

Localisation en intérieur avec Ultra Wide Band

Rachida SAROUI^{1,2} - Anthony JUTON¹

Édité le
 11/04/2025



¹Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, ² TU Graz

Cette ressource fait partie du N° 115 de La Revue 3EI du deuxième trimestre 2025.

Cette ressource présente l'Ultra Wide Band (UWB ou ultra large bande) avec le principe de la localisation en intérieur, un exemple de mise en œuvre à l'aide de modules accessibles Qorvo DWM1001-DEV, ainsi que le problème lié à la présence d'obstacles.

1 - Introduction

1.1 - Problématique de la localisation en intérieur

Alors que la localisation en extérieur repose sur les satellites, le rapport signal/bruit (SNR) rend souvent difficile le décodage de ces signaux en l'intérieur. Cette limitation a stimulé la recherche sur la localisation en intérieur. Pour permettre un Internet des objets géolocalisés, des systèmes de positionnement en intérieur dédiés doivent compléter la technologie GNSS (Système Mondial de Navigation par Satellite), ouvrant ainsi la voie à une nouvelle dimension connue sous le nom de la Localisation des Objets.

1.2 - Applications

L'Ultra Wide Band (UWB) offre des applications variées et innovantes. Dans l'industrie automobile, elle permet des solutions comme la clé numérique, qui verrouille ou déverrouille un véhicule sans contact. Dans le domaine de la santé, UWB optimise le suivi des équipements médicaux et améliore la coordination des soins. Elle est également utilisée pour le suivi des matériaux et outils en fabrication, facilitant la gestion des stocks et augmentant l'efficacité de production [3]. Enfin, les dispositifs grand public, comme l'AirTag d'Apple [1], exploitent l'UWB pour une localisation précise des objets perdus.

Le tableau ci-dessous répertorie les entreprises, les téléphones et produits IoT (Internet of Object ou Internet des Objets) qu'elles ont lancés depuis 2020, ainsi que le module UWB intégré à ces appareils [2].

Company (products released between 2020 and 2024)	UWB Controller
Apple (Smartphones, Smartwatches, IoT devices (AirPods, HomePod, AirTag))	Apple U1 / U2
Google (Smartphones)	Qorvo DW5720
Samsung and Xiaomi (Smartphones)	NXP SR100T

2 - Principe de la localisation UWB

2.1 - Définition

Selon la définition de la Commission fédérale des communications (FCC) et du Secteur des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT-R), les signaux UWB ont une bande passante absolue $B \geq 500$ MHz ou une bande passante fractionnaire (relative) B_{frac} supérieure à 0,2 [6], où B_{frac} est définie comme :

$$B_{frac} = \frac{B}{f_c} = \frac{f_s - f_i}{f_c}$$

Où f_s et f_i désignent respectivement les fréquences supérieure et inférieure auxquelles la densité spectrale de puissance (PSD) est inférieure de 10 dB à son maximum, et f_c est la fréquence centrale.

Le concepteur de circuits intégrés UWB Spark microsystems propose sur son site [16] deux figures présentant l'occupation temporelle et spectrale des signaux :

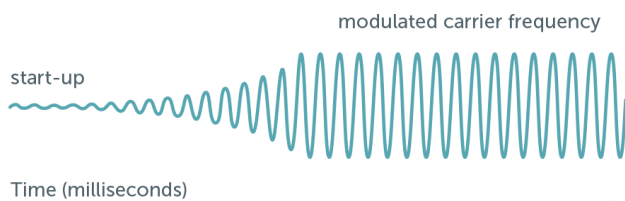


Figure 1 : Solution sans-fil narrow band (Wifi, BT, 4G...)



Figure 2 : Solution UWB source [16]

