



HAL
open science

Technologie ultralarge bande appliquée aux systèmes à ondes millimétriques pour la géolocalisation basée sur la TDoA

Thomas Steve NKOLO BEKONO, Christophe Loyez, Kamel Haddadi, S. Baranowski, Michael Bocquet

► To cite this version:

Thomas Steve NKOLO BEKONO, Christophe Loyez, Kamel Haddadi, S. Baranowski, Michael Bocquet. Technologie ultralarge bande appliquée aux systèmes à ondes millimétriques pour la géolocalisation basée sur la TDoA. XXIII èmes Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan-Les-Pins, France. hal-04524836

HAL Id: hal-04524836

<https://hal.science/hal-04524836>

Submitted on 28 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Technologie ultralarge bande appliquée aux systèmes à ondes millimétriques pour la géolocalisation basée sur la TDoA

S.Nkolo¹, C.Loyez², K.Haddadi², S. Baranowski², et M.Bocquet¹

¹ IEMN site Valenciennes, UMR 8520, UPHF, Valenciennes France

² IEMN, UMR 8520, Univ. Lille Villeneuve d'Ascq, France
ThomasSteve.NkoloBekono@uphf.fr

Résumé – Cette étude traite d'un système de géolocalisation qui utilise des signaux radio ultra large bande à impulsions sub-nanoseconde. Basé sur la différence de temps d'arrivée (TDoA), le système réalisé permet de localiser des émetteurs à 60 GHz dans un environnement confiné avec une précision compatible avec les exigences des futures générations d'objets communicants.

1. Introduction

Les solutions de géolocalisation sont de plus en plus présents dans l'industrie de la téléphonie cellulaire [1, 2]. Avec le besoin croissant de bande passante, les fréquences habituelles ne suffisent plus et les bandes de fréquence plus élevées sont de plus en plus sollicitées. Ainsi, pour les applications liées à la 5G et au-delà, la bande fréquentielle autour de 60 GHz constitue un candidat de choix. Les ressources spectrales sont abondantes dans cette bande, ce qui rend possible la cohabitation de différents systèmes de communication et de géolocalisation opérant à des fréquences voisines. Par ailleurs, les caractéristiques de l'onde radiofréquence à 60 GHz sont propices à la diffusion des transmissions à quelques centaines de mètres et facilitent les projets de réutilisation des fréquences. Ceci est particulièrement vérifié dans l'environnement intra-bâtiment qui correspond au cadre de cette étude. Dans cette proposition, nous avons axé le travail de conception sur le développement d'un système de géolocalisation le plus simple possible tout en essayant d'optimiser le compromis encombrement-performance. Notre approche nous a conduit à développer une topologie de système à impulsions courtes (sub nanosecondes) qui réduit le temps d'occupation du canal radio tout en présentant une précision compatible avec les exigences de localisation de l'utilisateur.

La première section détaille l'architecture du système que nous avons réalisé à 60 GHz. Il est basé sur l'interaction entre des émetteurs radio générant des impulsions courtes à 60 GHz et une balise collectant les signaux émis et les exploitant afin d'estimer la position de ces émetteurs. La deuxième section aborde le principe de fonctionnement et les paramètres de ce système, y compris ceux qui ont un impact direct sur les performances en termes de précision.

Enfin, la troisième section est consacrée aux résultats expérimentaux qui alimentent la discussion sur la pertinence d'un tel système et les perspectives d'amélioration.

2. Émetteur-récepteur radio à impulsions 60 GHz

Dans cette partie, l'architecture de l'émetteur-récepteur mis en œuvre est décrite en détail : son principe repose sur l'utilisation d'une technique de transmission de signaux impulsionnels de très courte durée, inférieure à une nanoseconde. Nous mettrons en évidence que cette largeur d'impulsion est déterminante.

2.a. Tx RF 60 GHz

La topologie de l'émetteur (Tx) est réduite à un générateur d'impulsions déclenché par un signal d'horloge (CLK). Le signal d'impulsion périodique alimente en tension un oscillateur (VCO) de 60 GHz et l'amplificateur de puissance moyenne (MPA) qui en découle.

