographique d'étendue limitée à un instant donné. Cette méthode se base sur la compensation entre les puissances de signaux reçus (Compensation Based Localization, CBL) pour estimer la position d'un nœud mobile. La métrique ternaire proposée est le ratio de la puissance de signaux reçus (Ratio of Received Signal Strength, R2S2) à partir d'une paire de stations de base (SB) avec des positions fixes et connues. La métrique proposée permet de simplifier des sources d'incertitude telles que la puissance de transmission effective ou l'élévation de la cible à localiser. De cette manière, l'utilisation de la métrique R2S2 réduit la zone d'incertitude et permet une précision supérieure aux méthodes de triangulation

conventionnelles. En plus, la position de la cible est déterminée par une interpolation simple et rapide.

Cette première méthode a été appliquée avec un système de localisation basé sur la technologie d'identification par radio fréquence (RFID) dans le contexte de propagation en LOS. La méthode est ensuite validée avec les différents modèles de propagation d'ondes électromagnétiques couramment utilisés dans le domaine de communication sans-fil et avec différentes portées.

La deuxième méthode de localisation proposée dans ce travail appartient à la famille des méthodes d'analyse de situation. Ces dernières se basent sur une carte radio préétablie de l'environnement de localisation qui consiste en une banque de données de signatures. La méthode propose d'utiliser les métriques ternaires, telles que la métrique R2S2 proposée par la première méthode ou la TDOA, pour former les signatures de la banque de données. En utilisant ce type de signatures, la banque de données et les mesures en temps réels sont présentées par des tenseurs (tableaux tridimensionnels) et non pas par des matrices et des vecteurs. La méthode proposée diffère des méthodes conventionnelles en appliquant la technique de CS, apparue récemment dans le domaine de traitement de signaux, pour permettre de localiser une cible à partir de sa signature compressée. Un algorithme de minimisation de type relaxation convexe est utilisé pour retrouver la position de la cible représentée par un vecteur parcimonieux, en se référant aux signatures dans la banque de données. La localisation est présentée sous forme d'un problème hautement sous déterminé (mal-posé) où il s'agit de déduire simultanément les positions d'un ou plusieurs cibles à partir d'un nombre réduit de mesures de signaux reçus souvent bruitées. Une procédure d'algèbre multidimensionnel est donnée pour permettre l'utilisation de la technique de CS avec des structures de données tridimensionnelles. La méthode est appliquée et validée en premier lieu dans un environnement de localisation deux-dimensionnel (2D) dynamique avec des variations du canal de propagation et en présence de trajets directs. Ensuite, la méthode est appliquée dans un environnement tridimensionnel (3D) intérieur avec des conditions de propagation en non ligne de vue (Non Line of Sight, NLOS) et en présence de bruit. Les expériences sont menées dans un bâtiment de quatre étages, construit avec différents types de matériaux, en utilisant l'infrastructure du réseau sans-fil existante. La position horizontale (dans l'étage) et verticale (numéro de l'étage) sont déterminées simultanément par le même calcul et avec le même niveau de précision.

Le présent travail traite également le développement d'un système d'évitement de collision au niveau des intersections routières basé sur la localisation des nœuds mobiles (p. ex. piétons). Justement la zone d'intérêt, une intersection routière, est parfaitement adéquate pour le déploiement d'un système de localisation tel que défini dans le troisième chapitre et l'application de la première méthode de localisation CBL.

Vu le grand nombre de points d'accès présents dans les zones urbaines, la création de cartes radio de villes entières est possible de nos jours. Lorsque la carte radio de la zone de l'intersection est disponible, la deuxième méthode basée sur les signatures radio et la technique de CS peut aussi être appliquée pour localiser les nœuds mobiles.

Pour réussir une application de ITS et tout spécialement une application de sécurité routière, deux conditions doivent être remplies : 1) Les positions géographiques des intervenants doivent être déterminées avec un niveau de précision acceptable et ce en temps réel. Autrement dit, les positions doivent être recalculées et rafraichies en permanence selon une cadence proportionnelle à la vitesse de déplacement du nœud mobile. 2) Les données de localisation doivent être diffusées continuellement dans le VANET de façon fiable et dans un délai minimum sans toutefois congestionner le réseau. Une fois les deux conditions satisfaites, il est possible d'envisager des solutions pour prévenir les conducteurs et les piétons du danger qui pourra les menacer et agir en conséquence pour éviter les collisions.

En entrée du système d'évitement de collisions au niveau des intersections routières, les données de positionnement sont supposées disponibles au niveau de chaque nœud dans le réseau, tout en respectant la précision requise. Il est important de noter que cette partie de l'étude porte uniquement sur le deuxième point, à savoir l'échange des informations géographiques entre les différents nœuds dans le VANET. Évidemment, chaque nœud est supposé capable de communiquer directement ou indirectement dans le VANET. Un format spécifique au message de position des piétons, inspiré de celui utilisé dans les systèmes de localisation communs tels que le GPS, est d'abord proposé. Ensuite, deux architectures de systèmes sont proposées: a) un système basé sur la technologie de communications dédiées à courte portée (Dedicated Short Range Communication, DSRC) uniquement avec une architecture piéton-véhicule (P2V), et b) un système hybride basé sur DSRC et Wireless Fidelity (Wi-Fi) avec une architecture impliquant une unité de l'infrastructure (Road Side Unit, RSU) qui joue le rôle de relai entre les

piétons équipés d'unités Wi-Fi et les véhicules équipés d'unités DSRC (P2I et I2V). Ces deux architectures sont étudiées et comparées selon les deux schémas de communication dédiés aux applications de sécurité et celles de service conformément aux standards établis pour l'accès sans-fil dans les environnements véhiculaires (Wireless Access in Vehicular Environment, WAVE). Les quatre combinaisons possibles sont comparées en utilisant un même schéma de mobilité qui considère un nombre significatif de nœuds piétons et véhicules avec des vitesses et des déplacements réalistes. Une étude comparative est dressée pour évaluer la performance de ces systèmes dans le cadre d'une application de sécurité routière en termes de PRR, délai de transmission et saturation du canal, en prenant en compte différents niveaux de densité du réseau. Les effets des choix de canaux et le phénomène d'alternation entre canaux sont analysés à la lumière des résultats des simulations effectuées. L'objectif est d'identifier un modèle de communication fiable qui respecte les délais de transmission exigés par une application sensible au retard, capable de garantir la sécurité de tous les intervenants au niveau d'une intersection routière.

Tableau 1.1 Scénarios de simulation pour le système d'anticollision avec les piétons

Mode d'utilisation WAVE Équipements des piétons	Application de sécurité utilisant uniquement CCH	Application de services utilisant CCH et SCH
Avec unité de communication DSRC	Scénario 1	Scénario 2
Sans unité de communication DSRC	Scénario 3	Scénario 4

1.3 Contributions de la thèse

Les contributions réalisées dans ce projet sont classées en trois groupes. Les principaux apports et avantages de chacune des contributions sont listés ci-dessous.

La première contribution consiste en une méthode de radiolocalisation géométrique basée sur la compensation entre les puissances de signaux reçus, CBL. Les avantages de cette technique sont les suivants :

- La technique se base uniquement sur les mesures de RSS prises par des équipements radio à faible coût. Avec la métrique R2S2 proposée, nul besoin d'utiliser des antennes directives

ni des horloges de haute résolution, facilitant ainsi le déploiement des systèmes qui utiliseront la technique. Aussi, la technique n'exige aucune synchronisation entre les nœuds mobiles ou les stations de base.

- La technique est moins affectée par les variations du milieu de propagation puisque les mesures de RSS ne sont pas directement utilisées pour calculer la distance entre émetteur et récepteur.
- La technique permet d'atténuer les erreurs de positionnement dues à la considération de paramètres fixes dans le modèle de propagation utilisé alors qu'en réalité ces caractéristiques de propagation varient au cours du temps. La métrique R2S2 permet de l'éliminer des sources d'incertitude (p. ex. la puissance de transmission) et exploite l'homogénéité du milieu de propagation à un instant t .
- La technique permet d'estimer la position du nœud cible même lorsque la puissance isotrope rayonnée équivalente (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) est inconnue contrairement aux autres méthodes basées sur RSS telles que la triangulation.
- La technique est applicable avec la plupart des modèles de propagation d'ondes radio permettant l'estimation de la distance entre émetteur et récepteur radio à partir de RSS tout en simplifiant des variables qui représentent des sources d'erreurs.
- La technique permet de réduire l'erreur de localisation (distance entre le centre et le point le plus éloigné de la zone qui délimite la position estimée de la cible) et d'éliminer les cas d'échec (incapacité de localisation).

Toutefois, les deux hypothèses suivantes sont ajoutées pour l'application de cette technique : 1) la cible est supposée équipée d'une antenne omnidirectionnelle (avec un diagramme de rayonnement uniforme). 2) Les gains des antennes des stations de base sont supposés identiques. Étant type de géométrie, la première technique proposée est adéquate pour des conditions de propagation en LOS.

Toujours dans le domaine de la radiolocalisation, la deuxième contribution étend la première en proposant une méthode de localisation de type analyse de situation (analyse de scène) basée sur les signatures radio des signaux et sur la technique de CS pour estimer simultanément les positions d'un ensemble de cibles mobiles. Les principales nouveautés de cette contribution sont les suivantes :

-
- Investigation de l'utilisation d'une carte radio tridimensionnelle formée de signatures calculées avec une métrique ternaire telle que la R2S2 moins sensible à la variation du canal de propagation d'ondes radio.
 - La localisation de nœuds mobiles dans un WN est formulée en tant que problème de recouvrement sous-déterminé. Un algorithme de minimisation de la norme l_1 (pour remplacer la pseudo-norme l_0 qui engendre un problème NP ardu) est utilisé pour retrouver la position d'une cible représentée par un vecteur parcimonieux.
 - Utilisation de la technique de CS pour l'acquisition des signatures durant la phase en temps réel pour améliorer la précision de positionnement principalement lorsque les mesures de RSS sont peu nombreuses ou bruitées.
 - Exposition d'une approche algébrique basée sur les produits tensoriels et la décomposition de tenseurs pour présenter le problème de localisation sous forme d'un problème de minimisation standard selon les règles de la technique de CS.
 - Évaluation de la technique basée sur CS pour des problèmes de localisation dans des environnements 2D et 3D avec et sans conditions de propagation en ligne de vue, en se référant évidemment à une carte radio préétablie selon la métrique R2S2.
 - La technique permet de localiser des nœuds mobiles dans un environnement 3D sans toutefois le décomposer en un ensemble de sous-problèmes 2D. Justement, un MFB est traité dans le problème de localisation en tant qu'une entité cohésive et non la superposition des différents étages.
 - Étude de la possibilité d'appliquer la technique sans modification avec la métrique de TDOA, une des plus utilisées pour la radiolocalisation.
 - Validation de la méthode par des simulations et des expérimentations conduites dans un MFB réel pour évaluer la fiabilité de la nouvelle technique, constater l'amélioration en termes de précision et temps de calcul et juger de sa performance face aux variations du milieu de propagation au cours du temps et face aux bruits.

Le temps de calcul nécessaire par cette méthode, nettement supérieur à la seconde, représente la limitation de cette deuxième méthode. Toutefois, plusieurs solutions sont envisageables pour contourner cette limitation mais qui ne sont pas traitées dans ce travail.

Deux demandes de brevets ont été déposées dans le cadre de ce travail. Le premier brevet porte sur la nouvelle méthode de localisation basée sur la technique de CS 3D avec des métriques ternaires des signaux reçus. La méthode est applicable pour la localisation 2D et 3D dans des environnements intérieurs et extérieurs avec différentes technologies de communication sans-fil. Le deuxième brevet propose un nouveau système pour éviter les collisions entre piétons et véhicules. Ce projet présente un prototype pour tout système de détection des objets mobiles (p. ex. enfant ou piéton vulnérable) à proximité des véhicules (p. ex. autobus, camions, sache neige, machinerie lourde). Le système se base sur la nouvelle technique de compensation des puissances des signaux reçus et sur la technologie RFID pour la localisation des cibles. L'objectif du système est d'alerter les conducteurs de véhicules lourds de la présence des piétons dans les angles morts ou en conditions de vision défavorables dans le but d'éviter les accidents.

Dans le but de valider les RTLS basés sur les technologies de communication sans-fil dans les milieux urbains, ce travail étudie la performance d'un système d'évitement de collision au niveau des intersections routières basé sur la localisation des nœuds mobiles. La troisième contribution s'intègre dans le domaine de communication dans les réseaux véhiculaires pour les applications de sécurité dans ITS. Les détails de cette contribution sont les suivants :

- Un format de trame spécifique aux données de positionnement des piétons et des cyclistes est proposé.
- Deux architectures pour un système de sécurité routière permettant d'éviter les collisions avec les piétons sont étudiées et comparées; i) Évaluation d'une architecture dans laquelle les piétons disposent des équipements de communication DSRC et interagissent directement dans le VANET. ii) Évaluation d'une architecture où une RSU est nécessaire pour acheminer, dans les deux sens, les données entre le VANET et le réseau qui permet de connecter les piétons et la RSU, sachant que chaque réseau utilise une technologie de communication sans-fil différente.
- Deux types d'utilisations du standard WAVE sont étudiés; Dans le premier cas, uniquement le canal de contrôle (Control Channel, CCH) est utilisé comme c'est le cas pour les applications de sécurité. Dans le deuxième cas, un canal de service (Service Channel SCH) est utilisé, ce qui implique la nécessité de commutation en alternance entre le CCH où le service est annoncé et un SCH où les messages sont diffusés.

-
- La performance de chacune des combinaisons est étudiée à travers les simulations, tout en faisant varier les paramètres en entrée, notamment la priorité des messages, la fréquence d'envoi de messages, la portée de communication et la densité des véhicules par kilomètre de route. La fiabilité de la communication est évaluée principalement en termes de PRR et les délais de livraison des messages.
 - Les conclusions tirées de cette étude permettent d'orienter le choix de l'architecture du système et du mode d'utilisation du standard WAVE selon les exigences de l'application ITS impliquant des piétons.

La thèse est structurée comme suit : Le chapitre 2 est subdivisé en deux parties. La première partie présente l'état de l'art de la radiolocalisation. La deuxième partie est une introduction aux VANETs et ITS. La description de la première méthode de localisation géométrique proposée dans ce travail et les résultats obtenus sont introduits dans les chapitres 3 et 4. Le chapitre 3 est un article de conférence intitulé "Received Signal Compensation-Based Position Estimation of Outdoor RFID Nodes" qui explique le principe de la méthode CBL utilisée pour la localisation des nœuds RFID. Le chapitre 4 est un article de conférence intitulé "Wireless Technology Agnostic Real-time Localization in Urban Areas" qui applique et évalue la performance de la même méthode avec différents modèles de propagation des ondes radio. La deuxième méthode de localisation basée sur les signatures radio de type R2S2 et sur la technique de CS pour l'estimation de la position est présentée et discutée sur deux chapitres : Le chapitre 5, sous la forme d'article de conférence qui a pour titre "3D Compressive Sensing for Nodes Localization in WNs Based On RSS", expose la méthode et démontre son intérêt pour la localisation dans les environnements 2D. Les performances et les principaux résultats obtenus avec cette méthode appliquée pour la localisation dans les environnements 3D confinés, notamment dans les MFBs, sont présentés dans l'article de revue ayant comme titre "Three Dimensional Compressed Sensing for Wireless Networks-based Multiple Node Localization in Multi-Floor Buildings" qui constitue le chapitre 6. L'importance de la radiolocalisation et les enjeux liés au développement des applications ITS de sécurité routière basées sur les VANETs sont abordés dans le chapitre 7 qui consiste en un article de conférence intitulé "Pedestrian Collision Avoidance in Vehicular Networks". Les conclusions sont données dans le chapitre 8 qui vient clore cette thèse.

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

2.1 La localisation dans les réseaux sans-fil

Les débuts de la radiolocalisation se font dans le domaine militaire à la fin des années 50 pour localiser les troupes militaires dans des milieux inconnus et sur les champs de bataille. La radiolocalisation a révolutionné la navigation grand public suite à l'autorisation d'exploiter les signaux transmis par les satellites du GPS pour les applications civiles. Cette décision a permis à toute personne, qui dispose d'un récepteur de ces signaux, une facilité de navigation sur la terre, dans la mer et les airs avec une précision de l'ordre de quelques mètres. Depuis, les techniques de radiolocalisation et leurs applications ont progressé énormément. De nos jours, les RTLS offrent aux utilisateurs des terminaux sans-fil une large gamme de services personnalisés selon leurs positions géographiques. Ces LBS répondent à des besoins variés dans différents domaines. Les principaux services sont l'assistance à la navigation, la localisation et la surveillance des individus et des biens dans les milieux ruraux/externes et plus récemment dans les espaces urbains/confinés tels que les hôpitaux et les aéroports. La radiolocalisation est à la base des nouvelles applications de sécurité telles que l'assistance aux personnes vulnérables, la localisation des utilisateurs en situation d'urgence afin d'accélérer leurs secours et la prévention des accidents/collisions sur les routes, étudiée par les nouveaux ITS. Dans le domaine commercial, il s'agit généralement d'acheminer aux abonnés des informations concernant des services et/ou des offres commerciales dans leur voisinage. Dans le domaine industriel, la radiolocalisation est utilisée dans le but d'améliorer le processus de gestion et de contrôle en localisant continuellement les ressources humaines, les biens ou du matériel dans les milieux de travail tels que les usines, les chantiers ou sur les routes. Dans le domaine militaire, les applications de localisation sont cruciales pour tout genre d'interventions terrestres, maritimes et aériennes. Dans le domaine des WNs, spécialement pour les réseaux mobiles, la radiolocalisation est utilisée pour optimiser la diffusion des données selon les positions des nœuds sans-fil mobiles. La radiolocalisation est aussi un sujet d'importance pour la recherche

scientifique telle que la robotique pour permettre aux robots de réagir et de se déplacer dans un environnement de manière autonome.

Les techniques de radiolocalisation ont été initialement dédiées aux milieux externes et ouverts. La prolifération des WNs et l'évolution des terminaux sans fil mobiles (téléphones intelligents et assistants digital personnels) ont accéléré les travaux de recherche pour appliquer la radiolocalisation non-GPS dans les milieux intérieurs (confinés) et urbains. Ce projet de recherche s'intéresse aux techniques de radiolocalisation dans les milieux confinés et urbains en utilisant les WNs. Une revue des principales méthodes de radiolocalisation existantes est présentée dans la première partie de ce chapitre. Les critères des systèmes de localisation et les différentes technologies applicables sont présentés. Le principe général de fonctionnement, les méthodes de calcul, les métriques et les équipements utilisés par chaque méthode sont exposés. L'accent est mis sur le niveau de précision et la performance de localisation présentement disponibles et identifie les limitations et les difficultés, auxquelles le présent travail propose des solutions alternatives pour contribuer à les surmonter.

2.2 Critères des systèmes de localisation

2.2.1 Environnement de localisation

Les systèmes de localisation sont adaptés à la nature de l'espace d'intérêt et à ses dimensions. Deux principaux types d'environnements sont identifiés ; 1) espaces ouverts avec des conditions de propagation en LOS, où un trajet direct est généralement existant, 2) espaces confinés avec des conditions de propagation en NLOS et en présence du phénomène de propagation multi-trajets occasionnées par les obstacles. Les techniques de triangulation sont plus adaptées aux environnements extérieurs et de longue étendue. Les systèmes de géolocalisation satellitaires fournissent une précision et une disponibilité adéquates dans les zones rurales et faiblement urbanisées. Dans les zones confinées ou fortement urbaines, la majorité des systèmes se basent sur les infrastructures des WNs existantes ou déployées pour cette activité. Les techniques basées sur l'analyse de situation sont les plus couramment utilisées dans les espaces confinés. La localisation consiste souvent à déterminer la position d'une cible dans un espace à deux dimensions, l'élévation semble relever de l'évidence (p. ex. surface de la terre). Dans certaines situations, l'estimation de l'élévation est aussi importante que les coordonnées horizontales. Il

s'agit alors d'un espace de localisation 3D tel que le cas de localisation dans les MFBs.

2.2.2 Précision de localisation

Selon la nature de l'application et les dimensions de la zone d'intérêt, la précision requise peut varier entre quelques centimètres et des dizaines voire des centaines de mètres. Une précision de l'ordre de trois mètres est excellente pour localiser une personne ou un objet dans une ville. Alors que ce même niveau de précision est inacceptable dans une application permettant à des robots de se déplacer de manière autonome dans une maison. La précision dépend aussi des équipements utilisés pour la localisation. Un système qui utilise des outils additionnels de détection de mouvement (accélération ou rotation) permet une meilleure précision qu'un système basé uniquement sur la puissance ou le temps d'arrivée des signaux par exemple. Toutefois, la précision retournée par les RTLS basés sur les technologies sans-fil est le critère à améliorer pour répondre à des exigences plus sévères, d'où le grand nombre de travaux qui s'intéressent à ce problème.

2.2.3 Localisation ascendante ou descendante

Deux approches différentes sont possibles pour implémenter les systèmes de localisation. Dans l'approche ascendante, le nœud mobile émet des signaux qui seront captés et analysés par des stations de référence. Ces données seront ensuite convergées vers une station centrale qui se charge du calcul de la position. Les techniques de localisation basées sur la triangulation à partir de la mesure de l'AOA des signaux utilisent cette approche. Dans l'approche descendante, le mobile reçoit des signaux venant des stations de référence qu'il interprète à son propre niveau pour calculer sa position. Le GPS utilise cette approche. De façon générale, les systèmes et les techniques de localisation peuvent être implémentées selon l'une ou l'autre approche. Toutefois, une étude sur l'adéquation des deux architectures de localisation est à prendre en compte. Dans l'architecture descendante, le calcul de la position s'effectue sur une plateforme embarquée avec les équipements du nœud mobile. Il est donc nécessaire de : 1) équiper cette plateforme d'un processeur et d'un espace mémoire suffisant pour effectuer les calculs nécessaires et assurer son autonomie en énergie, 2) réduire le volume de données à traiter et la complexité des algorithmes de localisation pour diminuer le temps de calcul de la position, la plus proche possible de la position courante du nœud mobile.

2.2.4 Position absolue / position relative / position symbolique

La position absolue est définie en termes de latitude, longitude et altitude. Ces coordonnées permettent de référencer universellement une position géographique sur la terre. La position relative permet de positionner un objet par rapport à des positions de référence. La position relative est définie par des coordonnées dans un repère cartésien généralement orthonormé et centré sur le point bas gauche de la zone d'intérêt. Ce dernier type est très utilisé dans les environnements confinés et il est souvent plus significatif que la position absolue pour certains types d'application (p. ex. localisation d'un robot dans son environnement ou localisation d'un objet dans un entrepôt). Une position symbolique est représentée par une région sémantique, une zone significativement plus petite que la totalité de la zone d'intérêt qui remplit une fonction différente de ces voisines. Selon l'application, le type de position sélectionné doit permettre de porter l'information utile et satisfaisante pour la localisation.

2.2.5 Ressources

Coût : Les coûts de déploiement et d'entretien des RTLS dans les milieux confinés non GPS sont très variés. Les systèmes les moins coûteux sont ceux basés sur l'infrastructure existante, où les cibles sont supposées équipées de dispositifs radio adéquats. L'utilisation d'une infrastructure dédiée ou des équipements sophistiqués (p. ex. gyroscope, accéléromètre, caméra ou des capteurs laser) améliore la précision de localisation mais augmente le coût du système. Le type de la méthode de localisation utilisée influence aussi le coût total de la solution. Par exemple, le coût d'entretien des systèmes basés sur les méthodes géométriques est moins élevé que ceux basés sur l'analyse de situation.

Les deux critères suivants sont plus critiques du côté du nœud mobile dans une approche de localisation descendante.

Énergie : Lorsque le RTLS s'appuie sur des équipements sophistiqués (p. ex. odométrie) embarqués sur la plateforme du nœud mobile, une attention particulière doit être portée à l'égard de ressources en énergie disponibles. Les RTLS basés uniquement sur la communication sans-fil représentent une alternative pour minimiser la consommation d'énergie de manière qu'elle soit assurée par des batteries ou des plaques solaires.

Capacité et temps de calcul : De manière similaire, lorsque le calcul de la position s'effectue au niveau du nœud mobile, la plateforme doit disposer d'un processeur et d'une mémoire suffisante pour traiter les données et exécuter les calculs nécessaires. Les méthodes géométriques utilisées par les RTLS basés sur les WNs sont simples et rapide à exécuter. Les méthodes probabilistes, utilisées comme algorithmes de jumelage avec les méthodes d'analyse de scène, sont plus complexes. La réduction de l'ordre de complexité du calcul est avantageuse en termes de capacités de calcul et temps de calcul. En effet, une fréquence de localisation supérieure ou égale à 1Hz améliore la performance de poursuite des cibles mobiles.

2.2.6 Avantages et limitations

Ci-dessous les principaux avantages et inconvénients d'un RTLS basé sur l'infrastructure du WN existante, de manière générale et sans considérations spécifiques par rapport à l'environnement ou les paramètres des signaux utilisés pour la localisation.

Les avantages :

- Un système omniprésent, non intrusif et de faible coût qui promet un déploiement effectif pour les applications grand public. La profusion des WNs dans les lieux publics et la popularité des téléphones intelligents appuient cette hypothèse et étendent la disponibilité du service.
- Facilité d'intégrer ce système de localisation avec les applications utiles telles que les LBS et les applications ITS.
- Le système est indifférent à l'éclairage du site (jour ou nuit) et peu influencé par les conditions météorologiques.
- Disponibilité des modèles de propagation d'ondes pour différents types d'environnements et pour plusieurs technologies sans-fil selon la fréquence et la puissance d'émission considérées.
- Potentiel d'obtenir une précision satisfaisante à plusieurs applications avec un minimum de ressources.

Les inconvénients :

- Le système détecte seulement les nœuds qui disposent d'équipements fonctionnels capables de communiquer avec le réseau sans-fil, contrairement aux systèmes existants (p. ex. Radar,

LiDAR, GPS) qui permettent de localiser tout objet fixe ou mobile dans le champ de perception.

- Le système dépend de l'existence du réseau sans-fil, contrairement aux réseaux satellitaires qui couvre la totalité de la terre.
- Les méthodes géométriques retournent des résultats imprévisibles lorsqu'un obstacle se met sur le trajet direct entre émetteur et récepteur.
- Les modèles de propagation se basent sur des paramètres de propagation d'ondes dans le site, considérés connus à priori, mais qui peuvent changer au cours du temps.
- La performance du système de localisation diminue dans les conditions d'environnements trop dynamiques et de propagation multi-trajets sévère.

Plusieurs travaux de recherche s'intéressent à l'étude de ces trois derniers problèmes afin de réduire leurs effets négatifs et d'accroître l'efficacité du système de localisation.

2.3 Systèmes de localisation et technologies sans-fil

Les nombreux systèmes de localisation disponibles à présent reposent sur des technologies très hétérogènes. Le choix de la technologie dépend du type de milieu et affecte la granularité du système. Les systèmes présentés dans cette section sont divisés en deux groupes : 1) les systèmes classiques qui nécessitent une infrastructure et des équipements dédiés à la localisation. L'utilisation des informations de positions obtenues par un tel système dans les applications de LBS nécessite généralement de passer par une interface. 2) les systèmes de localisation basés sur les technologies de communications sans-fil. L'avantage de ce type est l'exploitation de l'infrastructure existante pour la localisation. En plus, il est plus simple d'utiliser directement les positions calculées dans des applications de LBS basées sur la même technologie sans-fil.

2.3.1 Les systèmes de localisation classiques

Le système de positionnement GPS [DoD, 2008] est le système de localisation basé sur les réseaux satellitaires le plus utilisé. Le système GPS est initialement conçu par le département de la défense des États-Unis. Il repose sur un réseau de 24 satellites à 20000Km d'altitude de la terre et permet de calculer la position et l'altitude d'un mobile à chaque seconde partout dans le monde avec une précision de l'ordre de 10 mètres. Deux autres systèmes basés sur un réseau satellitaire existent; le système russe GLONASS (GLObal Navigation Satellite System) et le projet civil européen en cours GALILEO, développé pour améliorer la précision du positionnement jusqu'à 1 mètre. Les limites de ce type de systèmes sont principalement la perte de connexion dans les zones urbaines et à l'intérieur des bâtiments. Également, leur degré de précision est inférieur à la limite requise dans certaines applications. De par l'incertitude sur la réception du signal ainsi que la précision de ces systèmes dans les milieux confinés et urbains, ceux-ci sont inadéquats par exemple pour une application d'évitement de collisions avec les piétons dans une zone urbaine (à proximité des immeubles) dans le contexte de ITS.

RTLS basés sur l'Infrarouge : Active Badge proposée par [Want, 1992] est un des systèmes les plus connus. Il est basé sur l'utilisation d'une étiquette qui émet un identifiant unique à chaque 15 secondes. La communication entre étiquette et les senseurs est assurée par des signaux infrarouges avec une portée de 10 mètres. Ce système est utilisé dans un environnement intérieur et permet seulement de détecter le mobile dans une zone de petite dimension.

RTLS basés sur l'Ultrason : Les systèmes de localisation basés sur les ondes ultrasoniques actuels peuvent atteindre une précision de l'ordre de quelques centimètres sur une plage de 50 mètres dans un environnement intérieur. Un exemple d'un tel système est Active Bat proposé par [Harter, 2002], pour fournir une plus grande précision qu'Active Badge. Chacune des cibles à localiser est équipée d'un émetteur-récepteur ultrasonique portable (5x3x2cm, 35g), avec un identifiant unique, appelé Bat. Un réseau de récepteurs ultrasoniques avec des positions connues, continuellement synchronisés à travers un réseau câblé, est déployé dans la zone de localisation. Une station de base envoie une interrogation RF à chaque Bat lui demandant de s'identifier. Quand un Bat reçoit son interrogation, il répond avec une impulsion ultrasonique. Les récepteurs reçoivent l'impulsion à des moments différents et enregistrent le temps d'arrivée. La position du Bat est calculée en se basant sur le temps d'arrivée des signaux ultrasoniques

sachant la vitesse du son dans l'air. Le système attend un intervalle prédéterminé pour permettre aux échos ultrasonores de périr avant la prochaine interrogation des Bats. Cricket-MIT [Priyantha, 2000] est un autre exemple basé sur l'ultrason, moins onéreux mais moins précis qu'Active Bat.

RTLS basés sur RFID : Les RTLS basés sur la technologie RFID [Zhou, 2009] active sont généralement composés de plusieurs interrogateurs fixes et de transpondeurs actifs portés par les cibles mobiles. Le système de localisation Landmark retourne une erreur de localisation inférieure à 2m dans un environnement intérieur de 4x9m avec 4 lecteurs RFID et 16 étiquettes de références [Ni, 2004]. Le système SpotON [Hightower, 2000], basé sur RSS et un modèle d'atténuation des ondes radio, permet une précision approximative de 3m dans des environnements intérieurs. D'autres solutions commerciales plus sophistiquées permettent actuellement une précision de 1m.

2.3.2 Les systèmes de localisation basés sur les réseaux sans-fil

RTLS basés sur les réseaux de téléphonie mobile : Ils sont basés sur les réseaux cellulaires tels que GSM, GPRS et UTMS. Deux techniques de localisation sont généralement utilisées avec les réseaux cellulaires. La première technique dite CELL-ID consiste à l'identification de la cellule dans laquelle se trouve l'utilisateur mobile et ainsi limiter son emplacement dans une zone de l'ordre de 1 kilomètre carré. La deuxième technique est la triangulation basée sur le temps ou la puissance des signaux reçus pour localiser l'utilisateur d'un téléphone cellulaire dans les environnements extérieurs avec une précision de l'ordre de quelques dizaines de mètres.

RTLS basés sur Wi-Fi 802.11 : Ce type de système est perçu comme une solution économique et robuste dans les environnements intérieurs tirant profit de l'infrastructure déjà existante. Le système RADAR proposé par [Bahl, 2000] se base sur l'infrastructure du réseau sans fil local (Wireless Local Area Network, WLAN) Wi-Fi 802.11b existante dans l'espace de localisation. L'objectif de ce système est de localiser une cible mobile (un utilisateur avec un dispositif de communication équipé d'une carte réseau 802.11b), qui se déplace dans le bâtiment, à partir des mesures des puissances de signaux reçus au niveau des points d'accès.

La technique basée sur les empreintes (*Fingerprinting*) est très utilisée avec la technologie Wi-Fi et permet d'atteindre une précision de l'ordre de 3 mètres. Une autre solution commerciale

proposée par Ekahau [Ekahau, 2015] est basée sur la technique de *Fingerprinting* avec une deuxième phase probabiliste et offre une précision similaire à celle du RADAR.

La précision peut s'avérer insuffisante pour certaines applications mais des améliorations sont attendues vu le nombre de recherches qui portent sur la localisation basée sur les réseaux locaux sans-fil.

RTLS basés sur Bluetooth : Ce type de réseau a été initialement conçu pour les connexions sans-fil de courte portée pour une utilisation personnelle (Wireless Personal Area Network, WPAN). Il opère aussi dans la bande ISM 2.4GHz. Avec la vaste utilisation du Bluetooth pour la transmission sans-fil de données avec des appareils portatifs, quelques recherches ont proposé des solutions de RTLS basés sur cette technologie [Ferro, 2005]. Similaire à Wi-Fi, Bluetooth permet d'atteindre une précision de quelques mètres en se basant sur la mesure du RSS.

RTLS basés sur UWB (Ultra Wide Band) : [Cramer, 2002] Le terme ultra large bande réfère au développement de la transmission de données par des impulsions de radio fréquences de durée extrêmement courte (quelques centaines de picosecondes à quelques nanosecondes). Par conséquence, elle est moins sensible aux trajets multiples. La bande de fréquences s'étend entre 3.1 GHz à 10.6 GHz en Amérique du nord. Avec ces courtes transmissions, la puissance moyenne transmise est extrêmement petite. Ceci permet une économie de la consommation de la batterie et moins de probabilité d'interférence avec les autres systèmes à proximité. L'UWB peut également être utilisée pour le positionnement de mobiles de manière similaires aux autres RTLS décrits précédemment. Le système Sapphire DART [DART, 2007] propose un RTLS avec une portée de lecture de 200 m en champs de vision et de 50 m à travers des obstacles. Il offre une précision de localisation de l'ordre de 30cm. Le système commercial Ubisense basé sur UWB atteint une précision similaire.

La localisation utilisant les réseaux de capteurs (Wireless Sensor Network, WSN) : Les progrès conjoints de la microélectronique et les technologies de communication sans-fil ont permis de produire à coût raisonnable des micros capteurs susceptibles de fonctionner en réseaux, sans compromettre à la performance. Un capteur sans fil est composé de deux unités; i) une unité de captage chargée de capter des grandeurs physiques (p. ex. chaleur, humidité, vibrations, rayonnement) et de les transformer en grandeurs numériques, ii) une unité de traitement informatique et de stockage de données et un module de transmission sans fil. Le

déploiement de plusieurs d'entre eux, en vue de collecter et de transmettre des données environnementales vers un ou plusieurs points de collecte, d'une manière autonome, forme un WSN. Plusieurs systèmes de localisation basés sur les WSN ont été proposés dans la dernière décennie pour l'auto localisation d'objets et d'individus dans une diversité d'applications dans le domaine environnemental, de santé et plus récemment dans les ITS [Cheng, 2012]. Justement, la nouvelle classe de capteurs sans fil suscite aussi l'intérêt de la communauté ITS à cause de leurs prix de plus en plus bon marché, leur miniaturisation et leur faible consommation énergétique. Les informations échangées dans les réseaux mobiles et véhiculaires seront idéalement collectées et transmises par ces WSN, permettant de capter et de diffuser différents types de phénomènes reliés au trafic routier tels que: - Condition de la route (p. ex. verglas, nid de oiseau) - Condition du trafic (p. ex. congestion, accident) - Condition du véhicule (p. ex. panne du système de freinage, roue aplatie) - Condition actuelle (p. ex. manœuvre du conducteur du véhicule proche, mouvement d'un piéton, présence d'un obstacle) - Condition future (p. ex. risque de collision ou de glissement).

Les méthodes de localisation présentées dans les sections suivantes sont regroupées sous trois catégories principales: méthodes géométriques, méthodes de proximité et méthodes d'analyse de situation.

2.4 Méthodes de localisation géométriques

Les méthodes de localisation géométriques se basent directement sur les paramètres de propagation des ondes électromagnétiques pour calculer la distance entre émetteur et récepteur. Les modèles de propagation et les lois de calcul utilisés sont fondés sur l'observation des phénomènes de propagation d'ondes radio dans l'espace. Avant d'aborder ces méthodes de localisation, il convient de présenter un bref survol des principaux phénomènes et mécanismes de propagation des ondes radio.

2.4.1 Propagation des ondes radio

L'étude approfondie du canal de transmission et des mécanismes de propagation associés est indispensable au développement des systèmes de communication sans-fil. La propagation dépend de plusieurs variables telles que la longueur d'onde, la puissance d'émission, les dimensions de l'environnement, les bruits, les caractéristiques et les tailles des obstacles susceptibles de perturber les ondes électromagnétiques.

Phénomènes et mécanismes de propagation des ondes radio

Un trajet en ligne de vue entre l'émetteur et le récepteur est obtenu quand la zone appelée premier ellipsoïde de Fresnel est dégagée de tout obstacle. La forme générale de cette zone est $EP + PM \leq EM + n \lambda/2$, avec E et M les foyers de l'ellipsoïde qui coïncident avec les positions des deux antennes, λ la longueur d'onde et n l'ordre de Fresnel. Le rayon (r) de l'ellipsoïde est défini en tout point P par : $\sqrt{\lambda d_1 d_2 / d_1 + d_2}$ pour $n = 1$ où d_1 et d_2 sont les distances (Km) qui séparent le point P de l'émetteur et du récepteur, respectivement. La zone de Fresnel est illustrée à la figure suivante.

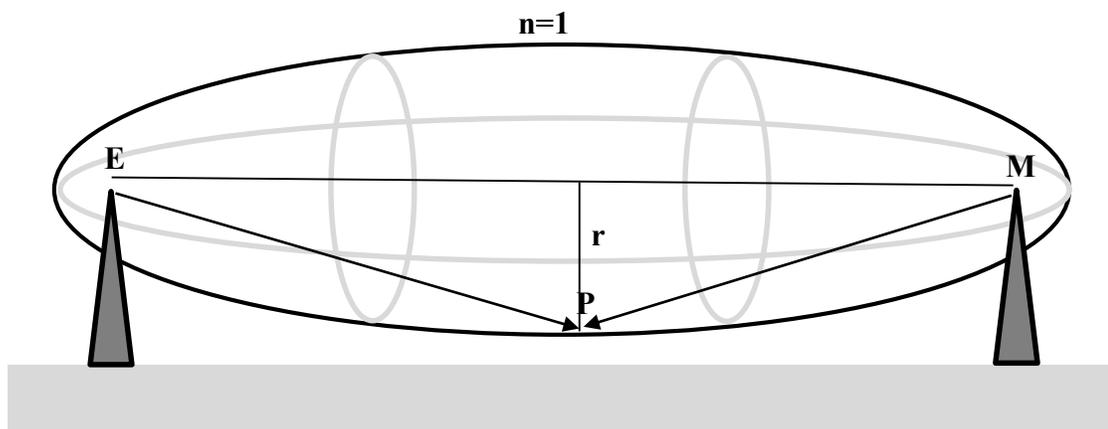


Figure 2.1: Zone de Fresnel

Les phénomènes régissant l'interaction de l'onde avec l'environnement, ou encore les mécanismes physiques de la propagation les plus significatifs dans le contexte des communications sans-fil sont les suivants :

Réflexion : ce phénomène survient lorsque l'onde heurte un obstacle de dimensions très grandes par rapport la longueur d'onde. Lorsque l'obstacle est lisse et conducteur, l'onde est partiellement réfléchi dans son milieu de propagation initial.

Réfraction : Dans les mêmes conditions que la réflexion, l'interaction de l'onde avec l'obstacle engendre aussi une onde réfractée qui se propage à l'intérieur de l'obstacle mais avec une direction différente. La réfraction se produit aussi dans des milieux hétérogènes avec des indices de réfraction différents. Les phénomènes de réflexion et de réfraction sont décrits par la loi de Snell-Decartes.

Diffraction : ce phénomène se produit lorsque l'onde rencontre un obstacle (ou une ouverture) de dimensions comparables à la longueur d'onde ou interagit avec des formes pointues. La diffraction est le résultat de l'interférence des ondes dispersées par les multiples pointes de l'obstacle (considérées comme des sources secondaires). Ce phénomène permet aux ondes de se propager dans des zones d'ombres et d'atteindre les récepteurs en NLOS. Le phénomène est décrit par le principe de Huygens-Fresnel utilisé en optique.

Diffusion : ce phénomène peut être interprété comme le résultat de la superposition d'un très grand nombre de phénomènes atomiques et moléculaires. La diffusion se produit lorsqu'une onde rencontre un grand nombre d'obstacles regroupés ou séparés avec des dimensions inférieures ou égales à la longueur d'onde sur son chemin. En conséquence, l'onde se propage par plusieurs chemins avec des atténuations différentes, donnant lieu au phénomène de propagation multi trajets.

Absorption : le phénomène par lequel tout milieu (matériau) atténue une onde électromagnétique qui le traverse. L'énergie électromagnétique absorbée est convertie en d'autres formes d'énergie telle qu'en chaleur (effet de Joule). L'absorption électromagnétique varie en fonction de la longueur d'onde et des caractéristiques de chaque milieu (indice d'absorption). L'énergie absorbée résulte à une atténuation du signal dans la direction de propagation.

Bruit radioélectrique : le bruit est l'ensemble des perturbations qui diminuent la qualité de transmission des signaux utiles. Il s'agit de bruits externes dont l'origine est le canal de propagation et de bruits internes dus à la perturbation dans les dispositifs électroniques du

récepteur. La qualité de transmission d'un canal est quantifiée par l'indicateur du rapport signal bruit (Signal Noise Ratio, SNR).

Perte en chemin : ce mécanisme est appelé aussi l'atténuation ou l'affaiblissement de parcours. Dans des conditions de propagation en espace libre, les pertes de puissance sont inversement proportionnelles au carré de la distance d qui sépare l'antenne de l'émetteur de celui du récepteur. Dans les milieux de propagation réels, la puissance p du signal décroît proportionnellement à la distance suivant la relation $P \approx \frac{1}{d^n}$ avec n l'indice d'atténuation du milieu, généralement compris entre 2 et 5.

Les modèles de propagation des ondes radio

Un grand nombre de modèles de propagation a été proposé dans la littérature pour simuler les canaux de propagation et estimer les pertes en chemin pour différents types d'environnements. Un modèle de propagation des ondes électromagnétique est une combinaison intrinsèque de deux composantes. La première est reliée à la technologie de communication sans-fil utilisée. Il s'agit des caractéristiques des ondes électromagnétiques telles que la fréquence, les gains des antennes et les pertes du système. La deuxième composante correspond aux caractéristiques de propagation du milieu. En effet chaque environnement a un indice de perte qui lui est propre, appelé coefficient d'atténuation du milieu de propagation, généralement déterminé de manière expérimentale. En plus, dans certains modèles plus réalistes, des indices de perte selon les types et le nombre d'obstacles existants enrichissent le modèle. À cause de l'impossibilité de modéliser fidèlement le phénomène de propagation, une variable aléatoire vient généralement s'ajouter au modèle pour quantifier l'erreur à considérer en appliquant le modèle. Cette variable aléatoire, relative à l'effet d'ombrage fait varier l'atténuation (affaiblissement), est définie par une moyenne et un écart type déterminés expérimentalement par une série représentative de mesures réelles entre émetteur et récepteur séparés par une distance constante dans l'environnement considéré.

Les modèles de propagation sont communément classés en trois catégories; déterministes, empiriques et semi-empiriques. Les modèles déterministes s'appuient sur les lois fondamentales de la physique et servent généralement de modèles de référence. Les modèles semi-empiriques combinent une formulation analytique des phénomènes physiques (réflexion, diffraction, diffusion) et un ajustement statistique à l'aide de mesures expérimentales. Ces deux derniers

nécessitent la prise en compte des caractéristiques de l'environnement (topographie, occupation du sol, contours des bâtiments, axe de rue, bases de données géographiques). Les modèles empiriques sont basés sur l'analyse d'un grand nombre de mesures expérimentales en fonction de certains paramètres tels que la fréquence, la distance, la hauteur des antennes. Ce dernier type suscite l'intérêt des recherches en radiolocalisation dans les milieux confinés et urbains dynamiques vu le grand nombre de paramètres et la diversité des situations à prendre en compte avec les deux premiers types de modèles. De nombreux modèles empiriques ont été proposés pour une multitude de conditions et technologies telles que: i) les types (intérieur, extérieur, avec et sans obstacles) et dimensions de l'environnement (de quelques dizaines de mètres jusqu'à plusieurs kilomètres), ii) caractéristiques techniques et élévations des antennes (1 à 60 mètres), iii) bandes de fréquences des signaux (900MHz-1500MHz, 2.4GHz-5.8GHz et jusqu'à 60GHz). Sachant qu'un tel modèle est applicable dans des conditions similaires à celles présentes lors du développement du modèle.

Plusieurs modèles sont basés sur des résultats expérimentaux obtenus dans des villes tels que les modèles d'Okumura et Hata établis sur des données collectées à la ville de Tokyo. Le modèle d'Okumura est appliqué avec les réseaux cellulaires opérants dans la bande de fréquence allant de 200 jusqu'à 1920MHz dans des environnements urbains. La modélisation du canal de transmission décrit la perte en chemin en fonction de la perte en espace libre, fréquence d'opération, la distance qui sépare l'émetteur du récepteur, les gains et les hauteurs des antennes ainsi que des facteurs d'atténuations propres de l'environnement. D'autres modèles ont été proposés pour les environnements extérieurs avec des conditions particulières : Le modèle Walfish-Ikegami tient en compte la hauteur moyenne des toits, la distance moyenne entre les bâtiments et la largeur moyenne des rues dans sa formulation des pertes en chemin en fonction de la distance et de la fréquence. Le modèle de Weissberger définit la perte en chemin due à la présence des feuillages et de végétations, en fonction de la fréquence du signal et de la distance entre émetteur et récepteur.

