

Rapport

PROJET PERIPHERAL – BLUETOOTH ANGLE OF ARRIVAL

10/02/2025

Projet industriel 2024/2025

Paul JALLAIS,
Antoine PICARD,
Sara BOUSSOUF

Année Universitaire 2024/2025

GPSE / SATE

Tuteur entreprise : Aymar De La
METTRIE

Tuteur ENSICAEN : Miloud FRIKEL



TABLE DES MATIERES

1. Introduction	3
1.1. Les objectifs	4
2. Théorie de la détection AOA	4
3. Choix techniques	6
3.1. Choix matériels	6
3.2. Choix software	7
4. Conception matérielle	9
4.1. Alimentation et commande du switch	9
4.2. Circuits d'adaptation des antennes	10
4.3. Lignes de transmission	11
4.4. PCB réalisé	13
5. Implémentation logicielle	14
5.1. Code d'émission	14
5.2. Code de réception –	15
6. Expérimentations et résultats	17
6.1. Test d'émission de trames et de réceptions	17
6.2. Test du switch et du fonctionnement de chaque antenne	19
6.3. Test de détection d'angle d'arrivée	19
7. Conclusion et perspectives	20

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier chaleureusement Aymar de La Mettrie ainsi que l'entreprise PERIPHERAL de nous avoir proposé ce projet.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à Miloud Frikel, qui nous a aidés à comprendre le fonctionnement des algorithmes de détection d'angle d'arrivée. Un grand merci également à Chantal Gunther, qui nous a guidés dans le choix du matériel utilisé tout au long de ce projet, et dont le cours d'antennes et hyperfréquences a été essentiel pour la création du PCB.

Enfin, nous tenons à remercier Olivier Clouard, qui nous a soutenus tout au long du projet, que ce soit pour la commande du matériel ou pour la création et l'impression du PCB.

1. Introduction

L'entreprise PERIPHERAL, représentée par M. Aymar, nous a proposé un projet visant à développer un système de localisation pour les pompiers en milieux clos. Lors de leurs interventions, ces derniers portent des masques ARI (Appareils Respiratoires Isolants), indispensables pour leur protection. PERIPHERAL conçoit des masques ARI équipés de LED stratégiquement placées afin d'exploiter l'attention visuo-spatiale implicite et exogène, permettant ainsi d'orienter naturellement le regard du pompier vers des indications cruciales.



Figure 1 : masque ARI

L'une des principales difficultés rencontrées par les pompiers dans des environnements enfumés et confinés est la localisation de leurs coéquipiers afin de pouvoir leur porter assistance en cas de besoin. Une solution pour répondre à cette problématique repose sur l'utilisation de la technologie de détection d'angle, qui permet de déterminer précisément la direction d'origine d'un signal reçu.

Les masques ARI développés par PERIPHERAL sont nativement équipés de la technologie Bluetooth. Depuis la version 5.1 de ce protocole, une fonctionnalité permettant la détection de l'angle d'arrivée du signal a été intégrée. L'objectif du projet est donc d'évaluer la faisabilité de ce concept en exploitant cette technologie pour améliorer la coordination et la sécurité des pompiers lors de leurs interventions.

1.1. Les objectifs

- **Étudier le principe de la détection d'angle d'arrivée (AoA)** afin de comprendre son fonctionnement, ses contraintes techniques et ses applications potentielles dans un environnement de secours.
- **Analyser les défis liés à la localisation en milieu clos** et explorer différentes approches technologiques pour identifier la solution la plus adaptée.
- **Développer et tester un Proof of Concept (PoC)** intégrant la technologie Bluetooth 5.1 et la détection d'angle d'arrivée, afin de valider la faisabilité du concept dans un scénario réel.

2. Théorie de la détection AOA

L'**Angle of Arrival (AoA)** est une méthode utilisée pour la localisation en intérieur, particulièrement avec la technologie **Bluetooth 5.1**. Cette technique repose sur la mesure de l'angle sous lequel un signal radio arrive à un récepteur multi-antennes, permettant ainsi de déterminer la position de l'émetteur.

