

Principes et Challenges de la Localisation par Bluetooth

Soufien Kammoun*, Jean-Baptiste Pothin**, Jean-Christophe Cousin*

* *Télécom ParisTech*, {soufien.kammoun, jean-christophe.cousin}@telecom-paristech.fr

** *DataHertz*, jean-baptiste.pothin@datahertz.fr

Mots-clefs : localisation en intérieur, Bluetooth, réseaux sans fils, état de l'art

Résumé

Bluetooth ne cesse de gagner en popularité ces dernières années. Cet engouement devrait encore s'accroître avec l'avènement de sa version 4, connue également sous les noms Bluetooth Low Energy et Bluetooth Smart. Cette communication propose un état de l'art des systèmes de localisation basée sur Bluetooth.

Introduction

La géolocalisation d'un bien ou d'une personne fait aujourd'hui partie de notre quotidien. Elle permet de guider des usagers, trouver rapidement certains services de proximité, assurer la surveillance, etc. Plusieurs solutions existent d'ores et déjà en extérieur, basées pour la majorité sur le système GPS. A l'intérieur d'un bâtiment (localisation dite *indoor*), la forte atténuation des signaux GPS, provenant directement des satellites, favorise le déploiement d'une infrastructure locale. Parmi les technologies couramment retenues, le standard Bluetooth offre plusieurs avantages. Bon marché, de faible complexité et peu gourmand en énergie, Bluetooth est également répandu sur une vaste gamme d'équipements, allant des claviers/souris aux téléphones portables, en passant par les montres et bientôt les t-shirts intelligents et autres "objets d'internet".

Cet article propose un état de l'art des systèmes de localisation par Bluetooth. La première section résume les caractéristiques du standard Bluetooth ainsi que les challenges liés à l'utilisation de cette technologie dans un contexte de localisation. La deuxième section présentera le principe de fonctionnement de plusieurs systèmes existants. Nous conclurons, section 3, par quelques résultats expérimentaux mettant en évidence des limites de la localisation par Bluetooth.

1 Principes de localisation par Bluetooth

Cette section présente les caractéristiques du standard Bluetooth ainsi que les signaux utilisés dans un contexte de localisation. Nous abordons ensuite les principaux challenges liés à cette technologie.

1.1 Caractéristiques de la technologie Bluetooth

La technologie Bluetooth, décrite dans le standard [1], fonctionne dans la bande ISM 2.4 GHz qui est utilisable mondialement sans licence. La technique d'étalement de spectre par évitement de fréquence (FHSS à 1600 sauts/s) immunisent les communications contre différents types d'interférences et améliore la coexistence avec d'autres signaux utilisant la même bande, comme WiFi ou ZigBee. La norme fixe également la puissance d'émission pour 3 classes de dispositifs ayant pour portée typique respective 100 m (classe 1), 10 m (classe 2) et 1 m (classe 3); la plupart des fabricants propose du matériel de classe 2.

On distingue deux situations pour pouvoir communiquer par Bluetooth, selon que les périphériques se connaissent ou non. La procédure *Inquiry* est utilisée pour découvrir les périphériques présents dans la zone de portée. La procédure *Page* permet quant à elle de se connecter à une cible dont l'adresse est connue.

1.2 Signaux mesurés

CID. L'identité d'une *cellule* Bluetooth, ou CID, est donné par l'identifiant (adresse MAC par exemple) d'un périphérique ou point d'accès Bluetooth. Introduit historiquement en GSM, le principe de localisation est d'utiliser une base de données qui associe les identifiants aux positions de cellules connues [2].

RSS. La mesure RSS (*Received Signal Strength*) représente la puissance reçue (en dBm). Les systèmes utilisant cette mesure exploitent en général le fait que la puissance d'un signal diminue avec la distance entre l'émetteur et le récepteur, comme peut le traduire le modèle *pathloss log-distance* [3].

RSSI. La mesure RSSI (*RSS Indicator*), en dB, est un entier signé sur 8 bits lié à la plage de puissance reçue idéale appelée GRPR (Golden Receive Power Range). Une valeur positive (resp. négative) signifie que le niveau de puissance reçue est au-dessus (resp. en-dessous) du GRPR. Un indicateur nul indique une puissance à l'intérieur du GRPR [4].