De nombreux modèles étaient destinés spécifiquement à la bande de fréquence de 2.4GHz (Wi-Fi) et 5.8GHz [Green, 2002]. Les expériences étaient menées dans des milieux confinés de tout genre (bâtiments, corridors, tunnels) et dans des zones fortement urbaines, sous différentes conditions (LOS, NLOS).

Les modèles de propagation sont utilisés dans la radiolocalisation pour déduire la distance entre un émetteur et un récepteur à partir de RSS. En plus de la métrique RSS, les métriques basées sur le TOD et sur l'AOA sont aussi utilisées pour estimer la position d'un nœud mobile. Les trois métriques fondamentales et les considérations de leur utilisation pour des applications de radiolocalisation sont présentées dans la section suivante.

2.4.2 Métriques des signaux et impact sur la localisation

Puissance du signal reçu (RSS)

L'utilisation de la métrique RSS dans la radiolocalisation assume que l'EIRP de l'émetteur est connue et que le récepteur est capable de mesurer avec une précision adéquate la puissance du signal reçu. Sachant que la puissance du signal s'atténue proportionnellement à la distance parcourue, il suffit d'utiliser le modèle de propagation qui modélise le mieux le comportement de propagation du signal dans le milieu de localisation pour déduire la distance parcourue entre émetteur et récepteur avec un certain niveau de confiance. La précision de la mesure du RSS est cruciale lorsque l'estimation de la position est basée sur une interpolation géométrique, conjointement avec un modèle de propagation, pour retrouver la distance. Dans ce cas, la valeur du RSS constitue l'unique indicateur sur la distance, d'où la relation entre la précision de la mesure du RSS et la celle de la distance estimée.

Les systèmes basés sur la métrique RSS sont généralement peu coûteux car ils ne nécessitent pas des équipements sophistiqués. Les valeurs des indices des RSS (RSSI en dBm) sont directement récupérées à partir du champ correspondant, le registre `RSSI_VAL`, dans les rapports de la carte réseau utilisée. Des formules existent pour calculer le RSS en fonction du RSSI. Plusieurs logiciels existants (p. ex. WiFi radar) retournent directement la puissance reçue moyenne après une session de capture de durée définie par l'utilisateur. De plus, aucune synchronisation temporelle entre émetteurs et récepteurs dédiée pour la localisation n'est demandée, ce qui facilite grandement le déploiement de la solution comparé à celle basée sur les mesures du temps d'arrivée. Le principe d'estimer la distance selon la perte d'énergie d'une onde électromagnétique est plus précis lorsque le signal suit un trajet direct. En réalité, lors de la localisation dans les milieux urbains ou confinés, ils existent souvent des obstacles sur le chemin direct entre émetteurs et récepteurs quelques soit la hauteur des antennes utilisées. Le

signal subit alors des réflexions sur les différents obstacles qui se traduisent par plusieurs duplications. Chaque version suit un chemin indirect différent et atteint le récepteur par une direction, phase et amplitude (énergie) différentes des autres. Ce phénomène de propagation multi-trajets représente l'inconvénient principal et la première source d'erreur des méthodes basées sur RSS. Il est nécessaire d'avoir recours à des mécanismes additionnels pour détecter le signal avec le trajet direct ou bien inclure le nombre de trajets indirects dans le modèle et prédire l'énergie absorbée par chaque obstacle afin d'éviter la dégradation de la précision de localisation. Le niveau d'ajustement du modèle de propagation utilisé et sa réaction aux variations du canal de propagation dans un environnement de localisation dynamique constituent une autre source d'erreur.

Temps d'arrivée du signal (TOA)

La deuxième métrique très utilisée est basée sur la durée de transmission du signal. Le signal est horodaté au moment de la transmission par l'émetteur. Le récepteur enregistre le temps au moment de la réception. Il suffit alors d'extraire l'information temporelle du signal reçu, la soustraire du temps d'arrivée et la multiplier par la vitesse du signal équivalente à la vitesse de la lumière pour retrouver la distance parcourue par le signal. La justesse de ce calcul est basée sur le niveau de synchronisation entre tous les nœuds du réseau ainsi que la résolution des horloges utilisées. Dans le cas idéal, il est possible d'avoir une haute précision dans des milieux extérieurs très étendus, supérieure à celle obtenue avec RSS. Toutefois pour atteindre ce niveau de précision, il faut équiper les nœuds avec des horloges de haute précision et d'effectuer une synchronisation très coûteuses en temps et en argent. D'où les contraintes qui pèsent sur le déploiement des RTLS basés sur TOA. Pour éviter toute synchronisation, une autre technique propose d'utiliser le temps d'aller-retour du signal. Dans ce cas, l'émetteur considère le temps de réception du message d'acquittement du signal initial équivalent au double de la distance qui le sépare du récepteur. Pour atteindre la précision adéquate avec cette technique, il faut connaître avec exactitude le temps de traitement au niveau du nœud distant. La TDOA est une autre métrique dérivée du TOA très utilisée. L'avantage initial de TDOA est que seuls les points d'accès du réseau doivent être synchronisés entre eux et non avec les nœuds mobiles, ce qui allège considérablement la charge du déploiement du système.

L'inconvénient principal des métriques basées sur le temps d'arrivée est dû au phénomène de propagation par trajets multiples, rencontré aussi avec la métrique RSS. Pour surmonter ce phénomène fréquent dans les environnements urbains et confinés, il faut prévoir les mécanismes nécessaires pour déceler le signal transmis en LOS ou bien quantifier le retard additionnel occasionné par les réflexions sur les obstacles.

Angle d'arrivée du signal reçu (AOA)

La position d'un émetteur peut se calculer en sachant les deux angles d'arrivée des signaux reçus au niveau de deux récepteurs avec des positions connues. Deux grandes classes de techniques permettent de mesurer l'angle de réception d'un signal reçu au niveau d'un récepteur. La première, basée sur l'amplitude des signaux reçus, utilise une antenne directionnelle qui pivote pour retrouver la direction du signal le plus fort. La technique de filtrage spatiale permet de calculer la direction et donc l'angle entre l'émetteur et le récepteur. Le problème rencontré avec cette technique est de différencier la variation de la puissance reçue relative à l'anisotropie de réception de celle due à la variation de la puissance d'émission. Plusieurs approches existent pour corriger ces problèmes tels que l'utilisation d'une deuxième antenne omnidirectionnelle pour normaliser la puissance reçue ou bien l'utilisation de quatre antennes directionnelles qui couvrent le périmètre et retenir la direction du signal le plus fort. La précision typique avec la première solution varie entre 2 et 15 degrés dépendamment du nombre d'antennes, de la sensibilité des antennes et de la largeur du pattern de propagation. La deuxième classe de type traitement d'antennes se base sur la différence de phase d'arrivée d'un même signal entre chacun des antennes (généralement six) disposés en rangée pour calculer l'angle de réception. Les antennes adjacentes sont séparées par une même distance d . La distance qui sépare l'émetteur de la dernière antenne de la rangée est approximé par $D_n \approx D_1 - nd \cos \theta$. Avec D_1 la distance entre l'émetteur et la première antenne de la rangée et θ le relèvement de l'émetteur par rapport au plan de la rangée. Sachant que les signaux reçus par deux antennes adjacentes ont une différence de phase de $2\pi d \cos \theta / \lambda$, le relèvement de l'émetteur est déduit par les mesures de différence de phase d'arrivée.

L'effet de la propagation multi trajets est plus nuisible avec la métrique d'AOA qu'il l'est avec les deux métriques précédentes. La localisation est totalement erronée si le signal sélectionné pour la localisation n'a pas suivi un trajet direct. Différentes solutions basées sur les algorithmes

de Maximum Likelihood (ML) et les algorithmes de traitement d'antennes et d'estimation spectrales (p. ex. ESPRIT et MUSIC) ont été proposées pour limiter l'effet de ce phénomène [Schmidt, 1986]. Toutefois, les antennes directionnelles ou les rangées d'antennes sont onéreuses et non communément disponibles dans les infrastructures sans-fil existantes, ce qui augmente le coût des systèmes de localisation basés cette métrique.

2.4.3 Les méthodes géométriques de localisation

Trois techniques de localisation sont généralement utilisées dans la catégorie des méthodes géométriques. Le choix d'une technique dépend principalement des équipements disponibles, de la technologie sans-fil utilisée, du niveau de précision requis ainsi que du coût alloué pour l'application. Le principe de ce type de méthodes consiste à déterminer un point ou une zone qui correspond aux distances qui séparent une cible d'un nombre minimum de SBs. Des SBs additionnelles sont souvent utilisées pour améliorer la précision ou bien pour corriger les erreurs. Les SBs ont des positions connues et dépendent de la technologie sans-fil utilisée pour la géolocalisation. Par exemple, une SB est soit un satellite dans l'orbite avec les réseaux satellitaires tel que GPS, une antenne relai avec les réseaux de téléphonie mobiles tel que GSM, un point d'accès avec un WLAN tel que Wi-Fi, ou un lecteur RFID avec la technologie RFID.

Trilatération :

Le processus de trilatération utilise la géométrie du cercle ou de sphère pour calculer la position d'une cible. Lorsque la notion de direction des signaux est omise, l'ensemble des positions possibles de la cible par rapport à une SB forme un cercle ou une sphère dans un repère 2D ou 3D respectivement. Le centre du cercle ou de la sphère est la position de la SB et le rayon est égal à la distance qui la sépare de la cible. La dimension du rayon est calculée sur la base du délai d'arrivée ou la perte d'énergie des signaux échangés avec la cible.

Dans des conditions idéales, les trois cercles se croisent en un seul point qui indique la position exacte de la cible dans un repère 2D. Autrement, l'intersection des trois cercles forme une zone. Dans ce cas, le centre de la zone est retenu tant que position de la cible en considérant un certain niveau d'incertitude. Pour éviter les situations où les cercles ne se croisent pas, la position probable d'une cible par rapport à une SB peut être représentée par un anneau au lieu d'un cercle. Chacun anneau est centré sur la position d'une SB et ses deux cercles intérieur et

extérieur définissent respectivement les limites inférieure et supérieure de la position de la cible par rapport à la SB. La position déterminée définit uniquement la latitude et longitude de la cible. Pour trouver l'altitude, il faut ajouter une SB additionnelle avec une élévation différente.

Dans un repère 3D, l'intersection des surfaces de trois sphères réduit les positions possibles, ou la cible peut se situer, à deux points. Le point qui coïncide avec la surface de la terre est ensuite sélectionné pour retourner la position finale de la cible. Supposons que les positions des centres des sphères et leurs rayons sont connus. La position relative du point d'intersection est d'abord déterminée dans un repère orthogonal (repère relatif dans Fig. 2.2). Le centre de la première sphère définit l'origine du repère et l'axe des x coïncide avec la ligne qui passe par le centre de la deuxième sphère. Les centres des trois sphères, non colinéaires, se situent sur le même plan d'élévation $Z = 0$ dans le repère relatif afin de simplifier le calcul. Posons d la distance entre les centres de deux premières sphère, les équations des sphères $S_1(O_1, r_1)$, $S_2(O_2, r_2)$ et $S_3(O_3, r_3)$ sont formulées comme suit :

$$\begin{cases} r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 & (2.1) \\ r_2^2 = (x - d)^2 + y^2 + z^2 & (2.2) \\ r_3^2 = (x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2 & (2.3) \end{cases}$$

L'abscisse x du point d'intersection est déterminée en soustrayant (2.2) de (2.1)

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (2.4)$$

En substituant (2.4) dans (2.1), l'intersection des deux premières sphères est le cercle défini par (2.5):

$$y^2 + z^2 = r_1^2 - \frac{(r_1^2 - r_2^2 + d^2)^2}{4d^2} \quad (2.5)$$

En substituant (2.5) dans (2.3), l'ordonnée y du point d'intersection est égale à (2.6):

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x \quad (2.6)$$

Finalement, l'intersection de la surface de la troisième sphère avec le cercle (2.5) se résume en deux points selon le signe en Z (2.7):

$$z = \pm \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (2.7)$$

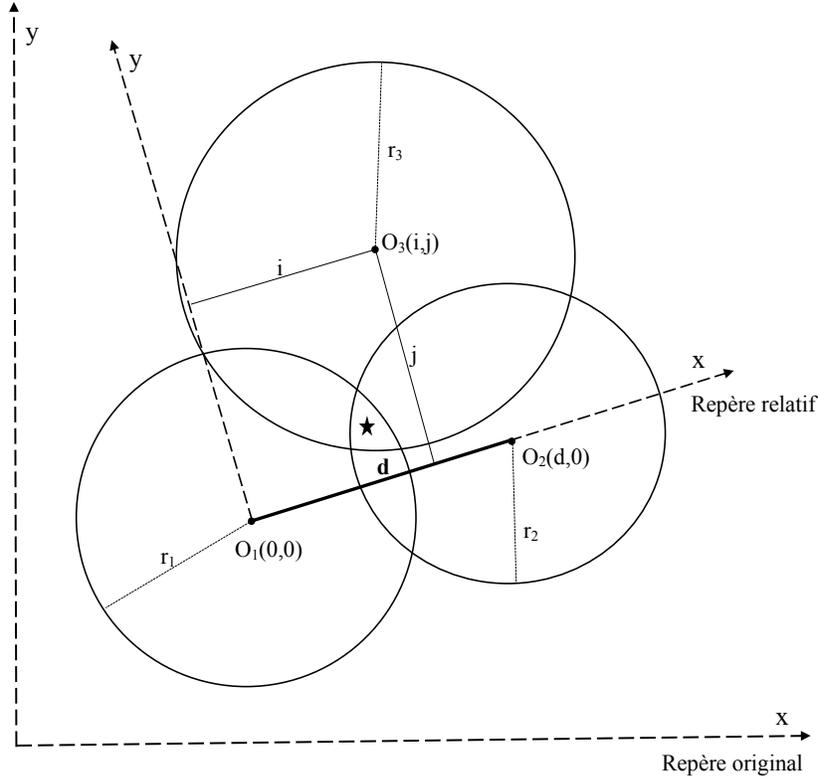


Figure 2.2: Technique de Trilatération

Une fois la position du point d'intersection est définie dans le repère relatif, elle est ensuite transformée dans le repère 3D de coordonnées cartésiennes d'origine (repère original dans Fig. 2.2). Admettant que \vec{O}_1 , \vec{O}_2 et \vec{O}_3 sont les vecteurs allant du centre du repère d'origine vers les trois centres des sphères O_1 , O_2 et O_3 , aussi exprimés dans le système de coordonnées original.

Soit $\hat{t}_x = \frac{\vec{O}_2 - \vec{O}_1}{|O_2 - O_1|}$ le vecteur unitaire de la transformation dans la direction x de O_1 vers O_2 exprimé dans le repère d'origine, $i = \hat{t}_x(\vec{O}_3 - \vec{O}_1)$ est la magnitude en x du vecteur de O_1 vers O_3 , $\hat{t}_y = \frac{\vec{O}_3 - \vec{O}_1 - i\hat{t}_x}{|O_3 - O_1 - i\hat{t}_x|}$ est le vecteur unitaire dans la direction y exprimé dans le repère d'origine et $j = \hat{t}_y(\vec{O}_3 - \vec{O}_1)$ la magnitude en y du vecteur de O_1 vers O_3 . Rappelons que les trois centres sur le même plan $Z = 0$, le troisième vecteur unitaire de base est $\hat{t}_z = \hat{t}_x \cdot \hat{t}_y$.

Après avoir défini les vecteurs unitaires du repère dans le repère original, la transformation suivante permet de transformer la position de la cible dans le système de coordonnées d'origine (2.8).

$$T_{r,a} = O_1 + x\hat{t}_x + y\hat{t}_y \pm z\hat{t}_z \quad (2.8)$$

Triangulation (Angulation) :

Le principe de cette technique est basé sur le théorème de Thalès employé en géométrie et en trigonométrie pour mesurer la distance d'une cible en mesurant les angles qu'elle forme avec deux points de référence avec des positions connues. Cette technique se base sur les relations entre les angles et les côtés du triangle ayant comme sommets les deux points de référence et la cible. La triangulation permet alors de calculer la position d'une cible qui représente le troisième sommet d'un triangle, sachant les valeurs d'au moins un côté et deux angles. À partir de ces données, la règle des sinus (2.9) permet de déterminer les autres inconnus du triangle.

$$\frac{\sin \hat{A}}{|BC|} = \frac{\sin \hat{B}}{|AC|} = \frac{\sin \hat{C}}{|AB|} \quad (2.9)$$

Sachant les trois angles et les trois côtés du triangle, le calcul des coordonnées peut s'effectuer par le calcul d'intersection des deux cercles $O_1(A, |AC|)$ et $O_2(B, |BC|)$, tel qu'illustré dans le Fig. 2.3. Admettant que C' est la projection orthogonale du sommet C sur la ligne passant par A et B , alors (2.10):

$$|AC'| = \frac{|AC|^2 - |BC|^2 + |AB|^2}{2|AB|}$$

$$|CC'| = \sqrt{|AC|^2 - |AC'|^2} \quad (2.10)$$

Les coordonnées de $C' = A + |AC'|(B - A)/|AB|$. Ayant les coordonnées des points $A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$ et $C'(x_{C'}, y_{C'})$ connues, les coordonnées de $C(x_C, y_C)$ sont égales à (2.11):

$$x_C = x_{C'} \pm |CC'|(y_B - y_A)/|AB|$$

$$y_C = y_{C'} \pm |CC'|(x_B - x_A)/|AB| \quad (2.11)$$

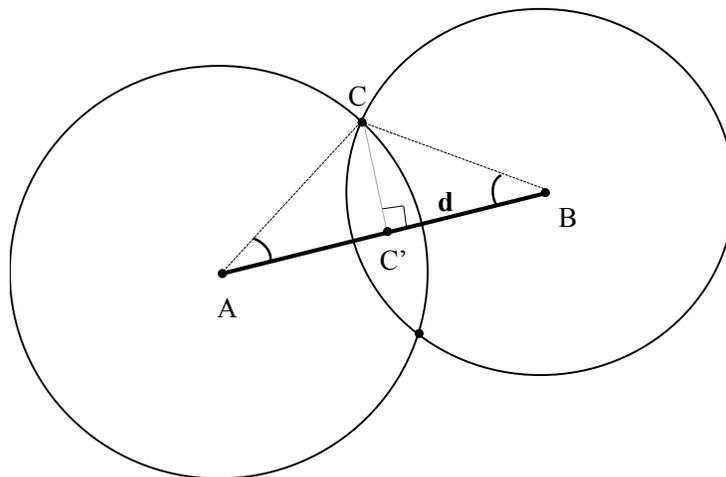


Figure 2.3: Technique de triangulation

Lorsque les deux cercles se croisent en deux points, l'estimation de la position de la cible nécessite alors le croisement de deux procédures de triangulation, d'où la condition de trois points de référence au minimum.

Un deuxième exemple de calcul de la position de la cible consiste à déterminer le point d'intersection des droites qui relient un émetteur à plusieurs récepteurs. Admettons que $P_e(x, y)$ est la position de l'émetteur à localiser, $P_r(x_i, y_i)$ est la position connue du récepteur i avec $1 < i \leq n$, n est le nombre des récepteurs, et $\theta(e) = [\theta_1(e), \dots, \theta_n(e)]$ sont les relèvements de l'émetteur par rapport à chacun des récepteurs. La relation entre la position de l'émetteur, la position du récepteur i et le relèvement $\theta_i(e)$ est la suivante (2.12):

$$\tan \theta = \frac{x-x_i}{y-y_i} \quad (2.12)$$

Une fois les vecteurs directeurs de chacune des lignes de relèvement calculés, la position de la cible est déterminée par le point d'intersection de ces lignes.

Latération :

Cette technique a été initialement utilisée avec le système de navigation GEE. Elle détermine la position d'une cible par le point d'intersection entre trois hyperboles calculées sur la base de décalage de temps d'arrivée de signaux. Un minimum de trois SBs avec des positions connues est requis pour former les trois paires de SBs. Une hyperbole définit la position relative de la cible par rapport à une paire de SBs de références i et j , en se basant sur un rang de différence constant. L'équation d'une hyperbole est comme suit (2.13) :

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j = \frac{1}{c} (\|P_i - P_T\| - \|P_j - P_T\|) = \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{c} \left(\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2} \right), \quad (i \neq j)$$

Avec t_i et t_j le temps d'arrivée au niveau de la SB $_i$ et SB $_j$, C la célérité de propagation du signal et $\| \cdot \|$ la norme euclidienne. Avec un nombre N de SB de référence, l'estimation de la position revient à résoudre un système d'équations avec les positions P_i connues et la position P_T est l'inconnu (2.14):

$$\begin{pmatrix} \|P_i - P_T\| - \|P_N - P_T\| - C \Delta t_{iN} \\ \vdots \\ \|P_{N-1} - P_T\| - \|P_N - P_T\| - C \Delta t_{N-1,N} \end{pmatrix} = 0 \quad (2.14)$$

2.5 Méthodes de proximité

Cette catégorie de méthodes est utilisée par les applications qui ne demandent pas une grande précision. Une telle méthode permet une localisation rapide et représente une alternative à faible coût pour délimiter la zone de recherche pour localiser une cible. Le principe consiste à localiser une cible par rapport à un seul point de référence avec une position connue, le plus proche. La position de la cible est représentée par un cercle centré sur le point de référence avec un rayon égal à sa portée de transmission. La méthode a été utilisée dans les applications basées sur les réseaux cellulaires pour localiser ou surveiller la présence d'une cible dans une zone géographique. Elle a aussi été utilisée avec la technologie RFID pour localiser une cible dans un compartiment (local ou étage) associé à un lecteur RFID, dans des environnements de localisation de dimensions réduites.

2.5.1 Identification de la cellule (Cell-ID)

Le concept est initialement utilisé avec les réseaux cellulaires pour retracer un téléphone cellulaire. La technique est simple, rapide, peu coûteuse et ne requiert aucun matériel additionnel pour la localisation. La position du cellulaire est celle de l'antenne relais auquel il est connecté. Ainsi, si le cellulaire est dans la zone de couverture d'une seule antenne, la précision est la portée de l'antenne limitée à 500 mètres dans une zone urbaine. Si le cellulaire est simultanément dans plusieurs zones de couverture, la précision peut être améliorée avec une triangulation. Dans les zones urbaines, avec une plus grande densité d'antennes relais ayant des portées plus réduites, un utilisateur peut se trouver dans la portée de plusieurs antennes simultanément. Dans ce cas, la position de la cible peut se limiter en une zone plus réduite qui correspond à l'intersection des cellules servies par les différentes antennes.

2.5.2 Landmark

Cette méthode de localisation est basée sur la proximité à plusieurs marques RFID avec des positions connues [Ni, 2004]. L'espace de localisation est muni d'un nombre de marques qui sont des dispositifs radio de faible coût, capables de communiquer avec le mobile à localiser. L'arrangement des marques est important pour l'efficacité et la précision de localisation. Elles sont généralement organisées sous forme d'une grille qui couvre la zone d'intérêt. Les marques

sont exploitables de deux manières lors de la localisation: i) le mobile communique directement avec ces marques et mesure les métriques sélectionnées des signaux reçus. Ensuite, les métriques sont exploitées par l'algorithme de localisation pour localiser la cible relativement aux marques. Vu qu'il est possible d'utiliser nombre des marques très grand par rapport à celui des stations de bases dans les systèmes basés sur l'infrastructure existante, la précision est grandement améliorée. ii) Les marques sont utilisées pour comme des points de référence qui servent à la calibration de la localisation. Puisque les marques sont confrontées aux mêmes phénomènes que les dispositifs radio des nœuds cibles, leurs données aident à détecter et à réagir rapidement aux variations dans un canal de propagation dynamique. La prise en compte des mécanismes réels de propagation et l'ajustement en temps réel des modèles utilisés permettent de localiser les cibles avec une meilleure précision. Les méthodes de type Landmark sont applicables pour la localisation dans les milieux confinés ou dans des zones géographiquement limitées, telle que la localisation d'un robot dans une chambre [Esteves, 2003] [Olson, 2000] ou la localisation des personnes dans un bâtiment.

2.6 Méthodes d'analyse de situation

Ce type de méthodes est la modernisation du principe de localisation le plus ancien qui se base sur des indices tels qu'un arbre, une colline ou une maison pour identifier des emplacements. La signature d'un emplacement ou son empreinte est les indices uniques qui le distinguent des autres emplacements. Ainsi, pour localiser une cible dans un environnement, il suffit d'analyser les indices pour identifier son emplacement courant. Le concept demeure le même mais les signatures et les processus de l'estimation des positions sont beaucoup plus sophistiqués. Dans ce contexte, il s'agit de localiser une cible équipée d'un terminal sans fil dans un environnement couvert par un réseau sans-fil. Les signatures sont les mesures du comportement des signaux électromagnétiques prises à plusieurs emplacements à travers la zone d'intérêt. En effet, les signaux se comportent de manière spécifique dépendamment du milieu de propagation et de la position de l'émetteur par rapport au récepteur. De ce fait, il est évident qu'un traitement inverse est susceptible d'identifier le milieu et l'emplacement d'une cible par l'analyse des signaux reçus. Pour déterminer la position d'une cible, des algorithmes mathématiques sont utilisés pour analyser les signatures et les associer à un emplacement donné. Ce principe de localisation a été appliqué avec différentes technologies de communication sans fil. De plus, différentes méthodes

déterministes et probabilistes ont été proposées pour analyser les signatures afin de déterminer les positions des cibles. Les positions retournées sont généralement de type relatif par rapport à l'espace de localisation. Toutefois, une correspondance est possible pour obtenir des positions absolues (p. ex. des coordonnées géographiques).

La méthode basée sur les signatures est une des techniques de localisation les plus adaptées aux milieux confinés [Kaemarungsu, 2003]. Justement, ces méthodes nécessitent la création d'une carte électromagnétique de référence de l'environnement de localisation, difficile à réaliser pour des milieux étendus.

Cette technique dans sa forme statique la plus utilisée se compose de deux étapes décrites dans les deux sous-sections suivantes.

2.6.1 L'étape en temps différé

La première étape en temps différé sert à établir la banque de données de référence qui regroupe et sauvegarde les mesures des signaux à un maximum d'emplacements de référence (points d'observation) dans la zone d'intérêt. Cette banque de données est équivalente à la carte radio de l'environnement. L'espacement entre les points d'observation et donc leur nombre est proportionnel à la qualité des données de référence. Plus l'espacement entre les références est petit, le mieux sera la résolution de la carte radio de référence. Toutefois, un plus grand nombre de références signifie un plus grand volume de données à créer et à maintenir. En plus le temps de traitement de ces données pour estimer la position de la cible sera plus long.

Choix des signatures et nombre des points d'observation.

Pour créer une carte radio utile, les métriques utilisées tant que signatures doivent satisfaire deux critères indispensables.

- 1- L'unicité : chaque signature utilisée pour identifier un emplacement dans la zone d'intérêt doit être unique. D'autant les signatures des différents emplacements sont distinctes, le plus la localisation sera rapide, efficace et précise. Deux emplacements différents avec une même signature constituent un défaut dans la carte radio qui réduit la fiabilité de la référence. Un choix judicieux de la métrique, ou la combinaison de métriques, permet de garantir l'unicité des signatures.

2- La reproductibilité : À un emplacement donnée, les mesures de signaux doivent donner les mêmes résultats ou d'autres très semblables lorsque la mesure est reproduite à des époques différentes. Si la signature d'un emplacement change complètement dans le temps, elle ne sera plus utile pour la localisation effectuée évidemment à des époques ultérieures à la création de la carte radio.

Une signature peut être formée par une des métriques présentées dans la section précédente, à savoir RSS, TOA ou AOA ou d'autres aspects de la propagation des signaux telles que le nombre de multi trajets reçus. Une signature peut aussi être formée par une combinaison de différents types de métriques.

Une fois la signature est choisie et le nombre et dispositions des points d'observation définis, l'étape de la création de la carte radio peut être lancée.

Création des signatures :

Deux alternatives se présentent pour la création d'une carte radio. La première se base sur les modèles de propagation des ondes électromagnétiques et les lois fondamentaux de la physique pour créer les signatures à chaque point d'observation de la zone d'intérêt. Vu la complexité de modéliser la propagation des ondes dans des environnements urbains ou confinés dynamiques, une étape expérimente est généralement exécutée pour mesurer les signatures et les associer avec les points d'observation. Il est indispensable d'effectuer la première étape au moins une seule fois. Il est aussi important de maintenir la banque de données à jour en appliquant les actualisations et les rectifications nécessaires si l'installation du réseau a changé ou lorsque des modifications ont été apportées à la zone d'intérêt.

Normalisation :

Une normalisation est effectuée pour assurer la représentabilité des signatures, réduire l'effet de fluctuations et accommoder la différence des équipements. Dans le cas de RSS, la moyenne d'un nombre significatif de mesures ou une distribution gaussienne de la puissance reçue par un récepteur à un point d'observation sont deux exemples de procédures de normalisation. En cas de non gaussianité, d'autres approches proposent de représenter la distribution du RSS par des modèles d'histogramme et définir des limites de classes de RSS pour chaque point d'observation relatif à chaque SB.

Classification:

L'idée de base de la procédure de classification est de diviser les signatures dans des groupes de taille beaucoup moindre que la totalité de la banque de données complète. Doter chaque groupe ou classeur d'une entête représentative et la correspondance vers les données. Ainsi en temps réel, une première comparaison grossière sera effectuée pour retrouver les classeurs les plus similaires à considérer pour le jumelage et la correspondance pour estimer la position.

Un algorithme de partitionnement des signatures est appliqué pour regrouper les mesures normalisées dans des classes. Cette étape permet d'accélérer l'accès et la recherche dans la banque de données afin de réduire le temps de calcul nécessaire pour l'estimation de la position en temps réel et améliorer la précision de localisation en conséquence. Cette procédure est très importante lorsque la localisation se déroule du côté de station mobile (mode ascendant). Dans ce cas, il s'impose de trouver un compromis entre précision de localisation et les capacités de stockage, de calcul et l'autonomie en énergie du terminal mobile. À titre indicatif, pour un espace de localisation qui s'étend sur 20 bâtiments, moyennant 500 points d'observation et un total de 30 SBs dans chaque bâtiment, en se basant uniquement sur la valeur moyenne pour une signature écrite sur 32 bits, la taille de la banque de données est de l'ordre de 10Mbits. Alors, pour les bases de données de grande taille, il faut aussi considérer le temps de téléchargement et le risque de saturation du réseau si un grand nombre d'utilisateurs procèdent au téléchargement des données en même temps.

Les différentes méthodes présentées ci-dessous ont été proposées pour la classification des signatures.

L'algorithme de partitionnement K-moyenne est à la base de plusieurs méthodes proposées pour le partitionnement des signatures. L'idée est de diviser n points $(x_1 \dots x_n)$ en un ensemble G de k groupes $(g_1 \dots g_K)$ en minimisant la somme des carrées des distances entre les points du même groupe (aussi appelé partition) (2.15):

$$\operatorname{argmin}_G \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in g_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad (2.15)$$

Avec $K \ll n$ et μ_i est la moyenne des points dans S_i .

Contrairement aux méthodes classiques de partitionnement, la classification floue permet le chevauchement des partitions. Un point peut appartenir à plus d'un groupe avec un certain

niveau d'appartenance à chacun des groupes. Dans ce cas, en présence de chevauchement, il est important de définir une procédure pour déterminer correctement et de manière optimale le nombre de groupes. Le nombre de groupes a une grande influence sur la qualité de classification.

L'algorithme des C-moyens flous (Fuzzy C-Means) est fondé sur l'optimisation d'un critère quadratique de classification où chaque classe est représentée par son centre de gravité. Le processus consiste à diviser n points ($x_1 \dots x_n$) en un ensemble G de k groupes ($g_1 \dots g_K$) avec des niveaux d'appartenance regroupés dans une matrice $W = w_{ij}$ qui désigne le niveau d'appartenance du point $i = 1, \dots, n$ au groupe $j = 1, \dots, k$. Pour garantir la qualité du partitionnement, $w_{ij} \in [0, 1]$ et $\sum_K w_{ij} = 1$. L'algorithme génère les groupes (flous) par un processus itératif en minimisant la fonction objectif suivante (2.16):

$$\operatorname{argmin}_G \sum_{i=1}^n \sum_j^K w_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2$$

Avec

$$w_{ij}^m = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (2.16)$$

Où $m > 1$ est un paramètre contrôlant le degré de flou (généralement $m = 2$) et c_k est le centre du groupe k .

Les réseaux de neurones, dans leur phase d'apprentissage, sont utilisés pour la classification des données. Les paramètres du réseau sont ajustés par des exemples (observations) avec des réponses connues et souhaitées. Apprendre revient à déterminer des coefficients synaptiques les plus adaptés à classifier les exemples disponibles. La carte auto-organisatrice (Self Organizing Map, SOM) est un type de réseau de neurones artificiels dont l'apprentissage se déroule de manière non supervisée. Leur rôle principal est de faire une projection non linéaire des données de haute dimension sur un espace de faible dimension (des partitions). Une SOM est constituée d'une grille. Dans chaque nœud de la grille se trouve un neurone. Chaque neurone représente un groupe particulier de données ou selon des critères qui les rassemblent. Une SOM est constituée de deux couches de neurone, les entrées et les sorties. Chaque entrée (observation) provoque une excitation particulière de chaque neurone de sortie. Le neurone le plus excité sera le neurone vainqueur dont le vecteur référent est le plus proche du vecteur de l'entrée. Les

neurones qui constituent la couche de sortie du réseau sont considérés comme des groupes dans les quels sont rangées les entrées. Deux neurones voisins sur la carte représentent des observations qui sont proches dans l'espace d'entrée. Pour avoir une meilleure distribution des vecteurs référents sur les données, le degré de voisinage doit atteindre des valeurs assez petites pour n'activer que le neurone vainqueur. Les données sont projetées de l'espace d'entrée vers espace de sortie (la carte). Chaque vecteur référent (prototype) dans l'espace d'entrée $v \in V$ est associé à chaque neurone $k \in \{1, \dots, K\}$, avec K le nombre des neurones de la carte et w_k le vecteur référent du neurone k . L'objectif de l'apprentissage consiste à mettre à jour les vecteurs référents de façon à approximer au mieux la distribution des vecteurs d'entrée tout en reproduisant l'auto-organisation des neurones de la carte. Une itération d'apprentissage consiste à choisir au hasard une observation v de l'ensemble d'entrée et la présenter au réseau pour déterminer son neurone vainqueur c . Ce dernier est le neurone avec le vecteur référent le plus proche au sens d'une distance donnée. L'équation pour trouver le neurone vainqueur c du vecteur v (2.17):

$$c = \theta_w(v) = \underset{k \in \{1, \dots, K\}}{\operatorname{argmin}} \|w_k - v\| \quad (2.17)$$

De façon itérative, les vecteurs référents du neurone vainqueur et ses voisins proches sont ajustés pour se rapprocher du vecteur en entrée. La fonction $\theta_w(v)$ qui définit les applications de la carte se précise d'itération t en itération $t + 1$ (2.18):

$$w_k(t + 1) = w_k(t) + \alpha(t) h_{ck}(t) \|w_k(t) - v\| \quad \text{Avec } k \in \{1, \dots, K\} \quad (2.18)$$

Où c est le neurone vainqueur de l'entrée v de l'itération t . Le paramètre $\alpha(t)$ est le pas d'apprentissage qui décroît au fur de l'apprentissage. Le degré d'appartenance au voisinage h_{ck} est la fonction de voisinage qui définit la proximité entre les neurones c et k . Ce paramètre se rétrécit avec les itérations pour contenir le neurone vainqueur c seul ou avec ses voisins immédiats à la fin de l'apprentissage. La fonction gaussienne suivante est la plus souvent utilisée comme fonction de voisinage (2.19):

$$h_{ck}(\sigma(t)) = \exp\left(-\frac{\|r_c - r_k\|^2}{2\sigma(t)^2}\right) \quad (2.19)$$

Avec r_k l'emplacement du neurone k sur la grille et $\sigma(t)$ le degré de voisinage de l'itération t .

À la fin de l'apprentissage, une fonction de correspondance à une classe est affectée à chaque neurone de la carte. Tous les points de l'espace d'entrée qui se projettent sur un même neurone appartiennent à la même classe. Une même classe peut être associée à plusieurs neurones.

Pour simplifier l'explication de l'étape en temps réel, la banque de données de référence (complète ou classeur) se résume à une table de correspondance entre les positions d'observation dans l'espace de localisation et les signatures mesurées durant l'étape d'essai en temps différé. À chaque position d'observation X_i correspond un n-uplet de signatures respectives à chacune de SBs de référence $S_i(s_{i1}, \dots, s_{ij}, \dots, s_{iN})$, avec $1 < i \leq M$ le nombre de points d'observation et $1 < j \leq N$ le nombre de SBs (Table.1).

Tableau 2.1: Table de correspondance position/signature

		BS₁	...	BS_N
X₁	→	s_{11}	...	s_{1N}
...				
X_M	→	s_{M1}	...	s_{MN}

2.6.2 L'étape en temps réel

La deuxième étape en temps réel de localisation consiste d'abord à mesurer les signaux échangés en temps réel entre une cible et les SBs et en extraire la signature de la position courante X . Ensuite la signature S_x mesurée est comparée à celles sauvegardées dans la banque de données pour en déduire la position X . La méthode la plus simple est de se baser uniquement sur la pondération de toutes les signatures dans la banque de données pour calculer la position de la cible (2.20):

$$X_C = \sum_{i=1}^M \frac{1/\|S_c - S_i\|^2}{\sum_{i=1}^M 1/\|S_c - S_i\|^2} X_C \quad (2.20)$$

Il existe différentes méthodes de jumelage qui permettent de retrouver cette correspondance avec une meilleure précision. Dans les sections suivantes, deux des méthodes les plus couramment utilisées, à savoir l'algorithme de k-plus proches voisins et les méthodes probabilistes sont d'abord présentées. Pour la troisième méthode plus récente, une introduction

générale à la CS sera donnée avant d'expliquer la manière de l'appliquer pour la localisation basée sur les signatures.

L'algorithme de k -plus proches voisins

L'algorithme permet de retrouver les k signatures de la banque de données les plus semblables à celle mesurée par la cible. Le nombre k est défini par une constante $k \ll M$. Lorsque $k = 1$, l'algorithme est appelé 1-voisin plus proche et la position de la signature la plus similaire est retenue comme la position de la cible.

Ce type d'algorithme se base sur la distance euclidienne pour mesurer le degré de similitude entre signatures. La distance entre la signature de la cible S_c et une signature de la banque de données S_i est la suivante (2.21):

$$d_{eucl}(S_c - S_i) = \|S_c - S_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^N (s_{c1} - s_{ij})^2} \quad (2.21)$$

Plus d_{eucl} entre deux signatures est faible, plus la similitude est forte et les positions X_c et X_i sont supposées proches. La recherche des K plus proches voisins X_i avec des signatures les plus semblables de cible est formulée comme suit (2.22):

$$V_K = \left\{ \underset{X_i}{\operatorname{argmin}} \left(\sqrt{\sum_{j=1}^N (s_{c1} - s_{ij})^2} \right), X_i \notin V_{K-1} \right\} \quad (2.22)$$

Finalement, l'emplacement de la cible est indiqué par la position centrale la plus proche des positions correspondantes aux signatures qui manifestent la plus grande vraisemblance avec celle de la cible. La position estimée de la cible est pondérée par l'inverse des erreurs (2.23) :

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^K (1/\|S_c - S_i\|) x_i}{\sum_{i=1}^K 1/\|S_c - S_i\|} \quad (2.23)$$

L'algorithme de k -plus proches voisins permet de diminuer l'effet de la fluctuation entre l'étape en temps différé et l'étape en temps réel. Ce genre d'algorithme, basé sur un principe simple, peut s'avérer lent et demander beaucoup de ressource puisqu'il dépend de la taille de la banque de données (M et N). En effet, la précision de localisation est proportionnelle à l'espacement entre les points d'observations, inversement proportionnel à leur nombre. Il faut alors prévoir une recherche exhaustive dans une banque de données la plus complète, donc volumineuse, pour réduire l'erreur de localisation.

Les méthodes probabilistes

Les méthodes probabilistes sont utilisées dans les algorithmes de jumelage. Elles se basent sur les densités de probabilité des processus aléatoires et l'inférence bayésienne pour déterminer la position de la cible en se référant à la banque de données.

Dans les formulations suivantes, les termes $P(\cdot)$ et $P(\cdot|\cdot)$ dénotent respectivement la distribution de probabilité et la probabilité conditionnelle. Pour chaque point d'observation à une position X correspond une distribution $P(S|X)$; la probabilité d'obtenir une signature S sachant la position X . L'application de la loi de Bayes définit une distribution à posteriori de la position (2.24):

$$P(X|S) = \frac{P(S|X)P(X)}{P(S)} \quad (2.24)$$

Avec $P(X)$ la vraisemblance maximale qui définit la probabilité à priori de se situer à la position X avant de connaître les valeurs de la variable d'observation S . En absence d'une telle information, une distribution à priori uniforme est utilisée $P(X) = 1/M$. Dans le cas de la localisation, avec un nombre discret de correspondances entre M points d'observation et leurs signatures relatives aux différentes SBs, la distribution de probabilité $P(S)$ est représentée par l'approximation suivante (2.25):

$$P(S) = \sum_{X_i \in \mathcal{P}} P(S|X_i) P(X_i) \quad (2.25)$$

Avec \mathcal{P} l'ensemble des positions répertoriées dans la banque de données de référence. L'élément $P(S|X_i)$ représente la fonction de vraisemblance (Likelihood function) qui donne la probabilité de l'observation (S) sachant la position de la source d'observation (X). Lorsque la probabilité à priori est uniforme, la fonction de vraisemblance définit complètement la distribution à posteriori de la position. De ce fait, il est alors important que cette fonction décrit le plus fidèlement possible la distribution des observations (signatures) à toutes les positions sources d'observation. Différentes réalisations sont possibles pour l'estimation de la fonction de vraisemblance à partir des données d'observation. Dans le cas discret, la méthode à noyau (Kernel) est l'une des plus utilisées. Cette méthode consiste à assigner une masse de probabilité uniforme à un noyau auprès de chaque observation dans la banque de données. La densité de probabilité pour une observation S à une position X est la somme pondérée de N fonctions de densité (2.26). Rappelons que N est le nombre de SBs,

$$P(S|X) = \frac{1}{N} \sum_{j=1 \dots N} K(S; s_{ij}) \quad (2.26)$$

Avec $K(\cdot; S_i)$ est la fonction du noyau auprès de la position d'observation X_i . La fonction de noyau gaussien, la plus couramment utilisée, s'énonce sous cette forme (2.27):

$$K_{Gauss}(S; S_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(S-s_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.27)$$

Avec σ un paramètre ajustable qui détermine la largeur du noyau. Le noyau gaussien introduit une fonction de coût basée sur l'erreur quadratique qui pénalise fortement les observations les plus différentes et de manière beaucoup moindre celles moins différentes.

D'autres travaux se sont basés sur l'élément $P(X)$ pour inclure des indices sur la position a priori d'une cible. Selon le profil d'une cible, la probabilité de se situer à des emplacements plutôt que d'autres varie. Dans le cas de poursuite des nœuds mobiles, le plus fréquent, les positions adjacentes de la dernière position connue de la cible sont les plus probables. Les méthodes de différenciation de champs utilisent la variation de la valeur moyenne de la signature pour chaque paire de point d'observation et SB pour poursuivre la trajectoire de la cible. Les techniques les plus couramment utilisées se basent sur le mouvement (rotation, direction, accélération) de la cible et l'horodatage des signaux et utilisent des modèles état-espace tels que le filtre de Kalman et la méthode de filtre particulaire pour déterminer la position [Rigatos, 2012].

Lorsque la banque de données de signatures est créée avec des distributions et non des valeurs discrètes, d'autres méthodes telles que la divergence de Kullback-Leibler (KLD) et la régression probabiliste de Kernel sont utilisées pour comparer des distributions et en déduire la position du nœud mobile [Mirowski, 2011].

Dans la forme différentielle de la technique basée sur les signatures, les données de références ne sont complètement préétablies par avance. Pour récompenser ce manque, le système se base sur les changements des signatures successifs pour déceler le déplacement de la cible et ainsi prédire sa position.

La technique de cartographie et localisation simultanées (Simultaneous Localization And Mapping, SLAM) se démarque par rapport aux autres techniques de la même catégorie par sa capacité d'explorer l'environnement de localisation, d'établir sa cartographie et de s'y localiser simultanément [Bailey, 2006]. Cette technique permet à un engin mobile (p. ex. robot, drone ou véhicule sans pilote) de se localiser dans un environnement inconnu. Les deux étapes en

temps différées et en temps réel, vues avec la forme statique de cette catégorie des méthodes basées sur les signatures, s'effectuent en parallèle et s'alternent dans le processus de localisation du SLAM. De plus, la carte de l'environnement peut être reprise par un autre mobile, qui à son tour, la complétera, l'améliorera et l'utilisera selon le même principe. Et ainsi de suite, jusqu'à l'obtention d'une carte plus complète permettant une localisation plus précise. Toutefois, la technique SLAM repose sur différents capteurs (p. ex laser) et équipements d'odométrie au niveau des engins mobiles et probablement certaines conditions dans les environnements de localisation (p. ex. éclairage ou présence de marqueurs). De plus, la qualité de la carte dépend de la fiabilité et de la justesse des informations collectées par les capteurs. La technique SLAM est appliquée avec succès dans le domaine de la robotique, permettant aux robots d'effectuer de manière autonome des tâches précises en se basant sur la géolocalisation. La technique SLAM a été aussi appliquée pour la localisation des personnes dans les MFBs, basée sur la capture vidéo et les mesures inertielles.