1. Constant Tone Extension (CTE)

Pour que la détection AoA fonctionne, un dispositif émetteur Bluetooth envoie un signal spécial contenant une **extension de tonalité constante (CTE)**. Cela permet aux récepteurs de capturer les informations de phase du signal. Elles se composent de plusieurs périodes distinctes :

Guard Period : une phase de protection permettant de stabiliser le signal et d'éviter les interférences dues aux transitions.

Reference Period : une période où l'émetteur envoie une onde continue non modulée, servant de référence pour le récepteur.

Switching Period : une phase durant laquelle le récepteur commute rapidement entre plusieurs antennes pour capturer les variations de phase du signal.

Sampling Period : une période où le signal est échantillonné afin d'extraire les informations IQ (**In-phase et Quadrature**), nécessaires au calcul de l'angle d'arrivée.



Figure 2 : trame CTE

Échantillonnage des composantes IQ

Le récepteur (doté de plusieurs antennes) analyse les variations de phase du signal à l'aide de l'échantillonnage des **composantes IQ**. Ces variations sont causées par la différence de temps d'arrivée du signal sur les différentes antennes.

2. Calcul de l'angle d'arrivée

En utilisant la différence de phase entre les antennes, on applique la formule :

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{2\pi d} \right)$$

Où, λ est la longueur d'onde du signal CTE, ϕ est la différence de phase entre les antennes, d est la distance entre les antennes

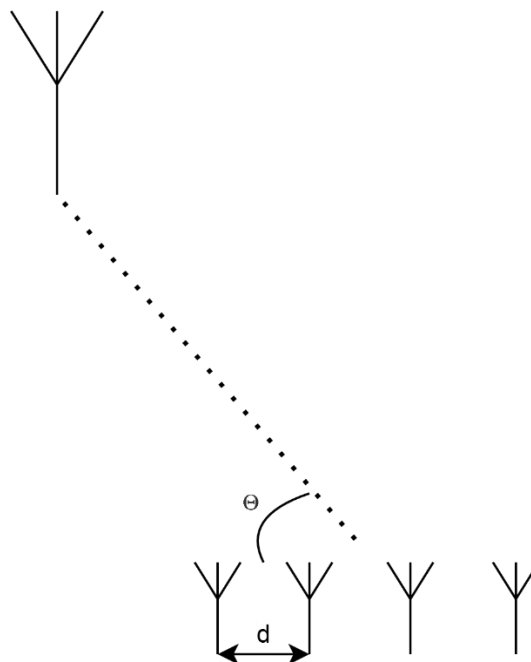


Figure 3 : Schéma de l'angle d'arrivée du signal sur un réseau d'antennes

3. Choix techniques

3.1. Choix matériels

Pour réaliser une détection d'angle d'arrivée (AoA), il est nécessaire d'utiliser un réseau d'antennes réceptrices ainsi qu'une antenne émettrice. De plus, une plateforme matérielle programmable est requise pour émettre un signal Bluetooth contenant un Constant Tone Extension (**CTE**), ainsi qu'une autre plateforme pour piloter le réseau d'antennes et récupérer les trames Bluetooth. PERIPHERAL utilise des processeurs de la famille **Nordic Semiconductor**, et plus particulièrement le **nRF52833**, qui intègre nativement la fonctionnalité de détection d'angle d'arrivée. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser la carte de développement **nRF52833 DK** pour le développement logiciel, d'autant plus qu'elle dispose déjà d'une antenne d'émission et de réception intégrée. Il restait donc à concevoir le réseau d'antennes.



Figure 4 : Carte de développement nRF52833 DK

L'objectif final étant d'intégrer ce réseau d'antennes dans un **casque ARI**, nous avons décidé de concevoir nous-mêmes le circuit imprimé (PCB) du récepteur. Dans un premier temps, nous avons opté pour une disposition simple, avec les antennes alignées linéairement, ce qui n'est pas encore directement intégrable dans un casque mais permet de valider le principe de fonctionnement.