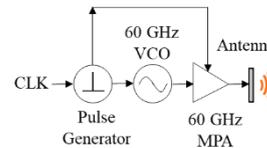
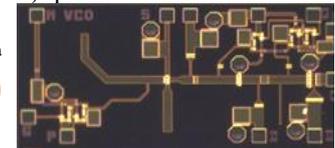


Figure 1.
Schéma Tx 60 GHz



La topologie de l'émetteur RF illustrée sur la figure 1 a été intégrée à l'aide d'une technologie de circuit intégré hyperfréquence monolithique (MMIC) impliquant des pHEMT avec des fréquences de coupure f_t allant jusqu'à 120 GHz. Comme indiqué précédemment, l'une des principales fonctionnalités intégrées dans cet émetteur est un générateur d'impulsions courtes. Ce générateur d'impulsions est simplement une porte logique à grande vitesse dont l'une des entrées est un signal d'horloge. A l'autre entrée de cette porte logique est appliqué le même signal d'horloge retardé : le retard est induit par une diode varactor dont l'effet capacitif peut être contrôlé en tension. Cela permet d'induire un retard réglable et donc d'ajuster la largeur de l'impulsion résultante à la sortie de la porte logique. La porteuse de fréquence proche de 60 GHz est générée par un oscillateur de fréquence contrôlable en tension (VCO) : celui-ci est réduit à une résistance de différence négative dont la vocation est de compenser le circuit d'accord qui n'est constitué que d'une ligne de transmission chargée par un varactor. Notons que notre approche est basée sur une technique de modulation d'amplitude.

Ce système peut donc parfaitement se contenter d'un oscillateur local aux propriétés de bruit de phase dégradées. La conversion de fréquence des impulsions sub-nanosecondes est naturellement obtenue en

alimentant ou non cet oscillateur local avec ces mêmes impulsions de tension. Afin de limiter l'énergie consommée, cette modulation d'amplitude est réalisée en alimentant simultanément l'oscillateur d'une part et le MPA d'autre part. Cela implique que ce Tx ne consomme de l'énergie que pendant l'émission des impulsions. La puissance maximale à la sortie de l'émetteur est égale à 10 dBm. Une micrographie de cet émetteur est présentée sur la figure 2. La largeur d'impulsion du signal radio pulsé à 60 GHz doit être réglée à 330 ps.

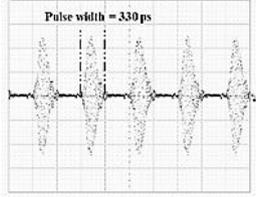


Figure 3.
Signaux Tx à
60 GHz

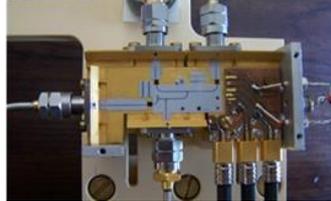


Figure 4.
Balise Rx à 60 GHz

2.b. Balise RF 60 GHz

La balise chargée de collecter les signaux impulsions émis par l'émetteur est composée de deux récepteurs dont la topologie est décrite en figure 4. Chacun de ces récepteurs peut extraire la valeur de la TDoA des signaux reçus. Pour cela, chacun d'entre eux comporte deux chaînes de réception en parallèle, chacune composée d'une antenne patch et d'un amplificateur à faible bruit de gain égal à 30 dB et de facteur de bruit égal à 6 dB comme décrit dans la figure 5. L'isolation (paramètre S12) de ces LNA est supérieur à 20 dB, ce qui permet de sommer les deux signaux impulsions collectés par la jonction des deux lignes de transmission à la sortie des LNA. A ce stade, l'enveloppe du signal résultant de cette somme est obtenue à l'aide d'un détecteur dont la sensibilité est de 0,8 mV par microwatt à 60 GHz. A partir de cette étape, le signal détecté est numérisé afin d'effectuer un traitement spécifique hors ligne.

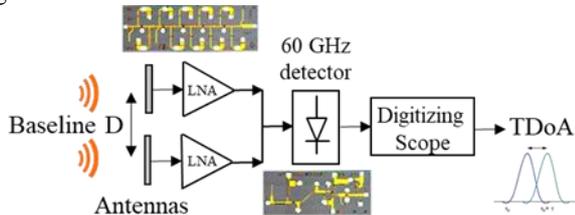


Figure 5. Schéma du récepteur 60 GHz

3. Principe et paramètres de géolocalisation

Le principe de géolocalisation proposé consiste à déterminer deux valeurs de TDoA, chacune décrivant une hyperbole comme emplacement possible de l'émetteur dont la position est à estimer. Nous nous limitons dans le cadre de cette étude à une estimation de la position en deux dimensions en prenant pour hypothèse que l'émetteur et la balise sont situés dans le même plan horizontal. Chacune des valeurs de TDoA nécessite deux antennes distinctes séparées par le baseline D (figure 5). Par la suite, la terminologie de point d'accès (AP pour

Access Point) sera utilisée pour désigner les points de collecte des signaux qui sont les antennes.