Acquisition comprimée :

D'après le théorème de Nyquist-Shannon, une fréquence d'échantillonnage du signal supérieure ou égale au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal est requise pour le convertir d'une forme continue à une forme discrète. Ce théorème est à la base de la conversion analogique-numérique des signaux. La compression du signal consiste à calculer la représentation du signal dans une certaine base de transformation et de retenir les coefficients les plus significatifs après la transformation. Cette technique nécessite un grand nombre de capteurs et de lignes d'acquisition et elle génère un volume important de données à traiter. La technique de CS [Donoho, 2006], [Baraniuk, 2007], apparue récemment en mathématiques appliquées, est de plus en plus utilisée pour le traitement des signaux et des images. CS propose une nouvelle façon d'acquisition et de reconstruction des données complexes en exploitant le phénomène de la parcimonie, présent dans la plupart des signaux physiques, lors de l'échantillonnage. Comme son nom l'indique, cette technique comprime l'acquisition même des données, directement au niveau des capteurs, permettant un taux d'échantillonnage réduit tout en garantissant une précision de reconstruction adéquate. Un signal a une représentation parcimonieuse (éparse) dans une certaine base Ψ , quand il est possible de l'exprimer par un petit nombre de coefficients non nuls suite à une transformation dans la base. Lorsque la représentation éparse du signal permet de garder les informations nécessaires pour sa

reconstruction à partir d'un nombre limité de projections sur une deuxième base Φ , incohérente avec la première base Ψ , le signal est dit compressible. De façon très intéressante, les projections aléatoires constituent des bases incohérentes avec toutes les bases fixes (cas par exemple où Ψ est la matrice identité ou bien la matrice de la transformée de Fourier).

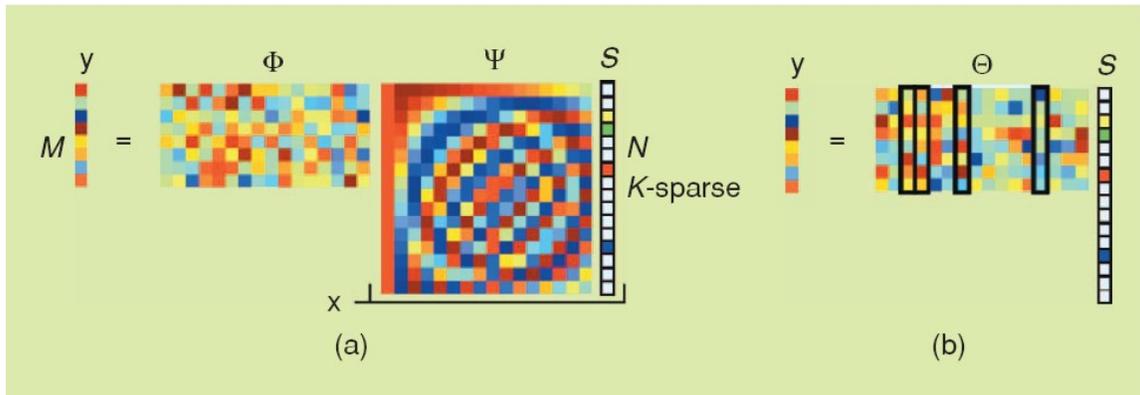


Figure 2.4: Technique de l'acquisition compressée [Donoho, 2006]

Soit un signal S défini par un vecteur-colonne de taille $N \times 1$ et soit une base $\Psi = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_N]$ sous forme d'une matrice de taille $N \times N$, généralement orthogonale, avec Ψ_i des vecteurs-colonne de taille $N \times 1$. Le signal S est représenté dans base Ψ par une approximation avec ses coefficients θ_i dans la base Ψ , comme suit (2.28):

$$S \approx \sum_{i=1}^K \theta_i \times \Psi_i = \theta \times \Psi \quad (2.28)$$

Le signal S possède une représentation k -éparse dans la base Ψ lorsque K parmi les N coefficients θ_i sont non-nuls. La technique de CS est intéressante lorsque $K \ll N$. CS modifie la plateforme d'acquisition afin de pouvoir reconstruire S à partir d'un nombre réduit d'échantillons M , même bruités. Soit une matrice de mesure Φ de taille $M \times N$, incohérente avec Ψ , ou $M < N$. Le vector-colonne de mesure y de taille $M \times 1$ est la projection linéaire de S dans Φ , $y = \Phi \times S$. En substituant S par sa valeur approximée, alors $y = \Phi \times \Psi \times \theta = \Theta \times \theta$ avec Θ la matrice de transformation de taille $M \times N$.

Selon la technique de CS, un vecteur k -parcimonieux de taille N peut être reconstruit avec une grande probabilité à partir M variables aléatoires, sous certaines conditions [Candès, 2005] [Candès, 2006]:

a) $M \geq \mathcal{C} \times K \times \log(N/K)$ ou \mathcal{C} est une constante qui dépend de chaque instance.

b) L'incohérence de Φ et Ψ , qui revient à calculer la corrélation mutuelle entre les vecteurs lignes (Φ_i) de Φ et les vecteur colonnes (Ψ_j) de Ψ selon la formule suivante (2.29):

$$\mu(\Phi, \Psi) = \sqrt{N} \max_{i,j} \frac{|\langle \Phi_i, \Psi_j \rangle|}{\|\Phi_i\|_2 \|\Psi_j\|_2} \quad (2.29)$$

c) La matrice de transformation θ conserve la propriété d'isométrie restreinte (Restricted Isometry Property, RIP), l'énergie entre les mesures de y et le signal S . La matrice θ respecte le RIP d'ordre k s'il existe une constante d'isométrie restreinte δ_k , un réel positif pas trop proche de 1, qui satisfait la condition suivante (2.30) pour tous les vecteurs θ k -parcimonieux:

$$(1 - \delta_k) \|\theta\|_2^2 \leq \|\theta\theta\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|\theta\|_2^2 \quad (2.30)$$

Ces conditions assurent que la phase d'acquisition (échantillonnage) ne déforme pas le contenu du signal s pour pouvoir le reconstruire à partir du vecteur de mesure (compressé) y .

En exploitant la parcimonie du signal, ou la parcimonie de sa représentation dans la base considérée, la reconstruction du signal est présentée sous forme d'un problème de minimisation (2.31);

$$\theta^* = \arg \min \|\theta\|_n \text{ sous condition } \theta \times \theta = y \quad (2.31)$$

Finalement, le signal est reconstruit par la multiplication des coefficients dans la base de plein rang, $S^* = \Psi \times \theta^*$. Puisque $M < N$, le recouvrement de S à partir des M échantillons comprimés, tel que énoncé dans (2.31), est un problème hautement sous déterminé. Toutefois, plusieurs algorithmes de minimisation existants permettent de résoudre ce type de problèmes.

L'application de CS vise à trouver la solution la plus parcimonieuse d'un système linéaire sous déterminé de type $Ax = y$. La représentation avec le minimum de composants non-nul signifie la minimisation de la norme l_0 , $\|x\|_0 = \sqrt[0]{\sum_i x_i^0} \cong \# (i|x_i \neq 0)$. Le symbole $\#$ signifie le cardinal de l'ensemble x_i . La minimisation l_0 est un problème NP ardu, difficile à résoudre (contrarié par le manque de représentations mathématiques de la norme l_0). Les problèmes de minimisation l_1 et l_2 sont les plus couramment utilisés pour remplacer la norme l_0 . La norme l_1 ou la norme Manhattan est la somme des valeurs absolues des composants de x (de la décomposition), $\|x\|_1 = \sum_i |x_i|$. La norme l_2 , ou la norme euclidienne, $\|x\|_2 = \sqrt{\sum_i x_i^2}$ est le standard utilisé pour mesurer la différence entre les vecteurs basée sur la distance euclidienne

[Candès, 2005] [Song, 2012]. Ci-dessous des exemples de problèmes standards de recouvrement parcimonieux basés sur la minimisation de la norme l_1 et la norme l_2 de la décomposition du vecteur pour résoudre un problème convexe dans ce cas.

Poursuite de base (Basis Pursuit, BP): [Chen, 1999] Le problème de BP consiste à trouver la solution la plus parcimonieuse du système d'équation sous-déterminé suivant (2.32):

$$\min_x \|x\|_1 \text{ sous condition } Ax = y \quad (2.32)$$

Avec A une matrice de taille $M \times N$ et y un vecteur de taille M , spécifiquement pour $M \ll N$. L'objectif est de trouver parmi les candidats possibles le plus petit x au sens de la norme l_1 , ayant une représentation dans la base avec le minimum de composants non-nuls, qui vérifie la condition. L'ensemble des candidats possibles de \hat{S} , défini par les contraintes affines, est l'ensemble fini des sommets d'un polyèdre convexe $\hat{S} = \{x \in \mathbb{R}^n : Ax = y, x \geq 0\}$. L'écriture $x \geq 0$ signifie que tous les composants non nuls du vecteur x sont positifs. Pour un problème convexe, il est possible de calculer l'ensemble \hat{S} en un temps polynomial et de choisir le vecteur plus parcimonieux comme solution. En effet, les puissances de calcul disponibles permettant un balayage rapide des solutions et l'utilisation des algorithmes d'optimisation convexes permettent de trouver la solution optimale du problème de minimisation l_1 . Plusieurs algorithmes tels que les algorithmes simplex et les méthodes de points intérieurs existent pour résoudre ce type de problème.

Poursuite de base avec bruitage (Basis Pursuit Denoising BPDN): [Lu, 2010] En présence de bruits et d'autres imperfections dans les données mesurées, les contraintes sont présentées par des équations affines d'inégalité qui tiennent compte de la valeur de l'erreur ε . Ce problème dit BPDN cherche à minimiser la norme l_1 de x tout en réduisant la distance euclidienne entre Ax et y équivalente à la norme l_2 (2.33).

$$\min_x \|x\|_1 \text{ sous contrainte } \|Ax - y\|_2^2 \leq \varepsilon \quad (2.33)$$

Avec ε un paramètre positif qui décrit le niveau du bruit dans les mesures.

La forme lagrangienne de ce même problème est donnée en utilisant un paramètre λ fonction de l'erreur ε (2.34):

$$\min_x \frac{1}{2} \|Ax - y\|_2^2 + \lambda \|x\|_1 \quad (2.34)$$

Avec $\lambda > 0$ qui dépend du niveau de bruit pour reconstruire le signal x avec une erreur proportionnelle au bruit relatif au vecteur de mesure y . Le paramètre λ décrit le compromis entre la parcimonie et la fidélité de reconstruction [Aybat, 2012]. Pour ce type de problème convexe quadratique, il existe plusieurs méthodes de résolution telles que l'algorithme Log-barrier basé sur la méthode de points intérieurs [Boyd, 2004] et l'algorithme In-crowd [Gill, 2011] qui propose une solution rapide à ce type de problème.

Une formulation avec contrainte, équivalente à la dernière forme lagrangienne de PBDN, a été proposée pour le même problème de recouvrement parcimonieux [Schmidt, 2005] (2.35):

$$\min_x \|Ax - y\|_2^2 \text{ subject to } \|x\|_1 \leq \sigma \quad (2.35)$$

La méthode de gradient projeté et celle de Newton projeté sont souvent utilisées pour résoudre ce type de problème.

Problème de moindre carré : Étant donné un problème de minimisation l_2 (2.36):

$$\min_x \|x\|_2 \text{ sous condition } Ax = b \quad (2.36)$$

Pour résoudre ce problème hautement sous déterminé, la notion des multiplicateurs de Lagrange est introduite (2.37): (Référence !!!)

$$\mathcal{L}(x) = \|x\|_2^2 + \lambda^T (Ax - b) \quad (2.37)$$

Avec λ est le vecteur dans la base d'arrivée. La dérivation de cette équation permet de trouver la solution optimale (2.38):

$$x^* = -\frac{1}{2} A^T \lambda \quad (2.38)$$

En remplaçant x par sa valeur optimale dans les contraintes (2.39):

$$Ax^* = -\frac{1}{2} AA^T \lambda = b \implies \lambda = A^T (AA^T)^{-1} b = A^\dagger b \quad (2.39)$$

Où le symbole \dagger signifie l'inverse généralisé typique de la matrice A . Cette équation, appelée Moore-Penrose pseudo-noise, permet de trouver une solution rapide et facile à calculer mais ne garantit pas l'obtention de la solution optimale.

D'autres formulations sont proposées avec la norme infinie telle que Dantzig Selector (DS) [Elad, 2010] (2.40):

$$\min_x \|x\|_1 \text{ sous contrainte } \|A^T(Ax - y)\|_\infty \leq \delta \quad (2.40)$$

Admettant que la norme infinie peut être expliquée simplement par $\|A\|_\infty = \max(|A_i|)$ et que la contrainte est équivalente à $\|A^T_r\|_\infty \leq \delta$, le problème revient à minimiser l'amplitude de la composante la plus élevée du résidu de la projection.

Les méthodes de la décomposition atomique [Chen, 1999] sont d'autres alternatives plus anciennes qui peuvent être appliquées pour la reconstruction, ci-dessous un exemple très utilisé:

La poursuite adaptative (Matching Pursuit, MP): La MP [Mallat, 1993] est un algorithme glouton qui permet de trouver de manière itérative la représentation à m composants, la plus corrélée avec le vecteur mesuré, dans une banque de référence (dictionnaire D). Cet algorithme, basé sur la décomposition de Karhunen–Loève, est sous-optimal mais il permet une bonne corrélation (en minimisant l'erreur) entre le vecteur original et le vecteur parcimonieux.

Soit une approximation d'un vecteur x donnée par la somme pondérée de m fonctions (atomes) $g_{\gamma n}$ suivante (2.41):

$$x_m = \sum_1^m a_n g_{\gamma n} \quad (2.41)$$

Avec a_n les coefficients de chaque atome à l'indice n dans D et $1 \leq n \leq m$. Le calcul commence par déterminer le premier atome $g_{\gamma 1}$ qui présente la plus grande corrélation «énergie» avec x en terme du carré de produit scalaire ($\langle \cdot, \cdot \rangle$) (2.42);

$$g_{\gamma 1} = \arg \max_{\gamma} |\langle x, g_{\gamma} \rangle|^2 \quad (2.42)$$

Étant donné le résidu de la projection orthogonale de x sur $g_{\gamma 1}$ (2.43).

$$R_x^1 = x - \langle x, g_{\gamma 1} \rangle g_{\gamma 1} \quad (2.43)$$

Le carré de la norme du résidu est défini par la relation (2.44):

$$\|R_x^1\|^2 = \|x\|^2 - |\langle x, g_{\gamma 1} \rangle|^2 \quad (2.44)$$

En procédant de manière itérative et en ôtant à chaque fois la contribution de l'atome courant au vecteur x représenté par le résidu R_x^m (2.45) (2.46) et (2.47);

$$g_{\gamma m+1} = \arg \max_{\gamma} |\langle R_x^m, g_{\gamma} \rangle|^2 \quad (2.45)$$

$$R_x^{m+1} = R_x^m - \langle R_x^m, g_{\gamma m+1} \rangle g_{\gamma m+1} \quad (2.46)$$

$$\|R_x^{m+1}\|^2 = \|R_x^m\|^2 - |\langle R_x^m, g_{\gamma m+1} \rangle|^2 \quad (2.47)$$

En réduisant à chaque itération la valeur du résidu jusqu'à atteindre un seuil prédéfini $R_x^M < S_{Arret}$ qui tend vers zéro et en admettant que $R_x^0 = x$, la décomposition de x est finalement obtenue sous forme de la combinaison linéaire (2.48).

$$x = \sum_{m=1}^M \langle R_x^{m-1}, g_{\gamma m} \rangle g_{\gamma m} + R_x^M \cong \sum_{m=1}^M a_m g_{\gamma m} \quad (2.48)$$

La MP orthogonale permet de l'approximation d'un vecteur mesuré x à l'aide d'une décomposition atomique sous optimale en m atomes d'une base de référence. L'algorithme assure la convergence du système après un nombre fini d'itérations.

2.6.3 Application du CS pour la localisation basée sur les signatures

Cette section présente les correspondances et les considérations pour adapter la technique de CS au contexte de localisation des nœuds mobiles dans un réseau de communication sans-fil.

Considérons un espace de localisation discrétisé sous forme d'une grille à N nœuds avec des positions connues. Les nœuds représentent les points d'observation d'un système basé sur les signatures (analyse de scène) qui doivent couvrir de manière optimale la totalité de l'espace d'intérêt. L'espace dispose d'une infrastructure de réseau sans-fil formée de L points d'accès (APs) fixes. Durant l'étape en temps réel, la banque de données des signatures, représentée par la matrice $\psi_{L,N}$, est créée en mesurant à chaque point d'observation la métrique présélectionnée des signaux reçus de chacun des APs. La localisation basée sur la technique CS exploite la nature parcimonieuse de la position d'un nœud mobile dans un espace de positions discrètes. Chaque nœud occupe forcément une seule position discrète à un instant donnée. Une position est représentée par un vecteur 1-parcimonieux de taille $N \times 1$, $\theta = [0 \dots 1 \dots 0]^T$ avec un seul élément non nul θ_n et n correspond à l'indice de la position. Dans la phase en temps réel, admettons que seulement M APs sont disponibles ou sélectionnés pour former les mesures en temps réel à une position inconnue, avec $M < L$. Soit la matrice de mesures $\Phi_{M \times L}$ où chaque vecteur-ligne $\Phi_m = [0 \dots 1 \dots 0]$ représente l'indice du AP_m sélectionné dans un certain ordre

établi pour tous les APs. Le vecteur de mesure en temps réel y de taille $M \times 1$ est alors considéré comme un échantillon comprimé et bruité à partir de M APs correspondant à une position donnée à retrouver, avec $M \ll N$. La parcimonie du vecteur de position à reconstruire est déjà évidente. Une étape de prétraitement, détaillée dans le chapitre 5, est exécutée pour satisfaire l'exigence d'incohérence entre les matrices Φ et Ψ . Finalement le problème de localisation est énoncé sous forme d'un problème de recouvrement d'un vecteur parcimonieux selon l'approche de CS, $y = \Phi \Psi \theta + \varepsilon$, où y est la signature compressée, Φ est la matrice de mesure, Ψ est le dictionnaire des signatures, θ est le vecteur 1-parcimonieux qui représente la position à retrouver et ε représente l'erreur de mesure (bruits) lors de l'acquisition des signatures radio des cibles. Les algorithmes de minimisation présentés dans la section précédente sont directement applicables pour estimer avec une grande probabilité la position du nœud mobile à partir d'un nombre réduit de mesures même bruitées, en un temps polynomial.

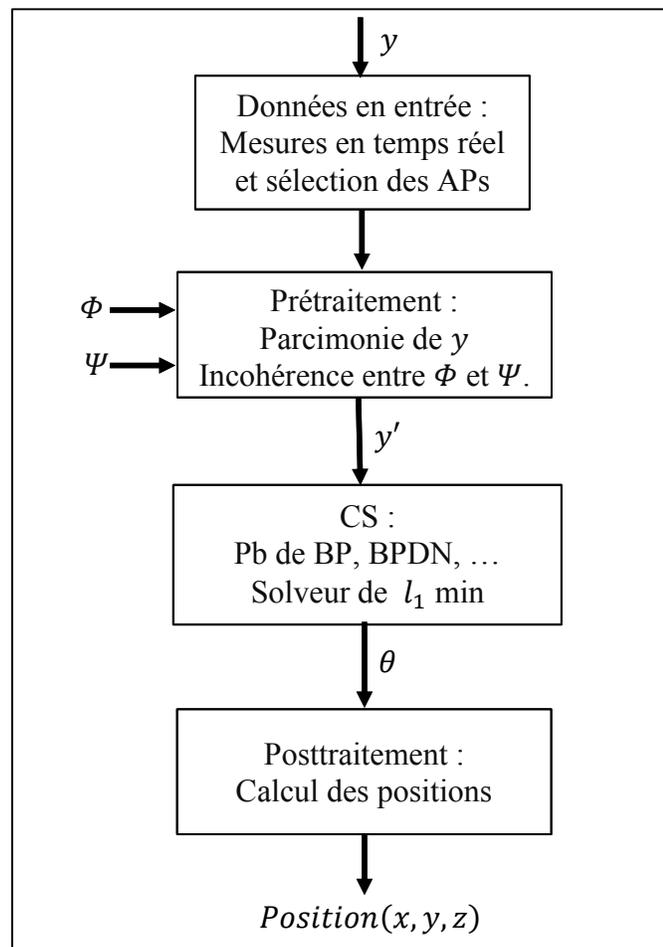


Figure 2.5: Étapes de localisation basée sur la technique de l'acquisition comprimée

2.7 Systèmes de transport intelligents

D'après Transport Canada [TC, 2010], les systèmes de transport intelligents résultent de l'utilisation des technologies novatrices telles que les nouvelles technologies de communication pour améliorer le réseau de transport. Les objectifs s'étendent sur les trois axes de logistique, sécurité et environnement. Les principaux buts des ITS sont :

- Gestion en temps réel du trafic et optimisation du système de transport.
- Sécurité, moins d'accidents, préserver la vie.
- Minimiser la consommation des carburants, moins de gaz à effet de serre, préserver l'environnement.
- Minimiser le coût de transport et économiser de l'argent.
- Confort, services, Info-divertissement.

La combinaison de nombreuses disciplines est nécessaire pour atteindre ces nouveaux objectifs. La gamme des technologies considérées comprend toutes les applications de la télématique dans le domaine du transport. Il s'agit notamment de l'électronique embarquée ou fixe (p. ex.: capteurs, unités de calcul), les équipements réseau et standards de télécommunication sans-fil, les systèmes d'information, les systèmes de régulation, les paiements électroniques et autres.

2.7.1 Liste de projets ITS

Les ITS se basent sur les capacités des véhicules à communiquer et à échanger l'information sous forme de messages entre véhicules (Vehicle To Vehicle, V2V) ou entre véhicule et l'infrastructure (Vehicle To Infrastructure, V2I). De nombreuses activités de recherche et développement et de standardisation de la communication dans les VANETs sont actuellement en cours. Des grands projets à l'échelle mondiale ont été amorcés depuis quelques années. Ci-dessous, une description de quelques-uns parmi les principaux projets qui s'intéressent à l'utilisation des VANETs dans les nouveaux ITS.

AUTO21 [Auto21, 2010] était une initiative multidisciplinaire de recherche et développement sur l'automobile supportée par le gouvernement du Canada entre 2001 et 2016. Le réseau Auto21 était divisé en six principaux thèmes dont: a) Santé, sécurité et prévention des blessures,

b) automobile de l'avenir, c) matériaux et fabrication, d) processus de conception, e) carburants et émissions, f) systèmes et capteurs intelligents.

IntelliDrive [USDOT, 2010a] est une initiative multimodale qui veut permettre une communication sans-fil sécuritaire et interopérable entre véhicules, infrastructure et passagers. Le but est de prévenir les collisions, améliorer la sécurité, favoriser la mobilité et avantager l'environnement.

California PATH [PATH, 2010] a pour mission de développer des stratégies et des technologies innovatrices pour les ITS dans le but d'améliorer la sécurité, flexibilité et mobilité des systèmes de transport.

Network on Wheels (NoW) [Festag, 2008], travaille sur le développement d'un système de communication pour VANET. Ce projet intègre les applications de sécurité, logistique et confort. NOW soutient et coopère fortement avec le consortium Car2Car.

Car2Car Communication Consortium [EU, 2010], est une organisation à but non lucratif lancée par les fabricants de véhicules européens qui est ouverte aux fournisseurs et aux organisations de recherche. Ses principales missions sont les suivantes : (i) la création d'un standard européen ouvert pour les communications V2V basé sur des composants WLAN, (ii) développer des prototypes et des démonstrateurs de systèmes V2V pour les applications de sécurité routière, (iii) promouvoir l'attribution d'une bande de fréquence exclusive libre pour les applications V2V en Europe, et (iv) développer des stratégies de déploiement et des modèles économiques pour la pénétration du marché.

2.8 Les réseaux véhiculaires ad hoc

Un réseau mobile ad hoc (Mobile Ad hoc Network, MANET) consiste en une population dense de nœuds mobiles qui se déplacent dans un espace. Chaque nœud dispose d'une interface sans-fil comme seul moyen de communication et sans aucune infrastructure réseau prédéfinie. Un VANET [Hartenstein, 2010] est un cas particulier de MANET qui est constitué de véhicules capables de s'échanger des informations par communication sans-fil. Par rapport à un réseau ad hoc classique ou à un MANET, le VANET se différencie par une forte mobilité des nœuds rendant la topologie du réseau fortement dynamique. La conception et la mise en place de

réseaux de communication entre véhicules et infrastructure veulent établir efficacement des communications haut débit à grande vitesse tout en limitant les coûts de déploiement.

Comparaison entre VANET et MANET : Les caractéristiques et les contraintes liées à l'environnement des réseaux de véhicules qui les distinguent des MANETs, peuvent se résumer aux points suivants : (i) Contrairement au contexte MANET, le VANET n'a pas de limite en termes d'énergie. Chaque nœud dispose d'une grande capacité de traitement et peut détenir plusieurs interfaces de communication (Wi-Fi, Bluetooth, RFID etc.). (ii) Les environnements pris en compte dans un MANET sont souvent des espaces confinés ou ouverts limités. Un VANET quant à lui suit un mouvement qui est lié aux infrastructures des autoroutes ou des routes en zones urbaines. (iii) Un VANET est caractérisé par une forte mobilité, liée à la vitesse des véhicules. Par conséquent, un nœud peut rapidement rejoindre ou quitter le réseau en un temps très court, ce qui rend les changements de topologie très fréquents. (iv) Le problème de partitionnement du réseau se produit fréquemment dans le VANET.

VANET et ITS : Les VANETs sont essentiels pour développement des ITS [USDOT, 2010b]. Sur le plan d'architecture réseau, la communication dans un VANET peut être soit: (i) V2V, (ii) V2I dans les deux sens, ou bien (iii) hybride (V2V et V2I). Les nœuds peuvent éventuellement servir de passerelle vers d'autres réseaux et services. ITS contribue à offrir des routes plus sûres et plus efficaces en se basant sur les VANETs pour la transmission des informations utiles entre les différents intervenants : véhicules, conducteurs, piétons, équipements de l'infrastructure (p. ex. capteurs, signalisation, points de services) et organismes (p. ex. autorité, centres de contrôle, gestion de trafic, péage). En résumé, les VANETs se chargent de connecter les différents intervenants dans les applications ITS, définir les protocoles de communication et gérer convenablement le routage et la dissémination de messages.

2.9 Standards de communication dans les VANETs

Les principaux organismes internationaux tels qu'IEEE [IEEE, 2010], IETF [IETF, 2010], ISO [ISO, 2010] et consortiums industriels tels que Car2Car s'intéressent au développement des nouveaux protocoles réseaux et standards de communication pour les applications ITS. L'IEEE travaille sur l'extension de la famille de protocoles 802.11 pour développer sa nouvelle pile protocolaire WAVE adaptée aux applications ITS. L'ISO a lancé depuis 2000 le standard

CALM basé sur IPv6 pour la communication continue dans les VANETs. L'organisme IETF propose un nombre d'extensions à IPv6 notamment Mobile IP et NEMO [Perera, 2004] en vue de standardiser une solution pour le support de la mobilité des réseaux. L'intégration et la standardisation de ces différentes initiatives fait l'objet d'intenses discussions et recherches.

2.9.1 DSRC

Un spectre de fréquences dédié aux communications dans ITS a été attribué dans différentes régions du monde. DSRC œuvre dans la bande de fréquence des 5.9GHz aux États-Unis et en Europe [Jiang, 2006]. Ces bandes de fréquences sont définies respectivement par le FCC (Federal Communication Commission) et par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). DSRC s'étend sur la bande de fréquence [5.850GHz, 5.925GHz] (75MHz) pour soutenir la communication de courte et de moyenne portée (entre 300 et 1000 m) avec un taux élevé de transfert de données allant de 3 à 27Mbps. Cette bande de fréquence DSRC est généralement segmentée en 7 canaux de 10 MHz chacun dont un CCH et six SCHs. Le CCH est réservé à la diffusion, avec haute priorité, des messages à usage unique tels que les trames de gestion et les messages de sécurité critique avec faible latence. Les messages critiques liés à la sécurité routière dans ITS sont transmis dans ce canal. Le CCH assure aussi l'initialisation des communications à double sens sur les SCHs. Les six autres SCHs sont, quant à eux, dédiés à la transmission des données des différents services annoncés sur le canal de contrôle. Un SCH supporte la communication à double sens entre les unités embarquées (On Board Unit, OBU) et les unités de l'infrastructure (Road Side Unit, RSU) ou entre OBUs, pour tout type d'applications ITS (p. ex. péage, accès internet). Différents types d'applications peuvent être exécutés en parallèle sur différentes SCHs. Plusieurs services de communication de courte et moyenne portée sont possibles avec un taux élevé de transfert et un faible temps de latence. L'allocation des canaux pour DSRC, la bande de fréquence, la limite de puissance rayonnée et la désignation de chaque canal pour le Canada, illustrées dans la figure 2.6, sont définies comme suit;

- Quatre SCHs partagés entre sécurité publique et privée. Ils sont désignés pour la communication entre les OBUs et les RSUs, dans les petites et les moyennes zones.

- Deux SCHs de courte portée; le canal 180 [5.895GHz, 5.905GHz] et le 182 [5.905GHz, 5.915GHz] avec une limite de puissance rayonnée de 23 dBm (200mW).
- Deux SCHs de moyenne portée; le canal 174 [5.865GHz, 5.875GHz] et le 176 [5.875GHz, 5.885GHz] avec une limite de puissance rayonnée de 33dBm (2.0W).
- Deux SCHs dédiés à la sécurité publique sont désignés pour les applications de sécurité critiques; le canal 172 [5.855GHz, 5.865GHz] avec une limite de puissance de 33dBm (2.0W) désigné pour sécurité publique V2V et le canal 184 [5.915GHz, 5.925GHz] avec une limite de puissance de 40dBm (10W) pour la sécurité publique au niveau des intersections routières.
- Un canal de contrôle, le canal 178 [5.885GHz, 5.895GHz] avec une limite de puissance de 44.8dBm (30.20W). Il est réservé pour la diffusion des applications et l'établissement des communications.

La bande de fréquence [5.850-5.855] est réservée pour l'harmonisation avec l'extension potentielle d'autres bandes (par exemple WiMAX [5,470, 5,825]).

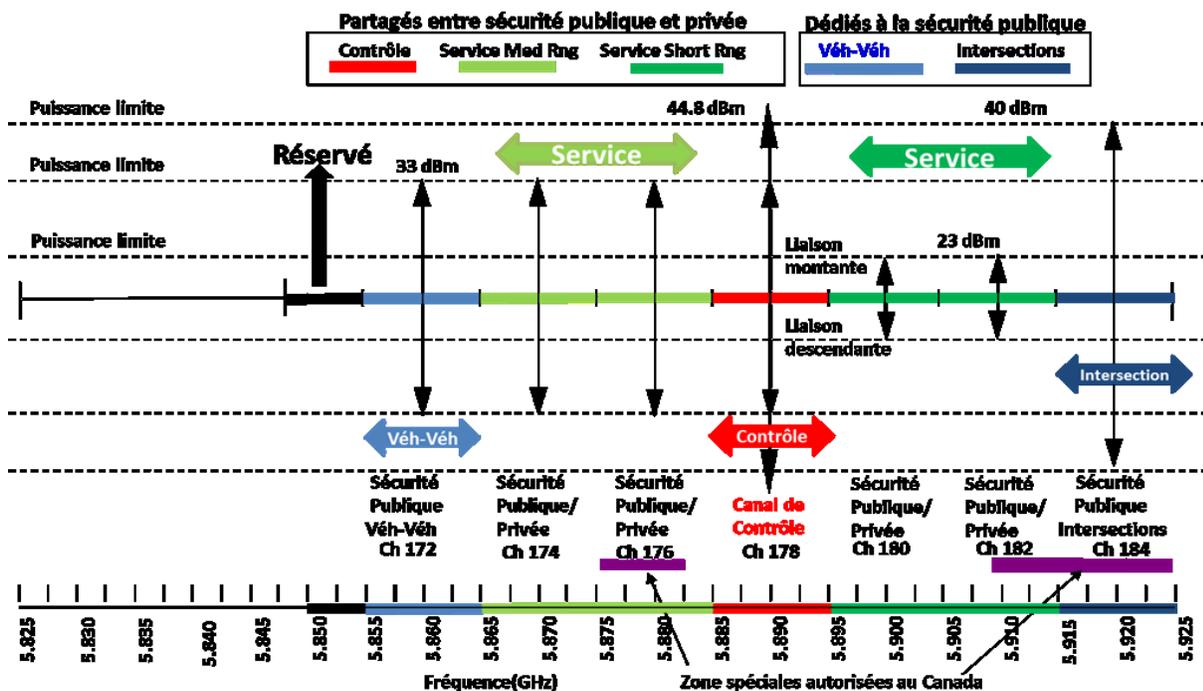


Figure 2.6 Présentation de la bande DSRC 5.9 GHz

2.9.2 Protocoles WAVE et IEEE 802.11P

Depuis l'année 2003 l'organisme IEEE a entrepris des travaux pour définir un nouveau standard dédié aux communications dans la bande DSRC. Ce standard connu sous le nom d'IEEE 802.11p/WAVE [Jiang, 2008a] utilise le concept de multicanaux afin d'assurer les communications pour les applications de sécurité et les autres services ITS. WAVE définit le mode d'opération des équipements IEEE802.11 dans la bande DSRC. La famille de protocoles IEEE1609 définit l'architecture, les modèles de communications, la gestion de structure, les mécanismes de sécurité et l'accès physique pour WAVE. IEEE 802.11p est le protocole sur lequel s'appuie le protocole WAVE au niveau de la couche physique et la couche de contrôle d'accès au support (Media Acces Control, MAC). L'objectif de ces travaux était d'adapter les technologies existantes (802.11) et de se préparer à supporter les nouvelles technologies (telle que IPv6). Ces améliorations visent à offrir aux unités mobiles à haute vitesse, notamment les véhicules, des services ITS avec une connectivité courte et intermittente.

Le protocole WAVE se base sur la famille de protocoles IEEE1609 pour opérer dans la bande DSRC. Cette pile protocolaire est formée de quatre standards :

i) IEEE 1609.1 Gestionnaire de ressources de WAVE au niveau des trois couches supérieures du modèle ISO. Ce protocole décrit les composants clés de l'architecture du système WAVE; a) spécifie les services et les interfaces des applications supportées par WAVE, b) définit les formats des messages de commandes et les réponses appropriées ainsi que les formats du stockage de données.

ii) IEEE 1609.2 Service de sécurité et gestion de messages de WAVE pour la transmission sécurisée des messages au niveau de la couche transport. Ce service définit les formats sécuritaires des messages et la façon dont ils sont traités et spécifie les conditions à respecter pour un échange sécuritaire de messages. Pour l'exemple de la sécurité et la protection des renseignements personnels, WAVE utilise les mécanismes suivants;

- Des adresses des OBUs aléatoires, pour prévenir la localisation malveillante des véhicules.
- Des annonces d'applications des RSUs authentifiées pour prévenir les messages erronés au niveau des véhicules.

- Le chiffrement au niveau de la couche liaison pour tous les messages pour prévenir le problème d'écoute aux portes.
- L'authentification par l'utilisation des PKI (Public Key Infrastructure).

iii) IEEE 1609.3 Services de réseautage de WAVE au niveau de la couche réseau incluant l'adressage et le routage. WAVE permet la communication basée sur IP, avec IPv6, ou optionnellement mobile IPv6 (MIPv6) ou Network Mobility Enhancement (NEMO). La couche transport est toujours basée sur UDP ou TCP. Ce type de messages est et transmis sur SCH seulement. WAVE permet aussi une communication non basée sur IP, avec le protocole WAVE Short Message (WSMP). Les messages de type WSMP sont transmis dans CCH et SCH. Sur le plan de gestion, IEEE 1609.3 introduit WAVE Management Entity (WME) qui gère la participation des WAVE Basic Service Set (WBSS) à l'appui des applications et coordonne la configuration d'IPv6.

iv) IEEE 1609.4 Opérations multicanaux de WAVE pour la coordination et la gestion des sept canaux dans la bande DSRC. Cette extension fonctionnelle s'occupe de la file d'attente et de l'ordre de priorité de l'accès au medium. L'objectif de 1609.4 est de permettre des mécanismes effectifs pour contrôler les opérations des couches supérieures de transfert de données à travers des canaux multiples, sans avoir besoin de connaître les paramètres de la couche physique. Ce protocole offre une extension fonctionnelle qui s'occupe de l'alternance et du routage des canaux, de la file d'attente et de l'ordre de priorité de l'accès sur le plan données. Sur le plan gestion, 1609.4 assure la synchronisation multi canaux, l'accès au canal et maintenance de MIB (Management information Base).

IEEE802.11p est le protocole au niveau de couche MAC et physique pour WAVE. Au niveau de la couche MAC, 802.11p est basé sur la méthode CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Pour l'adressage, les RSUs ont des adresses MAC fixes de 48bits et l'OBUS génère une adresse MAC aléatoire dès le démarrage de l'équipement. Lorsqu'une collision d'adresses MAC a lieu, l'OBUS change automatiquement son adresse. Les extensions de 802.11p MAC concernent la gestion de la priorité des messages pour mieux gérer les applications sensibles au retard. Au niveau de la couche physique à 5,9GHz, IEEE 802.11p emploie OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) de manière similaire à IEEE802.11a, mais avec des canaux de 10MHz.

La figure 2.7 suivante représente le modèle WAVE et le situe par rapport au modèle ISO.

N	Modèle ISO/OSI	Modèle WAVE	Protocole	Données		gestion
7	Application	Couche supérieure	IEEE 1609.1	ex. HTTP	Application WAVE	
6	Présentation					
5	Session					
4	transport	Services de réseautage	IEEE 1609.2	TCP/UDP	WSMP	WME
3	Réseau		IEEE 1609.3	IPv6		
2b	Liaison de données	s-couche LLC	IEEE 802.2	WAVE LLC		
2a		s-couche MAC	IEEE 1609.4 IEEE 802.11p	WAVE MAC	MCO	
1b	Physique	Couche physique	IEEE 802.11p	WAVE PLCP		PLME
1a				WAVE PMD		

Légende :

P1609.1 : Gestionnaire de ressources

P1609.2 : Service de sécurité et gestion de messages

P1609.3 : Services de réseautage

P1609.4 : Opérations multi-channel

IEEE802.11p : couche physique et Mac pour WAVE

WSMP: Wave Short Message Protocol

MCO: Multi-channel Operation

PLCP: Physical Layer Convergence Protocol

WME: WAVE Management Entity

PMD: Physical Medium Dependent

MLME: MAC Layer Management Entity

Figure 2.7: Comparaison entre le modèle OSI et le modèle WAVE

2.9.3 Mode de fonctionnement de DSRC

Dans le mode de fonctionnement de DSRC [ASTM, 2002], chaque seconde est divisée en 10 intervalles. Chaque intervalle est composé d'une alternance d'un intervalle CCH durant lequel tous les nœuds écoutent le CCH et un intervalle SCH durant lequel les nœuds surveillent les canaux de service. Le mode d'opération par défaut pour un dispositif WAVE est de recevoir sur CCH. Si le dispositif WAVE participe à un WBSS, il va périodiquement alterner entre CCH et SCH. Durant l'intervalle SCH, les nœuds alternent entre le mode réception et le mode transmission. Selon ce mode de fonctionnement, un RSU annonce aux OBUs les applications qu'il supporte et sur quel canal chacune de celles-ci est transmise, avec une cadence de 10 fois par seconde. Au début, un OBU écoute sur le canal 172 et authentifie la signature digitale du RSU. Il exécute les applications de sécurité d'abord, par la suite, il change pour les autres canaux et exécute les applications non de sécurité. Enfin, il revient au canal 172 et il réitère le processus. Les applications de sécurité publique et leurs messages sont prioritaires dans tous les canaux.

Un WBSS consiste en ressources en termes de temps et fréquences du canal qui seront réservées pour un service donné. Un WBSS est annoncé dans le CCH et établi dans un SCH. Si une application n'utilise pas un WBSS, elle peut seulement communiquer avec WSMP dans le CCH. Sinon, les applications qui emploient un WBSS peuvent communiquer avec WSMP ou IP dans le SCH associé à ce WBSS. WSMP est utilisé dans les canaux de service et de contrôle. Ce protocole est utilisé seulement par les dispositifs qui supportent WAVE est limité à 1400 octets. Le format du paquet IEEE 802.11p est le même que le standard IEEE802.11a. La nouveauté consiste dans le format de message WSMP. IPv6 est utilisé dans les canaux de service seulement. Il permet l'accès aux applications génériques et au réseau global.

Pour la gestion de la priorité d'accès au niveau MAC, les messages sont rangés dans quatre classes d'accès différentes (Access Classes, AC) chacune ayant sa propre priorité. La priorité de AC0 est inférieure à celle de AC1 encore inférieure à celle de AC2 et AC3 détient de la priorité la plus élevée. Chaque AC contient une file d'attente, lorsqu'un paquet arrive, il sera ajouté à la file qui correspond à sa priorité pour attendre son tour avant d'être envoyé. Le temps d'attente minimum dans une file est déterminé par les paramètres de contention.

Le temps minimum qu'un paquet devra attendre est égal à la somme : i) de la durée d'attente fixée et dépendante de la classe (9 périodes de 16 μ s pour la classe AC0, 6 périodes pour AC1,

3 périodes pour AC2 et 2 périodes pour AC3) appelée AIFS (Arbitration Inter-Frame Space) et ii) de la fenêtre de contention CW (Contention Window) qui est une valeur aléatoire prise entre 0 et CWmin (calculée selon les quatre priorités disponibles dépendant de la classe). Une fois ce temps d'attente est expiré, le paquet est envoyé. En cas de collision le paquet est retransmis avec une CW augmentée de $2(CW+1)-1$. Et ainsi de suite jusqu'à ce que le paquet soit transmis ou que la valeur de CW atteint CWmax (dépendant également de la classe) ou bien que le nombre maximal de tentatives (fixé à 7) est atteint.

Au niveau de la couche physique à 5,9GHz, IEEE 802.11p emploie le procédé OFDM avec des canaux de 10 MHz. IEEE 802.11p opère selon deux modes :

- Sans WBSS pour les messages de données et les messages de contrôle de sécurité critique, à faible latence, généralement en diffusion dans le CCH.
- Avec WBSS, pour les transactions à double sens (p. ex. de péage), cela demande l'utilisation d'un SCH après une phase d'initialisation dans le CCH.

Le 802.11p réduit de la moitié la bande passante du canal de 802.11a fixée à 20MHz. Il offre un taux de transfert de 3-27Mbps (la moitié de 802.11a) et double la durée du symbole. Le tableau suivant présente une comparaison entre 802.11a et 802.11p.

Tableau 2.2: Comparaison entre 802.11p et 802.11a

Paramètres	802.11p	802.11a
Modulation	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Durée d'un symbole OFDM	8 μ s	4 μ s
Intervalle de garde	1.6 μ s	0.8 μ s
Période FFT	6.4 μ s	3.2 μ s
Durée de préambule	32 μ s	16 μ s
Espacement entre fréquence de sous-porteuses	0.15625MHz	0.3125MHz
Taux de transfert de données Mbps	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 et 27	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 et 54
Taux de codage	1/2, 1/3, 3/4	1/2, 1/3, 3/4
Nombre de sous-porteuses	52+12 (entre porteuses)	52+12 (entre porteuses)

Plusieurs protocoles de routage sont proposés avec différentes techniques de dissémination de données dans les VANETs. Chacun de ces protocoles est bien adapté à un environnement donné (p. ex. autoroute, zone urbaine) avec des conditions spécifiques (forte ou faible densité de véhicules). Un protocole de routage peut être efficace pour certains types d'informations (p. ex. embouteillage, freinage) sans l'être pour la dissémination d'autres. Différentes métriques sont proposées pour évaluer ces protocoles telles que la latence (temps nécessaire pour propager une information entre deux véhicules séparés par une certaine distance), la performance d'une diffusion (en termes de nouvelle zone géographique couverte par une diffusion), le pourcentage de véhicules ayant reçu l'information, la précision (en terme d'erreur moyenne dans l'estimation de la localisation des autres véhicules sur la route) ou le taux d'utilisation (proportion d'information utile reçue par les véhicules). Les protocoles sont aussi jugés par leur niveau de consommation d'énergie et l'utilisation de la bande passante par les dispositifs de communication [Abid, 2010b].

2.9.4 CALM

Le groupe de travail (WG16) au sein de l'organisme international ISO travaille sur un schéma standardisé d'une série de protocoles de communication sans-fil pour les applications ITS. Le nom de projet CALM (Continuous Air-interface, Long and Medium Range) est devenu depuis 2007, l'acronyme de Communication Architecture for Land Mobile [ISO, 2014]. L'objectif de CALM est de développer une plateforme logicielle embarquée dans les véhicules qui assure l'interface entre plusieurs technologies de communication. Ces dernières incluent GSM (2G et 3G), Wi-Fi, DSRC (5.8GHz et 5.9GHz), les ondes millimétriques (60 GHz), WiMAX (IEEE802.11e), l'infrarouge, RFID et Bluetooth. Une vue d'ensemble des moyens de communication CALM est présentée dans la figure 2.8 suivante.