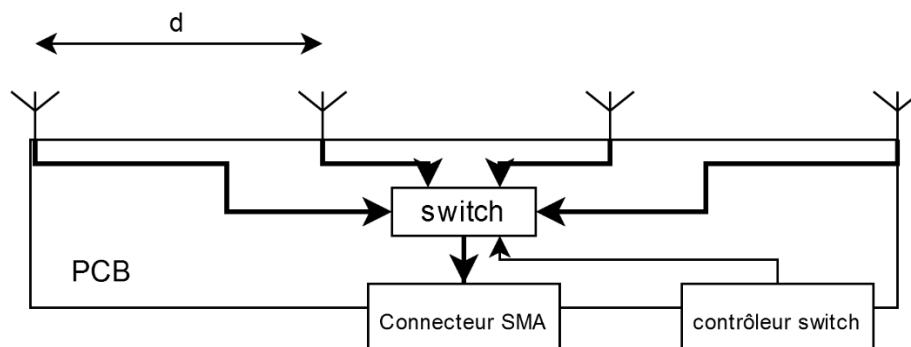
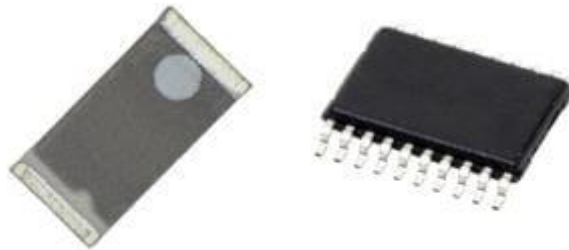


Figure 5 : Schéma du PCB à réaliser

La conception du PCB nécessite le choix de plusieurs composants et paramètres critiques. Tout d'abord, concernant les antennes, la communication Bluetooth fonctionnant à **2,4 GHz**, nous avons sélectionné des antennes adaptées, les [ST0147-00-011-A](#). Ensuite, il est nécessaire d'utiliser un **switch RF** capable de commuter rapidement entre les différentes antennes durant la **switching slot** du CTE, qui peut être aussi court que **1 µs**. Nous avons donc retenu le **commutateur RF** [ADG904BRUZ-REEL7](#), qui présente un **temps de transition maximal de 15 ns** et prend en charge des fréquences allant jusqu'à **2,5 GHz**.



Un autre paramètre clé à déterminer est la distance entre les antennes. En appliquant le théorème de Shannon, on établit que cette distance doit être inférieure ou égale à $\lambda/2$ afin d'éviter les ambiguïtés lors de la mesure de phase. Pour simplifier les calculs liés à la détermination de l'angle, nous avons choisi $d = \lambda/2$. Nous avons également le nombre d'antenne à déterminer. En gardant $d = \lambda/2$ on peut mettre 4 antennes sur une longueur de 20cm ce qui correspond à la largeur du casque ARI et on peut donc détecter au maximum 3 source de signal Bluetooth en théorie. En pratique la méthode choisie ne nous permet d'identifier qu'un émetteur à la fois.

Enfin, pour assurer la connexion entre les antennes et la carte **nRF52833 DK**, nous avons sélectionné un **câble coaxial** [MXHS83QE3000](#), compatible avec le port antenne de la carte. Pour relier ce câble au PCB, nous avons choisi un **connecteur SMA** adapté, le [CONSMA013.062-G](#).



3.2.Choix software

Pour le développement logiciel, nous avons opté pour l'environnement **nRF Connect SDK**, qui repose sur le système d'exploitation **Zephyr OS**. Ce choix s'est imposé naturellement en raison de sa compatibilité avec la carte **nRF52833 DK** et de son support natif pour la fonctionnalité **Angle of Arrival (AoA)** via Bluetooth 5.1. Le **Zephyr OS** offre une gestion

efficace des ressources du microcontrôleur et intègre une pile Bluetooth optimisée pour l'exploitation du **Constant Tone Extension (CTE)**, indispensable pour l'estimation de l'angle d'arrivée du signal.

Nous avons utilisé **Visual Studio Code (VS Code)** comme environnement de développement, couplé avec les extensions **nRF Connect for VS Code** pour faciliter l'intégration avec le SDK Nordic.