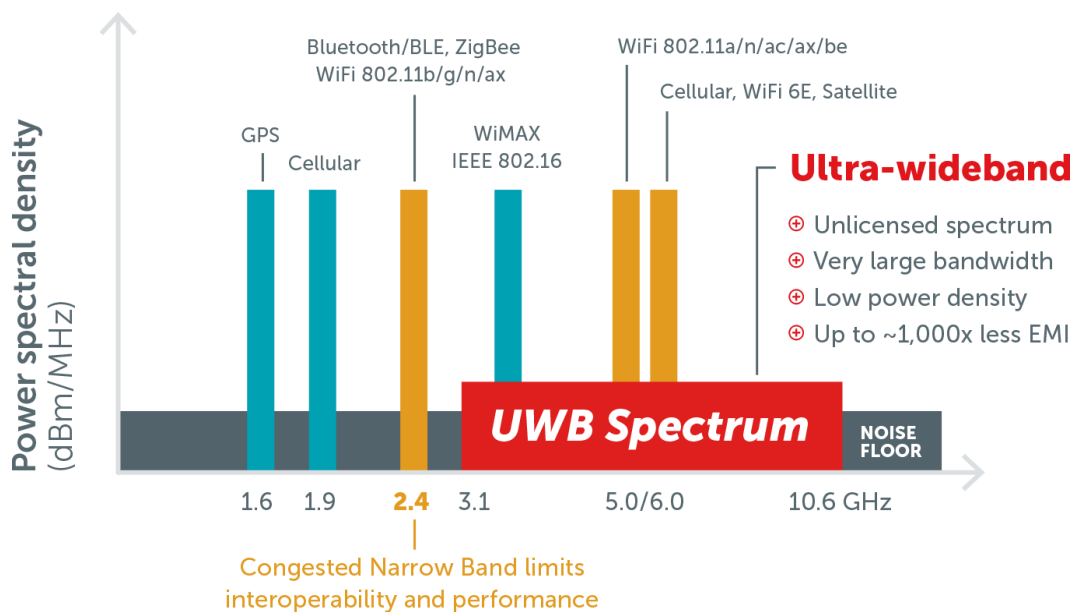


Figure 3 : Bande spectrale autorisée pour les signaux UWB

2.2 - L'Ultra Wide Band vs la bande étroite (narrowband)

L'exploitation d'une bande passante de plusieurs centaines de mégahertz correspond à une résolution temporelle de l'ordre de quelques nanosecondes. Dans le domaine spatial, cela permet de distinguer les composantes de trajets multiples (MPCs) provenant de surfaces réfléchissantes séparées par seulement quelques décimètres. Cela permet de dissocier le premier trajet du signal ou la composante de ligne de vue (LOS) des trajets multiples, ce qui permet de déterminer avec précision et exactitude son temps d'arrivée (ToA) et, par conséquent, le temps de vol du signal et

donc la distance à la source. À l'inverse, lorsque des systèmes à bande étroite sont utilisés, les MPCs interfèrent de manière constructive et destructive avec la composante de ligne de vue (LOS), ce qui introduit de l'affaiblissement et des distorsions d'impulsions, augmentant ainsi l'incertitude de l'estimation du ToA.

Cependant, cela peut potentiellement causer des interférences avec d'autres systèmes radio à proximité. C'est pourquoi des règles complexes régissent l'utilisation des fréquences, les niveaux de puissance autorisés et le rythme des transmissions.

Frequency Range (MHz)	960-1610	1610-1990	1990-3100	3100-10600	Above 10600	1164-1240 1559-1610
Ground penetrating radar, wall imaging	-65.3	-53.3	-51.3	-41.3	-51.3	-75.3
Through D-wall imaging systems:						
UWB bandwidth below 960 MHz	-65.3	-53.3	-51.3	-51.3	-51.3	-75.3
UWB bandwidth 1990-10600 MHz	-46.3	-41.3	-41.3	-41.3	-51.3	-56.3
Surveillance systems	-53.3	-51.3	-41.3	-41.3	-51.3	-63.3
Medical imaging systems	-65.3	-53.3	-51.3	-41.3	-51.3	-75.3/-53.3
Indoor UWB systems	-75.3	-53.3	-51.3	-41.3	-51.3	-85.3
Hand held UWB systems	-75.3	-63.3	-61.3	-41.3	-61.3	-85.3
Frequency Range (MHz)		1610-22000	22000-29000	29000-31000	Above 31000	
Vehicular radar systems	-75.3	-61.3	-41.3	-51.3	-61.3	-85.3

Emissions at 1164-1240 and 1559-1610 MHz to be measured using a resolution bandwidth no less than 1 kHz.
All other frequencies to be measured using a resolution bandwidth of 1 MHz.

Figure 4 : Limites d'émission (EIRP en dBm) pour les différents types de systèmes UWB. En dessous de 960 MHz, tous les systèmes doivent se conformer aux limites d'émission existantes qui s'appliquent à tous les émetteurs non intentionnels (Partie 15.209) [9]

2.3 - Modèle OSI

Le modèle OSI ci-dessous montre que des efforts de normalisation sont faits dans le but de garantir l'interopérabilité des composants, notamment pour la partie communication. Pour la localisation, on reste essentiellement sur des solutions propriétaires.