3.a. Détermination de la TDoA

Après l'opération de numérisation du signal $x(t)$ issu de la détection mentionnée dans la section précédente, chaque calcul de TDoA est obtenu par autocorrélation du signal $x(t)$. L'opération effectuée est détaillée par l'équation (1) : une recherche de maxima est ensuite effectuée à partir du résultat de cette corrélation.

$$C_{xx}(k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} x(n)x(n+k) & 0 \leq k \leq L \\ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|k|} x(n)x(n+k) & -L \leq k < 0 \end{cases} \quad (1)$$

où N représente le nombre d'échantillons d'entrée et L le nombre d'échantillons impliqués dans le décalage considéré entre les signaux collectés par deux AP, en supposant que la valeur maximale de la TDoA est toujours légèrement inférieure à la valeur du décalage résultant. Le taux d'échantillonnage est l'une des clés de la performance de ce système puisque la résolution temporelle des signaux numérisés a un impact direct sur l'erreur de localisation. Des Convertisseurs Analogiques Numériques à taux d'échantillonnage élevé sont couramment développés [3] et sont disponibles dans le commerce. Dans notre cas, le taux d'échantillonnage est égal à 10 GS/s, ce qui conduit à une résolution spatiale minimale de 3 centimètres.

3.b. Algorithme de localisation basé sur la TDoA

L'émetteur est localisé à l'aide d'un algorithme TDoA hyperbolique [4]. R_i ($i = 1, \dots, 4$) sont les quatre distances entre l'émetteur (X, Y, Z) et les points d'accès $AP_i (X_i, Y_i, Z_i)$ ($i = 1, \dots, 4$), les coordonnées estimées de l'émetteur (X_0, Y_0) sont obtenues en résolvant (2) et (3) en supposant un processus de localisation en 2D ($Z_0 = Z_1 = Z_2 = Z_3$) :

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,4} & Y_{3,4} \end{bmatrix}^{-1} * \left(\begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{4,3} \end{bmatrix} \cdot R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{4,3}^2 - K_4 + K_3 \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

$$R_{i,1}^2 + R_{i,4} \cdot R_1 = K_i - K_1 - 2 \cdot X_{i,1} \cdot X \quad i \in \{2,3,4\} \quad (3)$$

avec $K_i = X_i^2 + Y_i^2$; $i=1, \dots, 4$;

$$X_{2,1} = X_2 - X_1 \text{ et } X_{3,4} = X_3 - X_4 ; Y_{2,1} = Y_2 - Y_1 ; Y_{3,4} = Y_3 - Y_4$$

$$R_{2,1} = R_2 - R_1 = \frac{TDOA_1}{c} ; R_{4,3} = R_4 - R_3 = \frac{TDOA_2}{c}$$

où c représente la vitesse de la lumière.

3.c. Impact du baseline

Le principal avantage de la méthode de localisation à base de TDoA est qu'elle ne nécessite pas de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. La contrepartie est de devoir multiplier les points d'accès en réception, ce qui dégrade inévitablement l'encombrement de la balise induit par le baseline. La largeur d'impulsion est fixée à 330 ps, ce qui implique une résolution spatiale minimale de 10 cm. En d'autres termes, cela signifie que la valeur minimale du baseline doit être d'au moins 10 cm dans notre cas.

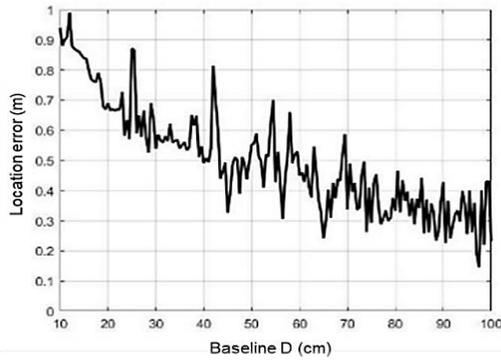


Figure 6. Erreur de localisation Vs baseline D (distance radiale = 7 m)