4. Conception matérielle

Afin de réaliser la détection de l'angle d'arrivée, nous avons conçu un PCB permettant d'interfacer un réseau d'antennes avec une carte de développement nRF52833 DK. Ce PCB joue un rôle essentiel dans la transmission et la commutation des signaux issus des antennes vers la carte d'acquisition.

La conception du PCB repose sur plusieurs contraintes critiques :

- Adaptation d'impédance pour garantir une transmission optimale des signaux RF.
- Routage des lignes de transmission pour assurer une synchronisation précise entre les antennes.
- Intégration d'un switch RF permettant de commuter rapidement entre les différentes antennes.
- Miniaturisation pour faciliter l'intégration future dans un casque ARI.

4.1. Alimentation et commande du switch

Le switch RF ADG904BRUZ-REEL7 est alimenté en 2,5V, tandis que la carte de développement fournit une tension de 5V. Une conversion de tension a donc été nécessaire. Pour cela, un pont diviseur de tension suivi d'un amplificateur opérationnel (AOP) en montage suiveur a été mis en place afin de garantir une tension stable sans affecter l'impédance d'entrée.

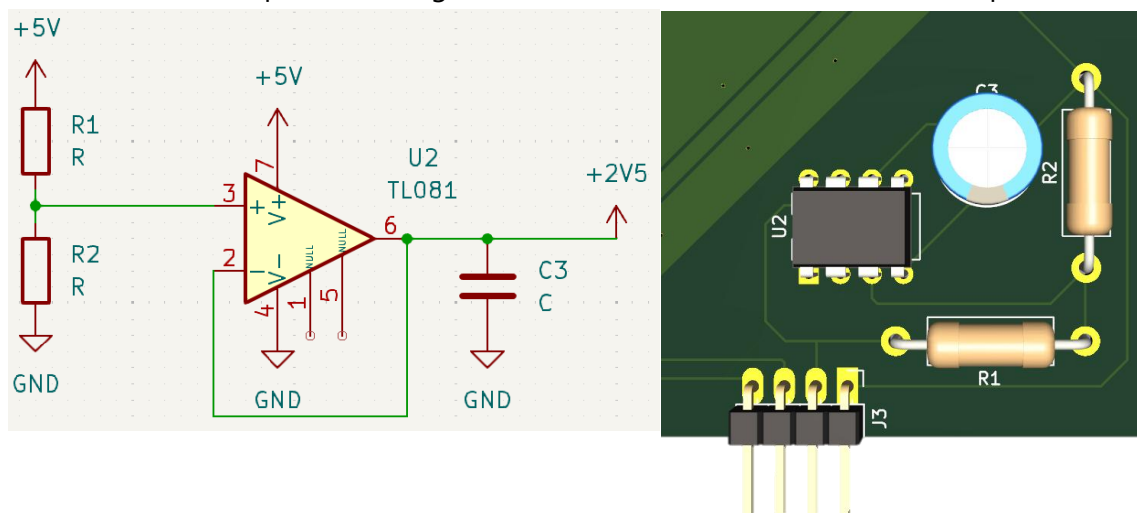


Figure 6 : Alimentation du switch

Les signaux de commande du switch doivent osciller entre 0V et 2,5V, alors que la carte de développement fonctionne sous une logique 0-3,3V. Afin d'ajuster ces niveaux logiques, un pont diviseur de tension a été employé.

A cause d'un oubli lors de la création du PCB, les circuits d'adaptation sont déportés sur une carte de prototypage.

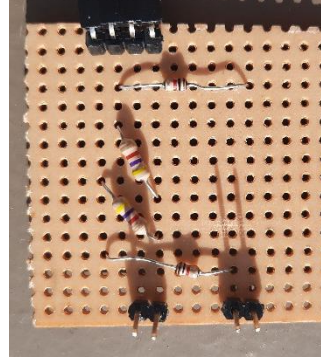


Figure 7 : Circuit de conversion des entrées logiques du switch

4.2. Circuits d'adaptation des antennes

L'efficacité de la réception d'un signal RF repose sur l'adaptation d'impédance entre l'antenne et les circuits associés. L'antenne présente une impédance nominale de 50 Ω , qui doit être maintenue tout au long de la chaîne de transmission pour minimiser les pertes de signal et les réflexions.