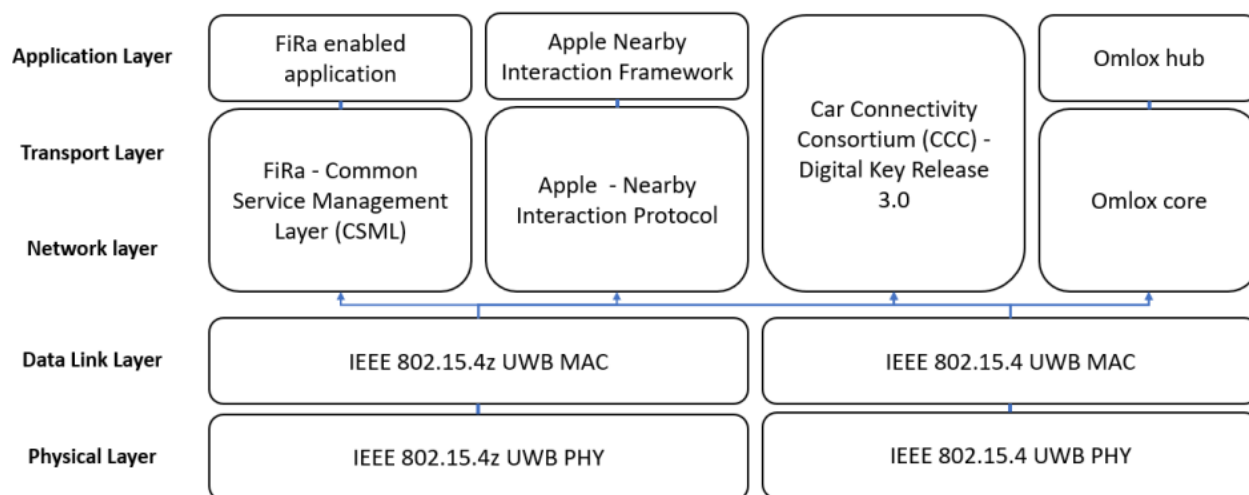


Figure 5 : Les normes UWB et leur intégration dans le modèle OSI [7]

2.4 - Localisation UWB

L'Ultra Wide Band (UWB) est conçue pour l'échange de données à faible consommation d'énergie et la mesure sécurisée de distance. L'UWB peut être utilisée pour construire un système de localisation en temps réel (RTL) tout en promettant une précision au centimètre près. À cette fin, il est

nécessaire d'utiliser au moins trois nœuds fixes pour estimer la position spatiale d'un quatrième nœud (algorithme de trilatération).

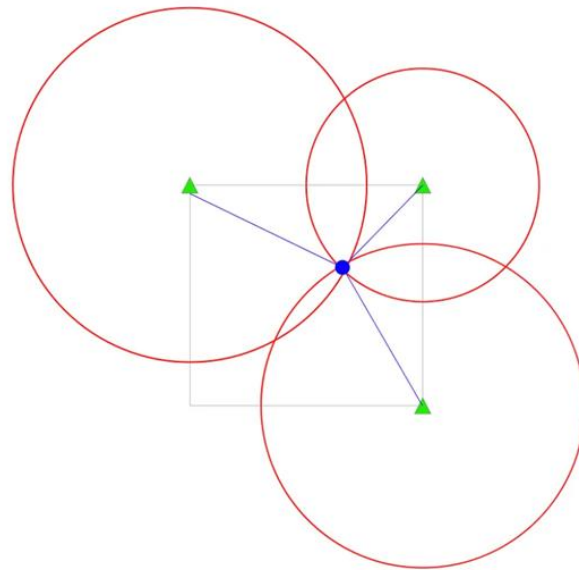


Figure 6 : Illustration de la trilatération [13]

2.5 - Mesure de Distance Bidirectionnelle

La figure 7 illustre le principe de la mesure de distance entre le tag et l'ancre ou balise. Il s'agit du procédé de "two-way ranging" [10]. Le tag envoie un message à la balise (anchor) qui lui renvoie un message contenant le temps entre la réception du signal tag et l'envoi de son signal balise Treply. Le tag, en mesurant la différence entre la date de réception du message balise et la date d'envoi du signal tag, obtient le double du temps de trajet entre le tag et la balise. Cette valeur peut bien sûr être transmise à la balise.