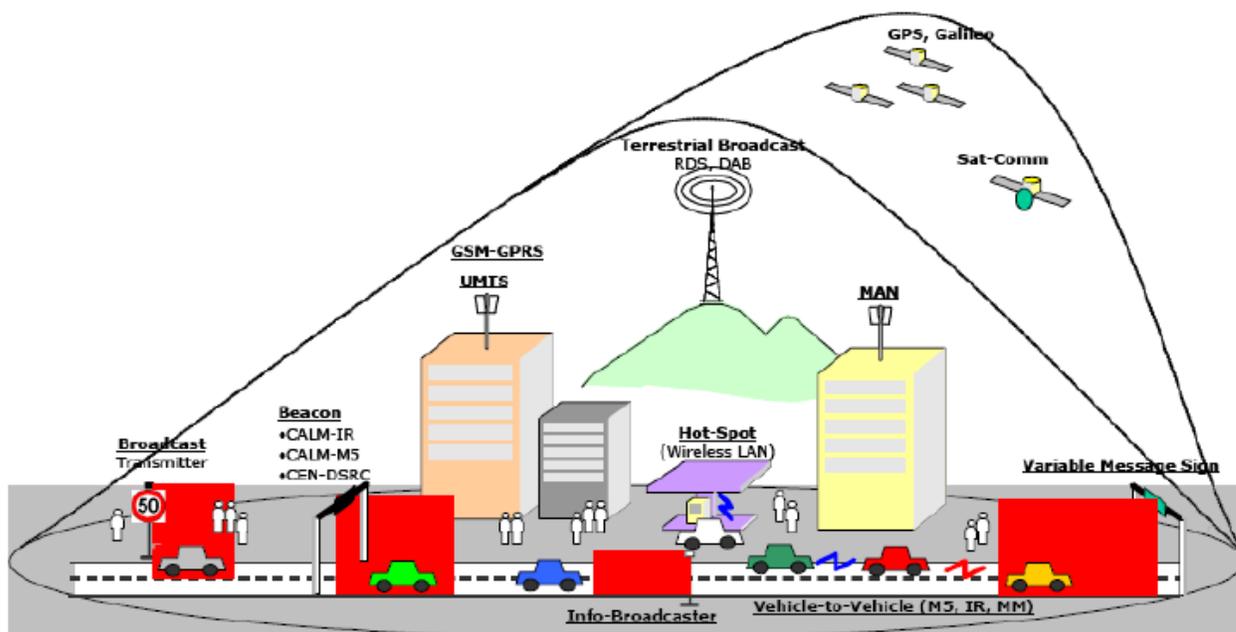


Figure 2.8 Les différentes technologies de communications supportées par CALM
[CALM, 2010]

CALM représente plus un référentiel qu'un protocole. Le but de CALM est d'offrir une communication continue ou quasi-continue de manière transparente pour une station mobile à travers les réseaux hétérogènes. Ceci, en sélectionnant en tout temps le meilleur choix de réseau selon la disponibilité, sans se préoccuper de la technologie de communication utilisée (p. ex. IEEE, IETF).

CALM dispose d'une architecture modulaire et souple. Elle comprend trois grands niveaux; (i) application, (ii) réseau et transport, (iii) accès physique au médium. Le centre de cette architecture est la couche réseau unifiée basée sur IPv6 (ISO21210), sur laquelle les différentes interfaces de communications viennent se brancher. CALM permet d'intégrer différents technologies et standards de communication, définis par le groupe CALM (CALM media) ou non (External media). Chaque interface présente un point d'accès au service (Service Access Point, SAP) à la couche réseau pour simplifier son implémentation. La figure 2.9 suivante schématise les interactions entre différents composants de l'architecture CALM.

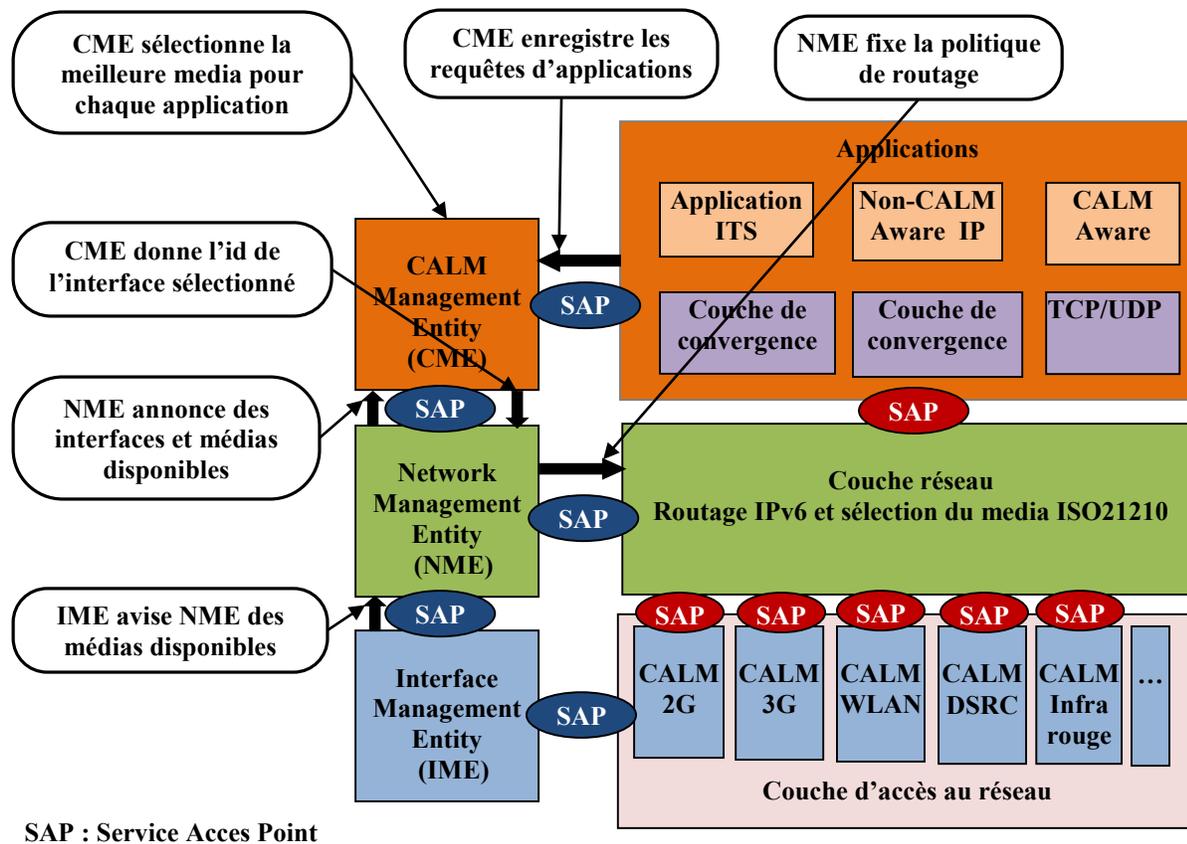


Figure 2.9 Architecture CALM et interaction entre ses composants

Les applications se divisent en deux grands types. Le premier type comporte les applications dites non-CALM-Aware qui vont dialoguer avec l'entité de management de CALM (CALM Management Entity, CME) et doivent passer par une couche de convergence avant d'interagir avec la couche physique. Le deuxième type contient les applications Internet standards (TCP/UPD) qui vont établir des communications sans se préoccuper des interfaces utilisées ou nécessiter une qualité de service particulière. Ces applications dites CALM-Aware disposent d'un SAP qui leur permet de déclarer leur préférences. Un SAP détient les informations permettant de caractériser les données à transmettre pour permettre au processus de décisions de choisir le meilleur moyen de communication.

Le gestionnaire d'interface (Interface Management Entity, IME) prend en compte les spécificités de chaque interface. IME dispose d'un SAP de gestion (SAP en bleu sur la figure 2.9) avec chaque technologie pour pouvoir la configurer et gérer son attachement aux différents protocoles d'accès aux réseaux. Une couche d'adaptation unifiée ISO 21218 est conçue pour simplifier cette tâche d'intégration. Le gestionnaire d'interface surveille aussi des interfaces

pour informer le gestionnaire de réseau (Network Management Entity, NME) de la disponibilité et l'état des différentes interfaces de communication.

Le gestionnaire réseau assure l'attribution de la charge des différentes applications en cours aux interfaces disponibles. Le NME interagit avec la couche réseau pour établir les tables de routage requises pour router les messages vers les SAP correspondants aux interfaces sélectionnés. Pour prendre ces décisions, le NME va communiquer avec le CME pour recevoir les requêtes de différentes applications

Le gestionnaire CALM enregistre les besoins de toutes les applications actives et les transmet au NME. CME se charge aussi de sélectionner la meilleure interface de communication pour chaque application.

CALM offre des services commerciaux et des services de confort Il permet aussi des applications ITS avec des contraintes temporelles très fortes, telles que la sécurité routière ou la gestion du trafic. Ces applications font appels à d'autres protocoles et interfaces de communications spécifiquement adaptées au contexte ITS tels que CALM M5/Infrarouge et IEEE 802.11p/WAVE. Ces standards sont conçus pour les communications V2V et V2I et ne sont donc pas obligatoirement reliés à Internet.

Ces nouveaux standards définissent spécifiquement la manière de traitement de chaque message selon son degré d'urgence ou d'importance. Ils s'appuient aussi sur des nouveaux protocoles de routage tels que Géocast ou les autres protocoles géographiques (basés sur la position des nœuds). Puisque la couche réseau de TCP/UDP ne supporte pas ce genre de services, CALM va implémenter un nouveau mode de fonctionnement appelé CALM FAST à côté d'IPv6. L'architecture de gestion est aussi modifiée pour autoriser à une application de ce type de préciser explicitement le standard de communication qu'elle a besoin d'utiliser et les contraintes à satisfaire pour chaque message [Abid, 2010b].

CHAPITRE 3 RECEIVED SIGNAL COMPENSATION-BASED POSITION ESTIMATION OF OUTDOOR RFID NODES

Avant-propos

Auteurs et affiliations :

M.A. Abid : étudiant au doctorat, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

S. Cherkaoui : professeur, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

Date d'acceptation : 6 décembre 2010.

État de l'acceptation : version finale publiée.

Conférence : Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE.

Référence : [Abid, 2010a]

Titre français : Localisation des nœuds RFID en espace libre basée sur la compensation des signaux reçus.

Contribution au document :

Le premier article élabore une première ébauche de la nouvelle technique de radio localisation basée sur le principe de compensation entre les RSS. La technique propose d'utiliser le rapport entre les puissances de signaux reçus par des paires de lecteurs RFID dans le but d'estimer la position de l'étiquette RFID active émettrice, portée par la cible. La position de la cible est délimitée par l'intersection de trois zones au minimum moyennant trois lecteurs RFID de référence, avec des positions fixes et connues. Chacune des zones est calculée en référence à une paire de lecteurs, en utilisant le rapport des distances qui séparent la cible de chacun des

deux lecteurs. L'étude présentée dans cet article se base sur un modèle de propagation simplifié pour l'affaiblissement de parcours des ondes radio et se restreint aux caractéristiques de la technologie RFID. L'objectif de l'étude est de démontrer l'intérêt de la nouvelle méthode de localisation et évaluer sa performance.

Résumé français :

Cet article propose une nouvelle technique pour estimer la position géographique d'une étiquette RFID active dans un environnement extérieur. La localisation se base sur la puissance de signaux d'un message émis par une étiquette RFID et reçu par un ensemble de lecteurs RFID avec des emplacements connus. La technique admet que les lecteurs disposent d'antennes omnidirectionnelles répandues avec les systèmes RFID de longue portée déployés dans des environnements extérieurs. La technique réussit à délimiter la position de la cible à l'intérieur d'une zone géographique restreinte même lorsque l'EIRP de l'étiquette RFID est inconnue. Les résultats des simulations montrent que cette technique basée sur la compensation entre les puissances des signaux reçus surpasse les autres méthodes de localisation conventionnelles, utilisant RSS, en permettant de cerner la position de la cible à l'intérieur d'une zone d'incertitude plus réduite.

3.1 Abstract

We propose a new algorithm for estimating the location of an outdoor RFID node, based on the received signal strength (RSS) of a transmitted message by a set of readers with known locations. The algorithm supposes Omni-directional RFID readers that are prevalent for outdoor long-range RFID systems. The method does not require knowledge of the Effective Isotropic Power (EIRP) of the transmitting tag, and bounds the position of the node within a small-delimited candidate area. Our simulation results demonstrate that the Received Signal Compensation Based Localization (CBL) method outperforms other compared RSS-based methods in improving the precision of the bounded area.

Index Terms: Localization, RFID, RSS.

3.2 Introduction

Radio Frequency Identification (RFID) technology is increasingly pervasive. Passive RFID tags are inexpensive and thus are the most prevalent form of RFID technology. Passive RFID poses, however, a number of limitations. The radio range of the reader does not exceed a few meters. Communication can be disturbed by materials such as metal, human body, walls, water, etc... Tags are parasitically powered by the energy from RFID readers, and usually employ linearly polarized antennas. If the angle between a reader and a tag is not within certain values, it may result in false negative readings. Most existing works on RFID-based localization suppose a directional reader/tag antenna. But recently, omni-directional antennas for passive RFID are gaining much interest [Chen, 2009]. Active or semi-active RFID technology uses battery powered tags and can reach distances up to 200m. Typically, long-range active RFID technology uses omni-directional antennas and is targeted towards longer range indoors applications. For example, Montreal city has recently adopted an active RFID-based solution where RFID-tagged buses and RFID-enabled bus stops provide increased transit visibility [Motorola, 2010]. Transit managers have a real-time view on bus dispositions and riders can wait sheltered from frigid weather temperatures while viewing real-time information about their bus expected time-of-arrival.

In this work we focused on network-based location estimation mechanisms for outdoor RFID nodes assuming omni-directional RFID readers. Given an RFID message emitted by a tag, the Received Signal Strength (RSS) collected at readers situated within the radio range of the tag is used to pinpoint the position of the emitter in a bounded zone with a certain confidence. The RSS value at each RFID reader is used to estimate a probable range of distances of the emitting tag from each reader. The new algorithm, called Compensation Based Localization (CBL) is based on distance ratios of a tag from two or more readers. The algorithm does not need assistance from the active tag in estimating its position. Neither does it require knowledge of the Effective Isotropic Power (EIRP) of the transmitting tag that may be affected, for example, with the state of its battery.

The rest of the paper is organized as follows: the next section discusses some related work. Section III presents the proposed approach. In section IV we present the simulation results and their analysis. Section V concludes the paper.

3.3 Related Works

Generally, radio frequency localization can be implemented by following one of two approaches. In the first one, most employed, the mobile node is the emitter and its location is computed at a central setup. In the second approach, the mobile is the receiver and its location is computed at its own level, like it is the case for GPS-equipped devices. Three methods are commonly used with RFID-based localization; Triangulation/Trilateration [Yang, 2009], Fingerprinting [Jin, 2006] and Landmark [Choi, 2009]. The majority of triangulation techniques use the first approach. Fingerprinting may use one or the other. However, most of RFID-based localization schemes presume a directional antenna model for the reader [Hahnel, 2003]. Ferret for example uses the location and directionality of RFID readers to infer the locations of nearby tags [Liu, 2006a].

If we presume an omni-directional antenna model for RFID nodes, different works have been proposed to locate general wireless nodes based on some collected signal information. Time-of-Arrival based approaches such as in [Sastry, 2003] need that all transmitters and receivers be precisely synchronized and have fast processors to eliminate the delay due to processing. This might not be feasible for RFID tags. Some relative RSS localization mechanisms were also described [He, 2003], [Liu, 2004] where a node collects the RSS values it receives to calculate its position. This again might not be practical in the case of RFID tags. RSS variations are taken into account in other works to construct a minimum and maximum distance annulus between the receiver and the emitter but the methods require knowledge of the emitter EIRP [Barbeau, 2006], [Liu, 2006b] which might not be feasible if there are variations in the transmitting tag power.

3.4 Radio propagation model and localization technique

An obvious RFID-based localization system requires the setting of a tag on the mobile node and two or more RFID readers at fixed locations. RFID tags may be attached to vehicles or carried by people. When a signal is received from a tag, some metrics are acquired and used for the distance estimation. CBL algorithm is based on the collection of RSS by a set of receivers. An RSS indicator eliminates the need for additional hardware in small receivers, and exhibits

favorable properties with respect to power consumption, size and cost. Because of its attractiveness, the research community has extensively considered the use of radio signal strength. Since the attenuation of the emitted signal strength is function of the distance between the emitter and the receiver. The target can be localized with at least three receivers if the corresponding signal path losses due to propagation are known. RSS-based localization methods are appropriate for localized outdoor areas with no severe effects influencing propagation such as multipath, fading or shadowing. Several empirical and theoretical models [Janaswamy, 2005], [Abhayawardhana, 2005], [Kong, 2009] have been proposed in literature to correlate the difference between the transmitted and the received signal strength with distance. One main drawback of most RSS-based techniques is the need for a measurement-based training phase during which the radio map of the environment is created. The process of generating a radio map is not only costly and sensitive to changes from one area to another, but also unrealistic for application with a projected high deployment.

In the proposed Compensation Based Localization method, we rely on using an appropriate propagation model instead of generating a radio map of a zone. A few reference tags are placed in the area where targets localization is to take place. To determine the position of a target, CBL uses the propagation model and signal information collected by the readers from the reference tags and the target tag at a given time. The received signal strength decreases by a value of free space Path Loss (PL) proportionally to the distance to the sender as stated by [Rappaport, 2002].

$$P_r(d)[dBm] = P_t[dBm] - PL(d)[dB] + G_r[dB] + G_t[dB] \quad (3.1)$$

Where P_r And P_t are the power of the receiver and the transmitter, and G_r and G_t are the gains of the receiver and transmitter antennas respectively. $PL(d)$ is the path loss which is a function of distance d separating the emitter from the receiver, calculated as in the following equations:

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d)[dB] + X_\sigma[dB] \quad (3.2)$$

$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.3)$$

Where n is the path loss exponent that indicates the rate, at which the path loss increases with distance, d_0 is the close-in reference distance which is determined from measurements close to the transmitter. The value of n depends on the specific propagation environment. In free space, n is equal to 2, and when obstructions are present, n will have a larger value.

The PL of the reference RFID tags is calculated using the free space path loss formula as follow:

$$PL(dB) = 10 \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = -10 \log\left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}\right) \quad (3.4)$$

According to Friis's free space transmission equation;

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^n \quad (3.5)$$

Where λ is the wavelength. In practice, this method requires an accurate and continual determination of the value of n to mitigate the dynamic change in the environment. For this reason, n has to be calculated at each signal emission based on the reference RFID tags placed in specific coordinates in the detection area such as shown in Fig. 3.1.

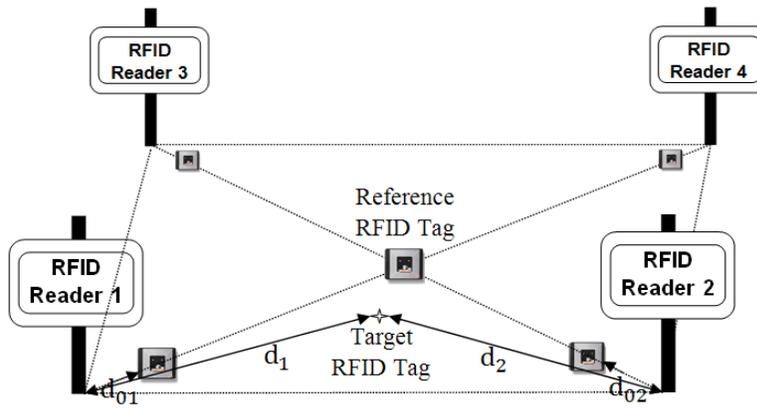


Figure 3.1: Reference tags location

The localization errors observed with this technique in real environments are quite large. They are due primarily to the random nature of the received power. Indeed, (3.2) shows that the received power is dependent of the random variable X_σ a zero-mean Gaussian distributed random variable (in dB) with standard derivation σ (also in dB). The variable X_σ considers the effects of propagation channel variability due to many factors such as fading, shadowing, reflection etc... Computations of probabilities that involve Gaussian processes require finding the area under the tail of the Gaussian (normal) probability density function as:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} \quad (3.6)$$

Where m and x are respectively the mean and the current value of PL (dB).

For a selected confidence level C , X_σ lies in the confidence interval $[-z\sigma \text{ dB}; +z\sigma \text{ dB}]$, where $z = \Phi^{-1}\left(\frac{1+C}{2}\right)$ and can be obtained from a Normal distribution table. Reference tags are used to continuously calibrate the propagation parameters n and σ specific to the environment and can vary during the process of localization. To further reduce the effect of the error caused by variable X_σ , we consider the ratio $\frac{d_1}{d_2}$ where d_1 and d_2 are the distances between the transmitter target tag and readers R_1 and R_2 respectively. For a signal transmitted by the same source of power P_t two values of signal strength P_{r1} and P_{r2} are recorded by both readers. As we suppose all readers to be identical (same gains):

$$P_{r1} + \overline{PL}(d_{01}) + 10 n \log\left(\frac{d_1}{d_{01}}\right) \pm z\sigma = P_{r2} + \overline{PL}(d_{02}) + 10 n \log\left(\frac{d_2}{d_{02}}\right) \pm z\sigma \quad (3.7)$$

Knowing parameters of (3.5), we can deduce distance d separating the node from each reader with known coordinates.

3.4.1 Trilateration

The Trilateration method [Yang, 2009] is based on the fact that the location of an object can be determined if the distances to three references are known. It differs from triangulation, which is based on the measurement of the angles of the received signal. With three readers, the target can be approximately located in a given area as shown in Fig. 3.2. The dotted circles are constructed using the real distances between the target and three fixed readers (R_1 , R_2 and R_3) and their intersection gives the actual position of the mobile RFID tag. Generally, the estimated distances (d_1 , d_2 and d_3) are larger than the real distances and their intersection gives rather a region of uncertainty (the shaded region) around the node. A variety of statistical direct or iterative techniques can be used to locate more precisely the target in this region of uncertainty. Note that in cases where at least one of the three estimated distances is less than the actual distance, the area cannot be determined because there would be no intersection. So to increase the accuracy of this technique, generally more than three receivers are used.

3.4.2 Compensation Based Localization

To remediate to errors of trilateration, CBL considers the ratio $\frac{d_1}{d_2}$ of distance to two given readers. Since we cannot assume that deviation can be canceled from one side to the other of the tag, we consider the two extreme situations to delimit the area where the target may be located. The first situation considers deviation in the R1 side at its minimum ($-z\sigma$), and at its maximum on the R2 side ($+z\sigma$), then;

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^+ = 10^{\left(\frac{P_{r2} + \overline{PL}(d_{02}) - P_{r1} - \overline{PL}(d_{01}) + 2z\sigma}{10n}\right)} \quad (3.8)$$

And the second situation considers the deviation in the R1 side be at its maximum ($+z\sigma$) and at its minimum on R2 side ($-z\sigma$), then;

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^- = 10^{\left(\frac{P_{r2} + \overline{PL}(d_{02}) - P_{r1} - \overline{PL}(d_{01}) - 2z\sigma}{10n}\right)} \quad (3.9)$$

Let's $\frac{d_1}{d_2} = K'$, d_i and d_j being the distance to RFID readers R_i et R_j , and L the distance between them (see Fig. 3.3) and $K = K'^2$. The target position relative to two readers represents a point with Cartesian coordinates x and y belonging to the set of points constituting the solution of the following second degree polynomial equation:

$$Ax^2 + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (3.10)$$

If both readers are at the same line parallel to x axe's, so $x_j = x_i + L$ and $y_i = y_j$, then;

$$A = B = (1 - K)$$

$$C = 2KL - 2x_i(1 - K)$$

$$D = -2y_i(1 - K)$$

$$E = x_i^2(1 - K) + y_i^2(1 - K) - 2KLx_i - KL^2$$

Otherwise, if both readers are in the same line parallel to y axe's, so $x_j = x_i$ and $y_i = y_j + L$, then;

$$A = B = (1 - K)$$

$$C = -2x_i(1 - K)$$

$$D = 2KL - 2y_i(1 - K)$$

$$E = x_i^2(1 - K) + y_i^2(1 - K) - 2KLy_i - KL^2$$

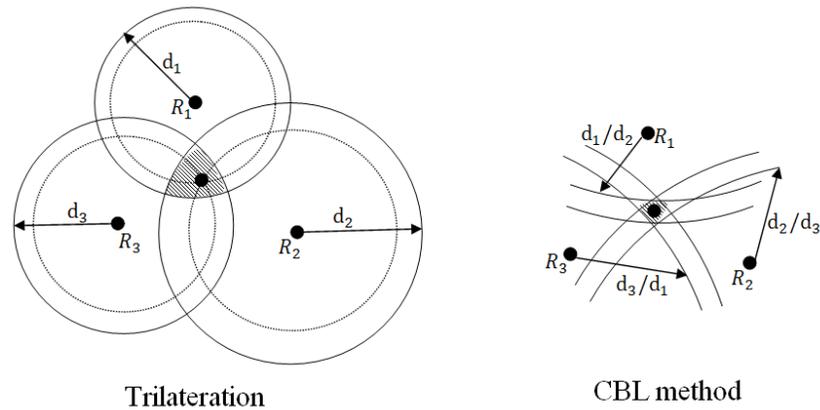


Figure 3.2: Difference between Trilateration and CBL method.

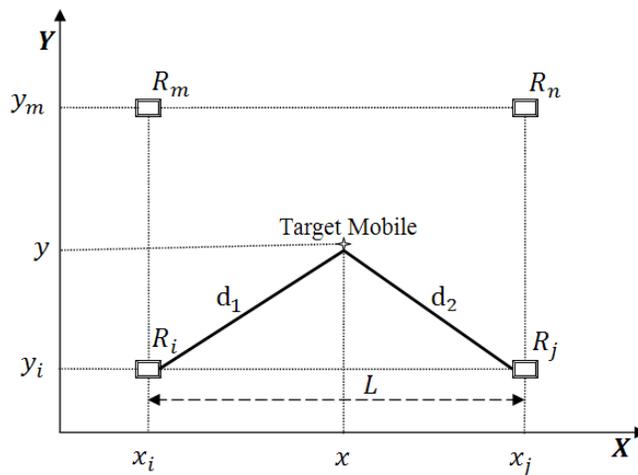


Figure 3.3: Illustration of triangulation and CBL methods.

To accurately estimate the target position, it is necessary to determine the intersection area between two hyperbolas. Each hyperbola represents the estimate of distance separation from two readers by compensation. So to determine the position of a target, three readers at least are necessary. For example, with 3 readers, 6 hyperbolas can be plotted to minimize the region of uncertainty around the mobile tag. To ensure a solution in every case, annuli obtained by (3.8) and (3.9) are used by CBL. Each annulus delimits an area that can contain the target with a distance ratio calculated with respect to a pair of receivers R_i and R_j . The minimum bound of this area is the ratio between the nearest possible distances from the target to R_i still further from R_j . The maximum area bound is the ratio between the farthest possible distances from the target to R_i even closer to R_j . The target node is located in the area between the minimum and maximum distance range ratio to R_i and R_j called Δ_{ij} , as shown in Fig. 3.4.

In order to track the mobility of the target tag, CBL determines the successive bounded areas at successive times and proceeds iteratively. A regression line correlating best the points bounded by the areas calculated at each iteration, helps determine the trajectory of the target, as illustrated in Fig. 3.4. Along the iteration process, the number of calculated points increases and the trajectory becomes clearer. The position returned by CBL, at each iteration, will be situated on the regression straight line or nearest point. For the first iteration, the position of the closest reader (with the strongest RSS) is considered as a point of population.

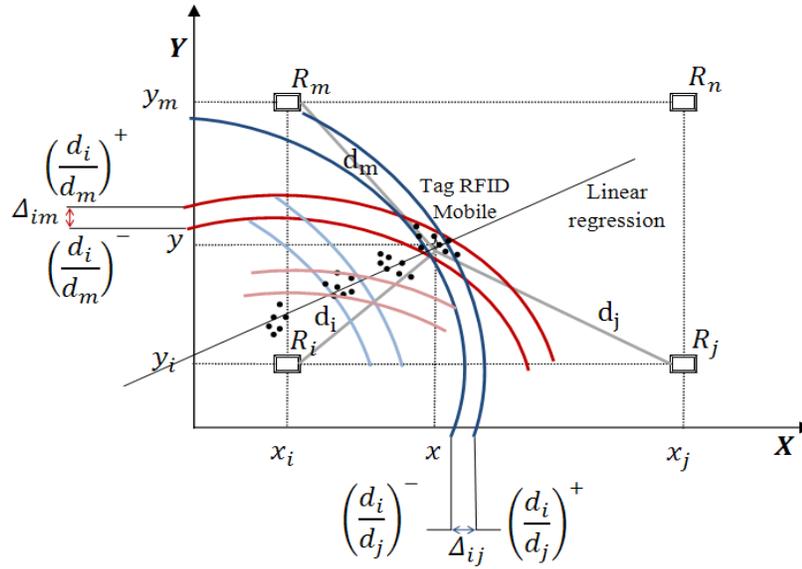


Figure 3.4: Target Tracking Approach.

The line of least squares also called regression y function of x represents the trajectory:

$$y = a x + b \tag{3.11}$$

Where: $a = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$ And $b = \bar{y} - a \bar{x}$

N is total number of points, $\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i$ and $\bar{y} = \sum_{i=1}^N y_i$

A simple linear correlation coefficient $|R|$ close to 1 means a good fit between all points and a better identification of the target trajectory.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \tag{3.12}$$

3.5 Simulation Results

In order to validate the features of the CBL, a set of simulations were performed in MATLAB environment. The scenario illustrated in the figures depicts an example where an RFID tag is attached to a person or a vehicle moving within the zone of a road intersection. Localization in this scenario is performed with four receivers, located on a $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ grid. The transmitter location is simulated randomly inside the grid. The simulation assumes a frequency of 915 MHz, a reference distance d_0 of 1 m, with a path loss exponent n of 2.69 and a shadowing standard deviation σ of 3.43 both determined experimentally in an outdoor setting. An EIRP of 50 dBm determined experimentally is assumed for computing the simulated RSS values at each receiver. For each execution, the minimum and maximum amount of signal shadowing is added to the RSS values along a Normal distribution, with mean zero and standard deviation σ . The minimum and maximum bound hyperbolas are then traced between each pair of receivers. The RFID tag localization is performed for confidence values $C = 0.92, 0.95$ and 0.99 . The area (z) of the bounded zone calculated by CBL is shown in Table 3.1.

Table 3.1: Relationship between intersection area and C values.

Z (C %)	1.66 (C=92%)	1.96 (C=95%)	2.44 (C=99%)
Intersection zone area (m^2)	9.544	13.7732	23.1642
Intersection zone vs. total zone	9.55%	13.77%	23.16%

In the second part of the set of simulations, CBL method is compared first to the Trilateration method and second to the the RSS Localization method described in [Landereau, 2008a].

For the Trilateration method, the layout is depicted in Fig. 3.5. Let (x, y) represent the coordinates of the real target T , and $(D_1, D_2, D_3$ and $D_4)$ distances estimated from $(R_1, R_2, R_3$ and $R_4)$ based on Friis's equation with the same value of standard deviation σ . For each estimated position, one circle is plotted with the reader coordinates as center and the estimated separation distance value as radius. The grey area shown in Fig. 3.5 measures the gap between the distance estimated via the RSS Localization and the real target position.

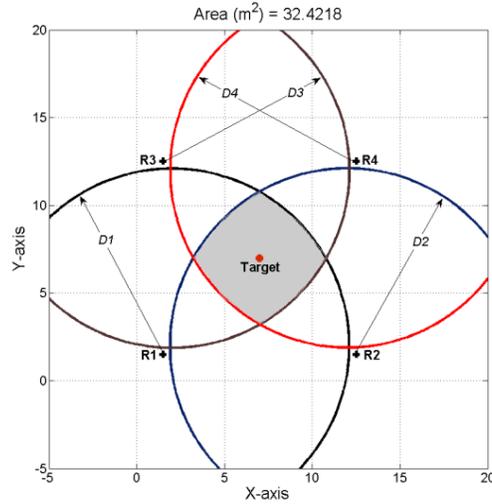


Figure 3.5: Intersection area with the Trilateration based localization method.

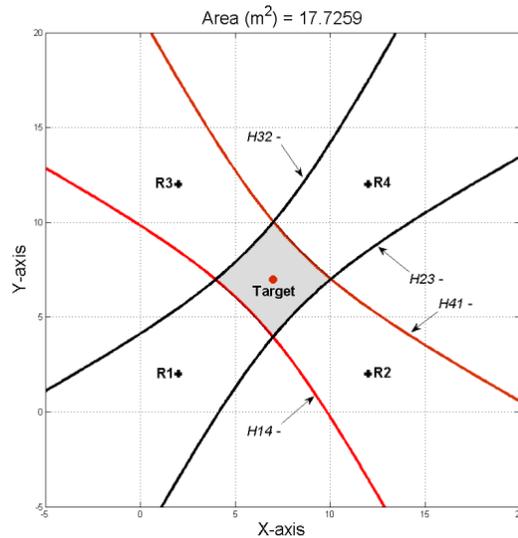


Figure 3.6: Intersection area with a RSS Based Localization method.

For the RSS Localization method, two candidates' hyperbolic bounds H_{14-} and H_{41-} are plotted to limit the location of a target T between two readers R_1 and R_2 with the same confidence level C and the same standard deviation σ . Two other hyperbolic bounds H_{23-} and H_{32-} for the pair of receivers R_2 and R_3 are computed in the same way to get the intersection area colored in grey shown in Fig. 3.6.

Finally, the CBL method is used for each pair of receivers (R_i, R_j) with D_{ij-} and D_{ij+} defined as the minimum and maximum bounds, respectively, of the compensated distance difference range between R_i and R_j with the same confidence level C as shown in Fig. 3.7.

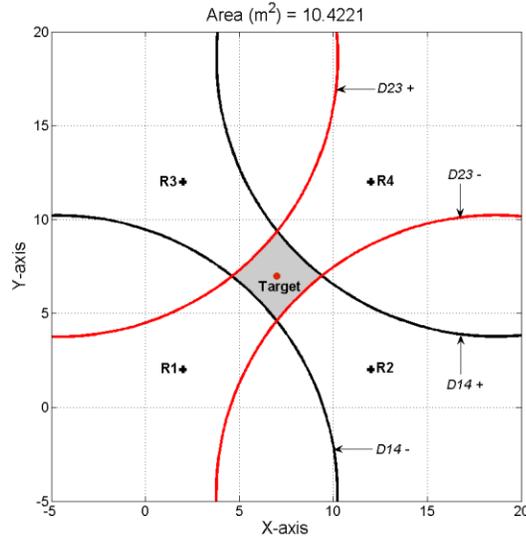


Figure 3.7: Intersection area with CBL.

In all simulation sets performed, the proposed RSS Compensation Based Localization method improves localization accuracy over the other two methods. As we can see in the graphs of the illustrated scenario, the three methods succeed in bounding the real target position. Also, they illustrate that the bounded area computed by CBL is smaller than that of the compared RSS-based method, and that the latter is smaller than the area determined by the Trilateration method. For an overall area of 100 m^2 , the bounded area computed for each method with a confidence level $C = 93\%$ is: 32.42 m^2 for Trilateration, 17.72 m^2 for the Relative Signal Strength method and 10.42 m^2 for CBL. This corresponds to the localization improvement ratios shown in Table 3.2. The Global Improvement Ratio being the difference in the calculated areas versus the total area. The Relative Improvement Ratio is the difference between the calculated areas versus the area calculated by the method compared to CBL.

Table 3.2: Localization improvement.

	CBL Global Improvement Ratio	CBL Relative Improvement Ratio
Trilateration	22%	67.85%
Relative SS	7.3%	40.11%

3.6 Conclusion

The proposed localization scheme succeeds in bounding, with a confidence coefficient, the location of an RFID tag with an unknown EIRP, within an area size consistently smaller than that of other compared methods. Further experiments are required to test CBL in different outdoors settings and with additional receivers. Although the empirical values used in simulations performed were collected for RFID active technology, CBL can be used to estimate the position of a nodes using other wireless technologies, assuming omni-directional antennas at the receivers and that the receivers have known global positions and can aggregate information about the received RSS from the target node.

Acknowledgment

This work has been performed within the project “Wireless Sensor Networks for Communicative and Adaptive Cars”, which is funded by the Canadian AUTO21 Network of Centers of Excellence.

CHAPITRE 4 WIRELESS TECHNOLOGY

AGNOSTIC REAL-TIME LOCALIZATION IN URBAN AREAS

Avant-propos

Auteurs et affiliations :

M.A. Abid : étudiant au doctorat, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

S. Cherkaoui : professeur, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

Date d'acceptation : 4 octobre 2011.

État de l'acceptation : version finale publiée.

Conférence: Local Computer Networks (LCN), 2011 IEEE 36th Conference on.

Référence : [Abid, 2011]

Titre français : Localisation en zones urbaines indépendante de la technologie sans-fil.

Contribution au document :

Cet article présente le développement de la technique de trilatération basée sur le rapport entre les puissances des signaux reçus, introduite dans le chapitre précédent, en l'appliquant avec les modèles de propagation d'ondes les plus communs dans les zones urbaines. Ce travail expose la manière d'utiliser la technique de localisation proposée avec plusieurs modèles de propagation déterministes et statistiques adaptés aux différentes fréquences, puissances d'émission et portées. L'objectif est de démontrer la capacité de la technique proposée à améliorer la précision de localisation indépendamment de la technologie de communication sans-fil utilisée.

Résumé français :

La localisation est une couche logicielle intermédiaire fondamentale dans toute application de LBS. Différents modèles de propagation radio, habituellement utilisés pour la planification des réseaux sans-fil, sont utiles pour localiser des nœuds mobiles en estimant la distance émetteur-récepteur à partir de RSS. Cependant, la plupart de ces méthodes de localisation nécessitent une connaissance préalable d'EIRP pour déterminer l'emplacement de la cible et peuvent souffrir d'imprécisions compromettantes à la localisation. Cet article propose une nouvelle technique appelée TR2S2 (trilatération basée sur le ratio de puissance du signal reçu). Pourtant que la technique est également basée sur RSS, le procédé utilisé améliore la précision de l'estimation des positions par rapport aux algorithmes de trilatération classiques sans requérir la connaissance de l'EIRP. La technique TR2S2 est appliquée avec différents modèles déterministes et statistiques de propagation d'ondes radio dans des contextes différents. Les résultats montrent que l'estimation de l'emplacement de la cible est à chaque fois plus précise comparée aux autres méthodes existantes.

4.1 Abstract

Location estimation is a fundamental middleware for enabling location-based services. Different Radio propagation models, customarily used in wireless networks planning, can be useful for localizing mobile nodes by estimating the transmitter-receiver distance from the Received Signal Strength (RSS). However, most of these localization methods need a prior knowledge of the Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) to determine a target location and may suffer from imprecisions that can undermine the purpose of localization. In this paper, we propose a new technique called TR2S2 (Trilateration based on Ratio of Received Signal Strength). Though also based on RSS, the method improves location estimation accuracy compared to classical trilateration algorithms and does not need a knowledge of the EIRP. TR2S2 was applied using different deterministic and statistical radio propagation models in different settings. The results show that location estimation is every time more accurate than other compared methods.

Keywords-component: Position estimation; Wireless networks; Received Signal Strength

4.2 Introduction

Precise location estimation is a fundamental building block for location aware applications. Real-Time Localization (RTL) and Real-Time Localization Systems (RTLS) are used to track and estimate the current location of objects and peoples [Hightower, 2001]. One RTLS may perform well in a specific environment and respond to particular purposes while others may fail and vice-versa. For example, Global Positioning System (GPS) and Video based RTLS are not the most appropriate means for tracking and locating mobile targets in real time in highly dense urban areas, mainly due to costs or technical limitations [Lu, 2006], [Shehata, 2008]. Wireless Network (WN)-based RTLS are attracting considerable research interest in this sense. This is because they can take advantage of the existing infrastructure which is expected to grow even further with the pervasive wireless applications. Indeed, wireless devices such as feature-rich Personal Digital Assistants and Smartphone have become a fundamental tool in modern live, with a high penetration rate up to 100% in many societies [Bbc, 2010]. Simultaneously, increasing efforts invested in ongoing research activities of radio wave propagation models and channel characterization act as leverage effect to improve WN based RTLS accuracy.

In this paper, a new technique called Trilateration based on Received Signal Strength Ratio (TR2S2) is illustrated. This method makes use of suitable radio propagation models to perform RTL. Multiple ongoing studies on radio propagation models and channel characterization for wireless systems now provide more accurate information about radio wave power law decay, which can increase the positioning performance significantly. With TR2S2, a target node has to be in the radio range of at least three non-collinear reference wireless nodes (RN) at known coordinates using omni-directional antennas. This assumption can be easily met in practical applications with the large and pervasive availability of wireless communications in highly dense urban area. TR2S2 is wireless technology-agnostic as it does not depend on the availability of a particular wireless technology.

The well-known trilateration [Munoz, 2009] scheme combines RSS measuring and propagation models to firstly compute the transmitter-receiver (T-R) distance followed by geometric calculations to determine a node location. Most researches take this technique as basis and work on improving positioning accuracy either by using statistical heuristics or by working on

propagation models. However, the proposed TR2S2 technique focuses on the improvement of trilateration technique itself as will be illustrated throughout the paper.

The contributions of this paper are as follows: (1) we present TR2S2, a new technique that uses RSS measurements that can be made by low-cost receivers. TR2S2 RTL does not require nodes synchronization or directional antennas and so can easily be deployed. (2) TR2S2 is loosely affected by variations in the environment as RSS measures are not used to determine T-R distance directly as will be illustrated later. Instead, TR2S2 uses RSS in a way that allows attenuating distance calculation errors made with particular propagation models should the environment change over time. (3) While other RSS-based methods, such as trilateration and relative localization [Laurendeau, 2008b] assume a known transmitter EIRP, TR2S2 allows estimating target nodes position even when the transmitted EIRP is unknown. (4) TR2S2 allows easily detecting and discarding measurements made by reference nodes hidden by obstacles and keep only measurements made by relevant nodes in the positioning process. (5) TR2S2 is independent of the used wireless technology (6) TR2S2 is independent of any particular propagation model, i.e., it is applicable with any radio wave propagation model allowing T-R distance recovery though RSS. Of course, TR2S2 localization accuracy is even bigger than the propagation model is detailed. (7) We show through simulations that TR2S2 location estimation is consistently more accurate than other compared models. The evaluation of TR2S2 was performed in terms of two important characteristics, including the average error and the failure rate of the location estimation. The aim of TR2S2 technique is to reduce localization error and eliminate failures cases.

The rest of the paper is structured as follow: related work in localization techniques in wireless networks is presented in section II together with a brief introduction of some main radio wave propagation models. In section III, we introduce TR2S2 and illustrate its usage with four different propagation models. In section IV, we describe the position estimation calculation technique in TR2S2. The simulations results for the evaluation of the TR2S2 method compared to others are given in section V. Section VI concludes the paper.

4.3 Related work

In literature, location estimation schemas making use of wireless network technologies can be classified into two categories, range-free and range-based [Sun, 2005]. Range-free schemes have been pursued as cost effective approaches that are easy to implement but they only provide coarse accuracy. Range-based schemes, regarded as more accurate, require collecting range information such as the Received Signal Strength Indicator (RSS), Angle of Arrival (AoA), Time of Arrival (ToA) or Time Difference of Arrival (TDoA). The latter two techniques require strict time synchronization between nodes in the network, making the schemes costly and quite difficult to implement. The AoA techniques use an array of antennas to measure the angle from which the signal arrives to the receiver. Such hardware is expensive, bulky and has high power consumption. RSS-based techniques involve measuring the energy received by receiver antenna to discern the attenuation amount caused by signal propagation, which is dependent on the T-R distance. RSS-based techniques require the simplest hardware which is usually already available in all standard wireless equipment. There are also systems based on RSS such as fingerprint localization [Liu, 2007]. This technique consists in creating a radio map based on RSS measurements as fingerprints at a large number of positions in an area during a training phase. This map is later used during the localization phase to find the closest points to the target node by matching its RSS measurements with data in the map.

RSS-range based location estimation methods involve the observation of multiple RSS of transmitted packets between the target node and at least three reference nodes with known positions. This process is usually referred to as multi-lateration. When the number of used observations is three, the process is referred to as trilateration or is also called triangulation because triangle geometric properties are used to estimate the target position. The approach involves finding intersections of circles with centers that correspond to reference node coordinates and with radiuses that correspond to the estimated T-R distances. Many methods with different complexities and restrictions have been proposed to determine the intersection points, such as analytical, least squares, Taylor series and approximate Maximum Likelihood methods [Shen, 2008]. Classical trilateration forms various patterns of circles that can be differentiated by the number possible solutions for the system of equations of circles involved. For example, if there are 3 to 6 intersection points, the estimated position is determined as the

center of the smallest triangle formed by the three nearest intersection points as summits. If there are only two intersection points, the estimated position is obtained by computing the midpoint of the two point's line. Otherwise, when there is no intersection, the centers of the circles are taken as the summits of the triangle and the Centroid [Bulusu, 2000] of this triangle becomes the final location.

Many propagation models have been used with RSS-range based localization in order to estimate T-R distance from signals path loss in several propagation environments. These models are commonly classified into three categories; deterministic, empirical and semi-empirical models [Sarkar, 2003]. Deterministic models are based on fundamental physics laws of electromagnetic wave propagation to determine the received signal power at a particular location. Serving as reference models, their computation time is however relatively high and they require a complete map of the propagation environment. A well-known example of a deterministic model is ray-tracing [Athanasiadou, 2000]. Semi-empirical models combine an analytical formulation of physical phenomena (reflection, diffraction, scattering) with a statistical adjustment by using experimental measurements. They are fast, precise and robust but they require taking into account the environment conditions (topography, building outlines, street axis, land occupation, etc.). Empirical models are based on the analysis of many experimental measurements. These models predict the mean path loss as a function of various parameters such as frequency, T-R distance, antenna height, etc. They are robust, and fast. Several empirical propagation models have been proposed, for example Okumura, Hata and COST-231 [Abhayawardhana, 2005] as large-scale propagation models, and Rayleigh and Rice distributions [Suzuki, 1977] as small-scale models.