IRR. L'IRR (*Inquiry Response Rate*), mesurée par un point d'accès pour une cible Bluetooth spécifique, représente le nombre de réponses reçues sur le nombre total de procédures inquiry exécutées sur une période donnée. L'utilisation dans un contexte de localisation repose sur l'hypothèse que le taux d'échec est corrélé avec la distance, en raison d'un rapport signal-sur-bruit qui diminuerait lorsque la distance augmente [5].

1.3 Challenges

Voyons à présent plusieurs problématiques qui freinent le déploiement des solutions de localisation Bluetooth :

- **Procédures de recherche de périphériques.** La recherche d'un périphérique Bluetooth peut prendre en moyenne 10.24 secondes et plus dans des environnements bruités. Ce délai, qui croît avec le nombre de dispositif en cours de recherche [6], est inacceptable pour de nombreuses applications mobiles et/ou nécessitant des connexions courtes et rapides [7]. En outre, raccourcir ce délai augmente la probabilité de ne pas trouver un ou plusieurs périphériques [8].

- **Découvrabilité.** Pour des raisons de sécurité et/ou d'économie d'énergie, la plupart des dispositifs Bluetooth entre automatiquement dans un état non découvrable après un délai limité. Rendre le dispositif à nouveau découvrable requiert bien souvent une intervention humaine, ce qui limite fortement les possibilités de continuité du service de localisation [9].

- **Procédures d'établissement de connexion.** Pour pallier aux délais élevés de l'inquiry, une idée est d'utiliser en alternative la procédure page, plus rapide car orientée connexion directe en impliquant des périphériques qui se connaissent déjà. Toutefois, cette solution requiert une infrastructure plus lourde, car elle nécessite l'interconnexion des stations de bases pour la transmission des adresses Bluetooth. En outre, les contraintes de topologie (piconet) fixent à 7 maximum le nombre de connexions actives par maître, ce qui limite le nombre des cibles pouvant être suivies.

- **Protocole LMP.** L'asservissement de la puissance d'émission, formalisé par le protocole LMP du standard Bluetooth, altère la relation qui pourrait lier la puissance du signal reçu à la distance de l'émetteur, et limite donc la pertinence des méthodes de localisation basées sur cette propriété [10].

- **Portée des équipements.** Enfin et non des moindres, la faible portée des équipements les plus répandus nécessite un balisage dense de la zone à couvrir si l'on souhaite une bonne précision de localisation. Cet inconvénient engendre naturellement des coûts élevés d'achat, installation et maintenance du système.

2 Systèmes existants de localisation par Bluetooth

Cette section présente le principe de fonctionnement de systèmes de localisation existants basés sur Bluetooth. Nous commencerons par BLN [11], BluePass [12], BlueWhere [13], Zonith™ [14] puis Gimbal™ [15] ; tous basés sur la procédure inquiry. Nous verrons ensuite BIPS [16] qui exploite quant à lui la procédure page. Pour tous ces systèmes, l'information de localisation proposée prend la forme d'une *zone*.

2.1 BLN

Le système BLN (*Bluetooth Location Networks*) [11] est composé de badges mobiles et d'unités statiques - ou stations de base (BS) Bluetooth de classe 2. Les BS sont réparties physiquement dans le bâtiment selon un pavage hexagonal. D'un point de vue réseau, elles coexistent au sein de piconets multi-couches. Les maîtres sont connectés, par Ethernet ou WiFi par exemple, à un serveur central chargé de fournir le service de localisation. Les BS sondent leur voisinage en procédant à des recherches *inquiry* toutes les 30 secondes. En fin de scan, chaque BS transmet au serveur central via son maître l'adresse Bluetooth des badges détectés. Finalement, le serveur localise un badge dans la zone formée par l'intersection des zones de couvertures des BS ayant détecté le badge et de l'exclusion des zones de couverture des BS n'ayant pas détecté le badge.