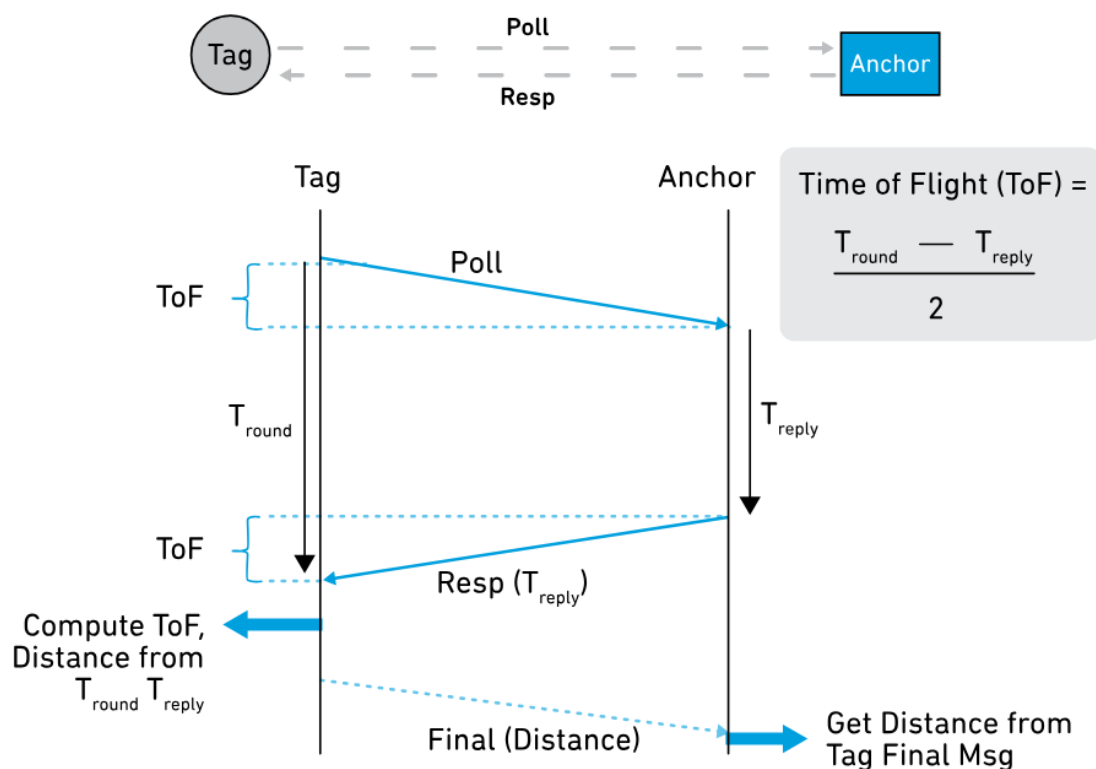


Figure 7 : Principe de la mesure de distance entre le tag et l'ancre - Procédé « two-way ranging »

3 - Un exemple de mise en œuvre à l'aide des kits DWM1001-DEV

La mise en œuvre présentée ici a mené à la mesure de précision de localisation d'un kit mobile (le tag) dans une pièce équipée de 4 autres kits fixes (les ancres).

Il est aussi possible, avec deux kits, de simplement effectuer du *ranging* entre deux cartes et observer la précision.

3.1 - Présentation du module DWM1001

- Précision de localisation jusqu'à 10 cm
- Antenne PCB imprimée UWB Canal 5 (6,5 GHz)
- Débit de données de 6,8 Mbps, conforme à IEEE 802.15.4-2011 UWB
- Connectivité Bluetooth® avec puce Nordic Semiconductor nRF52832
- Antenne Bluetooth® intégrée
- Capteur de mouvement : accéléromètre 3 axes
- Consommation optimisée pour le mode veille à faible consommation : <15µA
- Tension d'alimentation : 2,8 V à 3,6 V
- Interfaces SPI, UART, I2C et Bluetooth® pour connecter le DWM1001 à un appareil hôte
- Firmware intégré prêt à l'emploi pour des applications RTLS (Two Way Ranging)



Figure 8 : Module DWM1001

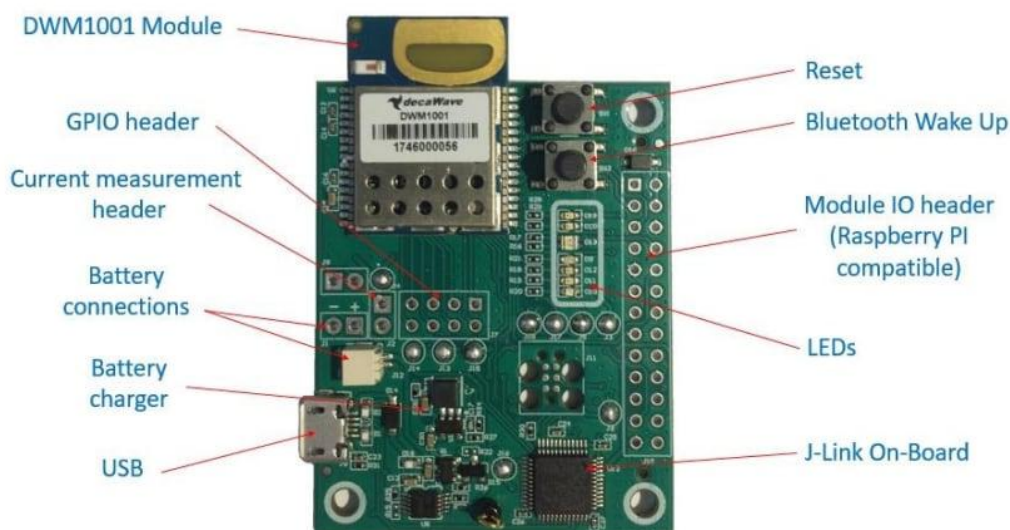


Figure 9 : Kit Qorvo DWM1001-dev source Qorvo

3.2 - Installation

Télécharger le package logiciel Decawave

Ce package comprend la documentation et le logiciel nécessaire pour la carte de développement DWM1001. Il contient un grand nombre de fichiers, et doit être téléchargé pour configurer correctement les modules UWB.

Flasher les capteurs UWB avec J-Flash Lite

J-Flash Lite est une interface graphique simple et gratuite qui permet de télécharger le micrologiciel embarqué (firmware) dans la mémoire flash des modules UWB.