Nous avons suivi les recommandations du fabricant en intégrant un circuit d'adaptation d'impédance afin d'optimiser la transmission du signal. Le fait de séparer l'antenne de la ligne de transmission simplifiera également le test du PCB.

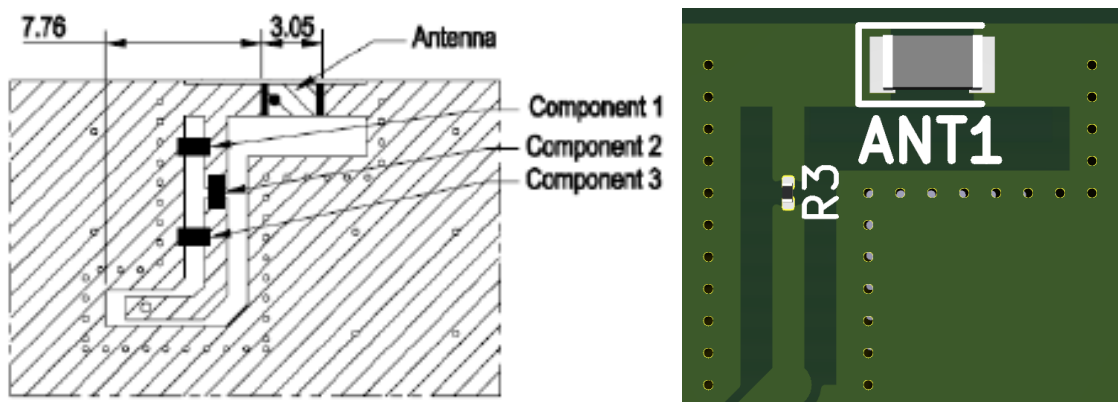


Figure 8 : Circuit d'adaptation de l'antenne

4.3.Lignes de transmission

Les lignes de transmission jouent un rôle crucial dans la préservation de l'intégrité du signal de l'antenne au switch. Pour garantir une bonne adaptation d'impédance et réduire les pertes, plusieurs paramètres ont été pris en compte :

Impédance caractéristique : Chaque ligne a été dimensionnée pour présenter une impédance de $50\ \Omega$, en utilisant le logiciel AppCAD pour calculer la largeur optimale des pistes en fonction de l'épaisseur et de la constante diélectrique du substrat PCB.

Coplanar Waveguide ☒ With Groundplane ☐ No Groundplane

Calculate Z0 [F4]

Diagram labels: L = 113, H = 1.65, εr = 4.6, T = 0.035, W = 1.45, G = 0.3

Dielectric: εr = 4.6
FR-4

Frequency: 2.4 GHz

Length Units: mm

Results:

- Z0 = 50.0 Ω
- Elect Length = 1.506 λ
- Elect Length = 542.1 degrees
- Elect Length = 188.089 mm (Air Line equiv.)
- Delay = 627.397 ps
- 1.0 Wavelength = 75.046 mm
- Vp = 0.601 fraction of c
- εeff = 2.77
- Shape factor = 0.707

Figure 9 : ligne de transmission choisie avec AppCAD

- Synchronisation des signaux :

Le déphasage, donné par la formule $\phi = \frac{2\pi l}{\lambda}$ doit être le même pour chaque ligne. Il faut pour ça que la différence de longueur entre chaque ligne soit un multiple de λ . Par simplicité, on choisit d'avoir des lignes de même longueur.

De plus on choisit une longueur multiple de $\lambda/2$ pour que l'impédance vue au niveau du switch soit l'impédance de l'antenne, même en cas d'erreur sur le circuit d'adaptation de l'antenne ou la ligne de transmission.