In this work, we attached special importance to empirical models, because they are better suited to our goal of localization in an outdoor and dynamic environment. If distance between a mobile node and a set of RNs can be approximated from the propagation model, then it is possible to estimate the transmitter position with the TR2S2. In the next sections, the usage of TR2S2 method with various empirical models will be demonstrated. Besides, we will compare TR2S2 localization accuracy with classical trilateration algorithms.

4.4 The TR2S2 Technique

TR2S2 is a new generic technique that can be applied with any propagation model allowing to retrieving T-R distance from RSS values. We outline in this section the assumptions inherent in TR2S2 technique and present how to apply it using more than one propagation model (free space, Hata, Lognormal, etc). We also describe our scheme for estimating probabilistic minimal and maximal bounds of subsets of space that may contain the target node.

In our proposed scheme, we suppose at least three base stations (BS) at known positions as RNs in the read range of mobile node. Reference and target nodes are equipped with wireless adapters, which extract RSS each time a packet is received. In homogeneous networks, reference nodes send packets periodically with the same transmission power (EIRP). When environments change, even when the T-R distance is unchanged, the RSS still may change significantly. TR2S2 method is based on the ratios of RSS values as will be shown in the next sections. The ratio of RSS from a pair of RNs varies little with environment change as the RSS from either base stations increases or decreases simultaneously. As a result, unlike with proximity methods such as Fingerprint where it is necessary to reconstruct radio maps every time the environment changes, the TR2S2 technique determines a node location with comparable accuracy when the environment changes.

4.4.1 Free space propagation model and TR2S2

This deterministic model [Friis, 1946] is used to predict the received signal strength when the transmitter and receiver are in Line Of Sight (LOS) i.e., with an unobstructed communication path. The received power (P_r) is given by Friis equation as follow:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^n L} \quad (4.1)$$

Where P_t is the transmitted power, G_t and G_r are the gains of the transmitter and receiver antennas and λ is the wavelength. L is the system loss, not related to propagation. Often, G_t , G_r and L are set to 1 (matched antennas and lossless system). Path loss exponent n is the key parameter in RSS-based localization algorithms that define the rate at which RSS decreases with distance in a specific environment. Friis equation shows that the received power decreases

inversely proportionally with the T-R distance. So we can presume that the ratio of distances separating one target node to two reference nodes is inversely proportionally to the ratio of RSS and function of path loss exponent n .

Let $P_{r_i} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_i^n L}$ and $P_{r_j} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_j^n L}$ be the received power values from the two identical transmitters BS_i and BS_j at distances d_i and d_j respectively from the target node. Now, admitting that path loss exponent n varies between two values $[n^-, n^+]$ depending on the environment dynamicity, the ratio of T-R distances d_i and d_j could have a minimum (4.2) and maximum (4.3) value respectively to minimum and maximum path loss exponent, where;

$$\left(\frac{d_i}{d_j}\right)^- = n^- \sqrt{\frac{Pr_j}{Pr_i}} \quad (4.2)$$

$$\left(\frac{d_i}{d_j}\right)^+ = n^+ \sqrt{\frac{Pr_j}{Pr_i}} \quad (4.3)$$

4.4.2 Hata model and TR2S2

This large-scale model is a path loss formulation in urban environments based on experimental results. The mean path loss as a function of T-R distance, antenna heights and frequency is defined as follows:

$$L_{50}(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log(h_t)) \log(d) \quad (4.4)$$

Where, L_{50} is the median path loss (in dB), f_c is the frequency in MHz, h_r and h_t are the effective heights above ground level of mobile node and base stations antennas. The parameter $a(h_r)$ is the correction factor for the effective antenna height of the mobile node based on the detection area size. For small to medium sized cities, the mobile antenna correction factor is given by:

$$a(h_r) = (1.1 \log(f_c) - 0.7)h_r - (1.56 \log(f_c) - 0.8) \quad (4.5)$$

This model is suitable for large ranges and its validity has been proved for frequencies between 150MHz and 1500MHz [Hata, 1981]. We admit that two BSs transmit signals with the same

power P_t that will be received by the mobile node. P_{r1} and P_{r2} are the RSS from BS_1 and BS_2 respectively measured by the mobile node to localize, then;

$$PL(dB) = 10 \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) \quad (4.6)$$

$$PL_1 + 10 \log(P_{r1}) = PL_2 + 10 \log(P_{r2}) \quad (4.7)$$

By replacing the PL with the median attenuation according to Hata model (4.4), the previous equality (4.7) is simplified as follow:

$$(44.9 - 6.55 \log(h_t)) \log(d_1) + 10 \log(P_{r1}) = (44.9 - 6.55 \log(h_t)) \log(d_2) + 10 \log(P_{r2}) \quad (4.8)$$

The relation between the ratio of distances separating the mobile node to each BS is defined as follows:

$$\frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{P_{r2}}{P_{r1}}\right)^{\frac{10}{(44.9 - 6.55 \log(h_t))}} \quad (4.9)$$

As the heights of BS antennas may not be exactly known, we suppose that h_t lies in interval $[h_t^-, h_t^+]$, knowing the upper and lower bound that the transmitter antenna height may have. So the ratio of T-R distances d_i and d_j could have a minimum (4.10) and maximum (4.11) value respectively to minimum and maximum highs of BS antennas.

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^- = \left(\frac{P_{r2}}{P_{r1}}\right)^{\frac{10}{(44.9 - 6.55 \log(h_t^-))}} \quad (4.10)$$

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^+ = \left(\frac{P_{r2}}{P_{r1}}\right)^{\frac{10}{(44.9 - 6.55 \log(h_t^+))}} \quad (4.11)$$

4.4.3 Probabilistic models and TR2S2

Probabilistic models offer computational simplicity and permit a more realistic modeling of radio wave propagation [Abhayawardhana, 2005]. A probabilistic model uses a deterministic model as basis and introduces parameters in order to get the mean transmission range. Since the transmission between a base station and a mobile is rarely in line-of-sight in urban area, the

received signal is subject to attenuation and non-deterministic distortion when traveling in the air. The distribution of these effects depends on deterministic models strengthened by probabilistic parameters.

Log-normal Shadowing model and TR2S2:

Both determinist and empirical propagation models indicate that RSS decreases in logarithmic manner with T-R distance. According to Lognormal shadowing model [Rappaport, 2002], the path loss in term of distance follows the power law:

$$PL(d) [dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma [dB] \quad (4.12)$$

Where $\overline{PL}(d_0)$ represents the attenuation average at a reference distance d_0 , n is the path loss exponent and X_σ is a Gaussian random variable of received power (in dB) with zero mean and standard deviation σ . With a confidence level C , the normality range of $X_\sigma \in [-z\sigma \text{ dB}, +z\sigma \text{ dB}]$ and the path loss at distance d is defined as:

$$PL(d) [dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \pm z\sigma [dB] \quad \text{With } z = Q_x^{-1}\left(\frac{c+1}{2}\right) \quad (4.13)$$

Since we cannot consider that the variation is equal for both sides of a mobile node, we consider two extreme situations.

In the first situation, the target node is closest to the BS₁ while being far away from BS₂, then:

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^+ = 10^{\left(\frac{P_{r2} + \overline{PL}(d_{02}) - P_{r1} - \overline{PL}(d_{01}) + 2z\sigma}{10n}\right)} \quad (4.14)$$

Conversely, when the target node is farthest from the receiver BS₁ while being the closest possible to BS₂;

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^- = 10^{\left(\frac{P_{r2} + \overline{PL}(d_{02}) - P_{r1} - \overline{PL}(d_{01}) - 2z\sigma}{10n}\right)} \quad (4.15)$$

Rayleigh distribution

The Rayleigh distribution [11] models the situation when there is no LOS, and only multipath components exist. This model incorporates intensive variations in received signal power

because multiple paths can either combine constructively or destructively. The Rayleigh distribution has a probability density function (PDF) given by:

$$P(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right], & 0 \leq r \leq \infty \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (4.16)$$

The probability that the envelope of the received signal does not exceed a specified value R , is given by the corresponding cumulative distribution function (CDF):

$$P(R) = \Pr(r \leq R) = \int_0^R p(r) dr = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.17)$$

Where r is the envelop amplitude of the received signal and $2\sigma^2$ is the predicted mean power of the received multipath signal. Similar to Lognormal shadowing model, Rayleigh model depends on a deterministic model to which a certain variation is applied:

$$P_{r_{Rayleigh}}(d) = Rayleigh(P_{r_{determinist}}(d)) \quad (4.18)$$

From the CDF of Rayleigh distribution, we can determine with confidence level C that the received power variation is included in the interval $[z_{min}\sigma, +z_{max}\sigma]$, where;

$$z_{min} = \sqrt{2 \ln\left(\frac{2}{2-\alpha}\right)} \quad (4.19)$$

$$z_{max} = \sqrt{2 \ln\left(\frac{2}{\alpha}\right)} \quad (4.20)$$

$$\text{And } \Pr(z_{min}\sigma \leq x \leq z_{max}\sigma) = 1 - \alpha = C, \quad 0 \leq C \leq 1 \quad (4.21)$$

As shown in the Fig. 4.1, for $\Pr(a < x \leq b) = C$, the area in each tail of the curve is equal to $(1-C)/2$. For confidence interval of 95%, the area in each tail is equal to $0.05/2 = 0.025$.

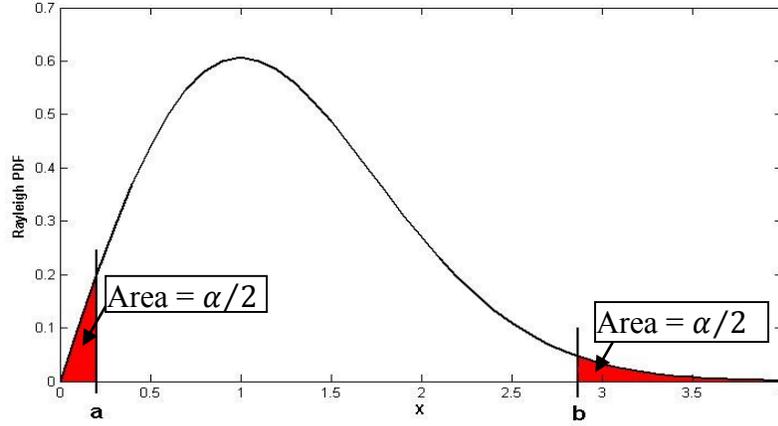


Figure 4.1: Example of Rayleigh distribution PDF.

4.5 Localisation based on TR2S2

In this section, we present how to apply TR2S2 to determine the area that may contain the receiver as an intersection of rings. Each ring marks the probable position of a mobile node in relation to two RNs based on distances ratio. Eventually, we explain how to detect the presence of obstacles and eliminate erroneous receivers from the localization process.

4.5.1 Position estimation from ratio of distances

In order to localize the mobile node, we use the ratio of distance extracted from propagation models. Let us assume that $\left(\frac{d_i}{d_j}\right)^2 = K$ with d_i and d_j are the distances of target node with coordinates (x, y) to BS_i with coordinates (x_i, y_i) and BS_j with coordinates (x_j, y_j) , where;

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (4.22)$$

$$d_j = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (4.23)$$

Then the position of target node belongs to the solution of the following equation in second order form:

$$A x^2 + B y^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (4.24)$$

Where: $A = (1 - K)$, $B = (1 - K)$, $C = 2(Kx_j - x_i)$

$$D = 2(Ky_j - y_i) \text{ and } E = x_i^2 - Kx_j^2 + y_i^2 - Ky_j^2$$

For any polynomial equation of second order, where $A = B$ with A and B nonzero real, as in our case, the solution is a circle. Then, with TR2S2 method, the target node position by reference to two RNs form the set of points whose (x, y) coordinates belong to a circle with center Cx and radius R defined as follow:

$$Cx = \left(-\frac{C}{2A}; -\frac{D}{2A} \right)$$

$$R = \sqrt{\frac{C^2 + D^2 - 4AE}{4A^2}}$$

Where:

$$A = B = (1 - K), C = 2(Kx_j - x_i), D = 2(Ky_j - y_i) \text{ and } E = x_i^2 - Kx_j^2 + y_i^2 - Ky_j^2 \quad (4.25)$$

To accurately estimate the mobile position, it is necessary to calculate the coordinates of the points forming the intersection area of two annuluses. Each annulus is estimated according to one pair of reference nodes. To obtain a solution at every shot we use maximum and minimum equations. By replacing K parameter by its value inferred by the propagation model, e.g. (4.14) and (4.15) with lognormal model, we calculate the minimum and maximum limits of area that contains the target node with respect to a pair of reference points BS_i and BS_j . The minimum bound of this zone is the ratio between the closest distance to BS_i and farther distance from BS_j . In turn, the maximum area bound is the ratio between the farthest distances from BS_i and the one closer to BS_j . For example, the mobile node position per reference to BS_i and BS_j may only lies either on the perimeter or inside the circle Cir_{max} with the following coordinates;

$$Cir_{max} = \left(\left(-\frac{C_{max}}{2A_{max}}; -\frac{D_{max}}{2A_{max}} \right), \sqrt{\frac{C_{max}^2 + D_{max}^2 - 4A_{max}E_{max}}{4A_{max}^2}} \right)$$

Where A, B, C, D and E computed with K equals to $\left(\left(\frac{d_i}{d_j} \right)^+ \right)^2$.

The domain that defines the transmitter location also called area of uncertainty emerges as the intersection of several rings; each defines an area between two circles, as illustrated by the gray area in Fig.4.2.

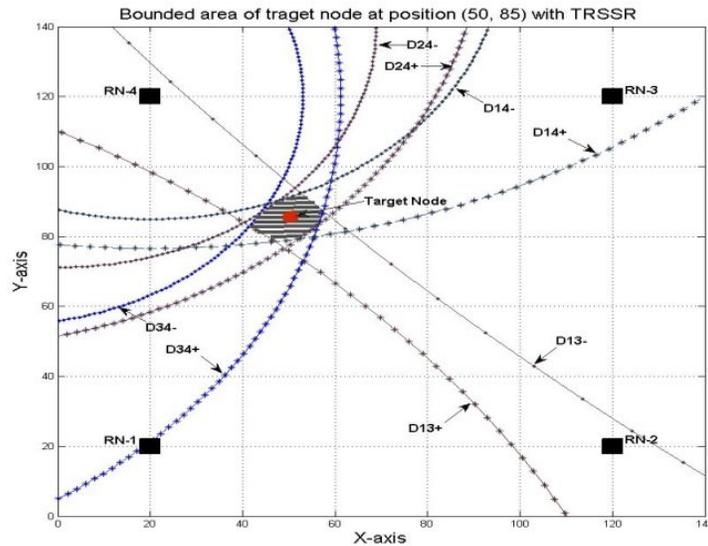


Figure 4.2: Example of annuluses intersection area

4.5.2 Obstructed reference node detection

In TR2S2 method each circle is computed with reference to a pair of fixed nodes. If there is no intersection between two circles that involve the same receiver, thus this latter is obstructed by an obstacle. If one circle is very far from the reference nodes, even further than the coverage area, then one of them is obstructed. To determine which one, we must verify with one-third reference node. The third case, most likely to occur, is when two rings with very small radiuses are close to two reference nodes, then the third is obstructed and then eliminated from the localization process. Generally more than three reference nodes are recommended for more accuracy; thereby more annulus can be obtained, with 3, 4 and 5 reference nodes we obtain respectively 3, 6 and 9 different pairs. As well, if one reference node is obstructed, there remain enough nodes to perform TR2S2 localization.

4.6 Simulations Results

In this section we outline the results obtained by simulating TR2S2 algorithm, using Matlab, with the four aforementioned propagation models. We also compare TR2S2 performance with classical the trilateration method used in the same conditions. Results for all propagation models, except for Hata model, are presented for same configuration with four fixed nodes

deployed at (20, 20), (120, 20), (120, 120) and (20, 120) in meter when the intersection of their respective coverage ranges delimit the detection area as a 230x230 meter grid. With TR2S2, minimum and maximum bound circles are constructed between each pair of reference nodes, when they are centered on each reference node in the case of the classical trilateration. The target node is located in the overlap region of all annuluses. Then, the chosen estimated position is the center of the bounded area and the location error considered is the longer distance between the center of bounded area and the farther point belonging to the edge of this area.

4.6.1 Performance of TR2S2 with Free space path loss model

Free space model is the perfect model to emphasize the improvement of TR2S2. As shown in Fig.4.3, TR2S2 always performs better than trilateration and it is much less sensitive to the variation of path loss exponent n , whatever the value of EIRP. When n varies only by ± 0.05 , the location error values returned by TR2S2 and classical trilateration are equals to 0.4m and 3.37m respectively. When n varies by ± 1 , the location error with TR2S2 and trilateration grow to 9m and 32.8m respectively.

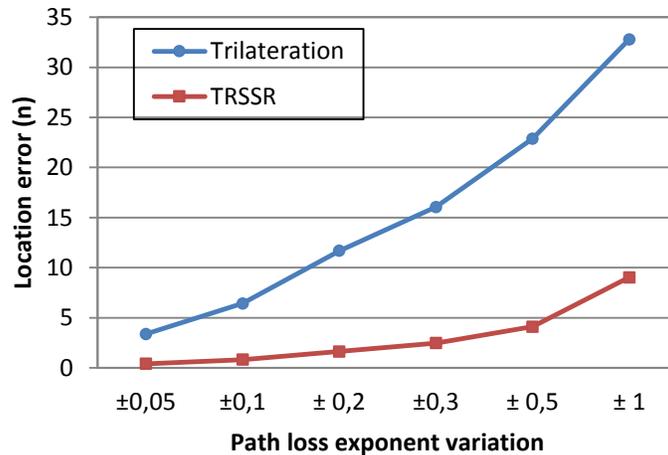


Figure 4.3: Location error obtained by TR2S2 and Trilateration based on free space model, with different values of path loss exponent variation.

4.6.2 Performance of TR2S2 with Hata model

For the simulation of TR2S2 with Hata model, we assume a frequency of 1500 MHz and four fixed base stations deployed at (2, 2), (12, 2), (12, 12) and (2, 12) in Km forming a detection areas of 23x23 Km grid. As the heights of nodes antennas are unknown, we define different ranges of antennas heights variation in meter for BS (hBS) and Mobile Station (hMS). For example the value $\pm 5\text{m}$ and $\pm 60\text{m}$ in the x-axis of Fig.4.4 mean that hBS varies in the intervals [95, 105] and [40, 160] (in meter) respectively. Similarly for hMS, the annotation “Tri hMS $\pm 0,1\text{m}$ ” in the legend of the same graphic means that hMS varies between 4.9m and 5.1m. The variation of hMS is taken into consideration only with Trilateration method, as this variable not used in TR2S2 calculation (4.5). For the same values of hBS variation TR2S2 performs slightly better than classical Trilateration when the height of MS antenna is exactly known. For example with hBS variation equals to $\pm 5\text{m}$ the location error is equal to 0.155Km and 0.211Km with TR2S2 and Trilateration respectively. On the other side, when the hMS value is unknown, and an interval of variation is used to estimate the location, TR2S2 perform much better than Trilateration. As shown in the Fig.4.4, with hBS and hMS variation equal to $\pm 20\text{m}$ and $\pm 0.8\text{m}$ respectively, TR2S2 returns a location error equals to 0.623Km while classical trilateration return a location error equals to 1.953Km.

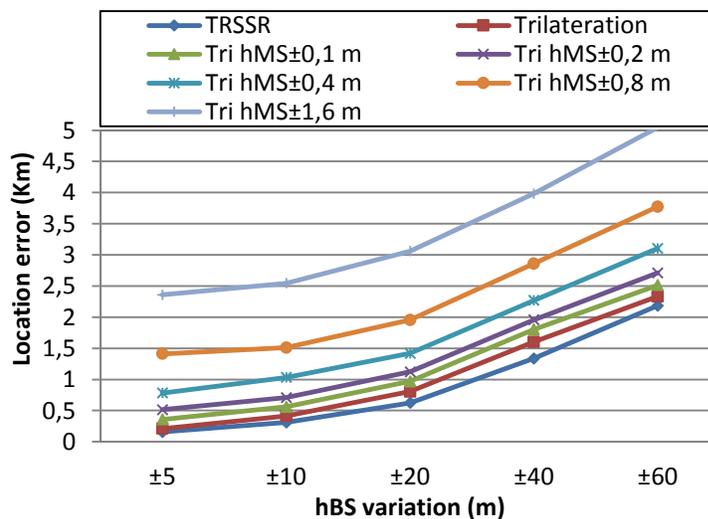


Figure 4.4: Location error obtained by TR2S2 and Trilateration based on Hata model for different heights of BS and MS antennas variation.

4.6.3 Performance of TR2S2 with lognormal model

The simulations for TR2S2 with Lognormal model assumes a frequency of 2.4 GHz, path loss exponent of equals to 3 and shadowing standard deviation σ equals to 3.43 determined for this frequency in an outdoor environment. A transmitter EIRP of 17 dBm ($\approx 50\text{mW}$) is assumed for computing simulated RSS values at the target node. For each execution, a random amount of signal shadowing is added to the RSS values along a normal distribution, with zero mean and $[-Z\sigma, +Z\sigma]$ shadowing deviation. From tables of probabilities for normal distribution, we can make these statements for Z equals to 1.56, 1.96 and 2.58 to determine the confidence level of 90%, 95% and 99% respectively.

With TR2S2 method, the transmitted power value is removed from (4.10) and (4.11), unlike classical trilateration, where an EIRP range must be considered. In Fig.4.5, we observe that the error increases as the confidence level increases for both methods and in all simulations. The location error for TR2S2 do not exceed 17m with confidence level of 90% and 27m for $C=99\%$ in a detection area size of $230 \times 230\text{m}$. With classical trilateration, the intersection of annuluses expands as considered EIRP interval is larger. When the EIRP range is set to $\pm 2\text{mW}$, the maximum location error is equal to 21.62m with $C=90\%$ and attains 30m for $C=99\%$.

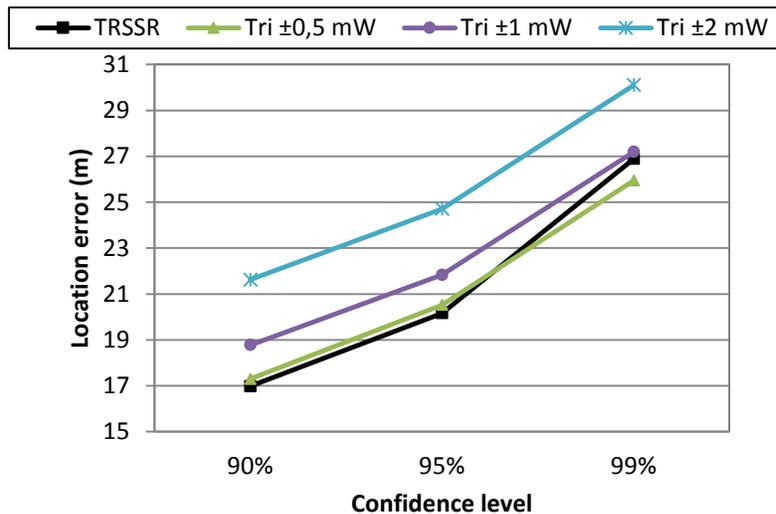


Figure 4.5: Location error obtained by TR2S2 and Trilateration based on lognormal model with different transmit power variation for different confidence levels

4.6.4 Performance of TR2S2 with Rayleigh distribution:

The simulation for TR2S2 with Rayleigh distribution assumes a frequency of 2.4 GHz, as well as the values for detection area size, transmitter EIRP, path loss exponent and shadowing standard deviation used with lognormal model. The main difference is the way to compute Z_{min} and Z_{max} according to (4.15) and (4.16). The values of Z_{min} and Z_{max} and the location error of TR2S2 method corresponding to confidence levels 90%, 95% and 99% are listed in Table 4.1.

Table 4.1: Confidence level and location error with Rayleigh distribution

Confidence	90%	95%	99%
Z_{min}	0.3847	0.2703	0.1203
Z_{max}	2.94	3.2625	3.91
Location error	13m	15.3481m	19.6583m

4.7 Conclusion

In this paper, we presented TR2S2, a new method based on RSS for RTL of a mobile nodes that is wireless technology agnostic, and can be applied with different radio propagation models. We showed that TS2R2, used in combination with different radio propagation models, achieved consistently smaller localization error than the classical triangulation method. TR2S2 location error decreases to less than 1m in ideal conditions and to values around 15 m with multipath phenomena within a detection area size of 230x230m. These results were obtained without the need of time and memory consuming operations for radio map building or specialized equipment to measure time or angle of arrival of signals. TR2S2 is a good candidate to implement simple, cost effective and energy efficient RTLS in urban areas based on existing deployed wireless infrastructure.

CHAPITRE 5 3D COMPRESSIVE SENSING FOR NODES LOCALIZATION IN WNS BASED ON RSS

Avant-propos

Auteurs et affiliations :

M.A. Abid : étudiant au doctorat, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

S. Cherkaoui : professeur, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

Date d'acceptation : 10 juin 2012.

État de l'acceptation : version finale publiée.

Conférence: Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on.

Référence : [Abid, 2012]

Titre français : Acquisition comprimée 3D pour la localisation des nœuds dans les réseaux sans-fil basée sur RSS.

Contribution au document :

Le présent article contribue à la thèse en élaborant la deuxième méthode de localisation basée sur l'approche de CS. La méthode de type analyse de situation proposée utilise la métrique R2S2, présentée dans les deux chapitres précédents, en tant que signature pour localiser des nœuds radio mobiles dans des environnements 2D. Cette méthode se passe des techniques de triangulation utilisées avec les méthodes géométriques conventionnelles et permet de localiser les cibles en reconstituant leurs positions à partir des mesures des signaux reçus en temps réel en se référant à une carte radio de la zone de localisation. Les principales nouveautés par rapport

aux méthodes probabilistes existantes (voir section 2.6.2) sont principalement la formulation du problème de localisation et l'utilisation de la technique de CS 3D comme un algorithme de jumelage pour estimer les positions des cibles.

Résumé français :

La technique de l'acquisition comprimée permet de reconstituer un signal avec un taux d'échantillonnage significativement inférieur à celui défini par le théorème de Nyquist. Cette technique permet d'éviter le prélèvement et le traitement d'échantillons inutiles. Dans ce papier, une nouvelle technique basée sur l'approche de CS 3D est proposée pour permettre la localisation des nœuds dans les WNs. Cette nouvelle approche de localisation utilise les trois éléments suivants pour retrouver la position de la cible; i) la métrique R2S2 pour former les signatures radio, ii) une carte radio créée durant la phase hors ligne qui définit la base est représentée par une matrice 3D parcimonieuse, iii) les mesures bruitées prises en temps réel représentées par une matrice 3D. Une démarche de l'algèbre multilinéaire basée les principes de la multiplication de tableaux multidimensionnels et la décomposition a été développée pour formuler le problème de localisation sous la forme d'un problème sous-déterminé à résoudre par un algorithme de minimisation de la norme ℓ_1 basée sur l'approche de la CS. Cette technique abrégée 3D-CS-R2S2 améliore la précision de localisation même lorsque les conditions de propagation varient significativement et lorsque l'EIRP est inconnue. En plus, cette technique favorise le développement des RTLS puisqu'elle demeure fonctionnelle avec un nombre réduit de points d'accès sans-fil sans toutefois compromettre à la fiabilité de la localisation. Les résultats des simulations montrent l'efficacité de cette technique qui non seulement réussit à retrouver la position de la cible mais aussi améliore la précision en présence de bruits.

5.1 Abstract

Compressive sensing (CS) intends to recover signals at a sampling rate significantly (much) lower than that classically used according to the Nyquist theorem. This allows avoiding unnecessary sampling and complexity. In this paper, a Three-Dimensional Compressive Sensing (3D-CS) approach is proposed for nodes localization in wireless networks. In 3D-CS-R2S2 approach, which is based on the ratio of received signal strength (RSS), a 3D sparsity basis and a 3D measurement matrix are used as radio map and noisy measurements respectively in order

to recover the target position. A specific multi-linear algebra procedure was developed using N-way array products, together with an adequate decomposition. Both allow formulating the localization problem in a way that is solvable by an ℓ_1 -minimization algorithm based on CS theory. 3D-CS-R2S2 improves localization accuracy even if propagation conditions change significantly and/or the effective isotropic radiated power (EIRP) is unknown. Additionally, it enables practical Real Time Localization Systems (RTLS) development since 3D-CS-R2S2 can be functional with a reduced number of base stations without compromising position recovery accuracy. The simulation results show the efficiency of the method that not only succeeds to recover a target position but also improves localization accuracy in presence of noise.

Keywords component: Compressive Sensing; Wireless Network, Real Time Localization System, Received Signal Strength

5.2 Introduction

Positioning capacities are provided by systems commonly called real time localization systems (RTLS) which can be based on several technologies including Wireless Network (WN) infrastructures. Among signal measures frequently used in WN-based RTLS [Hightower, 2001], the received signal strength (RSS) metric can be the best compromise in terms of cost and precision. Several empirical and theoretical models [Sarkar, 2003] have been proposed to correlate the path loss with the distance between a transmitter and a receiver. Still, this correlation is dependent on the propagation model used for a specific environment and so distance calculation errors will arise if the environment outline or its propagation conditions change. RSS-based localization techniques are therefore primary appropriate where no severe effects influencing propagation, such as multipath, fading or shadowing, occur.

Recently, we proposed a new method [Abid, 2010a] [Abid, 2011] based on the ratio of RSS which allows minimizing localization errors due to medium propagation change. The method, called TR2S2 [Abid, 2011] takes advantage of the fact that the ratio of RSS from a pair of Base Stations (BS) varies little when the environment changes as the RSS from either BS increases or decreases simultaneously. TR2S2 uses the ratio RSS_1/RSS_2 from a BS_1 and a BS_2 as an intrinsic data entity to pinpoint a Reference Point (RP) in the radio map of the environment.

In this work we extend the TR2S2 method by using Compressive sensing (CS) [Donoho, 2006], [Baraniuk, 2007]. To the best of our knowledge, 3D-CS-R2S2 is the first method to use three-dimensional compressive sensing theory for node localization in wireless networks. A three-dimensional radio map is created during the training phase of 3D-CS-R2S2, by recording at every RP, the ratio of RSS from each pair of BSs. The RTLS intervenes afterwards in the online phase to estimate, with a high accuracy and speed, a target position based on a few measurements from the BSs that are present in the radio range. This is possible by using CS. In fact, CS makes it possible for 3D-CS-R2S2 to recover target positions as a sparse vector from a small number of noisy measurements in a polynomial time. 3D-CS-R2S2 short execution time allows also to rule out the effects of target mobility which can gravely undermine the localization accuracy. Unlike RSS-based proximity methods such as Fingerprint [Liu, 2007], 3D-CS-R2S2 allows determining a node location with comparable accuracy when the environment changes. Moreover, the prior knowledge of the Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) is not required for 3D-CS-R2S2 when homogeneous WNs are used, cancelling in this way another source of errors.

Our contributions in this work are as follows: a) we investigate the use of a 3D radio map, less sensitive to environment changes, by using a three-way array data structure; b) we formulate mathematically the problem of nodes position estimation in WNs based on a 3D radio map, as a sparse recovery problem that is solvable by CS theory; c) we develop an appropriate algebraic procedure using tensor products, and also a decomposition which allows node position recovery thanks to ℓ_1 -minimization algorithms based on CS theory; d) finally we performed thorough simulations to show that 3D-CS-R2S2 approach allows target position recovery in polynomial time, even if the propagation conditions of the environment change.

The rest of the paper is organized as follows. The next section provides some background on CS and selected related works of CS application on both wireless WN-based RTLS and for 3D arrays reconstruction. In Section 3 we formulate the localization problem using a 3D radio map and describe how it is solved using CS. We show simulation results of the recovery performance in Section 4. Section 5 concludes the paper.

5.3 Related works on compressive sensing

5.3.1 Compressive Sensing background

CS is a recent framework allowing signal acquisition and reconstruction with significantly fewer samples than required by the Shannon/Nyquist sampling theorem. CS is enticing for ill-posed problems since it enables, in polynomial process time, the reconstruction of original data via ℓ_1 -minimization algorithms with excellent accuracy even with noisy measurements.

Let's consider a signal represented by \hat{x} an $N \times 1$ column vector and a $N \times N$ basis matrix $\Psi = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_N]$, generally orthonormal, where Ψ_i are $N \times 1$ column vectors. The signal has a K -sparse representation in basis Ψ if \hat{x} can be approximated by $\hat{x} \approx \sum_{i=1}^K \theta_i \times \Psi_i$ with θ_i being the coefficients of \hat{x} in basis Ψ , and $K \ll N$. In order to lift the waste in terms of sampling and complexity, compressed sensing modifies the framework for data acquisition. CS considers an $M \times N$ measurement matrix Φ , incoherent with Ψ , where $M \ll N$. The $M \times 1$ column vector measurements \hat{y} are linear projections of \hat{x} onto Φ , $\hat{y} = \Phi \times \hat{x}$, by substituting \hat{x} by its value, then: $\hat{y} = \Phi \times \Psi \times \theta = \Theta \times \theta$, where Θ is the $M \times N$ matrix. This way, only M measures are expected to recover \hat{x} almost surely. Since $M \ll N$, recovery of \hat{x} from the compressive samples \hat{y} is underdetermined. For a K -sparse signal and under certain conditions on Φ and Ψ (incoherence), one shows that exact signal recovery is possible, with a high probability, by using existing reliable recovery methods based on the ℓ_1 -minimization problem formulated as follow;

$$\theta^* = \arg \min \|\theta\|_1 \text{ subject to } \Phi \times \Psi \times \hat{\theta}^* = y \quad (5.1)$$

Finally, the recovered signal is expressed as $\hat{x} = \Psi \times \theta^*$. In other words, in compressed sensing theory, a K -sparse vector of length N can be recovered from only M random measurements, $M \geq C \times K \times \log(N/K)$ where C is some constant depending on each instance [Candès, 2006].

5.3.2 CS in Wireless Networks

The use of CS in Wireless Sensors Networks (WSNs) has stimulated an increasing attention. The advent of CS theory has led to the emergence of new solutions for the problems of efficiently sensing, gathering transmitting, and sharing information from or among a great

number of distributed nodes [Meng, 2009].. Recently in WSN research area, many new CS-based methods have been developed for: data routing schemes [Quer, 2010], networks monitoring, sparse event detection, distributed sensing and compression, etc. An early contribution is [Mostofi, 2009], where a mobile cooperative network is tasked with collecting information from its environment. This paper considers scenarios where mobile intelligent network is in charge of building a map of the spatial variations of one or more parameter(s) cooperatively.

More recently, Feng & all [Feng, 2010] have proposed an RSS-based localization method using CS theory. Authors formulated the node localization as a sparse matrix recovery problem in the discrete spatial domain, and used CS theory via spatial sparsity. After a pre-processing procedure of matrix orthogonalization to induce incoherence, target location recovery is performed by solving ℓ_1 -minimization programs such as Basis Pursuit (BP) [Chen, 1999], Basis Pursuit Denoising, and Dantzig Selector (DS) [Elad, 2010]. Then a post-processing procedure was used to compensate for the spatial discretization caused by a grid assumption.

Although the work in [Feng, 2010] uses CS for target detection, the approach still uses RSS measures directly and only differs from the Fingerprint method by using a CS-based location recovery. The objective of our work is to overcome the deficiency of RSS based radio mapping by investigating the tradeoffs between the generation of a generic radio map which is less sensitive to environment change, while still using the RSS metric. Furthermore, the work analyzes the 3D-CS based RTLS performance in order to improve nodes localization accuracy.

5.3.3 Three-dimensional CS

Three-Dimensional CS (3D-CS) has recently emerged for 3D shape and image reconstruction in 3D space. The majority of applications that investigate the 3D-CS approach lie in the image processing research area, especially for Magnetic Resonance imaging (MRI), Radar, and Ultrasonic imaging applications. In [Quinsac, 2010], authors apply CS to obtain 3D scene reconstruction using ultrasonic sensing capabilities. By transmitting incoherent wideband ultrasonic pulses and receiving their reflections, a sensor array can sense the scene and reconstruct it using standard CS reconstruction algorithms. In MRI true 3D-CS reconstruction are reputed to take a very long time [Bilgin, 2008]. Others authors [Lustig, 2007] have suggested

separating the 3D problem into many 2D problems to reduce computation time and memory load, in a similar manner to interferometry principle. While this approach can improve computational performance, powerful 3D connectivity information may inherently be lost.

In this paper a 3D-CS method is proposed for target position recovery based on a 3D radio map. A full 3D approach is investigated, by using n-way arrays in multi-linear algebra, to confirm its adequacy in terms of execution time and the position recovery performance.

5.4 A 3D-CS based target localization Method

5.4.1 Problem formulation

In a previous work, a localization technique called TR2S2 [Abid, 2011]. TR2S2, has a number of strong points, inter alia, being cost effective as it is based on the RSS which can be measured by low-cost receivers, in addition to its localization capability with unknown EIRP. As a matter of fact, when environments change, even if the Transmitter Receiver (T-R) distance is unchanged, the RSS still may change significantly. TR2S2 avails against environment non homogeneity at an instant t . This is because TR2S2 makes use of RSS ratios, and the ratio of RSS from a pair of BSs varies little with environment change as the RSS from either base stations increases or decreases simultaneously. Simulations demonstrated TR2S2 performance when using various radio propagation models, for some of the main wireless technologies currently available (802.11x, 802.16x, etc.), and within different localization areas (urban, suburban, etc.) ranges.

In classical localization methods, target nodes location has usually been computed with geometric calculation, as is the case with TR2S2, or by using methods such as K-Means, K-Nearest Neighbors and centroid techniques, etc. The originality of the proposed 3D-CS-R2S2 method resides in applying CS theory for target node position recovery, as well as handling n-way arrays to address the three-dimensionality for each measurement. In other words, each input data connects three wireless nodes, namely, two reference points and one possible target. The next section provides a formal expression of the proposed 3D-CS-R2S2 recovery technique.

5.4.2 D-CS recovery program

Most RSS-based RTLS need a measurement-based training phase, commonly called Fingerprinting, during which the radio map of the environment is created. Conventional radio maps compute and store the average of the maximum number of RSS measurements samples over time, from all existing BSs at many RPs, with known coordinates, covering optimally the entire detection area. This process is costly and may be insufficient especially for outdoor environments, since it will be practically impossible to identify all the propagation conditions.

- Sparsity Tensor $\Psi_{K \times K \times N}$

In 3D-CS-R2S2, each RSS ratio is computed according to RSS measurements at RP_n from two base stations BS_i and BS_j . Then radio map database can be represented with Ψ :

$$\Psi_{K \times K \times N} = \begin{pmatrix} \psi_{1,1,n} & \cdots & \psi_{1,M,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{M,1,n} & \cdots & \psi_{M,M,n} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

And

$$\psi_{i,j,n} = \widehat{\psi}_n = [\psi_{i,j,1}, \psi_{i,j,2}, \dots, \psi_{i,j,n}] \quad (5.3)$$

Where $\psi_{i,j,n}$ is the ratio of recorded RSS measurements from BS_i divided by that from BS_j recorded at RP_n , for $i = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, K$, and $n = 1, 2, \dots, N$. K is the total number of BSs and N is the total number of RPs taken in the detection area. Thereby, the radio map is a 3-way array known as tensor in mode-1 of $(x_k, y_k; \widehat{\psi}_n)$, for $n = 1, 2, \dots, N$, where (x_n, y_n) are Cartesian coordinates of the n^{th} RP. Tensor methods have been introduced since the 1960's for multi-dimensional data analysis.

- Target position vector $\theta_{N \times 1}$

Let all RPs in the detection area be represented by a column vector θ of size K . At a given time, each target node position has a unique position in the discrete spatial domain; here represented as a T-sparse vector with all cells are equals to zero except $\theta_n = 1$, where n is the index of the RP at which the target node is located, and T is the total number of target nodes;

$$\theta = [\theta_1, \dots, \theta_{n-1}, 1, \theta_{n+1}, \dots, \theta_N]^T \quad (5.4)$$

The localization problem is stated as a sparse signal problem for which CS can be applied for target node position recovery, which is equivalent to reconstructing vector θ^* from a set of noisy measurements.

- Measurement matrix $\Phi_{M \times N}$

During on-line localization, a target node will catch sight of only a small number K of BSs randomly situated in the detection area, $M < K \ll N$. The matrix $\Phi_{M \times N}$ represents the positions of BSs belonging to the target read range. $\Phi_{i \times j} = 1$ means that BS_{*i*} is located at RP_{*j*}. Since Φ is created randomly, then different online tensor measurements $yTensor_{M \times M \times T}$ are created at different runs. $yTensor_{i \times j \times k}$ is the current recorded ratio RSS_i/RSS_j measured from BS_{*i*} and BS_{*j*} respectively at target node T_k level.

Let us recapitulate with the following model:

$$yTensor = \Psi \times_{[1,2]} \Phi \times \theta + \varepsilon \quad (5.5)$$

Where $\theta \in \mathbb{R}^n$ is the vector of target position to recover, $yTensor \in \mathbb{R}^{M \times M \times N}$ is the observations tensor (current/online measurements), $\Psi \times_{[1,2]} \Phi \in \mathbb{R}^{M \times M \times N}$ is a measurement tensor with $M \ll N$, and ε is the measurement noise.

In order to recover θ via ℓ_1 -minimization algorithm, CS theory imposes two essential conditions, namely the sparsity of θ and the incoherence of Ψ and Φ [Baraniuk, 2007]. The first condition is already proved in (5.3). Because Ψ and Φ are artlessly coherent in spatial domain, each element of the Φ can be represented linearly by combining a few number of columns of the basis Ψ . To comply with the second condition, an orthogonalization procedure is required to make Ψ and Φ incoherent so that CS works properly. Since the concept of incoherence is not defined for orthogonal matrices, in the following section, we present an efficient computational transformation allowing the orthogonalization of n-way arrays so that Φ will have dense representation in the basis Ψ .

First, let assume $y = T \times yTensor$, and let;

$$T = Z \times_n A^\dagger \quad (5.6)$$

Where $A = \Psi \times_{[1,2]} \Phi$, i.e. the tensor Ψ is successively multiplied in mode-1 and mode-2 by matrix Φ , and Z is the transpose of High Order Singular Value Decomposition (HOSVD) of A^T

[Kolda, 2009], [Kruskal, 1989]. HOSVD models allow to decompose a three dimensional tensor \mathcal{T} into one core entity \mathcal{G} and three matrices factors (5.7), as illustrated in Fig.5.1;

$$\mathcal{T} = \llbracket \mathcal{G}; A, B, C \rrbracket \approx \mathcal{G} \times_1 A \times_2 B \times_3 C \quad (5.7)$$

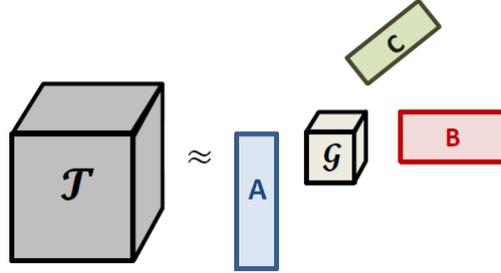


Figure 5.1. Tucker decomposition.

The most attractive features of HOSVD are: (a) matrice factors ($A; B; C$) are generally orthogonal, (b) core tensor \mathcal{G} must have mutually orthogonal slices in all the three modes of \mathcal{T} . The operator \times_n in (5.6) signifies the product of tensor Z 's core and the mode products of the three matrice factors of tensor A^\dagger , in the same way as in (5.7).

$$\begin{aligned} y = Z \times_n A^\dagger \times yTensor &= Z \times_n A^\dagger \times A \times \theta + Z \times_n A^\dagger \times \varepsilon = Z \times \theta + Z \times_n A^\dagger \times \\ \varepsilon &= Z \times \theta + \varepsilon' \end{aligned} \quad (5.8)$$

Owing to the transformation formulated in (5.8), tensor Z is orthogonal, and the incoherence condition is now fulfilled. Accordingly, given a set of measurements y , we can recover θ (or its approximation θ^*) by solving an ℓ_1 -minimization problem in accordance with CS approach, in polynomial time.