Après l'installation, suivre les étapes suivantes pour flasher les quatre modules :

1. Connecter le module à son ordinateur à l'aide d'un câble de données micro USB.
2. Flasher l'image du module DWM1001 :
 - a. Ouvrir J-Flash Lite.
 - b. Choisir nrf52832_XXAA comme périphérique et SWD comme interface, utiliser la vitesse par défaut de 1000. Cliquer sur "OK".
3. Cliquer sur "Erase Chip" pour effectuer un effacement complet de la puce.
4. Dans "Data File", cliquer pour parcourir le package logiciel Decawave téléchargé (/DWM1001/Factory_Firmware_Image/DWM1001_PANS_R2.0.hex) à flasher, puis cliquer sur "Program Device".

3.3 - Configuration via BLE

La manière la plus simple de commencer à utiliser les modules UWB est via l'application Android. Ouvrir le lien avec un smartphone, télécharger le SDK Android et l'installer.

Une fois l'application correctement installée, alimenter chaque module en USB (il est recommandé d'utiliser une batterie externe). Si les LEDs des modules clignotent en vert et rouge, il est possible d'établir la connexion en Bluetooth. Rechercher les modules avec l'application Decawave. Une fois les quatre modules détectés, ils doivent être connectés au même réseau que celui créé auparavant (dans les illustrations ci-dessous, le réseau est nommé RTLS Demo).

Il est alors possible de définir trois ancres et un tag :

- Sélectionner les modules dans le menu. Le PANID (identifiant de réseau sur 16 bits) doit être défini par l'utilisateur. Un groupe de nœuds formant un réseau UWB doit avoir le même PANID. L'ancre initiatrice initialise et contrôle le réseau.
- Définir les coordonnées de chaque ancre : X Y Z

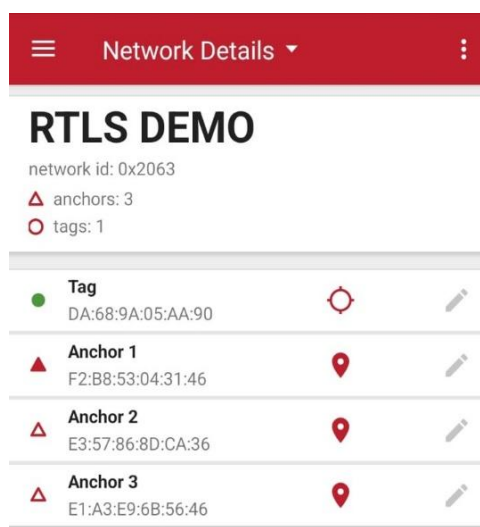


Figure 10 : Aperçu de la page de configuration de l'application Android Decawave



Figure 11 : Page de localisation de l'application Decawave

3.4 - Configuration via UART

Il est aussi possible de configurer les modules sans passer par l'application Android, en utilisant la liaison série UART :

- Anchor :
 1. nis 0x1234: PAN ID
 2. aps X Y Z
 3. nma / nmi si initiator
- tag
 - 1.nis 0x1234: PAN ID
 - 2.nmt

```
DWM1001 THR Real Time Location System
Copyright : 2016-2019 LEAPS and Decawave
License : Please visit https://decauwave.com/dwm1001\_license
Compiled : Mar 27 2019 03:35:59

Help : ? or help

dwm> nis 0x1234
nis: ok
dwm> aps 0 0 100
aps: ok
dwm> nmi

DWM1001 THR Real Time Location System
Copyright : 2016-2019 LEAPS and Decawave
License : Please visit https://decauwave.com/dwm1001\_license
Compiled : Mar 27 2019 03:35:59

Help : ? or help

dwm>
```

Figure 12 : Configuration d'une ancre via la liaison série

Lorsqu'un nœud est configuré en tant que **anchor** (balise fixe), il renvoie via l'**UART** les distances aux trois ancrs ainsi que leurs identifiants respectifs.

Quand un nœud est configuré en tant que **tag**, il renvoie via l'**UART** les données suivantes concernant les balises environnantes dans le même réseau :

- Identifiant du nœud (ID MAC).
- Coordonnées de position prédéfinies en X, Y, Z en millimètres.
- RSSI (Indicateur de force du signal radio).
- Numéro dans le réseau et réseau voisin.

3.5 - Récupération des données par un nano-ordinateur Raspberry Pi

Pour transmettre les informations de localisation au nano-ordinateur (nommé directement Raspberry Pi par la suite), il est possible d'utiliser un module série-USB ou de connecter directement le kit DWM1001-DEV sur les broches UART du connecteur GPIO de la raspberry pi.