2.2 BluePass

Dans le système BluePass (*BLUEtooth comPASS*) [12], des BS de classe 1 sont réparties dans l'environnement. Chaque BS est connectée à un ordinateur différent, appelé serveur local. Les BS alternent périodes de veille avec périodes de recherche *inquiry* au cours desquelles le RSS des utilisateurs mobiles voisins est acquis. Les serveurs locaux transmettent au serveur central les informations de RSS associées à l'adresse BD_ADDR des utilisateurs. Le serveur central estime la distance entre un utilisateur et une base en utilisant un modèle pathloss log-distance dont les paramètres ont été préalablement déterminés au cours d'une phase offline de collecte. L'estimation de position est obtenue par l'algorithme SCDM (*Signal Coverage Density Method*). Dans cet algorithme, l'environnement est décomposé sous la forme d'une matrice dont les cellules sont initialisées à 0. Contrairement à BLN, qui considère l'intersection des zones de couverture, SCDM considère des carrés de côté égale à deux fois les distances estimées et centrés sur les différentes stations de base associées. Pour des valeurs de distances estimées d inférieur à un seuil d_0 , toutes les cellules à l'intérieur du carré d'arête $2d$ sont incrémentées. Pour des valeurs $d > d_0$, seules les cellules dans l'intervalle $[d, 2d]$ sont incrémentées. Ainsi, l'intersection des différents carrés engendre des zones à densité élevée. L'utilisateur est localisé dans la pièce obtenant la densité la plus importante.

2.3 BlueWhere

BlueWhere [13] localise des éléments Bluetooth stationnaires avec une précision niveau pièce. Le système est basé sur le taux de réponse d'un dispositif aux requêtes inquiry, ou IRR (*Inquiry Response Rate*). Des points d'accès (AP) Bluetooth procèdent à la découverte des périphériques dans leur voisinage par inquiry. L'IRR d'une cible, mesuré par un AP spécifique, est défini comme le nombre de réponse reçues sur le nombre total d'inquiry. Les inquiry ont une durée fixe de 5.12 s, et sont répétés toutes les 10 s, pour une durée totale supérieure à 3 mn typique par cycle. Après obtention de l'IRR d'une cible, BlueWhere détermine la pièce par fingerprinting. Les empreintes sont les vecteurs ayant pour valeurs l'IRR mesurés par les différents AP. L'algorithme de matching est quant à lui basé sur une mesure d'entropie relative (fonction Kullback-Leibler et son extension à la pseudo-distance par la fonction Jensen-Shannon).

2.4 Zonith™

Le système Zonith™ [14], de Teldio, est constitué de stations de base Bluetooth reliées à un serveur central par Ethernet. Celles-ci procèdent à des recherche de périphériques avec un taux paramétrable. Pour améliorer la granularité du système, leur zone de couverture peut être ajustée par logiciel de 1 à 25 mètres environ. L'utilisateur est équipé d'un dispositif Bluetooth en mode découvrable, comme un tag ou un dongle. Sa position est estimée par celle de la dernière station de base ayant détecté le tag/dongle.

2.5 Gimbal™

Le système Gimbal™ [15], commercialisé par Qualcomm, utilise les stations de base iBeacon récemment développées par Apple. Ces balises, qui utilise Bluetooth 4.0, détectent la proximité d'un utilisateur équipé d'un iPhone. Le système permet par exemple de transmettre en temps réel des informations spécifiques (annonces, offres promotionnels, etc.) à un client selon sa position dans les galeries/rayons d'un centre commercial.

2.6 BIPS

BIPS (*Bluetooth Indoor Positioning System*) [16] a pour but de réduire les temps de latence dues à la procédure de découverte *inquiry*. L'infrastructure est composée d'AP fixes et inter-connectés à un serveur par un réseau dédié (LAN par exemple). Les AP suivent le déplacement des utilisateurs par procédure *page*. L'idée consiste à informer le serveur BIPS en cas de perte de connexion avec un utilisateur. Le serveur BIPS "diffuse" alors un message d'alarme aux AP à proximité qui entrent ensuite en phase *page* en tentant d'établir un lien avec l'utilisateur sur une durée W avec une période T_{rep} . La notion de proximité peut être implémentée de différentes façons. Il peut s'agir des AP les plus proches physiquement, des AP les plus visités, des AP sur une estimation de la trajectoire, etc. Lorsque l'utilisateur est "retrouvé" par un AP, il informe le serveur BIPS qui à son tour peut arrêter les tentatives de connexion des autres AP.