The problem posed in (5.8) can be solved efficiently using several methods proposed in recent years, especially in the signal processing field. Our focus in this paper will be only on the well-known Basis Pursuit (BP) method, just to validate and prove our new wireless node position recovery based on a 3D CS approach. In fact, BP can be used with noisy data by solving an optimization problem trading off a quadratic misfit measure with an l_1 norm of coefficients occurring in the representation that we seek to recover. In our case, BP method refers to the solution of:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \|\theta\|_1 \text{ subject to } Z \times \theta = y \quad (5.9)$$

The vector θ^* returned when solving (5.9) by BS algorithm is assumed to be a 1-sparse $N \times 1$ vector with all cells equal to zero except $\theta_n^* = 1$, where n is the index of RP at which the target node is located. Every once in a while, it may happen that the target node is not situated exactly at a RP coordinate, and otherwise, the recovered θ^* is as a matter of fact an approximation of the real data, leading to have the θ^* vector containing a few non-zero coefficients. In that event, the recovered target position Q^\otimes is the centroid of the positions of index with highest coefficients satisfying this constraint:

$$Q^\otimes = \text{Centroid}((x_h, y_h) | \theta^*(h) \geq \max(\theta^*(h)) \times 0.95) \quad (5.10)$$

5.5 Simulations Results

For the purpose of simulations, the free space shadowing model [Sarkar, 2003] is used to predict the received signal strength when the transmitter and receiver are in Line Of Sight (LOS). The received power (P_r) is given by the Friis equation as follow:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^n L} \quad (5.11)$$

Where P_t is the transmitted power, G_t and G_r are the gains of the transmitter and receiver antennas and λ is the wavelength. L is the system loss, not related to propagation. Here, G_t , G_r and L are set to 1 (matched antennas and lossless system). Path loss exponent n is the key parameter in the localization algorithm that defines the rate at which RSS decreases with distance in a specific environment. Let $P_{r_i} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_i^n L}$ and $P_{r_j} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_j^n L}$ be the RSS values from two base stations BS_i and BS_j at distances d_i and d_j respectively from the target node when it is located at RP_n .

$$\Psi_{n \times i \times j} = \frac{P_{r_i}}{P_{r_j}} \quad (5.12)$$

In the presented simulations, we consider 8 BSs and 4 target nodes randomly situated in a detection area of $12\text{m} \times 12\text{m}$ size. BSs can be situated outside the detection area as long as they remain in the targets read range. The measurement matrix is returned according to BSs detected in the read range. The simulations aim, on the one hand to validate the results of the 3D-CS-R2S2, and on the other hand to analyze the effects of the two major sources of error the localization accuracy; propagation conditions change and target mobility.

In the first scenario, target nodes are assumed to move discontinuously across the RPs positions with no propagation conditions of environment changing. In this ideal case, the 3D-CS-R2S2 localization program manages to recover multiple targets positions accurately, even in special cases such as a target located exactly at BS coordinates, as illustrated in Fig.5.2.

In the second scenario, target nodes move over the grid randomly, and propagation conditions remain unchanged. The values in the measurement matrix are no longer exactly equal to those in radio map, and the recovered position is mostly the centroid of several potential positions. In this case, the 3D-CS-R2S2 method demonstrates as well good performance, recovering targets positions substantially close to the originals, as shown in Fig.5.3.

In the third scenario, measurement noises are introduced by adding a random shadowing, resulting in additional fluctuations of the RSS measurements. The additional shadowing is expressed by several standard deviations $\sigma = 1.5, 3, 4, 5, 6$ in dBm. Fig.5.4 demonstrates that localization accuracy does not degrade significantly when the propagation conditions change, hence the advantage of using the ratio of RSS (R2S2) instead of simple RSS. The positioning mean error curve in Fig.5.4 varies lightly with a slight slope to the rise when the shadowing effect increases. The localization mean error increases from 1.11m to 1.535m when the standard deviation σ increases from 1.5dBm to 6dBm.

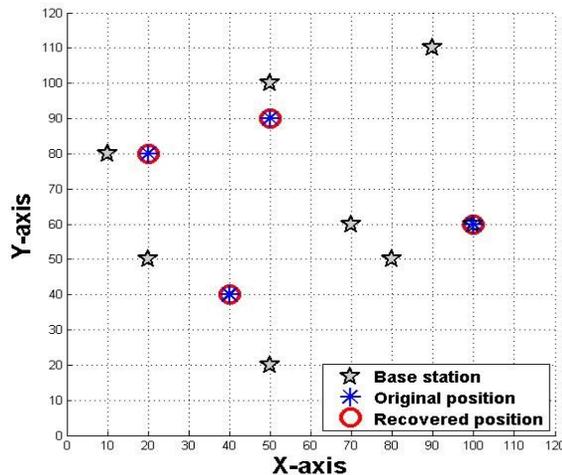


Figure 5.2. 3D-CS localization of targets at discrete positions and no propagation conditions changing

Execution time is one of the most important criteria when implementing RTLS. Tab.5.1 summarizes the execution time of the 3D-CS-R2S2 for the localization of 1 target node and for 4 targets nodes simultaneously in the 12m × 12m grid. As can be seen, execution time for the localization of one target is slightly lower than for 4 targets. Looking into detail, the execution time to perform HOSVD task is approximately the same because the number of BSs is maintained at 8, and thus the size of measurement matrix $\Phi_{M \times N}$ is the same. Contrary to HOSVD time, the execution time of BP algorithm is significantly lower in the first case. Indeed, the algorithm is run as many times as the number of targets. As a concluding remark on this aspect, the total execution time is proportional to the number of BSs and target nodes involved in the localization.

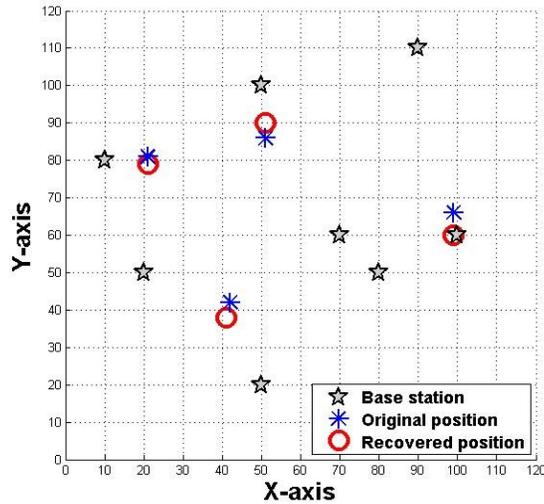


Figure 5.3. 3D-CS localization of targets at continuous positions and no propagation conditions changing

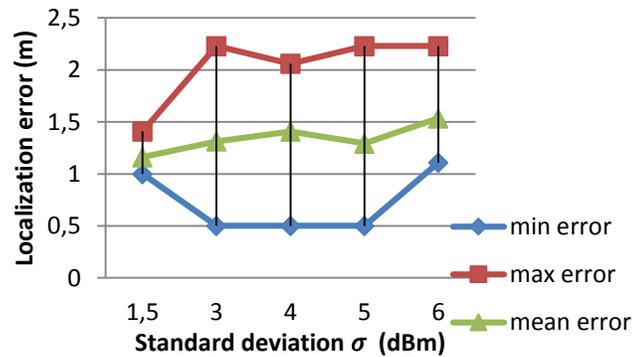


Figure 5.4. 3D-CS localization error as function of standard deviation σ .

Execution time is one of the most important criteria when implementing RTLS. Tab.5.1 summarizes the execution time of the 3D-CS-R2S2 for the localization of nodes in location 1 and 4 in the $12\text{m} \times 12\text{m}$ grid.

Table 5.1. Execution time details

Target number	Ψ load time(s)	HOSVD time(s)	BP time(s)	Total time(s)
1	0.0624	59.8	0.889	60.7514
4	0.078	62.022	1.638	63.738

5.6 Conclusion

In this paper we focused on a full three-dimensional CS approach for mobile nodes localization in wireless networks. Unlike conventional RSS based localization methods, the proposed method is deterministic and fully founded on multi-linear algebra, instead of geometric computation to mark off the estimated boundaries of the targets. Since the ratio of received signal strengths from pairs of base stations is selected as a data to characterize a node presence at a reference point, the radio map and the observation matrix used to set up input data in 3D-CS-R2S2 are represented by three-way arrays called tensors. An appropriate algebraic procedure is developed using tensor products together with a suitable decomposition which allow solving the wireless nodes localization problem by ℓ_1 -minimization algorithms based on CS theory. Simulation results show that almost exact target position recovery is possible, with a high probability, and even if the propagation conditions of environment change and/or the target node is mobile.

CHAPITRE 6 3D COMPRESSED SENSING FOR WIRELESS NETWORKS-BASED MULTIPLE NODE LOCALIZATION IN MULTI-FLOOR BUILDINGS

Avant-propos

Auteurs et affiliations :

M.A. Abid : étudiant au doctorat, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

S. Cherkaoui : professeur, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

Date d'acceptation : 9 décembre 2015.

État de l'acceptation : version finale publiée.

Revue: Wireless Communications and Mobile Computing.

Référence : [Abid, 2015]

Titre français : Acquisition comprimée 3D pour la localisation multiple des nœuds basée sur les réseaux sans-fil dans les bâtiments multi-étages.

Contribution au document :

L'estimation des coordonnées géographiques horizontales a été longtemps privilégiée par les RTLS dans le domaine de l'informatique omniprésente. L'évaluation précise de l'élévation est actuellement appréciée pour rencontrer les nouvelles exigences des applications de LBS offerts dans des environnements 3D. Dans ce travail, il s'agit de la localisation des nœuds radio dans les MFB en utilisant l'infrastructure des réseaux sans-fils existantes tout en considérant les deux

conditions de LOS et l'existence d'obstacles. Une alternative aux solutions géométriques, probabilistes et la technique de lancer de rayon habituellement utilisées pour la localisation des nœuds dans les WNs est proposée dans le souci d'améliorer la précision et réduire la complexité et le temps de calcul. Le présent article développe d'avantage la technique de localisation de type analyse de situation basée sur 3D-CS, déploie son utilisation dans les environnements 3D et examine ses performances en fonction de différents paramètres. La technique proposée utilise la métrique R2S2 en tant que signature et un algorithme de jumelage basé sur l'approche de CS 3D. Afin d'évaluer la performance de la nouvelle technique, des simulations et des expériences ont été réalisées dans le bâtiment de la faculté de génie de l'université de Sherbrooke en utilisant l'infrastructure du réseau sans-fil existante. L'objectif de ce travail est de développer une technique de localisation qui permet d'estimer simultanément et avec le même niveau d'importance l'étage et l'emplacement des cibles mobiles en temps réel.

Résumé français :

Les signaux radio utilisés pour la localisation sont sévèrement entravés par des phénomènes complexes tels que l'ombrage, l'absorption, le bruit et la distorsion due à la propagation par trajets multiple. Pour cette raison, le problème de radiolocalisation est formulé entant qu'un problème mal-posé pour lequel la technique de CS est réputée pour retourner une solution avec une haute performance. La méthode proposée utilise l'approche de CS 3D appliquée avec les métriques de R2S2 et de TDOA. L'objectif est d'améliorer la précision de localisation de multiples nœuds mobiles dans des environnements 3D basée sur l'infrastructure des WNs, tout en réduisant la complexité de déploiement et le temps de calcul. Les simulations et les expériences ont été exécutées dans un MFB représentatif en utilisant RSS et une carte radio de la zone de localisation. Les résultats démontrent que; i) l'approche 3D-CS est fiable pour l'estimation de l'étage et l'emplacement de la cible à l'intérieur de l'étage, ii) la précision de la localisation est moins affectée par la variation du medium de propagation comparée à la technique basée sur 2D-CS, iii) l'erreur moyenne de localisation est moins élevée lorsque le nombre des APs augmente et l'espacement entre les points d'observation dans la carte radio diminue. Les résultats des tests ont aussi démontré que la précision retournée par l'approche 3D-CS est assurée lorsque les matériaux de construction du bâtiment, les positions des APs et la puissance d'émission des dispositifs radio des cibles sont inconnus.

6.1 Abstract

In wireless network (WN) based node localization, the received signals are hampered by complex phenomena, such as shadowing, noise, and multi-path fading. In this work, the localization is stated as an ill-posed problem that can be solved by compressed sensing (CS) technique. A three dimensional (3D)-CS approach using the ratio of received signal strength (R2S2) and the time difference of arrival (TDOA) metrics was proposed to improve the localization accuracy of multiple target nodes in 3D WNs, and to reduce deployment complexity and processing time. Simulation and experimental tests were conducted in a large multi-floors building (MFB) using the strength of the received signals and the radio map of the localization area. The results indicated that the 3D-CS approach is reliable for identifying the floor number and estimating the horizontal position. The localization precision is less affected by the propagation medium variation than the conventional 2D-CS method. The localization mean error is lower when the number of access points (APs) increases and the radio map spacing decreases. In addition, the accuracy of the 3D-CS approach was assured as well as the building material characteristics, position of APs, and wireless-terminal real transmission power are unknown.

Keywords-component: Compressed sensing; localization in 3D WNs; indoor positioning; RTLS;

6.2 Introduction

The Global Positioning System (GPS) [DoD, 2008] is the widely adopted navigation system for tracking and navigation assistance applications. In outdoor environments, the GPS determinates the longitude of a receiver position with acceptable accuracy. The altitude estimation is up to three times less accurate than longitude even with high quality GPS receivers. This work focuses on accurate 3D localization in indoor and dense urban environments with limited GPS satellites visibility [Hegarty, 2008], [Arnold, 2011]. Indoor localization is an important and challenging issue. In fact, recent studies show that people spend up to 90% of their lifetime indoor and 54% of world population lives in urban areas [DoESA, 2014].

Many Real Time Localization Systems (RTLS) [Hightower, 2001] have been proposed for indoor localization in wireless networks (WNs) in the last two decades. Geometric, probabilistic and ray-tracing (RT) techniques based on empirical/theoretical electromagnetic wave propagation models are often used for node position estimation. The lack of reliability of localization techniques based on WN is due to several factors; WN infrastructures that support the localization are not designed for this task, the propagation medium variation, and the multipath propagation in non-line of sight (NLOS) condition. To achieve better accuracy, recent RTLS use additional equipment (accelerometers, cameras, laser or sonar sensors) that increase the deployment cost and difficulty for large-scale location based service applications. In addition, the most existing RTLS differentiate between horizontal and elevation localization accuracy and focus more on the former.

Compressed Sensing (CS) [Donoho, 2006], [Baraniuk, 2007] is an emerging technology promising for a wide-range of applications especially in signal and image processing. This work proposes a new localization method based on CS approach which can recover target positions with accuracy from few noisy measurements in 3D WNs.

The proposed method is appropriate for indoor and outdoor environments when the positions of Access Points (AP), the equivalent isotropic radiated power (EIRP) of wireless transmitters, and the environment characteristics (layout, materials, etc.) are unknown. In the off-line phase, the radio map of the detection area is created by taken received signal measurements at multiple reference points (RPs). In the online phase, multiple node positions estimation is performed based on the real-time measurements from of APs. In order to reduce the localization mean error due to the propagation medium variation, it is recommended to use dual metrics i.e. the ratio of received signal strength (R2S2) [Abid, 2011] instead of the received signal strength (RSS), and respectively the time difference of arrival (TDOA) instead of the time of arrival (TOA). The use of R2S2 and TDOA metrics requires processing a radio map and measurements data set represented by n-way arrays leads to 3D-CS issue. The 3D-CS method using the R2S2 metric aims to provide a reliable localization with low sensitivity to noisy measurements, acceptable running time, and without additional equipment. The method estimates at once the horizontal positions and the elevation of target nodes with the same precision.

The paper is organized as follows; firstly, a survey of related works on localization in 3D WNs and a background on CS theory were presented. Secondly, a multiple node localization problem was formulated as a recovery problem and the resolution process that uses CS theory with different signal metrics was described in detail. Thirdly, the performance of the proposed method was investigated by conducting simulation and experimental tests in a multi-floors building (MFB) with existing WN infrastructure. The impact of different parameters such as the propagation medium variation, the number of APs and RPs, on localization mean error was investigated. Finally, the performance of the 3D-CS method was compared to the 2D-CS methods and others existing RTLS.

6.3 Related works on WNs based localization in MFB

Localization techniques in WNs can be classified in four groups: proximity methods, geometric methods, scene analyses, and RT. Proximity methods determine whether the target is within the read range of an AP with known position. This allows coarse localization related to the APs density and coverage depending on the wireless technology. For fine-grained localization, geometric methods are used in two forms: a) Triangulation method estimates the target position by calculating the distance to at least three APs with known positions. The distance that separates the target and the AP is computed from RSS attenuation and radio wave propagation models, or from the TOA of the signal traveling at the speed of the light. b) Angulation method estimates the target position from the intersection of angle direction lines from at least two APs. Scene analyses methods, such as the fingerprinting localization, are composed of two phases. In the off-line phase, the fingerprints (TOA, RSS and direction of arrival (DOA)) of signal received are recorded at multiple reference points (RPs) through the localization area and stored in a reference data set (radio map). In online phase, the position of target node is estimated by matching its real-time fingerprints with those in the radio map. The matching of fingerprints can be performed with a multitude of techniques such as least square minimization, Kalman filtering, and Bayesian approaches [Bouet, 2008], [Paul, 2010]. The RT technique is able to simulate a wide variety of optical effects, such as reflection, scattering, and dispersion phenomena. Thus, the RT was perceived as a promising solution for indoor localization in WNs with NLOS condition. Alas, RT is heavy in vector analysis which involves high computational cost of the system.

People and assets localization in MFB and 3D areas is an important and challenging problem [Beucher, 2011]. Given the increasing trend of tall buildings construction in most cities of the world, indoor vertical localization becomes as important as horizontal. In many works addressing the floor estimation, the horizontal localization within the floor is not considered or deteriorated. Several studies have addressed horizontal and vertical localization issue in MFB. Varshavsky et al. [Varshavsky, 2007] developed the fingerprinting-based localization system using GSM technology. SkyLoc system aims to locate the actual floor of a mobile user who dials 911 in tall MFB. Experimentations were conducted in 6 MFBs with 9 to 16 floors in 3 cities across North America. Using RSS, SkyLoc system succeeds to identify the correct floor, one floor-off, and two floors-off in 57%, 82%, and 98% of the cases, respectively. Ahmed et al. [Ahmad, 2008] explored the idea of locating targets in a semantically meaningful area (SMA) in MFB instead of using geometric distance. Using IEEE 802.11 beacons, the exact SMA and floor of the target node were determined in 83% and 88% of cases, respectively. The localization system based on radio interferometry achieved an accuracy of few centimeters in an area of 160 m range by making measurements with at least 8 network nodes [Maroti, 2014]. Such system takes about one minute to estimate the position of the target and it is appropriate for stationary target localization, since a mobile target, such a pedestrian, can cross several tens of meters in one minute.

In robotic research, a high precision is required. For example, the precision of several tens of centimeters requires micro aerial vehicles to navigate autonomously in a MFB using onboard sensors [Castellanos, 2000]. Schwarz et al. [Schwarz, 2005] have proposed an Ultra Wide Band-based 3D positioning system that performed a localization mean error of 0.5 m in a room of 9.6x8x2.8 m size. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) [Bailey, 2006] allows an autonomous robot to build the map of an environment and simultaneously locate its position. Woodman and Harle [Woodman, 2008] developed a pedestrian tracking system in a three-floor building using a foot-mounted inertial sensor to track the sensor-wearer with an accuracy of 1 m. Hightower et al. [Hightower, 2000] developed SpotOn localization system using long-range RFID tags coupled with 2-axis accelerometer with an accuracy of 1 m³ in ideal conditions. Additional equipment, such as gyroscope or accelerometer, improves the localization precision but it is not appropriate for largely deployed applications.

In RT research field, the work reported in [Coco, 2004] achieved a mean localization error of 10 m in an urban area of 120 m side length in NLOS condition with the presence of obstacles. Tayebi et al. [Tayebi, 2009] used RT and fingerprinting techniques and obtained a best mean error of 0.55 m in a detection area of 85x120 m size with an RPs spacing of 0.8 m and an 8 rays-order of path. RT-based techniques improve the localization precision in NLOS condition, when geometric methods may probably return erroneous results, but they are time consuming.

CS approach was recently applied for network monitoring, sparse events detection, distributed sensing, and lately for localization in WNs. Results reported in [Meng, 2009] indicated good localization performance when locating 15 target nodes based on 90 measurements in an area of 60x60 m divided into a 900 grids with a signal noise ratio (SNR) of 25 dB. More recently, simulation results achieved in [Xian, 2014] proved the accuracy of an adaptive localization algorithm based on distributed CS in wireless sensor networks. The positions of 10 target nodes are exactly estimated (with a near zero error) in a 20x20 m size network divided into a 500 grids when SNR is 20 dB and some 150 sensor nodes are randomly deployed in the area. CS was also used to build the map of obstacles in the environment based on sparse sensing [Mostofi, 2009].

In this work, a new 3D-CS approach is proposed for localization in MFB with NLOS condition based on signal metrics with no additional equipment. The proposed technique allows the same double accuracy for vertical and horizontal position estimation with an acceptable running time.

6.4 Related works on compressed sensing

CS technique has recently emerged in applied mathematics and has been widely used for signal and image processing. CS allows signal acquisition and lossless data compression using reduced sampling rate far less than Nyquist-Shannon rate (twice the higher frequency of signal). Indeed, high sampling rate requires considerable number of sensors and associated acquisition lines, and it generates large amount of data to be processed. To obviate these limitations, CS theory proposes to compress sparse signals at the sampling phase with particular method, i.e. directly on sensors level.

CS exploits the sparse nature of signals and allows their reconstruction with a high probability from small number of samples by solving a convex optimization problem. Let's consider a discrete field or signal x represented by a column vector of dimension N . Assume that x has a

sparse representation in a given basis Ψ composed of N rows vector $\{\Psi_i\}$, when $1 \leq i \leq N$. The signal x is written as:

$$x = \sum_{i=1}^N \theta_i \Psi_i \quad (6.1)$$

where the vector θ of dimension N represents the coefficients of x in basis Ψ . Signal x is said k -sparse when k among N coefficients in θ_i are non-zero. CS is useful when the signal has parsimonious representation in the basis Ψ , i.e. $K \ll N$, so that CS promises to reconstruct a signal x from M random measurements where $M \geq (K \log(N/K))$ and $M \ll N$ [Baraniuk, 2007]. Instead of measuring θ directly respecting to Shannon's rate, the CS method modifies the framework for data acquisition and presumes taking compressed measurements as presented in the following model:

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \theta = \Phi^* \theta \quad (6.2)$$

where Φ is the $M \times N$ transformation matrix and the $M \times 1$ column vector measurements \hat{y} is the linear projections of x onto Φ . Thus, y is presented as an ill-posed problem. Recovering the signal x from the observation measurement y is equivalent to resolve a system of highly under determined linear equations. However, in CS theory, the sparse vector x can be recovered in polynomial time under some assumptions. Mainly, the transformation matrix Φ^* must conserve the restricted isometric property between y and signal x to be reconstructed later. This property is satisfied with high probability if the matrix Φ and Ψ are incoherent. The inconsistency is made, for example, if Φ is a random matrix.

The problem presented in (6.2) admits an infinite number of approximate solutions \tilde{x} . Since the evaluation of the norm ℓ_0 is a non-convex problem difficult to solve, the norm ℓ_1 minimization resulting in a convex problem as presented in (6.3) is applied. This problem can be efficiently solved by using existing algorithms such the Basis Pursuit (BP) algorithm [Chen, 1999].

$$\min \|\tilde{x}\|_1 \text{ such that } \Phi \tilde{x} = y \quad (6.3)$$

In the case of noisy measurements, a zero-mean error parameter (err) is added to (6.2) as follows:

$$y = \Phi \tilde{x} + eps = \Phi^* \theta + err \quad (6.4)$$

Thus, x can be recovered by using greedy algorithms, such as Matching Pursuit [Joel, 2007] or BP Denoising (BPDN) [Lu, 2010], which are defined to resolve optimization problem in the following form:

$$\min \|\tilde{x}\|_1 \text{ such that } \|\Phi \tilde{x} - y\|_2 < \text{eps} \quad (6.5)$$

where $\|err\|_2$ is lower than eps .

The topic of 3D-CS usefulness for 3D applications was primarily addressed in image processing field. In recent works, 3D-CS was applied for 3D shape reconstruction and tracking assets location in 3D space using magnetic resonance imaging (MRI) and ultrasonic imaging technologies. The feasibility and challenges of 3D-CS use in MRI applications was investigated in [Kim, 2011]. Quinsac et al. [Quinsac, 2010] have defined a CS-based solution for the reconstruction of a 3D scene by transmitting wideband ultrasonic pulses and analyzing their reflections received by an array of sensors.

Feng et al. [Feng, 2009], [Feng, 2012] were the first to propose RTLS using CS theory in WNs. CS was used to estimate single and multiple target positions with acceptable accuracy in a 2D indoor environment from a small number of RSS measurements. The authors have exploited the spatial sparse nature of localization in WNs problem, to firstly, formulate it as a sparse vector recovery problem in discrete spatial domain, and secondly to recover target node positions by solving a ℓ_1 -minimization problem. A localization error of 0.4 m was observed in simulation when 4 target nodes are located in an 10x10 m area divided on 23x23 grids using 12 RSS measurements and assuming a SNR equal to 25 dB [Feng, 2009].

In the next section, we will present how to use the RSS (respectively TOA) and the R2S2 (respectively TDOA) metrics for localization in MFB based on CS. The localization in WNs problem formulation and the multi-linear algebra process applied with full 3D-CS approach will be exposed.

6.5 3D-CS based localization in MFB

TOA and RSS metrics are the most used measurements in WNs based RTLS. The time based method measures the time delay of signal from the transmitter to receiver to deduce the distance that separates them. The TDOA metric is aimed to improve location accuracy in NLOS condition when a high-resolution clock and inter-node synchronization are in place. Regarding RSS metric, the distance is proportional to the attenuation suffered by the signal to attain the receiver. The inconvenience of the use of RSS is due to the propagation medium variation and multi-path propagation. In addition, the theoretical or empirical radio propagation models allow

an approximation of the distance between the transmitter and receiver. The R2S2 metric is intended to alleviate position estimation errors intrinsic to the RSS measurements.

The proposed 3D-CS method uses a fingerprinting localization technique based on R2S2 or TDOA metric, and a 3D-CS approach for the fingerprints matching and position estimation of multiple wireless nodes. It should be noted that the proposed method has the same form with TOA and RSS, and a different form in greater dimension with TDOA and R2S2 metrics. In the first form, RSS or TOA is measured between the target node and one AP (single metric). The resultant radio map and measurement data are presented by 2D matrix. In the second form, TDOA or R2S2 metric concerns the target node and two APs simultaneously (dual metric). The radio map and measurement data set are presented by 3-way arrays and a 3D-CS procedure is used for localization in WNs.

CS is thrifty in terms of sensing resources, which can be helpful where they are not available at large number. In localization in WNs case, the APs are installed to optimally cover specific areas in the MFB and they are not planned for localization purpose. CS is perfectly suited to recover target positions from small number of measurements to quickly estimate the position and improves the system responsiveness. It is important to emphasize that in this context is not a question of signals recovery, so that no matter of conventional signal time variation problem. The interest is to detect the target nodes presence, pinging on the network at a discrete time t with, to measure the RSS level, and to estimate their positions.

6.5.1 Problem formulation

The following sub-sections provide a formal expression of the proposed method for localization in 3D WNs using single and dual metrics.

2D-CS based position recovery program with single metrics (RSS and TOA)

The MFB is decomposed in a set of superposed grids. Each RP position is represented by its index in a vector. For example, if each floor is decomposed on 10x10 grids, the 4-floors building requires a vector of size 400 to represent all RPs index. Assume that RP_i with index $i = 128$, so it located in the grid of coordinates (3,8) in the 2nd floor. The radio map in represented by the following matrix:

$$\Psi_{K \times N} = \begin{pmatrix} \psi_{1,1} & \cdots & \psi_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{K,1} & \cdots & \psi_{K,N} \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

where $\psi_{i,j}$ is the RSS measured at RP_j from AP_i , for $i = 1, 2, \dots, K$ and $j = 1, 2, \dots, N$, and K and N are the total number of APs and RPs, respectively.

During online phase, only a sub-set of APs existing in target nodes read range is considered. Additional selection criteria of APs can be used based on signal strength or covariance. The first criterion discards the APs with RSS value lower to a specific threshold and the second selects the APs with minimum RSS readings variance. The measurement matrix $\Phi_{L \times K}$ represents the indexes of L selected APs for the current localization cycle. Each Φ_l row vector in the measurement matrix means that AP_l is located at the index $_l$ in the established APs indexes order $\Phi_l = [\Phi_1, \dots, \Phi_{k-1}, 1, \Phi_{k+1}, \dots, \Phi_K]$.

At a given time, every target node has a unique position in the discrete spatial domain. All target nodes present in the localization area at an instant t , are represented by the sparse matrix $\theta_{N \times T}$, were T is the total number of existing targets and each column vector θ_k has whose cells equal to zero expect this corresponding to the position of target node, $\theta_k = [\theta_1, \dots, \theta_{n-1}, 1, \theta_{n+1}, \dots, \theta_N]^T$. Taking our previous example, if the filed at index $\theta_{128} = 1$ in the recovered vector θ_i^* , the target node is located at the position of coordinates (3, 8) in the 2nd floor.

Finally, the compressed RSS measurements which are recorded by all target nodes from selected APs are represented by the $L \times T$ matrix $y = \Phi \Psi \theta + \varepsilon$ where ε is a random measurement noise and the matrix θ is the solution to be found.

To be able to properly apply CS, two essential conditions must be fulfilled, namely, the θ parsimony, already proved, and the incoherence of Φ and Ψ [Baraniuk, 2007]. However, the reference matrix Ψ and measurement matrix Φ are artlessly coherent in spatial domain. Thus, an orthogonalization procedure is applied in order to introduce the incoherence condition. Assume that $y' = T y$ and $T = Z A^\dagger$, where $A = \Phi \Psi$ and $Z = \text{orth}(A^T)^T$. Note that $\text{orth}(\cdot)$, $(\cdot)^T$ and $(\cdot)^\dagger$ are the orthogonal basis, the transpose and the pseudo-inverse of matrix, respectively. This procedure transforms the matrix Z in orthogonal. The new compressed measurements are then presented as follows:

$$y' = Z A^\dagger y_m = Z A^\dagger A \theta + Z A^\dagger \varepsilon = Z \theta + \varepsilon' \quad (6.7)$$

This problem formulation was already proposed by Feng et al. [Feng, 2009], [Feng, 2012] to localize multiple target nodes in 2D WN using RSS metric.

3D-CS position recovery program with dual metrics (R2S2 and TDOA)

As mentioned above, with R2S2 and TDOA metrics, we have to handle n-way arrays since each reading entry is computed according to a pair-wise of APs and one wireless node. Then a 3-way array structure, called tensor, is employed to represent the radio map Ψ as follows:

$$\Psi_{K \times K \times N} = \begin{pmatrix} \psi_{1,1,1} & \cdots & \psi_{1,K,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{K,1,1} & \cdots & \psi_{K,K,N} \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

The radio map is a tensor in mode-1 of column vector $\psi_{i,j,n}$, where $i = 1, 2, \dots, K$, $j = 1, 2, \dots, K$ and $n = 1, 2, \dots, N$ with K and N are the total number of APs and RPs, respectively. Using R2S2 metric, $\psi_{i,j,n}$ is the ratio of RSS reading from AP_{*i*} to that from AP_{*j*} ratio at RP_{*n*} position. With TDOA metric, $\psi_{i,j,n}$ is the difference of arrival time of signal transmitted from AP_{*i*} minus that from AP_{*j*} recorded at RP_{*n*} position.

The matrix of targets positions $\theta_{N \times T}$ and the measurement matrix $\Phi_{L \times K}$ working are identical to the previous section. The online compressed measurement tensor $y_{L \times L \times T}$ records values (R2S2 or TDOA) calculated from all selected APs pair-wises in targets read range in the localization area as follows:

$$y = \Psi \times_{2|3} \Phi \times_1 \theta + \varepsilon \quad (6.9)$$

where ε is the measurement noise and operator $\times_{2|3}$ means that the tensor the Ψ is successively multiplied in mode-2 (\times_2) and in mode-3 (\times_3) by the matrix Φ . The resulted tensor is multiplied in mode-1 (\times_1) by the matrix of target positions θ . In order to effectively recover θ via ℓ_1 -minimization algorithm by CS theory, Ψ and Φ must be incoherent. The following transformation aims to orthogonalize the n-way arrays, so the matrix Φ will have dense representation in the basis Ψ .

First, assume that

$$y' = T \times_n y, \text{ with } T = Z \times_n A^\dagger \text{ and } Z = \text{HOSVD}(A^T)^T \quad (6.10)$$

where $A = \Psi \times_{2|3} \Phi$ and Z is the transpose of High Order Singular Value Decomposition (HOSVD) [Kolda, 2009] of A^T . Notice that the transpose of tensor A is made by permuting his two modes 1 and 2, which amount to transpose all horizontal slices of tensor [Kruskal, 1989]. The HOSVD model allows the tensor \mathcal{T} decomposition into one core entity \mathcal{G} and three matrices factors as follows;

$$\mathcal{T} = \llbracket \mathcal{G}; A, B, C \rrbracket \approx \mathcal{G} \times_1 A \times_2 B \times_3 C \quad (6.11)$$

where matrices factors (A ; B ; C) are generally orthogonal, and the core tensor \mathcal{G} has mutually orthogonal slices in the three modes of \mathcal{T} as illustrated in Fig.6.1.

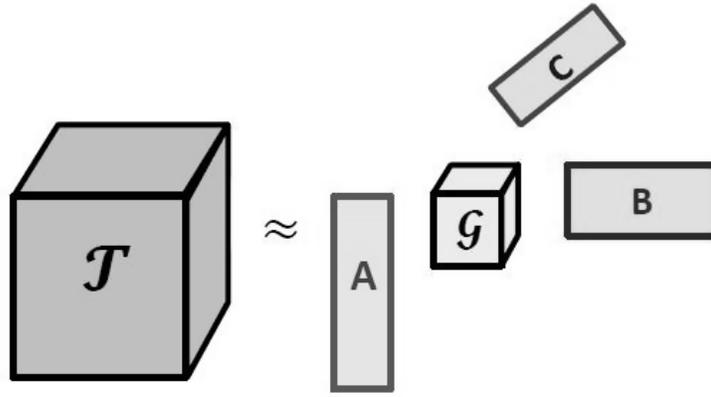


Figure 6.1: Tucker decomposition

Combining equations (6.9) and (6.10), we obtain:

$$\begin{aligned} y' &= Z \times_n A^\dagger \times_n y = Z \times_n A^\dagger \times_n A \times_1 \theta + Z \times_n A^\dagger \times_n \varepsilon = Z \times_1 \theta + Z \times_n A^\dagger \times \varepsilon \\ y' &= Z \times_1 \theta + \varepsilon' \end{aligned} \quad (6.12)$$

The model in (6.12) can be applied since $A^\dagger \times_n A = I_n$ where I_n is the mode-n identity tensor, and \times_n is the mode-n product with $n = 3$ (three modes of tensor).

Once all conditions are met, namely the sparsity of θ , the orthogonality of Z and the incoherence of Ψ and Φ , it is possible to recover the multiple target locations matrix approximation θ^* in accordance with CS theory by solving a ℓ_1 -minimization problem. Finally, the tensors Z and y' are reshaped as matrices and the optimization solver algorithms are applied as the same way as in 2D problem. In noiseless case, the well-known BP algorithm is selected to solve the problem modeled as follows:

$$\theta^* = \min_{\theta} \|\theta\|_1 \text{ s. t. } Z \times_1 \theta = y' \quad (6.13)$$

The BP algorithm is used to solve an optimization problem using noisy data, as indicated in [Chen, 1999]. To evaluate the performance of the proposed method versus various noises level, BPDN algorithm is applied to solve the following problem:

$$\theta^* = \min_{\theta} \|\theta\|_1 \text{ s. t. } \|Z \times_1 \theta - y'\|_2 < \varepsilon' \quad (6.14)$$

The target positions are recovered from the $N \times T$ matrix θ^* and each $N \times 1$ column vector represents the position of one target. If this vector contains few non-zero coefficients among all N , the greatest coefficient is selected, otherwise the centroid of positions with highest coefficients is computed to estimate the final position as given below:

$$Q^* = \text{Centroid}((x_t, y_t, z_t) | \theta^*(t) \geq \max(\theta^*(t)) \times 0.95) \quad (6.15)$$

6.6 Simulations Results

In this work, we focus on evaluating the performances of the proposed method with RSS and R2S2 metrics in both simulation and experimentation. Experimentation with TOA and TDOA metrics will be the focus of future work.

Two scenarios were studied. In the first scenario, LOS propagation condition is considered in order to evaluate the performance of the proposed localization method in ideal conditions. In the second scenario, NLOS condition is considered using a reproduction that is close to the real MFB where the experiments were performed to simulate WN conditions as in reality. To enable better comparison, the dimensions of localization areas are identical in both scenarios. The radio map created in off-line phase, aggregates all RSS values computed according to the selected radio propagation model. The RSS from all APs are computed at every discrete RP location in detection area without considering noises. To create the radio map tensor based on R2S2 metric, the same measurements are used to calculate the ratio of RSS values with reference to all pairs of APs at every discrete RP. The average of 100 target localization operations was performed for each study presented in sections V. and VI.

6.6.1 Localization in MFB with LOS condition

The objective of this study is to validate the efficiency of the proposed method and to analyze the influence of propagation medium variation on localization accuracy in LOS condition. The free space-shadowing model is used to simulate the ideal case with LOS propagation. The lognormal shadowing model [Sakar, 2003] is applied to deal with dynamic changes in propagation medium by introducing a random noise to the measurements. The path loss in terms of distance obeys to the following power law:

$$PL(d) [dBm] = PL_{d_0} + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (6.16)$$

where PL_{d_0} represents the attenuation at a reference distance d_0 , n is the path loss exponent that defines the rate at which RSS decreases with distance in a specific environment, d is the distance between transmitter and receiver, and X_σ is a Gaussian random variable of received power (in dBm) with zero mean and a standard deviation σ . With a confidence level C , the normality range of $X_\sigma \in [-z\sigma \text{ dBm}, +z\sigma \text{ dBm}]$ and $z = Q_x^{-1}\left(\frac{C+1}{2}\right)$. The value of Z can be obtained from a Normal distribution table.

Simulation setup: Localization area considered in LOS condition is reduced to an open space without indoor walls or roofs equivalent to 4 floors with superficies of 80x60 m each. A total of 30 APs are simulated to create the radio map with 40x30x4 RPs, so that the horizontal distance between two neighbors RPs is equal to 2 m and it is fixed to 4 m in vertical direction. Wi-Fi APs illustrated by circles annotated with the floor number are dispersed throughout the MFB as seen in Fig. 6.2. A battery of tests was conducted to localize 4 targets at unknown positions supposed at RPs locations. When all the APs are used, the minimum number of measurements required by CS theory is respected ($30 > 4 \times \log(40 \times 30 \times 4/4)$).

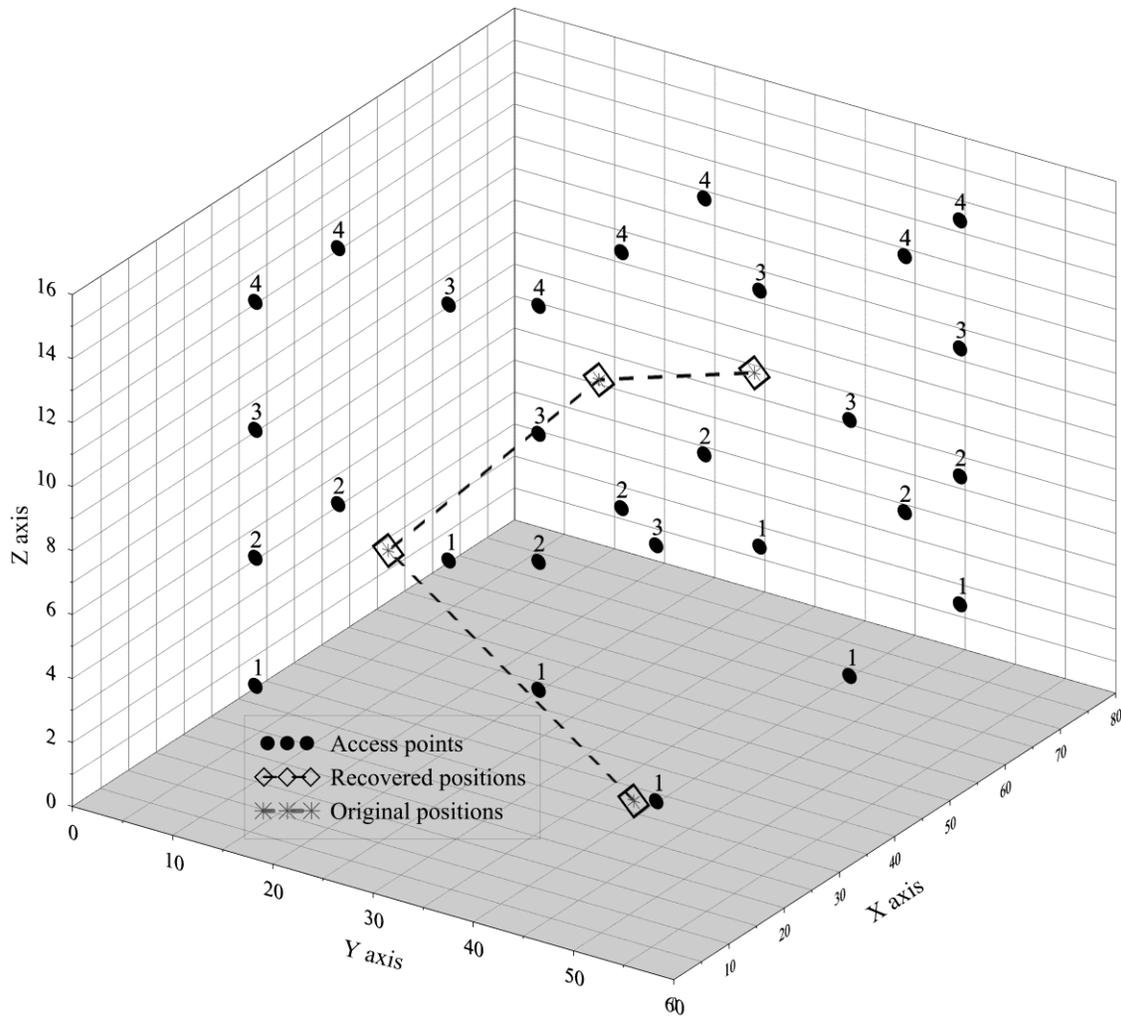


Figure 6.2: Recovered target positions using 3D-CS method in ideal conditions

Simulation Evaluation: The purpose of this first simulation is to evaluate the impact of the propagation medium variation on the 3D-CS method performance. In the first case, there is no change considered in propagation medium during online localization phase. The real-time RSS measurements are strictly equal to those recorded in radio map ($X_\sigma = 0$). In this situation, the localization program based on RSS as well as with R2S2 succeeds at every run to recover accurately the target positions, as visualized in Fig. 6.2. Indeed, the problem is reduced to an inverse problem where the radio map defines the model that relates each vector of RSS measurements to a specific position in the MFB.

In the second case, a random noise is added to the real-time measurements by setting the maximum standard deviation (σ) to 2, 5, 10, and 15 dBm, that corresponds to different levels of

propagation medium variation. Fig. 6.3 summarizes the localization mean error and the corresponding standard deviation (represented by error bars) obtained with respect to different propagation variation levels. Using RSS and 2D-CS approach, the obtained mean error in horizontal position is equal to 2.15 m with a standard deviation of 1.44 m when $\sigma = 10$ dBm. The current target floor is always well recovered with a lower variation. However, one floor is missed in 38% of cases when $\sigma = 10$ dBm.

In presence of radio propagation irregularity, a new hypothesis is considered using R2S2 metric. Assuming a homogeneous environment at one slot time, the signal strength variation between the target and each of the two considered AP has the same sign, which makes R2S2 metric less sensitive to the propagation medium variations. In others terms, the ratio of RSS from a pair of APs varies little with environment change as the RSS from either Wi-Fi APs often increases or decreases simultaneously. Simulations results demonstrate that localization accuracy is notably improved, mainly when $\sigma \geq 10$ dBm as shown in Fig. 6.3. For example, the horizontal mean error is equal to 1.78 m with a standard deviation of 1.35 m when $\sigma = 10$ dBm. The right floor can be well determined even with noisy measurements.

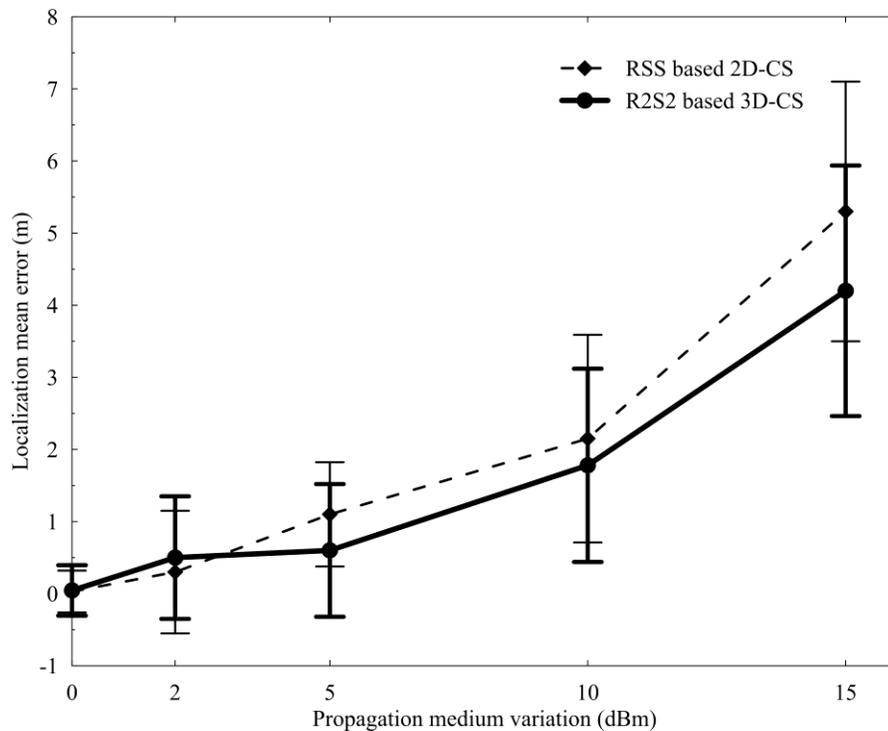


Figure 6.3: Influence of the propagation medium variation on the localization mean error for 2D-CS and 3DCS methods

As seen in Fig. 6.3, with both methods based on RSS and R2S2 metrics, the localization error increases as the propagation variation increases and the accuracy decreases sharply when the variation is close to 15 dBm. The error standard deviation is relative stable when σ is set to 2 and 5 dBm and it increases gradually when $\sigma \geq 10$ dBm. The 3D-CS method allows superior performance to recover target positions with lower localization mean error and corresponding standard deviation compared to the 2D-CS method, especially with high propagation variation. It should be noted that the position recovery process is not reliable when $\sigma \geq 15$ dBm.