Il est possible d'utiliser le code disponible sur le dépôt de Patrick Hallek :

<https://gist.github.com/PatrickHallek/3f800d0d39e740a3f955733a549011c3#file-dwm1001-localization-py>

Ce code fait l'importation des bibliothèques JSON et Redis, ce qui permet de stocker les données reçues du module dans une base de données Redis. Si tout fonctionne comme prévu, la chaîne suivante est renvoyée :

```
DIST,3,AN0,8182,2.18,0.00,0.00,0.83,AN1,0F8C,2.12,1.04,0.00,0.18,AN2,5C2F,0.00,0.00,0.00,0.59,POS,0.83,0.52,0.00
```

Les données des ancrs suivent cette structure :

```
DIST,Nombre d'ancres,[AN+Numéro de l'ancre,ID de l'ancre,Position X,Position Y,Position Z,Distance au module],POS,Position X du module,Position Y du module,Position Z du module
```

Les informations entre crochets sont répétées pour chaque ancre.

Le script Python divise cette chaîne en plusieurs éléments, puis stocke les informations dans un tableau. Les données des ancrs et la position du module sont ensuite sauvegardées séparément dans la base de données.

Les données de position sont maintenant stockées en temps réel sur la Raspberry Pi.

3.6 - Pour aller plus loin

Pour approfondir et comprendre les différents types de ranging (double-sided, single-sided two-way ranging), ainsi que pour explorer toutes les informations disponibles, comme les diagnostics RX, une liste d'exemples à tester est fournie. Il est recommandé d'exécuter ces exemples sur Segger Embedded Studio ou, sinon, de créer un makefile adapté à son environnement.

Dans [11], se trouvent toutes les fonctions de l'API du DW1001 utilisables pour ses projets. Les exemples sont également expliqués dans le document.

4 - Enjeu de la connaissance de la présence d'un obstacle

4.1 - Problématique

Les environnements intérieurs posent souvent des défis aux systèmes de positionnement par radiofréquence (RF). Les objets présents peuvent perturber la propagation du signal en absorbant, réfléchissant ou dispersant les ondes, ce qui crée des erreurs dans l'estimation du temps d'arrivée (TOA) et donc de la position. Récemment, des approches classiques et basées sur l'apprentissage automatique (ML) ont permis de détecter ces perturbations en analysant les réponses impulsionnelles des canaux (CIR) des systèmes de positionnement Ultra Wide Band.

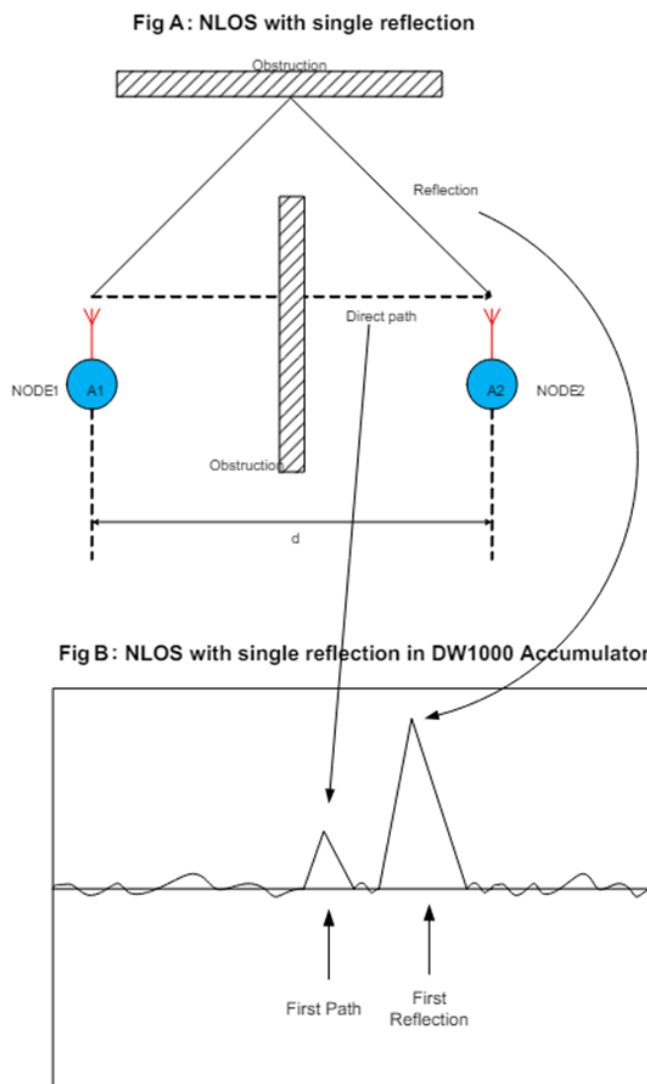


Figure 13 : La figure A montre le schéma d'un émetteur et d'un récepteur où la ligne de vue directe est obstruée. Une réflexion est également représentée.

La figure B montre les échantillons accumulés dans l'accumulateur du DW1000. Le premier chemin correspond à la voie directe, tandis que la première réflexion correspond à la réflexion illustrée dans la figure A.