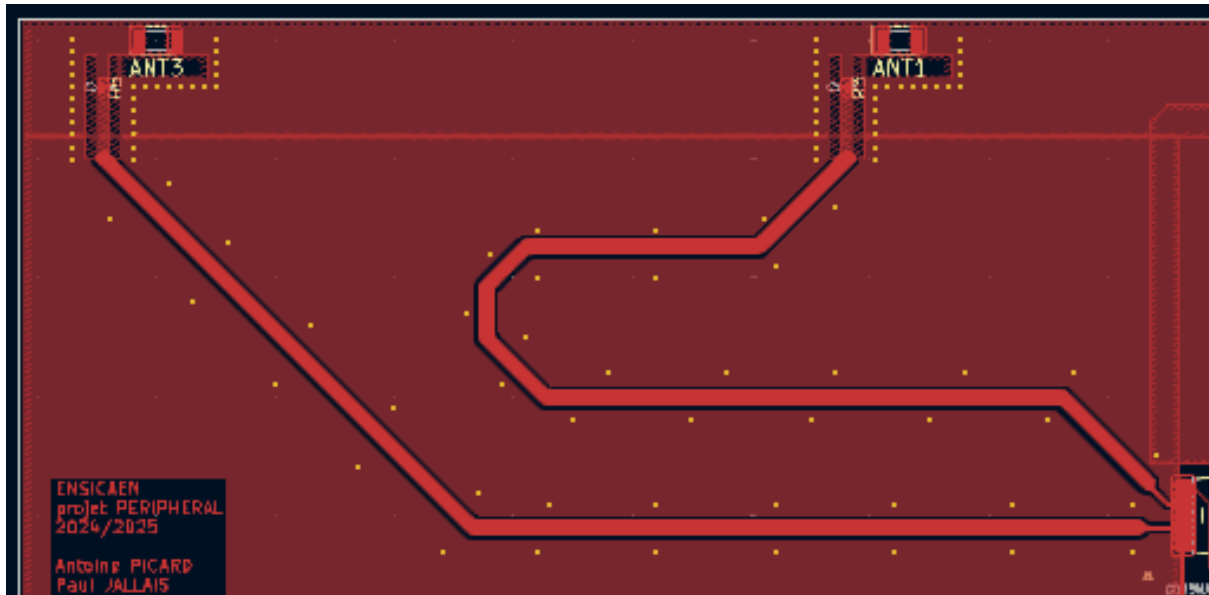


Figure 10 : Routage des lignes de transmission sur le PCB

- Prévention des résonances parasites :

La fréquence de résonance est liée à la longueur de la ligne. Heureusement, on peut augmenter la fréquence de résonance en plaçant des vias à intervalles réguliers. On sait d'après [1] que l'espacement maximal entre les vias est $d = \frac{0.25 \cdot 2 \cdot 10^8}{F_{max}}$, ce qui nous donne une distance entre les vias de 2 cm. On choisit par la suite une distance de 1 cm, ce qui nous donne une marge d'erreur convenable.

Can we calculate the maximum via distance we need?

- Signal speed: 0.66 times the speed of light. $2e8$ m/s
- Wavelength = Signal speed / Signal Frequency

Via distance (mm)	Fres (GHz)	Wavelength (mm)	relative wavelength
87	0.7	286	0.30
43	1.4	143	0.30
22	2.9	69	0.32

- Max via distance: $0.25 \cdot 2e8 / F_{max}$
- Watch out with digital signals: F is 9 times higher due to harmonics! (9 times max digital clock frequency)