3 Etude expérimentale

Dans cette partie expérimentale, nous procédons à une collecte de mesures RSS et IRR à l'aide d'un smartphone Android et d'une application dédiée qui réalise des cycles inquiry. L'environnement de test est un couloir de 15 m de long et 2 m de large environ. Un périphérique Bluetooth en mode découvrable, de type lecteur RFID Bluetooth MS87D, est disposé au centre du couloir. La distance avec notre smartphone varie par pas de 50 cm de 50 cm à 10 m, correspondant à la limite de portée du MS87D. Pour chaque distance considérée, un nombre $N = 100$ de mesures est enregistré.

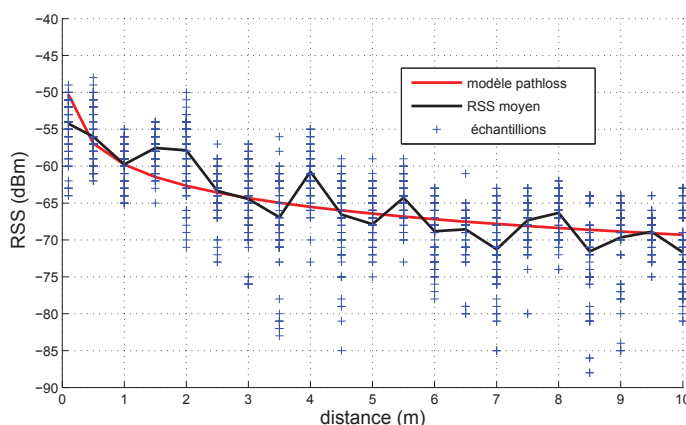


Figure 1 – Evolution du RSS Bluetooth en fonction de la distance

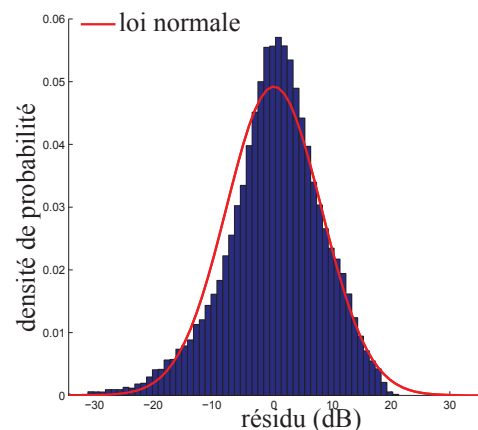


Figure 2 – Histogramme normalisé des résidus

3.1 Utilisation de la métrique RSS pour l'estimation de distance

La fig. 1 montre que les valeurs RSS suivent le modèle *pathloss log-distance* avec une certaine tendance sinusoïdale de la valeur moyenne due probablement aux trajets multiples. L'erreur de modélisation, obtenue en soustrayant la valeur du modèle aux différentes valeurs RSS, est habituellement considérée comme normale de moyenne nulle et d'écart type σ . La fig. 2 montre que les résidus suivent effectivement une distribution gaussienne; dans notre cas de paramètres $\mu = 7.9756e^{-13} \approx 0$ et $\sigma = 8.101$ dB. La plage de normalité au niveau de confiance 95% est de $\pm 2\sigma \approx \pm 16$ dB, soit une erreur engendrée en terme de distance supérieure à la portée (10 m) de la balise utilisée. En pratique, le nombre de mesures RSS Bluetooth disponibles à une position fixe étant très faible (quelques échantillons seulement), il vient que l'approche naïve Cell-ID donnera en général de meilleurs résultats qu'une approche plus sophistiquée utilisant la trilatération RSS.

3.2 Utilisation de la métrique IRR pour l'estimation de distance

La fig. 3 représente l'histogramme des délais de réponse pour une distance de 1 m. Les deux pics dominants, localisés entre 0.2-1 s et 2.8-3.6 s environ, s'expliquent par le déroulement de la procédure inquiry. On trouve également que la majorité des réponses est obtenue en moins de 6 secondes. La Table 1 permet de souligner l'absence de corrélation entre le délai moyen de réponse et la distance. Les valeurs min/max et écart type confirment cette indépendance. Ces observations suggèrent que des systèmes basés sur l'estimation de distance par temps de réponse, comme BlueWhere, sont peu pertinents.