Fig. 6.4 shows the percentage of the exact position, the neighbor, and the centroid which correspond to the lower, middle and upper portion of the histogram, respectively. The exact position is often recovered with higher percentage using the both methods and whatever the value of σ . Otherwise, one neighbor position or the centroid of a given number of likely positions is selected as the estimated target position.

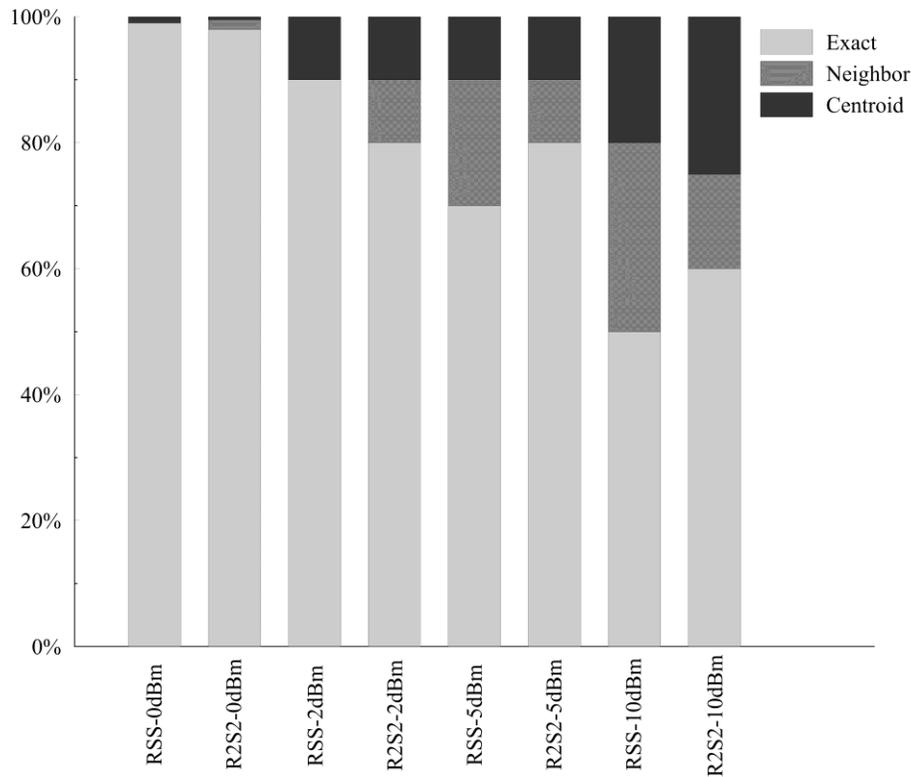


Figure 6.4: Details of recovered positions using RSS and R2S2 metrics with different propagation medium variation levels in LOS condition

6.6.2 Localization in MFB with NLOS condition

Several empirical and theoretical models [Sakar, 2003] have been proposed in literature to correlate signals path loss with respect to the distance between a transmitter and a receiver in indoor buildings with obstacles. In this work, the multi-walls multi-floors model [Lott, 2001] is selected for simulations in NLOS condition. This model, derived from the ray tracing algorithm, considers the number and the type of walls and floors as detailed in the following formula:

$$PL = PL_{d_0} + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_{wi}} L_{wik} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K_{fj}} L_{fjk} \quad (6.17)$$

where L_{wik} denotes the attenuation due to k-th traversed wall of type i, L_{fjk} is the attenuation due to k-th traversed floor of type j, i and j are the wall and floor types respectively, K_{wi} is the number of traversed walls of category i, K_{fj} is the number of traversed roofs of category j and finally PL is the estimated path loss. Notice that when no walls and floors are present between the transmitter and the receiver, the model is artlessly shortened to the free space propagation model presented in (6.16).

Simulation setup: The MFB structure selected in this study reflects the most real propagation conditions in common interior trim of hospitals, airports, commercial center, etc. The real-like plan of environment chosen for experimentation was implemented. The MFB is considered as an inseparable entity insuring that the accuracy of the localization in vertical direction is as important as in horizontal direction. The floors and the walls are represented by plans and polygons, respectively, as seen in Fig. 6.5. The intersection of wave trajectory with the walls and the floors was computed exactly by algebraic equations. Since the walls and the ceilings are made with different materials and having different thickness, through-wall and through-floor power attenuation are set to 5 and 15 dBm, respectively. These values are based on work in [Lott, 2001] that experimentally measured the path loss depending on the material and thickness of obstacles in MFB using 2.4 GHz wireless technologies. The placement of the APs is picked as it is in the real MFB in order to reduce their number while providing good wireless network coverage. The inter-floor signal propagation makes the radio map more cohesive and very advantageous for localization issue. Even the received signals are weak (not useful to establish communication), they still supply additional and pertinent information for localization purpose. In NLOS condition, performed tests consist on locating simultaneously 4 target nodes on exact

RP positions. The 3D-CS method was compared to the 2D-CS method using different simulation parameters.

Simulation results: Fig. 6.6 summarizes the localization mean error determined with different levels of propagation medium variation (0, 2, 5, 10, and 15 dBm) and by varying the number of the APs of 10, 20, and 30. The selected APs are equivalent to the number of measurements in CS theory having a minimum required of 12.32, considering (40x30x4) RPs and 4 target nodes. Similarly to LOS condition, the results showed that localization mean error increases as the propagation medium variation increases using 2D-CS and 3D-CS methods. The 3D-CS method tolerates higher level of propagation medium variation up to 15 dBm using 20 and 30 APs. The localization mean error significantly decreases as the number of APs increases from 10 to 20 exceeding the minimum required by CS theory.

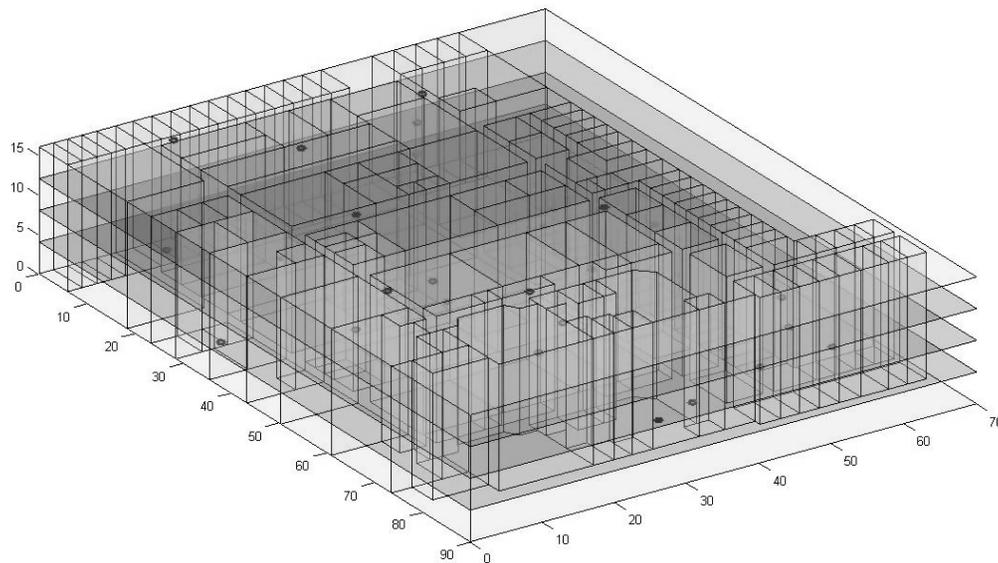


Figure 6.5 : Reproduction of the MFB plan

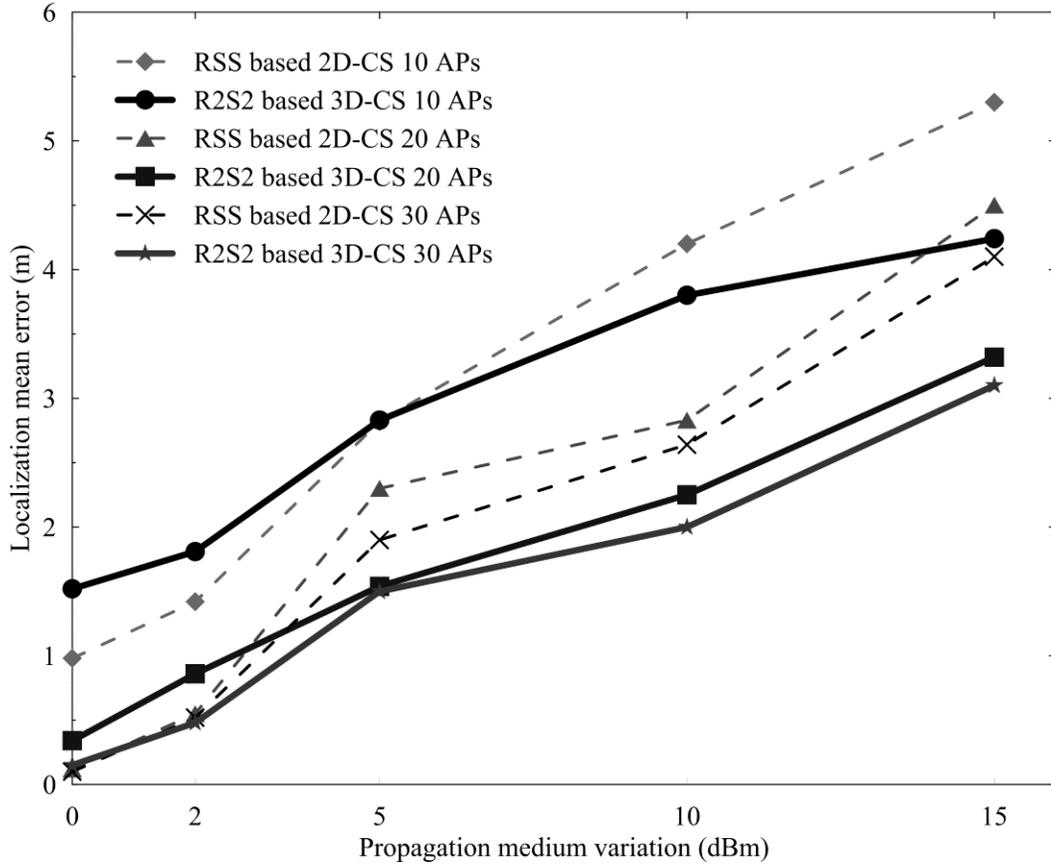


Figure 6.6 : The localization mean error determined by varying the propagation medium variation and the number of APs using 2D-CS and 3D-CS methods in NLOS condition

In order to analyze the impact of radio map spacing on the localization mean error, both 2D-CS and 3D-CS localization methods were simulated under various levels of horizontal distance (2, 3 and 4 m) between two adjacent RPs. In this scenario, unknown target node positions were located somewhere in the vicinity of RPs using 30 APs with no propagation medium variation. As shown in Fig. 6.7, the closer the radio map spacing results in a decrease of the localization mean error and the standard deviation.

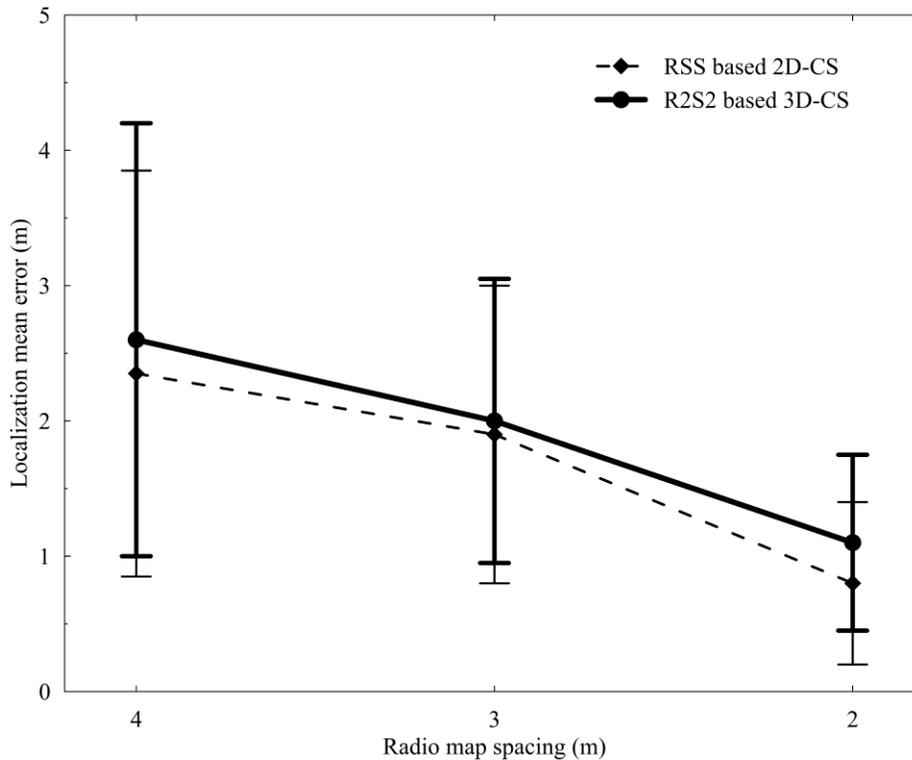


Figure 6.7 : Influence of the radio map spacing on the localization mean error

Based on the previous simulation results, the average of the localization mean error is equal to 1.97 and 2.19 m with an average of the standard deviation of 1.22 and 1.62 m using the 3D-CS and the 2D-CS method, respectively. As a result, the 3D-CS method is found to be suitable for localization in MFB in NLOS condition. Thus, the semantically meaningful area can be well identified. The disparities of RSS measurements between adjacent positions, which are often separated by walls or ceilings, in complex MFB structures are clearer than those observed in open space area.

6.7 Experimental Results

Experiments were carried out to assess the performance of the proposed localization method in a real MFB. The accuracy of the 3D-CS localization method was investigated by varying the number of APs, the radio map spacing and the number of target nodes. The performance of the proposed method was compared to 2D-CS and other conventional methods addressing the same problem in similar conditions.

Experimental setup: The experiments were conducted in the four-floors building of the faculty of engineering at the University de Sherbrooke. Each floor measures 80 m in length, 60 m in width, and 4 m in height and comprises around 100 premises. Unlike residential or commercial buildings, the materials and the equipment of the selected MFB are different from one floor to another and even from one compartment to another. In this spirit, the experimental site was fittingly selected in order to experiment different materials and building structures. The real plan of the third floor of the building is shown in Fig. 6.8. Seven or eight APs were installed in each floor, as illustrated by circles annotated by letters from A to G, for a total of 30 APs in the entire MFB. Note that the AP locations are different from one floor to another.

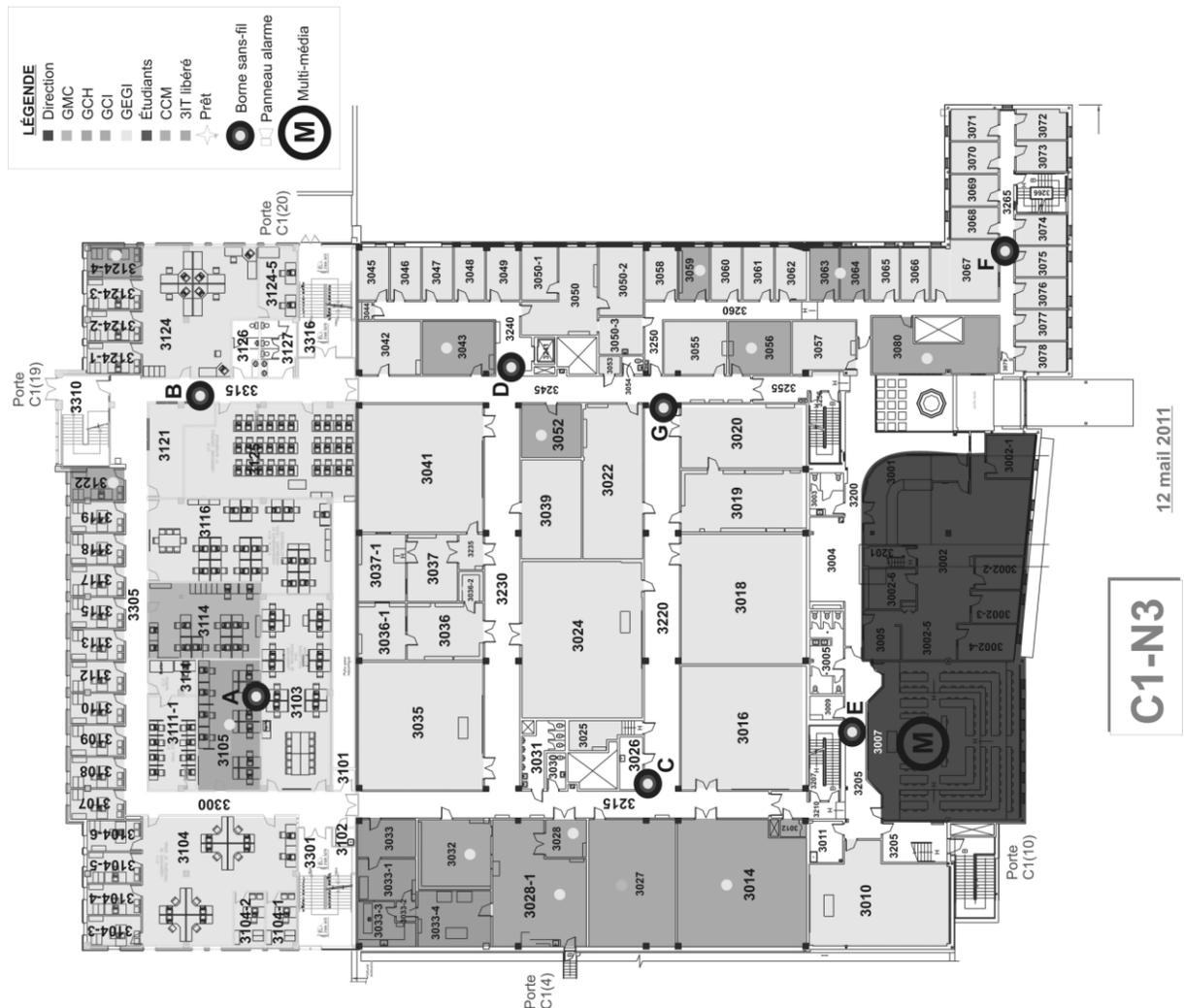


Figure 6.8 : Plan of the third floor of MFB and APs placement

To create the radio map, the RSS values were measured from APs in the read range of the Wi-Fi scanner at 128 RPs through corridors of each floor and exactly in front of each door. Each two adjacent RPs are separated by 2 m at 1.5 m above the floor. A minimum of 6 APs and a maximum of 14 APs were detected at each RP. To prevent any interference with the RSS measurements, the radio map was created during the non-activity period of the building. At each RP, the Wi-Fi scanner program was run over a sufficiently period (at least 30 seconds) until the RSS measurements are stabilized and all APs are detected. The total run time to investigate all the floors was about 12 hours. Finally, the RSS scanning files were analyzed to create the radio map data set and to dress the correspondence table between the RP positions and their corresponding semantically meaningful area. An Intel Core 2 quad with 4GB memory computer was used to perform all the calculations. The radio map for the 2D-CS is presented by an array of 30×512 that records the RSS values from the 30 APs at the 512 RP positions. Note that the minimum number of measurements required by CS theory is 8.42 when using 512 RPs and 4 target nodes. For the 3D-CS method, the radio map consists of a tensor of $30 \times 30 \times 512$ that calculates the RSS of AP_i to the RSS of AP_j ratio at a RP_k , where i and j vary between 1 and 30, and k varies between 1 and 512. If AP_i is perceived and AP_j is not, the corresponding field in radio map is set to +Infinity, inversely; the field is set to -Infinity. If neither AP_i nor AP_j is perceived at one RP, the corresponding field in radio map is set to 0. In the online phase, localization tests were carried out to localize target nodes at random position in front of room doors, based on RSS measurements during the normal activities in the MFB.

Results evaluation Fig. 6.9 shows the variation of the localization mean error as a function of the number of APs varied from 6 to 14. The localization mean error decreases as the number of APs increases. The localization precision is improved when using over than 10 APs since the localization error is significantly lower. The best localization precision is equal to 1.3 m using 14 APs in the targets read range. This error can be acceptable due to the extent of the building.

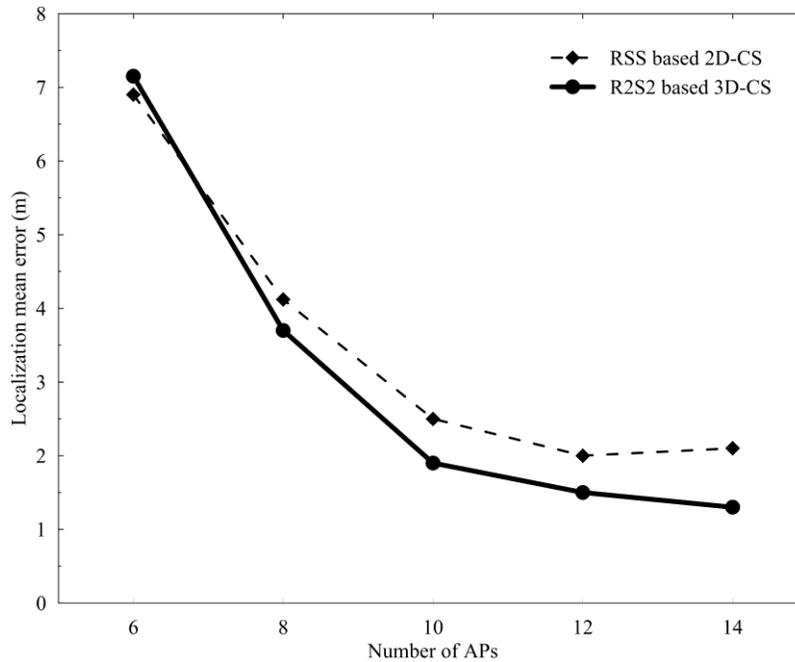


Figure 6.9 : Influence of the number of APs on localization mean error determined by experimental results

Fig. 6.10 illustrates the impact of the radio map spacing on the localization mean error. The minimum number of measurements required by CS theory was respected. Three levels of horizontal spacing of 2, 4 and 6 m were used corresponding to 512 (128x4), 256 (64x4), and 168 (42x4) RPs, respectively. As seen in Fig. 6.10, that the error and the corresponding standard deviation decrease as the radio map spacing decreases. The localization mean error decreases from 3.6 to 2.3 m when the radio map spacing drops from 6 to 4 m.

With a radio map spacing of 2 m and when the minimum number of measurements is respected, the 3D-CS based method allows determining the current right floor in most cases showing an average of localization mean error equal to 1.87 m and a standard deviation of 1.51 m. However, the 2D-CS method has higher average of localization mean error of 2.27 m and a standard deviation of 1.62 m

Since the number of target nodes is related to other parameters (the number of APs and RPs) as defined in CS theory, the maximum number of targets is limited to 8. Then, the localization precision was investigated by varying the target nodes between 2 and 8. As a result, the localization mean error seems to be insensitive to this parameter. Assume that the sparsity level, which discussed in CS definition, is the ratio of the number of target nodes to the number of

RPs. Since the sparsity levels did not exceed 5%, they cannot be significant to investigate the influence of the number of target nodes on localization mean error.

Runtime evaluation: A higher number of APs and RPs improves the localization precision but also increases the computational cost. The greater the number of target nodes results in the increase of the run time for algorithm to recover their locations. The 3D-CS method is more accurate but it is more time consuming than the 2D-CS method. The main reason of such consuming time is the tensor decomposition and HOSVD operation. However, tensor product and transposition operations take few microseconds to be executed using nowadays computers capabilities. In order to reduce the run time, parallelization of techniques, such as gradient-based, Newton and alternating least squares (ALS) methods can be used.

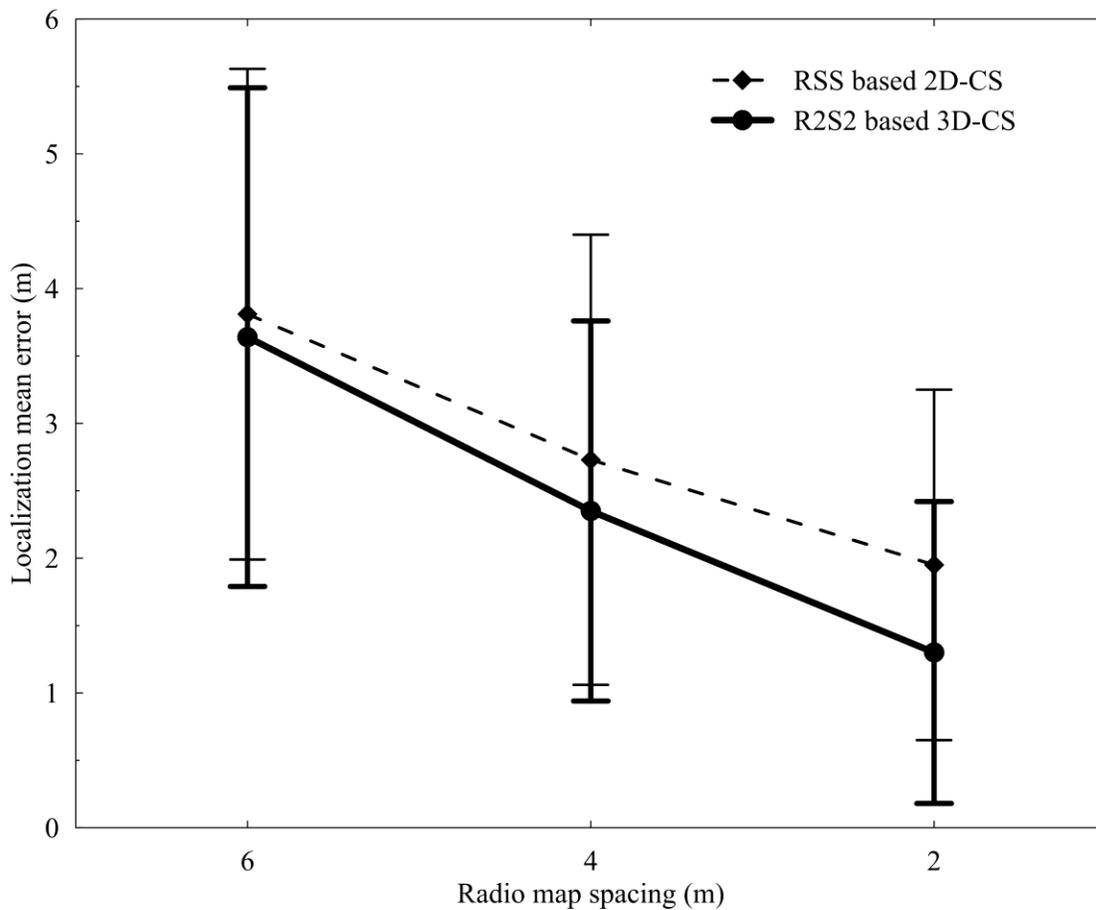


Figure 6.10: Influence of the radio map spacing on the localization mean error determined by experimental results

Comparison to prior work: Table 6.1 shows a comparison between the performance of the 3D-CS method and previous experimental work based on different localization techniques. Different comparison criteria were considered as seen in Table 6.1. We observe that the 3D-CS method is better in terms of practicability, computational and monetary cost. In addition, our method is well suitable for localization in MFB due to reliable position estimation of multiple targets in both horizontal and vertical directions.

Tableau 6.1: Comparison between the proposed 3D-CS method and existing localization techniques

Criterion	3D-CS	2D-CS [Feng, 2012]	Ray-tracing [Tayebi, 2009]	SLAM [Kummerle, 2009]
Technique	CS	CS & Clustering	RT (6 to 8 rays)	Localization/Mapping/Odometry
Run time	Moderate	Short	Long	Moderate
Computational cost	Low	Low	Heavy	Moderate
Monetary cost	Low	Low	High	High
Range measurement	Ratio of RSS	RSS	TOA, DOA	Laser/sonar/camera...
Sensing device	Mobile terminal	APs	Base station	Mobile terminal
Computing device	Mobile terminal	Base Station	Dedicated station	Mobile terminal
Fingerprinting	Radio map	Radio map	Reference data	Landmark
RPs spacing	2m	1.5m	$0.4m^1 - 0.8m^2$	-
Dimensions	3D	2D	2D	2D-3D
Area	80x60x16 m	30x46 m	85x120 m	500x250 m
Localization area	Multi-floor	Single-floor	Single-floor	Single-floor
Target number	Multiple	Multiple	Single	Single
Accuracy	1.8 m - Right floor	1.5 m	$0.2828m^1 - 0.5657m^2$	<1m

6.8 Conclusion

In this work, a 3D-CS method using received signals dual metrics was applied for multiple target nodes localization in MFB. The proposed solution allows a reliable estimation of the horizontal position and identification of the floor number using existing wireless networks infrastructure and a radio map, which is created in off-line phase. Both simulations and experiments showed that the localization precision is enhanced when the number of APs increases and the radio map spacing decreases. The results indicated that the 3D-CS method allows superior performance in NLOS condition with significant propagation medium variation than 2D-CS method. The localization precision is improved by about 0.4 m compared to 2D-CS method. The proposed method can be applied with different wireless technologies offering a good alternative to conventional techniques for environment monitoring or traffic management systems.

CHAPITRE 7 PEDESTRIAN COLLISION AVOIDANCE IN VEHICULAR NETWORKS

Avant-propos

Auteurs et affiliations :

M.A. Abid : étudiant au doctorat, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

O. Chakroun : chercheur postdoctoral, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

S. Cherkaoui : professeur, Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté de génie, Université de Sherbrooke.

Date d'acceptation : 9 juin 2013.

État de l'acceptation : version finale publiée.

Conférence: Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on.

Référence : [Abid, 2013]

Titre français : Évitement des collisions avec les piétons dans les réseaux véhiculaires.

Contribution au document :

Ce dernier article contribue à la thèse sur deux plans. D'un côté, il présente une application typique qui dépend totalement de la fiabilité de localisation des nœuds radio mobiles dans les environnements urbains. Justement, les deux techniques de radiolocalisation, proposées précédemment dans ce travail, sont destinées à la réalisation des RTLS dans les environnements confinés et extérieurs. D'un autre côté, l'étude présentée dans ce travail est au cœur de la deuxième exigence de toute application de sécurité routière dans les ITS, à savoir, un échange fiable et juste-à-temps d'information entre les différents nœuds dans le VANET. En effet, cet

article présente une étude comparative de différents schémas de communication dans les VANETs selon le standard WAVE/DSRC.

Résumé français :

Les applications dans les VANETs visent principalement l'amélioration de la sécurité routière. Pour atteindre cet objectif, les données géographiques des usagers de la route doivent être relayées efficacement entre tous les intervenants. Le présent travail propose d'examiner la performance des systèmes basés sur le standard WAVE/DSRC en incluant les usagers non motorisés. Premièrement, un format spécifique pour encapsuler les données géographiques des piétons et des cyclistes est proposé. En deuxième lieu, une architecture complète d'un système pour évitement des collisions au niveau des intersections routières est présentée. Par la suite, des tests ont été effectués pour analyser la performance du système en terme de taux de réception de paquets et délais de transmission en utilisant le standard WAVE/DSRC dans ces deux modes d'opérations possibles. Justement, une comparaison entre le mode qui utilise uniquement le CCH pour annoncer et transmettre les messages et le mode qui utilise un SCH (p. ex. le canal 172 et 184) pour la transmission des messages après avoir annoncé le service sur le CCH est éclairante et d'actualité. La comparaison a permis d'évaluer le mode d'opération qui implique le moins de congestion et saturation du canal, en prenant en compte différents niveaux de densité du réseau. Les constatations sont pertinentes pour la conception des modèles de transmission de données dans les systèmes d'évitement des collisions avec les piétons basés sur les VANETs.

7.1 Abstract

Main applications in vehicular networks are primarily looking for road safety improvement. To achieve this goal, position-data information of all interfering road users must be conveyed effectively. This proposal examines the performance made possible using WAVE/DSRC standard when including pedestrians/two-wheels. First, we propose a specific message format for encapsulating pedestrian and two-wheel position-data information. Second, we propose a complete system for collision avoidance at intersection level. Subsequently, we perform tests to analyze the system performance in terms of packets reception rate and transmission delay using WAVE / DSRC standard in two modes of operation. Namely, we perform a comparison between using only the control channel to announce and forward messages as a safety service, and using

one of the dedicated channels 172 or 184 after announcing the service on the control channel. Taking into account different levels of network densities, we investigate the modes of operation that provide lower congestion and channel saturation. The findings in this work are relevant to the design of data transmission patterns for pedestrian collision avoidance systems at intersections when using VANETs.

Keywords-component: VANET, WAVE/DSRC, Pedestrian Collision Avoidance, SAE J2735, 802.11a.

7.2 Introduction

Road users' localization for safety purposes has received increasing attention in recent years. In many applications such as navigation-aid and parking assistance, user self-location information is used for maneuvering and facilitating navigation. Apart from self-contained systems offered by vehicle manufacturers, a growing research field is studying the generalization of all these services through vehicular ad-hoc networks (VANETs) [Hartenstein, 2010]. With VANETs, an efficient location data exchange between the various users of the road, including vehicles, cyclists and pedestrians is paramount. The DSRC/WAVE standard [Uzcategui, 2009], [IEEE Std, 2007a] aims at establishing a communication framework between vehicles (V2V), between vehicles and infrastructure (V2I) and even with other road infrastructure users such as pedestrians.

This study focuses on how to develop a general vehicular safety application that requires location data exchange between nodes at various speeds. Such application can possibly leverage different wireless technologies to eventually converge on vehicular networks, in conformity with WAVE standard, to deliver information to vehicles in a timely manner. In earlier works, pedestrians were introduced in VANETs as road side units, mobile or stationary nodes according to the considered scenarios [Maeda, 2005]. In this work, we study the case where pedestrian and two-wheel nodes are sharing the road with vehicles. In such a scenario, a collision avoidance application seeks to deliver pedestrians/two-wheels location to vehicles that are coming close to an intersection using WAVE/DSRC. Using different modes of operation of WAVE/DSRC, we evaluate the communication efficiency of such application within the context of public safety.

Our contributions in this work are as follows: a) we propose a specific frame format to enclose pedestrian and two-wheel position information; b) we develop a system architecture for pedestrian collision avoidance (PCA) supporting pedestrians with and without DSRC capabilities; c) we investigate two main cases where PCA uses DSRC Control Channel only and when the Service Channel is used; and d) finally we evaluate the performance of the system thorough simulations by varying parameters such as messages priority, messaging frequency, communication range and vehicles density per kilometer-road to evaluate the packets reception rate and the delivery delay.

The remainder of this paper is organized as follow. A brief review of WAVE/DSRC standards and their main foundation together with related major findings through previous researches are presented in Section 2. In Section 3, we expose the proposed frame format for pedestrian information beaconing. In the same section, we introduce the proposed architecture for an active pedestrian collision avoidance system that uses WAVE/DSRC. Section 4 presents the results of simulations evaluating two possible operation modes. Observations and conclusions drawn are finally discussed in Section 5.

7.3 Overview of DSRC and WAVE

7.3.1 Dedicated Short Range Communication band

In 1997, the Federal Communications Commission (FCC) has dedicated 75 MHz of bandwidth in the 5.9GHz frequency band, called DSRC [Uzcategui, 2009], [IEEE Std, 2007a], [ASTM, 2002] for short to medium range communications in WAVE, including public safety and privates services. DSRC is meant to provide very high data transfer rates for mobile nodes in a relatively small communication zone under 1Km and with reduced latency in the range of 100ms. DSRC frequency spectrum, the Control Channel (CCH) and the six Service Channels (SCHs) allocation, maximum transmission power limits, and dedicated channels are described in Fig. 7.1.

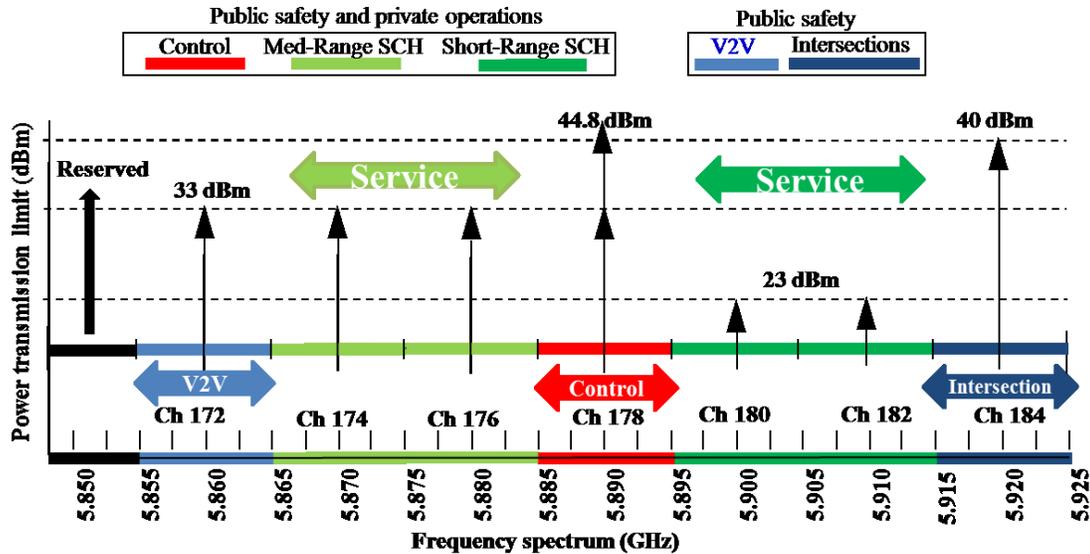


Figure 7.1: DSRC Frequency Spectrum and channel allocation

7.3.2 Wireless Access in Vehicular Environment

WAVE [Uzcategui, 2009] is the communication standard between nodes in vehicular networks. There are two types of nodes in WAVE;

- Onboard Units (OBU) located in vehicles or handled by pedestrians and two-wheelers.
- Roadside Units (RSU) located on the road and acting as service providers.

WAVE is the operation mode used by IEEE 802.11p [IEEE Std, 2007a] devices in the DSRC frequency band allocated for Intelligent Transportation Systems (ITS). WAVE model is presented as a layered architecture such as the OSI stack. The following illustration (Fig.7.2.) summarizes the different layers of the WAVE model and their equivalent in the OSI reference model.

- IEEE 802.11p*: [IEEE Std, 2007a] the standard governing Physical and Medium Access Control (MAC) layers of WAVE. It is developed in order to support communication between high mobility nodes up to 280Km/h. The main changes compared to IEEE 802.11a are: a) signal bandwidth reduced to 10MHz, b) removal of scanning and association procedure allowing connection setup and data transfer in only 100ms.
- IEEE1609.4*: [IEEE Std, 2006a] describes the effective mechanisms of multi-channels operation for switching between control and service channels.

- *IEEE1609.3*: [IEEE Std, 2007b] defines addressing and data delivery services providing multiple higher layer entities.
- *IEEE1609.2*: [IEEE Std, 2006b] Covers the format of secure messages and their processing.
- *IEEE1609.1*: [IEEE Std, 2006c] allows the interaction between the OBU and the in-vehicle applications.

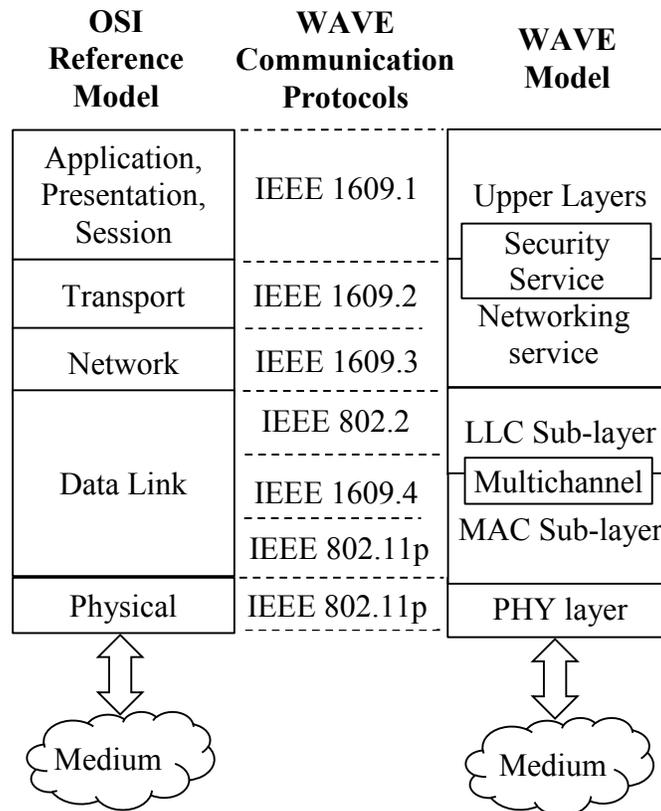


Figure 7.2: WAVE Standard architecture

IEEE802.11p and IEEE1609.4 were developed based on IEEE 802.11a and include the major's adaptations made by the American Society for Testing and Material (ASTM) to define WAVE. The multi-channels operation aims to facilitate the recurrent switching coordination between channels for WAVE units. These units can exchange information either independently over the CCH or by forming a WAVE Basic Service Set (WBSS) and exchange information through one SCH. A WBSS consists on time and frequency allocation, and it is announced in CCH. Two types of WBSS are supported in WAVE; 1) persistent WBSS announced in each CCH interval, and 2) non-persistent WBSS announced only on creation. If an application uses WBSS, WAVE units can communicate using two protocol stacks; 1) WAVE Short Message Protocol (WSMP),

which is a WAVE proprietary protocol defined to reduce the latency and the message overhead in order to be effective for time sensitive applications. 2) IPv6 protocol currently used in almost Internet traffic. Note that only WSMP can be used for applications that do not support WBSS.

Since the WAVE accession, many researches have been conducted to study its features and improve their performances. To comment on the current standard performance we cite some recent findings. In [Stibor, 2007], authors noticed that 90% of successful communications take place at less than 750m, even in low fading environments. Jiang et al [Moreno, 2004] reported that the probability of reception for broadcasted messages, in saturated conditions, is between 20% and 30% at distances less than 100 meters. According to [Jiang, 2008b], the optimal data rate for safety-related messaging is fixed to 6Mbps using packets of 200 bytes and 500 bytes, while respecting the bearable latency of 100ms for end-to-end message delivery.

7.4 Pedestrian collision avoidance system

This section will be dedicated to; (a) the presentation of the frame formats for the pedestrian positioning data exchange and (b) an overview of the system architecture.

7.4.1 Frame format for pedestrian position data

Based on SAE J2735 [SAE, 2010] basic safety message standard, we propose a frame format to enclose the pedestrian location data. The format is a direct simplification of frame formats that comply with NMAE2000 [Luft, 2002]. NMAE2000 is used by GPS systems and adopted by the majority of the locating and mapping systems such as Google-maps.

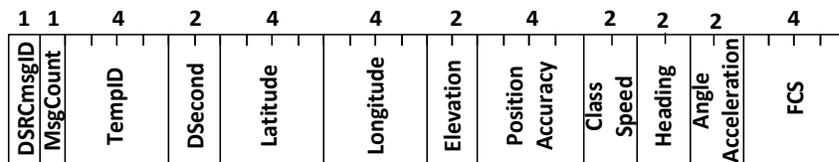


Figure 7.3: Pedestrian location data frame format

The proposed frame is composed of 12 fields presented in their order of appearance as illustrated in the following:

1. *DSRCmsgID*: determines the type of the current message.
2. *MsgCount*: sequential number incremented at each successive transmission by a given pedestrian. It is primarily used in packet error statistics.
3. *TempID*: as a temporary ID, this field is set a random constant for a period of time, and is changed occasionally for privacy reasons.
4. *DSecond*: clock signal for messages time stamping.
5. *Latitude*: Geographic latitude of pedestrian.
6. *Longitude*: Geographic longitude of pedestrian.
7. *Elevation*: Elevation compared to the sea level.
8. *Position-Accuracy*: used to convey how precise the latitude and longitude values are to evaluate the location information accuracy.
9. *Class-Speed*: is mainly a value determining if it is pedestrian or a two-wheel.
10. *Heading*: Compass heading of pedestrian.
11. *Angle-Acceleration*: Current position of the steering wheel of two-wheel nodes, expressed as a positive angle of longitudinal and lateral acceleration.
12. *Checksum*: checksum parity for error detection.

The Pedestrian position data frame is encapsulated in an IEEE802.11p frame inducing an overhead of 32 bytes as shown in Fig.7.4.

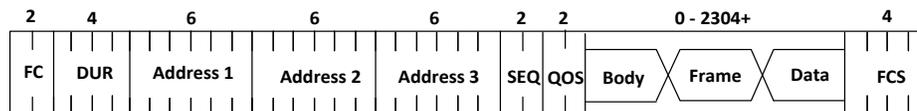


Figure 7.4: IEEE802.11a data frame format

7.4.2 Intersection collision avoidance with pedestrian participation; System design and architecture

One of the main goals of WAVE is to support delay sensitive application designed to preserve the driver's life, passengers, as well as non-motorized road users such as pedestrians and cyclists. Fig. 7.5 summarizes the proposed architecture of an active pedestrian collision

avoidance system, comprising the principal hardware equipment and data streams of all interfering parts, namely pedestrian (or two-wheels), road side units and on board units. Two major cases are considered; in the first P2V case we consider that pedestrian terminals comprise an ultra-small DSRC Unit. In the second case, called P2I+I2V case, we assume that pedestrian terminals use another wireless technology (e.g. Wi-Fi) to exchange data with the RSU, which in turn will be acting as an intermediary with vehicles' OBUs. In the figure hereafter, the block in red at the pedestrian side is replaced in the second case by a communication unit with the RSU leveraging another technology.