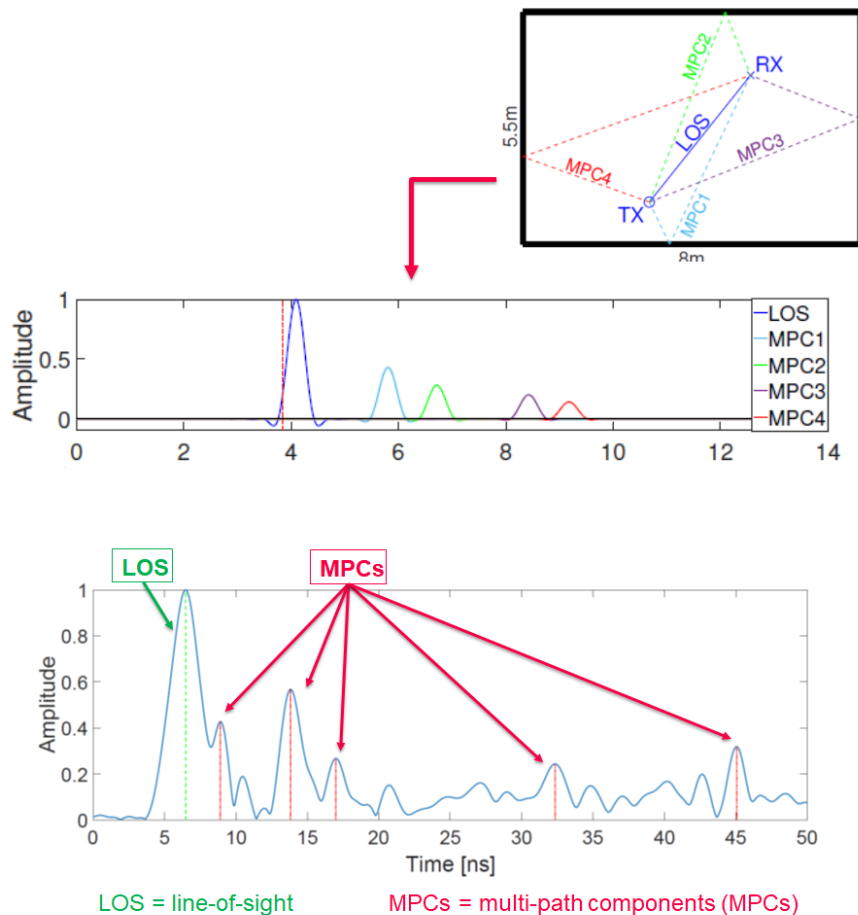


Figure 14 : Amplitudes des signaux reçus lors d'une connexion multitrajet

4.2 - L'utilisation de l'apprentissage automatique pour la classification LOS/NLOS et la correction d'erreurs

Les CIR peuvent être utilisés directement comme entrées pour des modèles d'apprentissage automatique pour la classification LOS/NLOS et la correction d'erreurs. Cependant, beaucoup d'approches se concentrent surtout sur les performances de classification et la correction des erreurs, sans se soucier des préoccupations pratiques comme la mémoire ou le temps d'exécution. De nombreux modèles, surtout les réseaux de neurones convolutifs (CNN), demandent beaucoup de puissance de calcul. C'est pourquoi certains chercheurs recommandent de les déployer sur des dispositifs edge, comme des Raspberry Pi avec des CPU/GPUs puissants et suffisamment de mémoire [14].

Dans [15], les auteurs ont développé un framework InSight qui facilite le déploiement des méthodes de machine learning sur des dispositifs Ultra Wide Band intégrés, tout en faisant un compromis entre la précision et les contraintes de ressources, comme un temps d'exécution minimal pour des taux de mises à jour rapides ou une empreinte mémoire réduite pour les dispositifs à mémoire limitée. L'intégration avec le système existant est fluide. Le générateur de modèles prend en charge plusieurs algorithmes de machine learning, notamment les machines à vecteurs de support (SVM), les arbres XGBoost et les réseaux de neurones. Le moteur NLOS intégré est responsable de la classification et de la correction d'erreurs sur le dispositif, conçu pour s'intégrer facilement à diverses applications.