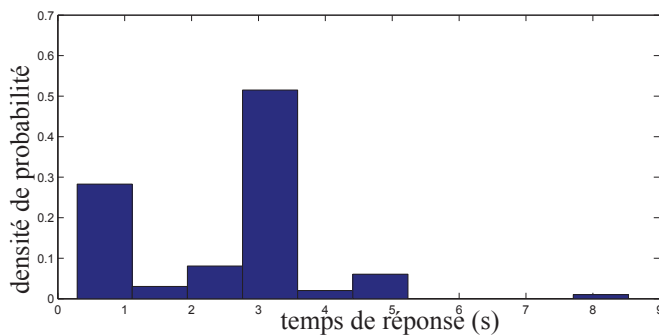


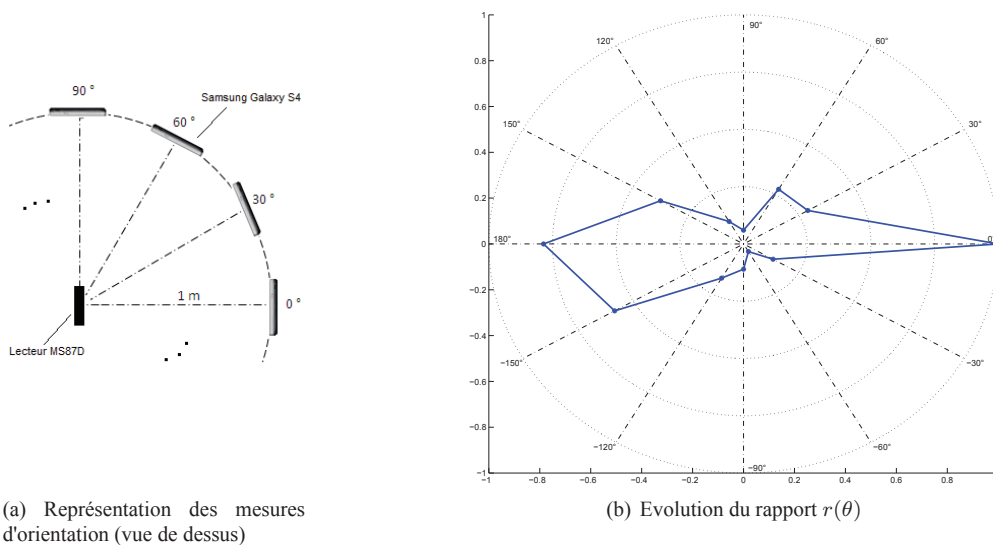
Figure 3 – Histogramme normalisé des temps de réponse inquiry

Distance (m)	Délai de réponse (s)			
	Moyen	Min.	Max.	Écart type
1	2.615	0.289	8.532	1.482
2	2.524	0.350	4.731	1.412
3	2.671	0.379	4.761	1.323
4	2.772	0.350	9.257	1.537
5	2.855	0.271	9.859	1.770
6	2.856	0.340	8.564	1.578
7	2.479	0.329	7.796	1.443
8	2.766	0.361	8.548	1.503
9	2.785	0.342	8.570	1.647
10	2.590	0.336	5.990	1.448

Table 1 – Statistiques relatives aux réponses inquiry

3.3 Influence de l'orientation sur les mesures RSS

Pour cette expérience, la balise est placée à une position fixe et le smartphone présenté "face avant" à une distance de 1 m. L'angle relatif entre les deux dispositifs varie de 0 à 330° par pas de 30°, comme illustré fig. 4a. Pour ces différentes valeurs d'angles, nous avons procédé à la normalisation des mesures RSS collectés selon la formule $r(\theta) = P(\theta) / \max_{\theta} P(\theta)$ où $P(\theta)$ représente la valeur moyenne RSS, convertie en Watt, pour l'orientation θ . On notera fig. 4b la présence d'un lobe principale pour 0°, des lobes secondaires ainsi qu'un rayonnement affaibli pour +/- 90°.