4. Résultats expérimentaux

Cette approche est testée dans un environnement confiné qui correspond à une grande pièce meublée (10m x 5,5m). Comme évoqué précédemment, l'utilisation de signaux impulsions sub-nanoseconde offre une précision de localisation intrinsèquement élevée. L'objectif est de déterminer l'incidence de deux paramètres essentiels que sont le baseline et la distance radiale (Tx-Rx) sur la précision de localisation. Les premières mesures sont présentées par la figure 7 qui montre l'évolution de l'erreur de localisation en fonction de la valeur de la baseline pour une distance radiale donnée. Deux paires de récepteurs, distants de 2 mètres, comme décrit dans la figure 5, sont impliquées dans cette estimation de la position de l'émetteur. Nous constatons que l'erreur se dégrade fortement lorsque le baseline atteint la condition minimale de 10 cm. Bien qu'affectée par le phénomène de trajets multiples, l'évolution expérimentale de la Figure 6 permet de déterminer la valeur du baseline répondant à une spécification donnée en termes de précision de localisation. Des mesures supplémentaires ont été effectuées, Figure 7, pour déterminer l'erreur de localisation en fonction de la distance radiale pour eux valeurs de baseline différentes. Pour une distance radiale allant jusqu'à 10 mètres, l'erreur de localisation peut dépasser 1m lorsque le baseline est de 10 cm alors que cette erreur reste contenue à des valeurs inférieures à 55 cm lorsque le baseline est égale à 50 cm.

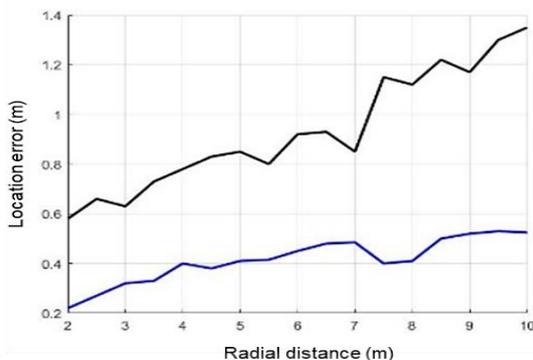


Figure 7. Erreur de localisation Vs distance radiale (courbe noire : D = 10cm ; courbe bleue : D = 50 cm)

Contrairement aux travaux antérieurs sur les autres techniques de localisation répertoriés dans le tableau 1,

qui nécessitent une synchronisation fastidieuse entre les récepteurs, notre approche basée sur la TDoA fonctionne sans aucune synchronisation. Avec pour atout majeur la simplicité d'installation et d'utilisation, la flexibilité en ce sens où, le système peut être utilisé dans un environnement où la synchronisation est difficile, voire impossible à réaliser. La précision obtenue reste contenue dans une valeur de quelques dizaines de centimètres. L'étude réalisée valide expérimentalement le concept et fournit les données nécessaires pour dimensionner au mieux le système en ce qui concerne le compromis entre la taille de la balise et la précision de localisation.

Réf.	Méthode	Portée Max.	Précision	Fréq. (GHz)	Sim. / Exp
[5]	AoA	3m	N.A. (1.5 °)	3-5	Exp
[6]	ToA	5 m	< 2.7 mm	60	Exp
[7]	ToA	20 m	< 17 cm	60	Sim.
[8]	ADoA	8 m	< 1 m	60	Exp.
Ce travail	TDoA	10 m	< 55 cm	60	Exp.

Tableau 1. Tableau des performances.

Références

- [1] Z. Abu-Shaban, H. Wymeersch, T. Abhayapala and G. Seco-Granados, «*Single-Anchor Two-Way Localization Bounds for 5G mmWave Systems*», in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 6, pp. 6388-6400, June 2020.
- [2] Z. Abu-Shaban, H. Wymeersch, T. Abhayapala and G. Seco-Granados, «*Single-Anchor Two-Way Localization Bounds for 5G mmWave Systems*», in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 6, pp. 6388-6400, June 2020.
- [3] D. Wu et al., «*A 10-GS/s 8-bit SiGe ADC with Isolated 4x4 Analog Input Multiplexer*», 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2019, pp. 1-4.
- [4] Y. T. Chan and K. C. Ho, «*A simple and efficient estimator for hyperbolic location*», in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 42, no. 8, pp. 1905-1915, Aug. 1994.
- [5] G. Lee, H. Koh, U. Suh and T. W. Kim, «*An IR-UWB Angle-of-Arrival Sensor IC Using Auto-Toggled Time-to-Digital Converter*», in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 29, no. 11, pp. 749-752, Nov. 2019.
- [6] P. Indirayanti, T. Ayhan, M. Verhelst, W. Dehaene and P. Reynaert, «*A mm-Precise 60 GHz Transmitter in 40 nm CMOS for Discrete-Carrier Indoor Localization*», in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 50, no. 7, pp. 1604-1617, July 2015.
- [7] E. Grossi, M. Lops and L. Venturino, «*Adaptive Detection and Localization Exploiting the IEEE 802.11ad Standard*», in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 7, pp. 4394-4407, July 2020.
- [8] J. Palacios, G. Bielsa, P. Casari and J. Widmer, «*Single- and Multiple-Access Point Indoor Localization for Millimeter-Wave Networks*», in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 3, pp. 1927-1942, March 2019.