The P2V case is equivalent to V2V taking into account the low velocity of pedestrians which have DSRC units enabling them to communicate directly in a VANET mode. The second case is equivalent to dividing the problem in two parts: 1) P2I, pedestrian transmitting messages to the RSU using some other wireless technology such as Wi-Fi, and 2) I2V, the RSU relaying the message to OBUs leveraging WAVE technology.

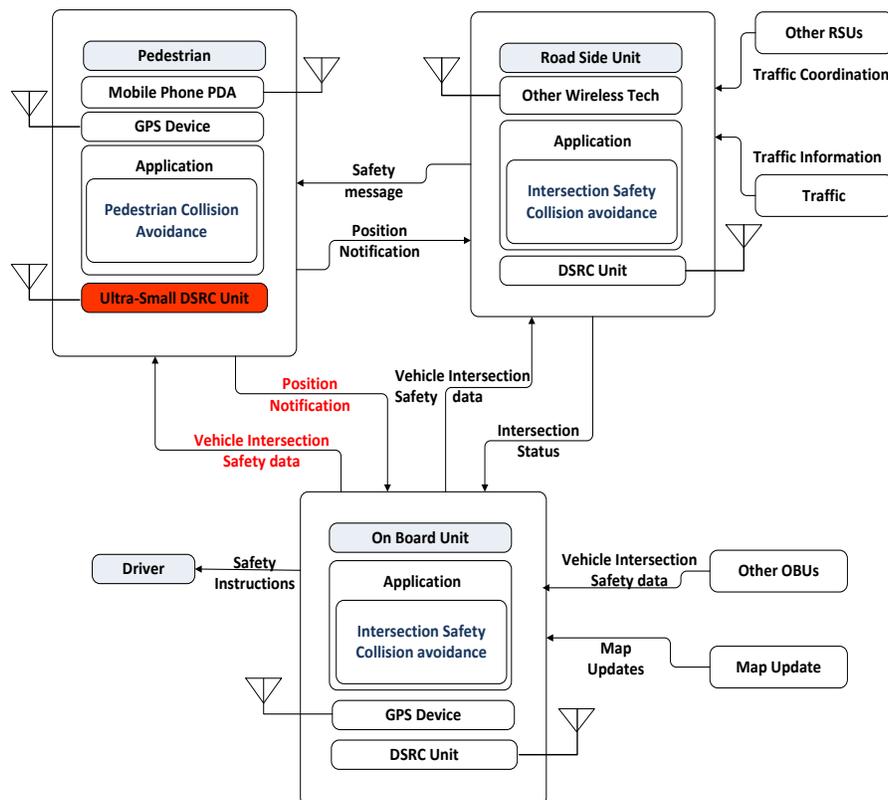


Figure 7.5: Pedestrian collision avoidance system architecture

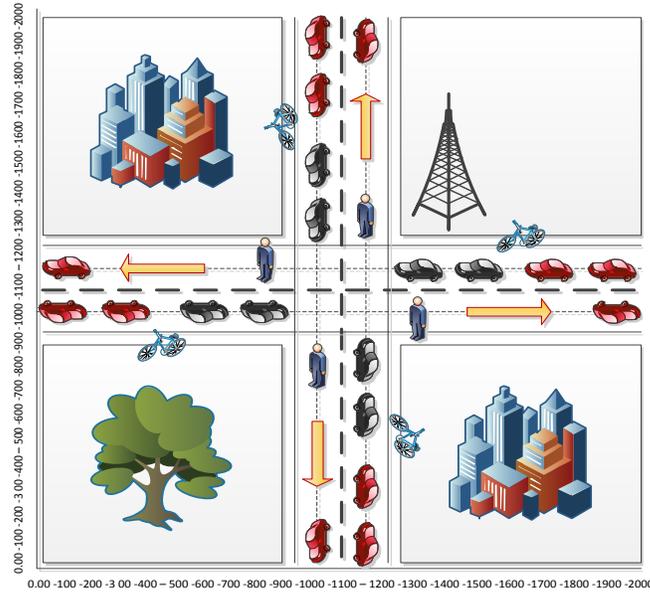


Figure 7.6: Traffic view and mobility pattern

7.5 Simulations Results

Simulations are conducted in two main parts based on the aforementioned scenarios, namely P2V and P2I+I2V. An implementation of IEEE 802.11p offering priority service in a similar way to EDCF access scheme over NS-2 was used. For each scenario two cases were studied; case 1) using the CCH exclusively or, case 2) announcing the service in the CCH and nodes have to switch to the SCH (for example, the dedicated channels 172 or 184) to join the PCA application. We implemented two priority schemes corresponding to the highest (HP) and lowest (LP) access scheme (AC0 and AC3). Two traffic flows, equally proportional, were tested in each case to emphasis the priority impact on communication performance. It is worth noting that multi hop data delivery was implicitly supported in all simulations and that traffic load is always added in the consulting channel, i.e. respectively in CCH (SCH) for case 1 (case 2). We evaluated two major performance metrics, namely End- To-End (E2E) delay and Packet Reception Rate (PRR). These metrics are of utmost importance as both high transmission reliability and low delay transmissions are critical for ensuring the PCA system will be able to operate in a timely manner to potentially save lives.

In the simulations, we considered an intersection similar to the one illustrated in Fig. 7.6 where 20 vehicles, 4 pedestrians and 4 two-wheels are sharing a 2Km by 2Km road infrastructure area.

All vehicles try to navigate the intersection. Two lines are available in each road in the same direction, to allow lane changing and gears shifting. Vehicles in black color, being closer to the intersection are travelling at a maximum speed of 30 Km/h, where the red ones run at speed up to 100 Km/h. Each pedestrian is walking at a maximum speed of 5 Km/h, and wants to attain the opposite side by crossing two roads. The cyclists ride at a maximum speed of 25 Km/h on the side of the road in the same direction as the vehicles. In order to assess the performances of the system in different communication situations, we used, throughout simulations, the communication density metric defined by Jiang et al. [Jiang, 2007] as a combination of; messaging frequency (Mf), Vehicles density (Vd) and Communication Range (Cr).

$$CD = Mf(Hz) * Vd(Veh/KmRoad) * Cr(m) \quad (7.1)$$

Simulations parameters are summarized in the table 7.1 below:

Table 7.1: Simulation parameters

Transmission range	300m, 500m and maximum range
Vehicle Density	Up to 28 nodes on 1000m of road
Data rate	6Mbps [Jiang, 2008b]
Messaging frequency	10 Msg/s, 20 Msg/s and 25Msg/s
Packet size	200 bytes
Propagation model	Two ray ground with 3.5 path-loss exponent
Power limit	CCH: 44.8dBm/SCH: 33bBm
Access Scheme	E-Distributed Coordination Function (EDCF)

7.5.1 P2V case simulations results

PCA performance in terms of E2E delay was studied based on the EDCF implemented over 802.11p. Fig. 7.7 shows the effect of increasing the CD in scenarios 1 and 2. In light load condition, E2E delay does not exceed 25ms. In medium and high load conditions, E2E delay increases more rapidly when SCH is used than with CCH. In both cases, using the HP offers a better E2E delay. It is worth noting that using CCH with LP gives better results in terms of delay than using SCH with HP. This confirms the fact that the use of CCH is better suited for delay sensitive applications compared to SCH.

The second performance metric assessed was PRR. PRR is defined as the ratio between successfully received packets and the total emitted packets. PRR is generally affected negatively by the emitter-receiver distance, network load and interferences. As shown in Fig.7.8, on the one hand, PRR decreases when CD increases. This is due to collisions rising when the network is close to its saturation. In low load conditions, PRR is kept over 75%. On the other hand, using CCH allows maintaining an acceptable PRR with HP traffic. Even if using HP over SCH gives a slight advantage in term of PRR comparatively to using CCH with LP in low communication densities, with medium and high CD values, PRR decreases more sharply with SCH down to 20%.

Results noted in in Fig.7.7 and Fig.7.8, are mainly due to two reasons: a) the switching mechanism introduced by IEEE1609.4; in the SCH case, the transmission time is less than that available in the CCH case. Indeed the time is cut on CCH intervals and SCH intervals minus a guard time for synchronization purpose. Overall PCA traffic has to wait longer to be successfully transmitted and received leading to a higher E2E delay b) Transmission power difference: SCH provides a lower range which means less packets are received affecting directly the PRR.

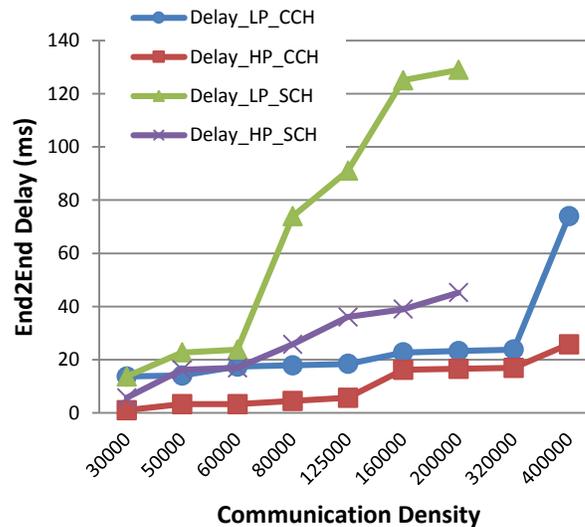


Figure 7.7: Delay function of CD in CCH and SCH with Low Priority (LP) and High Priority (HP) in P2V case

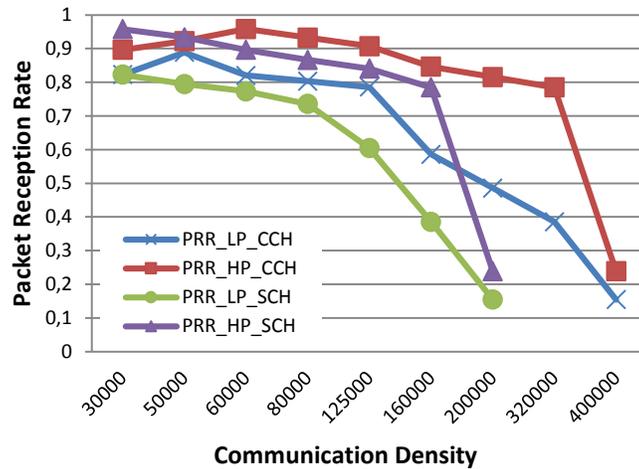


Figure 7.8: PRR function of CD in CCH and SCH with LP and HP in P2V case

7.5.2 P2I+I2V case simulations results

For the study of this case, an RSU is installed at the intersection level. Its main role is to operate as a mediator between non-DSRC equipped pedestrians and the vehicles OBUs. The RSU relays incoming messages from pedestrian units via Wi-Fi, to the OBUs over DSRC and vice-versa. As illustrated in Fig.7.9, the E2E delay is much greater than in the first scenario especially for low priority traffic. This is mainly due to the extra delay introduced by the Wi-Fi communication and the conversion of packet formats at the RSU level. Nevertheless, HP traffic (emergency) in the two cases of DSRC over CCH and SCH provides lower delays less than 60ms, respecting the maximum latency required by safety-related applications. However, the E2E delay of LP traffic (beaconing) exceeds 100ms for both SCH and CCH use.

In the same manner as in the first scenario, the PRR diminishes as the CD rises. As illustrated in Fig.7.10, the maximum achievable PRR for LP traffic in both channels does not exceed 60% even for low traffic. On the contrary, HP traffic offers acceptable PRR superior to 70% in low and medium densities up to 100k CD. In highly dense environment, 40% of packets are successfully received for CD up to 160k.

The two major reasons for performance difference between CCH and SCH cases in the P2I scenario remain valid here. Furthermore, the RSU becomes a bottleneck for traffic. At the RSU, the channel distinction is annealed and only the prioritybased distinction is maintained with the conversion between 802.11p (channel and priority distinction) and Wi-Fi (priority distinction). This is why priority has a higher impact on messages dissemination than in the P2V scenario.

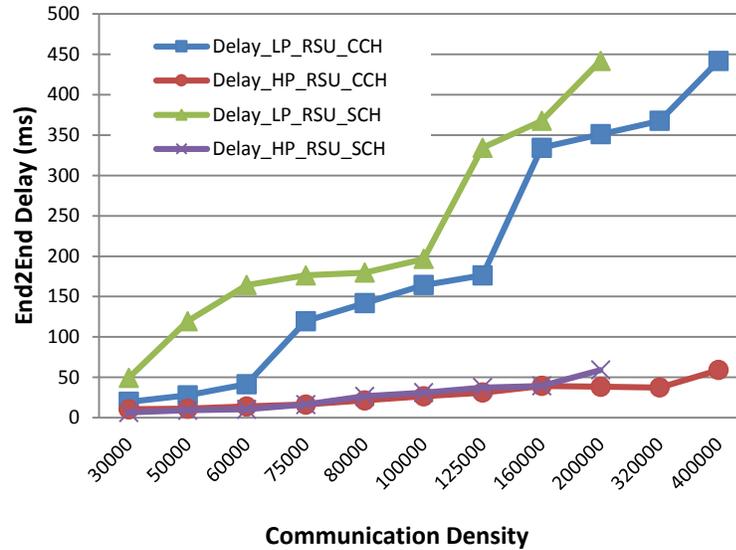


Figure 7.9: Delay function of CD in CCH and SCH with LP and HP in P2I+I2V case

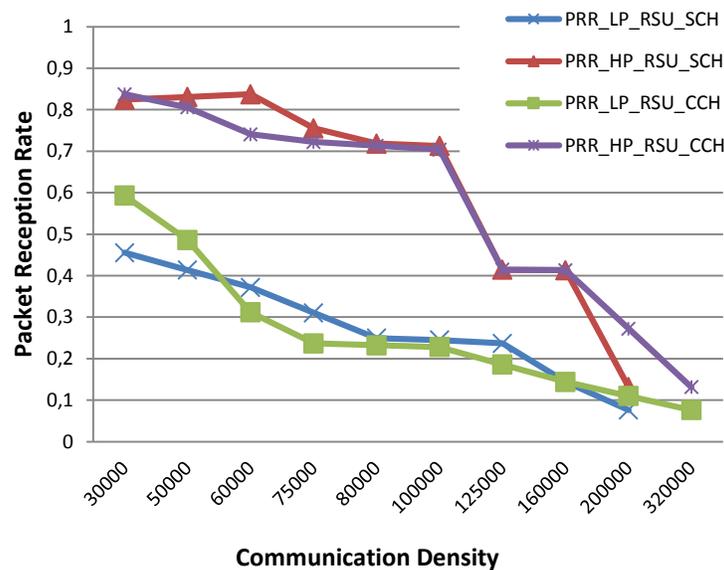


Figure 7.10: PRR function of CD in CCH and SCH with LP and HP in P2I+I2V case

7.6 Conclusion

In this paper we investigated the performance of a communication scheme for a pedestrian/two wheel collision avoidance system at road intersections. We investigated two possible cases. First the cases where pedestrians/two-wheels are equipped with WAVE/DSRC capabilities to directly communicate their position to vehicles. Second, the case where pedestrian/two wheels are using

Wi-Fi to communicate with road side units, and then the latter relay the information to vehicle on-board units by using WAVE/DSRC. Different saturation conditions were examined while using either a high priority or a low priority to send messages over WAVE/DSRC. The results show first, that given a chosen message priority, using CCH for communicating position information over WAVE/DSRC gives an advantage in terms of end-to-end delay and probability of reception, especially at high communication densities in both scenarios. However, using high priority influences also the overall system performance, and especially so in the second case. In fact, in the second scenario, the end to-end delay and the probability of reception became unacceptable when using low messages priority.

Acknowledgement

The authors would like to thank the National Science and Engineering Research Council (NSERC) of Canada for supporting this work.

CHAPITRE 8 CONCLUSIONS

Ce projet de recherche a porté sur les techniques de localisation dans les réseaux de communication sans-fil. Une méthode géométrique de localisation basée sur la compensation entre les puissances de signaux reçus a été premièrement proposée pour réduire les nombres des inconnus et améliorer la précision de localisation. La technique R2S2 utilisée est générique et appropriée pour la localisation avec différentes technologies sans-fil et différents modèles de propagation des ondes radio à condition d'utiliser les antennes omnidirectionnelles. Le principe de base consiste à utiliser la métrique du ratio des puissances reçus en référence à une paire de stations de base simultanément pour situer un nœud mobile dans une zone de détection. Les simulations ont démontré que cette technique permet d'améliorer la précision de la localisation de l'ordre de 20% par rapport à la méthode de trilatération conventionnelle basée sur RSS, dans des conditions de propagation en ligne de vue. La performance de la méthode a été validée lorsque; i) la puissance d'émission effective est inconnue, ii) l'indice de propagation du milieu varie au cours du temps, iii) il y'a une incertitude sur les paramètres utilisés dans les modèles de propagation tels que les hauteurs des antennes et les variations des puissances d'émission.

Une deuxième méthode de localisation de type analyse de situation a été ensuite proposée pour confirmer l'intérêt d'utiliser les métriques ternaires (R2S2 ou TDOA) versus les métriques binaires (RSS ou TOA) entant que signatures radio. En se référant à une carte radio tridimensionnelle créée dans la phase hors ligne, la deuxième méthode propose d'utiliser la technique d'acquisition comprimée entant algorithme de jumelage dans la phase de localisation en ligne pour retrouver la position des cibles mobiles. La démarche à suivre pour formuler le processus de localisation sous forme d'un problème de minimisation selon l'approche de l'acquisition comprimée tout en travaillant avec des structures de données tridimensionnelles a été d'abord présentée. Ensuite, la performance de cette méthode a été validée avec succès pour la localisation des nœuds mobiles dans des environnements de localisation deux dimensionnels et tri dimensionnels avec des conditions de propagation en de ligne de vue et non ligne de vue. En plus, des expériences ont été réalisées dans un bâtiment multi-étages pour localiser des

nœuds en utilisant l'infrastructure du réseau Wi-Fi existante et la nouvelle métrique (R2S2) comme signature radio. L'évaluation de la performance a été étudiée en fonction des principaux paramètres tels que le niveau de variations dans le medium de propagation, le nombre de points d'accès et l'espacement entre les points d'observations. La performance de la méthode proposée a été principalement comparée à une méthode qui utilise la métrique binaire (RSS) et la technique d'acquisition comprimée deux dimensionnelle tant que signature radio et algorithme de jumelage respectivement. Les résultats ont montré la performance supérieure de la méthode proposée face aux variations du medium de propagations dans les environnements dynamiques et ce avec différents degrés de complétude de la carte radio et différents nombres de mesures pris en temps réel, confirmant par la même occasion l'utilité de la technique de 3D-CS proposée. Toutefois, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour réduire au minimum le temps de calcul requis par la technique 3D-CS afin de localiser les cibles mobiles avec plus de précision. En effet, la technique de localisation 3D-CS nécessite plus de temps de calcul que la technique 2D-CS. Le temps additionnel est principalement consommé par les méthodes de décompositions tensorielles. Pour pallier cette limitation, la parallélisation de ces méthodes semble être une stratégie prometteuse. Justement, l'investigation des différentes méthodes de décomposition parallèles récemment proposées et l'évaluation de leur performance en terme de temps de calcul est une piste à explorer.

Les détails des méthodes et des systèmes de radiolocalisation proposés ainsi que leurs performances ont été publiés dans des articles scientifiques pour contribuer aux recherches dans le domaine de localisation basés sur les technologies sans-fil dans les milieux confinés et urbains.

Le travail comprend également une étude quantitative de différentes architectures et standards de communication sans-fil dans le cadre d'une application de sécurité des piétons au niveau des intersections routières. Le but de l'étude est d'évaluer les contraintes réelles pour une application basée sur les positions des nœuds mobiles dans un environnement urbain. Dans ce cadre, l'étude s'intéresse au standard de communication le plus approprié pour la transmission des informations des positions dans ce type application qui relève de l'intérêt des systèmes de transports intelligents et du domaine de communication dans les réseaux ad hoc véhiculaires. Les résultats de cette étude ont confirmé l'intérêt d'utiliser le canal de contrôle pour obtenir les meilleures performances en termes du délai de bout en bout et du taux de réception de messages,

avec différents niveaux de densité, dans le cas des applications de sécurité. L'étude a également montré l'avantage d'équiper les piétons avec des dispositifs radio leur permettant de communiquer directement dans le VANET selon une architecture Piéton-Véhicule plus avantageuse que celle basée sur une unité de l'infrastructure pour faire le relai entre deux technologies sans-fil différentes.

LISTE DES RÉFÉRENCES

(Abhayawardhana, 2005) V.S. Abhayawardhana, I.J. Wassell, D. Crosby, M.P. Sellars and M.G. Brown, “Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems,” Vehicular Technology Conference, 2005 IEEE 61st 30 May-1 June 2005, V-1; 73 – 77.

(Abid, 2010a) M.A. Abid and S. Cherkaoui, “Received Signal Compensation-Based Position Estimation of Outdoor RFID Nodes,” in Proc. GLOBECOM, 2010, pp.1-5.

(Abid, 2010b) M.A. Abid, “Système de localisation en temps réel basé sur la communication sans fil pour la sécurité routière,” Définition du projet de recherche de doctorat, Université de Sherbrooke, Département de génie électrique et de génie informatique, Sherbrooke, Canada, 64 p.

(Abid, 2011) M.A. Abid, S. Cherkaoui, “Wireless Technology Agnostic Real-Time Localization in Urban Areas,” The 4th IEEE LCN International Workshop on Wireless and Internet Services, WISe 2011.

(Abid, 2012) M.A. Abid and S. Cherkaoui, “3D compressive sensing for nodes localization in WNs based on RSS,” in Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on , vol., no., pp.5195-5199, 10-15 June 2012.

(Abid, 2013) M.A. Abid, O. Chakroun and S. Cherkaoui, “Pedestrian collision avoidance in vehicular networks,” in Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on , vol., no., pp.2928-2932, 9-13 June 2013.

(Abid, 2015) M.A. Abid and S. Cherkaoui, “Three dimensional compressed sensing for wireless networks-based multiple node localization in multi-floor buildings,” Wireless Communications and Mobile Computing, 9 DEC 2015, (online).

(Ahmad, 2008) U. Ahmad, B.J. Dauriol, Y.K. LEE, S. LE, “Multi-Floor Semantically Meaningful Localization Using IEEE 802.11 Network Beacons,” IEICE transactions on communications 2008; 3450-3460.

(Arnold, 2011) L.L. Arnold, P.A. Zandbergen, “Positional accuracy of the wide area augmentation system in consumer-grade GPS units,” Computers & Geosciences 2011: 37.7: 883-892.

(ASTM, 2002) ASTM E2213, “Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange between Roadside and Vehicle Systems — 5GHz Band Dedicated Short

Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” 2002.

(Auto21, 2010) Auto21 (L'innovation par l'excellence en recherche. Dans (page consultée le September 2010).

(Athanasiadou, 2000) G.E. Athanasiadou, A.R. Nix, and J.P. McGeehan, “A microcellular ray-tracing propagation model and evaluation of its narrow-band and wide-band predictions,” *IEEE J. Select Areas Commun.*, vol. 18, pp. 322–335, Mar. 2000.

(Aybat, 2012) N. S. Aybat and G. Iyengar, “A First-Order Augmented Lagrangian Method for Compressed Sensing,” *SIAM Journal on Optimization*, 2012, 22:2, 429-459.

(Bahl, 2000) P. Bahl, et V. Padmanabhan, “RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system,” *IEEE infocom*, volume 2. Citeseer, p. 775-784, 2000.

(Bailey, 2006) T. Bailey, H. Durrant-Whyte, “Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II,” *Robotics & Automation Magazine*, IEEE 2006; Vol.13: Issue 3: DOI: 10.1109/MRA.2006.1678144.

(Baraniuk, 2007) R.G. Baraniuk, “Compressive sensing,” *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 24, no. 4, pp. 118–120, Jul. 2007, 124.

(Barbeau, 2006) M. Barbeau and J.M. Robert, “Rogue-base station detection in WiMax/802.16 wireless access networks,” *Annals of Telecom-munications*, vol. 61, no. 11–12, pp. 1300–1313, November–December 2006.

(Bbc, 2010) News Technology, Over 5 billion mobile phone connections worldwide, <http://www.bbc.co.uk/news/10569081>, July 2010.

(Beucher, 2011) P.J. Beucher. Asset localization identification and movement system and method. U.S. Patent 2011; 7 957 833 B2.

(Bilgin, 2008) A. Bilgin, T. Trouard, M. Altbach, and N. Raghunand, “Three dimensional compressed sensing for dynamic MRI,” in *Proceedings of the 16th ISMRM Scientific Meeting & Exhibition*, p. 337, Ontario, Canda, May 2008. (Bouet, 2008) M. Bouet, A.L. Dos Santos, “RFID tags: Positioning principles and localization techniques,” *Wireless Days 2008*; WD 08: 1st IFIP: 1-5.

(Boyd, 2004) S. Boyd and L. Vandenberghe, “Convex Optimization,” Cambridge University Press, 2004, <http://stanford.edu/~boyd/cvxbook>.

(Bulusu, 2000) N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, “GPS-Less Low-Cost Outdoor Localization for Very Small Devices,” *IEEE Personal Communications*, Vol. 7, No. 5, October 2000, pp. 28-34.

(CALM 2010) CALM Project (Communication Architecture for Land Mobile. Dans CALM Continuous Communications for Vehicles. <http://www.isotc204wg16.org/concept> (page consultée en Octobre 2010).

(Candès, 2005) E. J. Candes and T. Tao, “Decoding by linear programming, ” in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 51, no. 12, pp. 4203-4215, Dec. 2005. doi: 10.1109/TIT.2005.858979.

(Candès, 2006) E.J. Candès and T. Tao, “Near optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies,” IEEE Trans. On Information Theory, vol. 52, no. 12, pp. 5406–5425, 2006.

(Castellanos, 2000) J.A. Castellanos, J.D. Tardos. Mobile robot localization and map building: A multisensor fusion approach. Kluwer academic publishers 2000.

(Chen, 1999) S. Chen, D.L. Donoho, and M. A. Saunders, “Atomic decomposition by basis pursuit,” SIAM J. Sci Comp., vol. 20, no. 1, pp.33 - 61, 1999.

(Chen, 2009) S.L. Chen, K.H. Lin, and R. Mittra, “Miniature and near-3D omnidirectional radiation pattern RFID tag antenna design,” Electronic Letters Volume 45, Issue 18, p.923–924, 2009.

(Cheng, 2012) L. Cheng, C. Wu, Y. Zhang, H. Wu, M. Li, and C. Maple, “A Survey of Localization in Wireless Sensor Network,” International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2012, Article ID 962523, 12 pages, 2012.

(Choi, 2009) J.S. Choi, H. Lee, R. Elmasri, D.W. Engels, “Localization systems using passive UHF RFID,” Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC, 2009, pp.1727-1732.

(Coco, 2004) S. Coco, A. Laudani, L. Mazzurco, “A novel ray tracing procedure for the localization of EM field sources in urban environment,” IEEE Trans. Mag. 2004; vol. 40: no. 2:1132–1135.

(Cramer, 2002) R.J.M. Cramer, R.A. Scholtz et M.Z. Win, “Evaluation of an ultra-wide-band propagation channel,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, volume 50, numéro 5, p. 561-570, 2002.

(DART, 2007) DART, S. Sapphire DART (RTLS). Product Data Sheet, Multispectral Solutions Inc., Germantown, MD, 2007.

(DoD, 2008) Departement of Defence. Global positioning system standard positioning service performance standard. Assistant secretary of defense for command, control, communications and intelligence, 4 th. Edition, 2008.

(DoESA, 2014) Departement of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects The 2014 Revision Hoghlights. United Nation 2014: ISBN 978-92-1-15157-6

(Donoho, 2006) D.L. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.52, no. 4, pp. 1289–1306, Sep. 2006.

(Ekahau, 2015) Ekahau (2015). Real-time localization system. <http://www.ekahau.com/real-time-location-system/technology> (page consulté en novembre 2015).

(Elad, 2010) M. Elad, "The Dantzig-Selector Algorithm," *Sparse and Redundant Representations*, 2010, Part 1, 153-166.

(Esteves, 2003) J.S. Esteves, A. Carvalho et C. Couto, "Generalized geometric triangulation algorithm for mobile robot absolute self-localization," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2003. ISIE'03p. 346-351.

(EU, 2010) EU, Car 2 Car Communication Consortuim. Dans <http://www.car-2-car.org/> (page consultée en Mars 2010).

(Feng, 2009) C. Feng, S. Valaee, Z.H. Tan, "Multiple target localization using compressive sensing," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2009*; 1-6.

(Feng, 2010) C. Feng, W.S.A. Au, S. Valaee, and Z. Tan, "Compressive Sensing Based Positioning Using RSS of WLAN Access Points," in *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, March 2010, pp. 1–9.

(Feng, 2012) C. Feng, W.S.A. Au, S.Valaee, Z. Tan, "Received-Signal-Strength-Based Indoor Positioning Using Compressive Sensing," in *IEEE Trans. On Mobile Computing 2012*; Vol. 11, No. 12: 1983-1993.

(Ferro, 2005) E. Ferro, et F. Potorti, "Bluetooth And Wi-Fi Wireless Protocols: A Survey And A Comparison," *IEEE Wireless Communications*, p. 13, 2005.

(Festag, 2008) A. Festag, G. Noecker, M. Strassberger, A. Lübke, B. Bochow, M. Torrent-Moreno, S. Schnauffer, R. Eigner, C. Catrinescu, J. Kunisch, "NoW - Network on Wheels: Project Objectives, Technology and Achievements," in *proceedings of 6th International Workshop on Intelligent Transportation*, Hamburg, Germany, March 2008.

(Friis, 1946) H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," in *Proceedings of the I.R.E.*, vol. 34, no. 5, May 1946, pp. 254–256.

(Gill, 2011) P. R. Gill, A. Wang and A. Molnar, "The In-Crowd Algorithm for Fast Basis Pursuit Denoising," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 10, pp. 4595-4605, Oct. 2011, doi: 10.1109/TSP.2011.2161292.

(Green, 2002) D.B. Green, A.S. Obaidat, "An accurate line of sight propagation performance model for ad-hoc 802.11 wireless LAN (WLAN) devices," in *Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on*, vol.5, no., pp.3424-3428 vol.5, 2002

(Hahnel, 2003) D. Hahnel, W. Burgard, D. Fox, K. Fishkin, and M. Philipose, "Mapping and localization with RFID technology," Intel Research Institute, Seattle, WA, Tech. Rep. IRS-TR-03-014, December 2003.

(Hartenstein, 2010) H. Hartenstein and K.P. Laberteaux, "Vanet, Vehicular applications and inter networking technologies," John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK., 2010.

(Harter, 2002) A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward et P. Webster, "The anatomy of a context-aware application," *Wireless Networks*, volume 8, numéro 2, p. 187-197, 2002.

(Hata, 1981) M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-29, pp. 317–325, September 1981.

(He, 2003) T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher, "Range-free localization schemes for large scale sensor networks," in *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, September 2003, pp. 81–95.

(Hegarty, 2008) C.J. Hegarty, E. Chatre, "Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS)," *Proceedings of the IEEE 2008*; vol.96: no.12: 1902-1917.

(Hightower, 2000) J. Hightower, R. Want, G. Borriello, "SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength," University of Washington, Tech. Rep. UW CSE, 2000.

(Hightower, 2001) J. Hightower and G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing," *IEEE Computer*, vol. 34, no. 8, pp. 57-66, Aug. 2001.

(IEEE Std, 2006a) IEEE P1609.4, "Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Multi-Channel Operation," 2006.

(IEEE Std, 2006b) IEEE P1609.2, "Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Security Services for Applications and Management Messages," 2006.

(IEEE Std, 2006c) IEEE P1609.1, "Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Resource Manager," 2006.

(IEEE Std, 2007a) IEEE P802.11p/D3.0, "Draft Amendment to Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications-Amendment 7: Wireless Access in Vehicular Environment," 2007.

(IEEE Std, 2007b) IEEE Std P1609.3, "IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)-Networking Services," 2007.

(IEEE, 2010) IEEE Society (2010). IEEE advancing Technologie for Humanity. Dans The world's largest professional association for the advancement of technologie. <http://www.ieee.org/> (page consultée le Novembre 2010).

(IETF, 2010) IETF (2010), The Internet Engineering Task Force. Dans <http://www.ietf.org/> (page consultée en Mars 2010).

(ISO, 2014) Intelligent Transport Systems - Communications access for land mobiles (CALM) - IPv6 networking. ISO 21217:2014.

(Janaswamy, 2005) R. Janaswamy, "Path loss predictions in the presence of buildings on flat terrain: A 3-D vector parabolic equation approach," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, August 2003.

(Jiang, 2006) D. Jiang, V. Taliwal, A. Meier, W. Holfelder et R. Herrtwich, "Design of 5.9 GHz DSRC-based vehicular safety communication," Wireless Communications, IEEE, volume 13, numéro 5, p. 36-43, 2006.

(Jiang, 2007) D. Jiang and C. Qi and L. Delgrossi, "Communication Density: A Channel Load Metric for Vehicular Communications Research," IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, MASS, 2007.

(Jiang, 2008a) D. Jiang et L. Delgrossi, "IEEE 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments," in Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE. IEEE, p. 2036-2040.

(Jiang, 2008b) D. Jiang, C. Qi and L. Delgross, "Optimal data rate selection for vehicle safety communications," Proceedings of the fifth ACM international workshop on Vehicular InterNetworking VANET 08, 2008.

(Jin, 2006) G. Jin, X.Y Lu, M.S. Park, "An indoor localization mechanism using active RFID tag," Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2006. IEEE International Conference on Volume 1, 5-7 June 2006.

(Joel, 2007) J.A. Tropp, and A.C. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," IEEE Transactions On Information Theory 2007, Vol. 53, No. 12.

(Kaemarungsi, 2004) K. Kaemarungsi et P. Krishnamurthy, "Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting," in INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, volume 2, 2004.

(Kim, 2011) D. Kim, J. Trzasko, M. Smelyanskiy, C. Haider, D. Dubey, A. Manduca, "High-Performance 3D Compressive Sensing MRI Reconstruction Using Many-Core Architectures," International Journal of Biomedical Imaging 2011.

(Kolda, 2009) T.G. Kolda, B.W. Bader, "Tensor decompositions and applications," *SIAM Rev.* 51, pp. 455–500, 2009.

(Kong, 2009) S.H. Kong, "TOA and AOD statistics for down link Gaussian scatterer distribution model," *Wireless Communications, IEEE Transactions on* Volume 8-5, May 2009, 2609 – 2617.

(Kruskal, 1989) J.B. Kruskal, "Rank, decomposition, and uniqueness for 3-way and N-way arrays," *Multiway Data Analysis*, North-Holland, Amsterdam, 1989, pp. 7–18.

(Kummerle, 2009) R. Kummerle, B. Steder, C. Dornhege, M. Ruhnke, G. Grisetti, C. Stachniss, A. Kleiner, "On measuring the accuracy of SLAM algorithms," *Autonomous Robots 2009*; Vol. 27, No. 4: 387-407

(Laurendeau, 2008a) C. Laurendeau and M. Barbeau, "Hyperbolic location estimation of malicious nodes in mobile WiFi/802.11 networks," in the *Proceedings of the 2nd IEEE LCN Workshop On User MObility and Vehicular Networks (ON-MOVE)*, October 2008.

(Laurendeau, 2008b) C. Laurendeau and M. Barbeau, "Rogue Attribution Using Relative Signal Strength Based Location Estimation," *Carleton University, Technical Report TR-08-01*, January 2008.

(Liu, 2004) C. Liu, K. Wu, and T. He, "Sensor localization with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*, October 2004, pp. 516–518.

(Liu, 2006a) X. Liu, M. Corner, P. Shenoy, "Ferret: RFID Localization for pervasive multimedia," *UbiComp 2006: Ubiquitous Computing (2006)*, pp. 422-440.

(Liu, 2006b) B.C. Liu, K.H. Lin, and J.C. Wu, "Analysis of hyperbolic and circular positioning algorithms using stationary signal-strength-difference measurements in wireless communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 2, pp. 499–509, March 2006.

(Liu, 2007) H. Liu, H. Darabi, P. Benrjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev.*, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, Nov. 2007.

(Lott, 2001) M. Lott and I. Forkel, "A multi-wall-and-floor model for indoor radio propagation," *Vehicular Technology Conference VTC Spring. IEEE VTS 53rd 2001*; vol.1: 464-468.

(Lu, 2006) M. Lu, W. Chen, X. Shen, H. Lam, J. Liu, "Positioning and tracking construction vehicles in highly dense urban areas and building construction sites," *Journal of Automation in Construction*, 2006.

(Lu, 2010) W. Lu, N. Vaswani N. Modified BPDN for noisy compressive sensing with partially known support. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Process. (ICASSP) 2010*; 3926-3929.

- (Luft, 2002) L.A. Luft, L. Anderson, F. Cassidy, "NMEA 2000 A Digital Interface of 21st century," Institute of Navigation's 2002 National Technical Meeting, San Diego, CA, January 30 2002.
- (Lustig, 2007) M. Lustig, D. Donoho, and J. Pauly, Sparse MRI: The Application of Compressed Sensing for Rapid MR Imaging 2007 [Online]. Available: <http://www.stanford.edu/~mlustig/SparseMRI.pdf>
- (Maeda, 2005) K. Maeda et al., "Getting urban pedestrian flow from simple observation: realistic mobility generation in wireless network simulation," In Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM '05). ACM, New York, NY, USA, 151-158.
- (Mallat, 1993) S. Mallat and Z. Zhang, "Matching Pursuit in a time-frequency dictionary," IEEE Transactions on Signal Processing, 41, 1993, p. 3397-3415.
- (Maroti, 2005) M. Maroti et al. "Radio interferometric geolocation," In Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems ACM 2005; 1-12.
- (Meng, 2009) J. Meng, H. Li, and Z. Han, "Sparse event detection in wireless sensor networks using compressive sensing," The 43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), 2009.
- (Mirowski, 2011) P. Mirowski, H. Steck, P. Whiting, R. Palaniappan, M. MacDonald and T. K. Ho, "KL-divergence kernel regression for non-Gaussian fingerprint based localization," Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011 International Conference on, Guimaraes, 2011, pp.1-10. doi: 10.1109/IPIN.2011.6071928.
- (Moreno, 2004) M. Torrent-Moreno, D. Jiang, and H. Hartenstein, "Broadcast Reception Rates and Effects of Priority Access in 802.11-based Vehicular Ad-Hoc Networks," 1st ACM Wksp. Vehic. Ad-hoc Networks, 2004.
- (Mostofi, 2009) Y. Mostofi and P. Sen, "Compressive cooperative sensing and mapping in mobile networks," in ACC'09 Proceedings of the 2009 conference on American Control Conference, 2009, pp. 3397-3404.
- (Motorola, 2010) White paper: "Montreal Transit Authority (AMT) relies on Motorola RFID," Last accessed March 25 2010. <http://www.motorola.com>.
- (Munoz, 2009) D. Munoz, F. Bouchereau, C. Vargas, and R. Enriquez-Caldera, Position Location Techniques and Applications. Academic Press, 2009.
- (Ni, 2004) L.M. Ni, Y. Liu, Y.C. Lau et A.P. Patil, "LANDMARC: indoor location sensing using active RFID," Wireless Networks, volume 10, numéro 6, p. 701-710, 2004.
- (Olson, 2000) C.F. Olson, "Probabilistic self-localization for mobile robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 16, numéro 1, p. 55-66, 2000.

(PATH, 2010) ITS Berkeley Institute of Transportation Studies (PATH. Dans California Partners for Advanced Transit and Highways. <http://www.path.berkeley.edu/> (page consultée en Mars 2010).

(Paul, 2008) A.S. Paul, E.A. Wan, “Wi-Fi based indoor localization and tracking using sigma-point Kalman filtering methods,” in Position, Location and Navigation Symposium IEEE/ION 2008; 646-659.

(Perera, 2004) E. Perera, V. Sivaraman, et A. Seneviratne, “Survey on network mobility support,” ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, volume 8, numéro 2, p. 7-19, 2004.

(Quer, 2009) G. Quer, “On the Interplay Between Routing and Signal Representation for Compressive Sensing in Wireless Sensor Networks,” in Information Theory and Applications Workshop (ITA 2009), San Diego, CA, US, Feb. 2009.

(Quinsac, 2010) C. Quinsac, A. Basarab, J.M. Gregoire, and D. Kouame, “3D compressed sensing ultrasound imaging,” in Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. (IUS), San Diego, U.S.A., Oct. 2010.

(Rappaport, 2002) T.S. Rappaport, “Wireless communications: principles and practice,” Second Edition 2002, Prentice Hall PTR.

(Rigatos 2012) G.G. Rigatos, “Nonlinear Kalman Filters and Particle Filters for Integrated Navigation of Unmanned Aerial Vehicles,” Robotics and Autonomous Systems, vol. 60, no.7, pp.978-995, July 2010.

(SAE, 2010) “SAE International, DSRC Implementation Guide. A guide to users of SAE J2735 message sets over DSRC,” Feb. 2010. Available at: <http://www.sae.org/standardsdev/dsrc/DSRCImplementationGuide.pdf>

(Sarkar, 2003) T. K. Sarkar, Z. Ji, K. Kim, A. Medour, and M. Salazar-Palma, “A survey of various propagation models for mobile communication,” IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 45, no. 3, pp. 51–82, Jun. 2003.

(Sastry, 2003) N. Sastry, U. Shankar, and D. Wagner, “Secure verification of location claims,” in Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Wireless Security (WiSe), September 2003, pp. 1–10.

(Schmidt, 1986) R. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” IEEE Transactions on Antenna Propagation 34 (2),276–280, 1986.

(Schmidt, 2005) M. Schmidt, “Least Squares Optimization with L1-Norm Regularization,” CS542B Project Report, 2005. https://www.cs.ubc.ca/.../2005_Notes_Lasso.pdf

(Schwarz, 2005) V. Schwarz, A. Huber, M. Tuchler, “Accuracy of a commercial UWB 3D location/tracking system and its impact on LT application scenarios,” in Ultra-Wideband, IEEE International Conference on 2005; 599-603.

(Shehata, 2008) M. S. Shehata, and all, "Video-based automatic incident detection for smart roads: The outdoor environmental challenges regarding false alarms," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 349-360, Jun. 2008.

(Shen, 2008) G. Shen, R. Zetik, and R. S. Thoma, "Performance comparison of TOA and TDoA based location estimation algorithms in los environment," in *Proc. WPNC*, 2008, pp. 71–78.

(Song, 2012) H. Song and G. Wang, "Sparse Signal Recovery via ECME Thresholding Pursuits," *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2012 (2012), 22 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2012/478931>.

(Stibor, 2007) L. Stibor, Y. Zangand, H.J. Reumermann, "Evaluation of communication distance of broadcast messages in a vehicular ad-hoc network using IEEE 802.11p," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, Hong Kong, China, Mar. 2007, pp. 254-257.

(Sun, 2005) G. Sun, J. Chen, W. Guo, and K.J.R. Liu, "Signal processing techniques in network-aided positioning," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 12–23, July 2005.

(Suzuki, 1977) H. Suzuki, "A statistical model for urban radio propagation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 25, pp. 673–680, July 1977.

(Tayebi, 2009) A. Tayebi, J. Gomez, F. Saez de Adana, and O. Gutierrez, "The application of ray-tracing to mobile localization using the direction of arrival and received signal strength in multipath indoor environments," *Progress In Electromagnetics Research* 2009; vol. 91: 1–15.

(TC, 2010) Transport Canada, Terms of Reference for ITS Strategic Planning, dans *Société des systèmes de transport intelligents du canada*, November 2010. <http://www.itscanada.ca/> (page consultée en Juin 2010).

(USDOT, 2010) United States Department of Transportation (IntelliDrive. Dans www.its.dot.gov/press/announcement/mobility_workshop.htm, IntelliDrive Safer Smarter Greener. (page consultée le Mars 2010).

(USDOT, 2010a) United States Department of Transportation, IntelliDrive Safer Smarter Greener. www.its.dot.gov/press/announcement/mobility_workshop.htm. (page consultée en Mars 2010).

(USDOT, 2010b) United States Departement of Transportation, RITA Intelligent Transportation Systems. www.its.dot.gov (page consultée en Mars 2010).

(Uzcategui, 2009) R. Uzcategui and G. Acosta-Marum, "Wave: A tutorial," *Communications Magazine, IEEE* , vol.47, no.5, pp.126-133, May 2009.

(Varshavsky, 2007) A. Varshavsky, et al., "The SkyLoc Floor Localization System," *Pervasive Computing and Communications PerCom Fifth Annual IEEE International Conference* 2007; 125-134.

(Want, 1992) R. Want, A. Hopper, V. Falcao, et J. Gibbons, "The active badge location system," ACM Transactions on Information Systems (TOIS), volume 10, numéro 1, p. 102, 1992.

(Woodman, 2008) O. Woodman, R. Harle, "Pedestrian localisation for indoor environments," In Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing ACM 2008; 114-123.

(Xian, 2014) Q. Xian, and W. Zhang, "Adaptive Localization Algorithm Based on Distributed Compressed Sensing in Wireless Sensor Networks," Journal of Networks 2014: Vol 9, No 7: 1900-1907.

(Yang, 2009) Z. Yang, Y. Liu, "Quality of trilateration: confidence-based iterative localization," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 29 May 2009.

(Zhou, 2009) J. Zhou, et J. Shi, "RFID localization algorithms and applications--a review," Journal of Intelligent Manufacturing, volume 20, numéro 6, p. 695, 2009.