(a) Représentation des mesures d'orientation (vue de dessus)

(b) Evolution du rapport $r(\theta)$

Figure 4 – Effet de l'orientation des antennes émetteur/récepteur

Nom du système	Métrique	Type de communication
BIPS	CID	Page
BLN	CID	Inquiry
BluePass	RSS	Inquiry
BlueWhere	IRR	Inquiry
Gimbal™	CID	Inquiry
Zonith™	CID	Inquiry

Table 2 – Classification des systèmes de localisation par Bluetooth

Conclusions

La localisation par Bluetooth utilise principalement la notion de visibilité, c-à-d la capacité à détecter ou non la présence d'un périphérique Bluetooth dans une zone de couverture. L'inconvénient majeur des systèmes utilisant *inquiry* réside dans le taux de rafraîchissement faible dû à la lenteur de la procédure. Ceux utilisant *page* sont plus rapides, mais requiert une infrastructure lourde avec l'interconnexion des stations de bases Bluetooth pour la diffusion de l'adresse des mobiles. Dans la partie expérimentale, nous avons signalé la forte variation des mesures RSS Bluetooth ainsi que la faible pertinence du critère IRR appliqué à la localisation. Les erreurs d'estimation de distances obtenues par RSS sont de l'ordre de la zone de portée, ce qui explique en partie les faibles performances des techniques de multilatération dans le cas Bluetooth. Nous avons mis également en évidence l'importance de la position des antennes qui suggère, quant à elle, que des systèmes de localisation par fingerprinting ont tout intérêt à prendre en compte l'information d'orientation des dispositifs.

Références

- [1] Bluetooth SIG Bluetooth Specifications, Core Version 4.1. [Online]. Available : <https://www.bluetooth.org/en-us/specification/adopted-specifications>
- [2] E. Trevisani and A. Vitaletti, "Cell-ID location technique, limits and benefits : an experimentl study," *IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 51--60, 2004.
- [3] A. J. Motley and J. M. P. Keenan, "Personal communication radio coverage in buildings at 900MHZ and 1700MHZ," *Electronics Letters*, vol. 24, no. 12, pp. 763--764, 1988.
- [4] Bluetooth Specifications Version 1.0, Part A, Radio Specification. [Online]. Available : http://ece.wpi.edu/analog/resources/bluetooth_a.pdf
- [5] A. Franssens, "Impact of multiple inquirers on the Bluetooth discovery process and its application to localization," Ph.D. dissertation, University of Twente, July 2010.
- [6] B. S. Peterson, R. O. Baldwin, and R. A. Raines, "Bluetooth discovery time with multiple inquirers," in *Proceedings of the 39th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 2006, pp. 1--5.
- [7] T. Salonidis, P. Bhagwat, and L. Tassiulas, "Proximity Awareness and Fast Connection Establishment in Bluetooth," *Proceedings of the First Annual ACM Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 141--142, 2000.
- [8] J. Hallberg, M. Nilsson, and K. Synnes, "Positioning with Bluetooth," *IEEE International Conference on Telecommunication*, vol. 2, no. 2, pp. 954--958, 2003.
- [9] D. Huber, "Background Positioning for Mobile Devices - Android vs. iPhone," in *Joint Conference of IEEE Computer & Communication Societies*, 2009, p. 7.
- [10] L. Pei, R. Chen, J. Liu, H. Kuusniemi, T. Tenhunen, and Y. Chen, "Using Inquiry-based Bluetooth RSSI Probability Distributions for Indoor Positioning," *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 122--130, 2010.
- [11] F. J. Gonzalez-Castano and J. Garcia-Reinoso, "Survivable Bluetooth Location Networks," *IEEE International Conference on Communications (ICC'03)*, vol. 2, pp. 1014--1018, 2003.
- [12] J. J. M. Diaz, R. de A. Maues, R. B. Soares, E. F. Nakamura, and C. M. S. Figueiredo, "BluePass : an Indoor Bluetooth-based Localization System for Mobile Applications," in *Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2010, pp. 778--783.
- [13] M. S. Bargh and R. de Groote, "Indoor Localization based on Response Rate of Bluetooth Inquiries," in *Proceedings of the first ACM International Workshop on Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments*, 2008, pp. 49--54.
- [14] ZONITH Indoor Positioning System (IPS). [Online]. Available : <http://www.zonith.com/products/ips/>
- [15] Gimbal Context Aware and Proximity Platform. [Online]. Available : <https://www.gimbal.com/>
- [16] R. Bruno and F. Delmastro, "Design and analysis of a bluetooth-based indoor localization system," in *Personal Wireless Communications, IFIP-TC6 8th International Conference, PWC 2003*, 2003, pp. 711--725.
- [17] F. J. Gonzalez-Castano and J. Garcia-Reinoso, "Bluetooth Location Networks," *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'02)*, vol. 1, pp. 233--237, 2002.