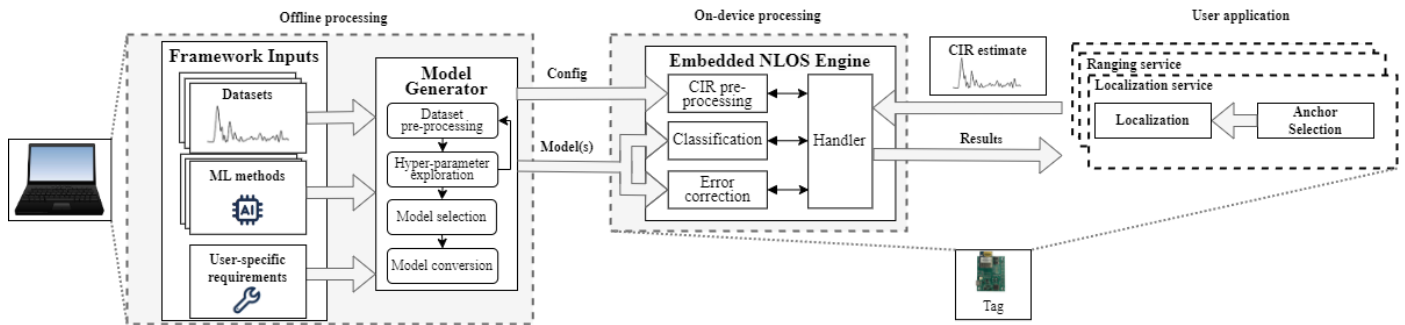


Figure 15 : Présentation de la framework InSight, comprenant le générateur de modèles hors ligne et le moteur NLOS intégré sur l'appareil. Le générateur de modèles hors ligne choisit le modèle le plus approprié en fonction de la configuration d'entrée, tandis que le moteur NLOS intégré effectue la classification et/ou la correction d'erreurs en utilisant les données de réponse impulsionnelle du canal (CIR) fournies par un service de localisation ou de mesure de distance [15].

5 - Présentation du module DWM3000 et comparaison avec DWM1001

- Conformes au BPRF IEEE 802.15.4-2015 et IEEE 802.15.4z
- Entièrement alignés avec les spécifications FiRa™,
- PHY, MAC et le développement de la certification
- Prend en charge les canaux 5 (6,5 GHz) et 9 (8 GHz)
- SoC nRF52833 Nordic avec émetteur-récepteur BLE
- Tension d'alimentation VCC de 2,5 V à 3,6 V
- Antenne puce BLUETOOTH®
- Bloc de sécurité AES 128/256

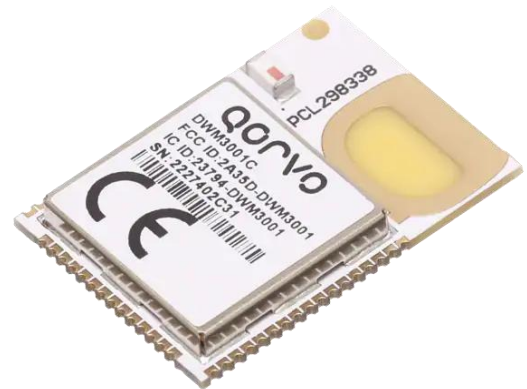


Figure 16 : Module Qorvo DWM3000

Caractéristiques nouvelles :

- Angle d'arrivée (QM33120W)
- STS (Scrambled Timestamp Sequence : une séquence d'impulsions pseudo-aléatoires générées à l'aide d'un générateur de bits aléatoires déterministe (DRBG) et incluse dans le paquet UWB)

Comparaison de Performances :

En conditions LOS, le DW3000 est plus précis avec une réduction de l'écart type de 5,5 %, et plus fiable, avec une diminution de 71 % du RMSE. En moyenne, il garantit une précision de distance constamment inférieure à 10 cm en conditions LOS et avec une orientation optimale de l'antenne. Le DW3000 présente également une consommation d'énergie réduite par un facteur de 2× par rapport à son prédécesseur, et un pic de courant diminué de 45 % un atout majeur pour tout dispositif IoT à faible consommation [12].

Références :

- [1] Apple, "AirTag", Accessed: July 26, 2023. Available : <https://www.apple.com/airtag/>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_UWB-enabled_mobile_devices
- [3] [PhD Thesis \(grosswindhager.com\)](#)
- [6] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), "Recommendation ITU-R SM.1755: Characteristics of UWB Technology," 2006 (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R))
- [7] Coppens, D., Shahid, A., Lemey, S., Van Herbruggen, B., Marshall, C., & De Poorter, E. (2023). "An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions".
- [9] A Summary of FCC Rules for Ultra Wideband Communications By Gary Breed, High Frequency Design.
- [10] Ultra-Wideband For Dummies®, Qorvo Special Edition.
- [11] DW1000 DEVICE DRIVER APPLICATION PROGRAMMING INTERFACE (API) GUIDE 2016
- [12] Polonelli, T., Schläpfer, S., & Magno, M. "Performance Comparison between Decawave DW1000 and DW3000 in Low-Power Double Side Ranging Applications." D-ITET, ETH Zurich.
- [13] <https://medium.com/@newforestberlin/precise-realtime-indoor-localization-with-raspberry-pi-and-ultra-wideband-technology-decawave-191e4e2daa8c>
- [14] Stefano MARANO et al. « NLOS Identification and Mitigation for Localization Based on UWB Experimental Data ». In : IEEE Journal on Selected Areas in Communications 28.7 (sept. 2010). Stefano Marano and Wesley M. Gifford are Student Members, IEEE ; Henk Wymeersch is a Member, IEEE ; Moe Z. Win is a Fellow, IEEE, p. 1157-1166.
- [15] Markus Gallacher et al. "InSight: Enabling NLOS Classification, Error Correction, and Anchor Selection on Resource-Constrained UWB Devices." EWSN 2023, Rende, Italy, ACM.
- [16] Le site de Spark Microsystems : <https://www.sparkmicro.com/ultra-wideband-technology/>