Figure 11 : Extrait de la vidéo de Hans Rosenberg

4.4.PCB réalisé

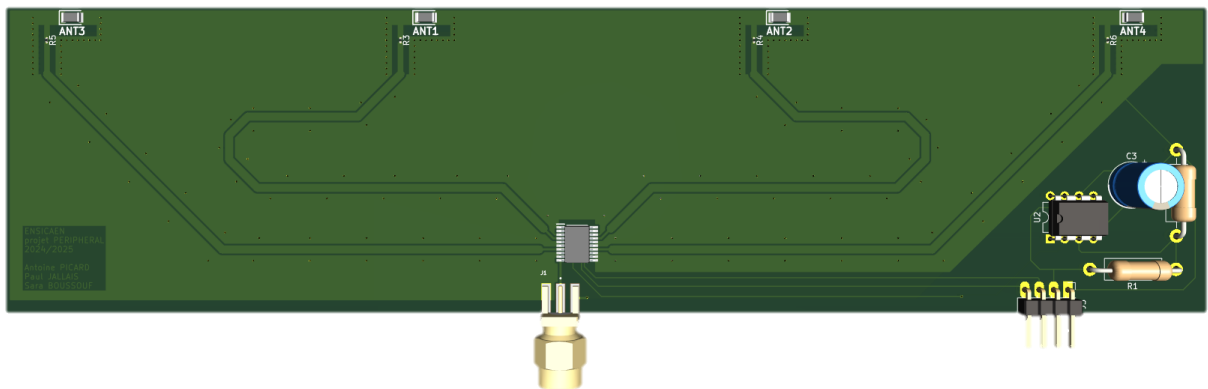


Figure 12 : PCB complet

Finalement, nous avons un PCB capable d'alimenter et de contrôler le switch pour transmettre les signaux reçus par les antennes à la carte de développement.

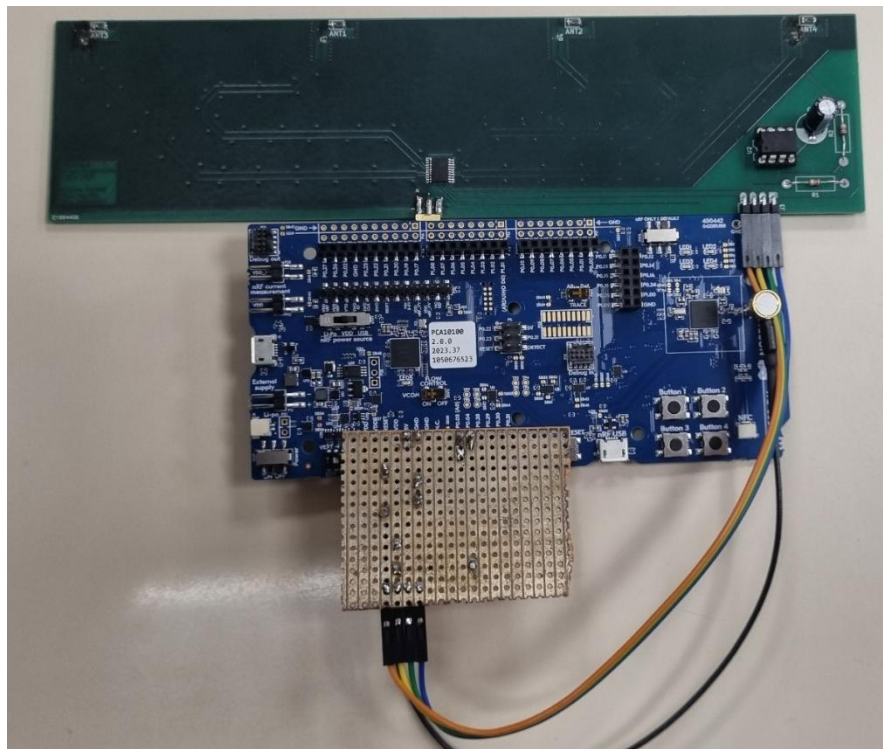


Figure 13 : montage partie réception

5. Implémentation logicielle

Il nous faut donc maintenant deux bases logicielles adaptées au nrf52833dk pour pouvoir émettre des trames Bluetooth et les recevoir

5.1. Code d'émission

Notre code met en place un émetteur Bluetooth Low Energy (BLE) utilisant la publicité périodique et la transmission de signaux directionnels via le Constant Tone Extension (CTE). Il est conçu pour fonctionner avec la pile Bluetooth du Zephyr.

L'initialisation commence par l'activation du Bluetooth avec *bt_enable(NULL)*, permettant l'utilisation de la pile BLE. Ensuite, un ensemble publicitaire est créé avec *bt_le_ext_adv_create()*, en définissant des paramètres comme l'intervalle de publicité rapide (BT_GAP_ADV_FAST_INT_MIN_2 et BT_GAP_ADV_FAST_INT_MAX_2). L'ensemble publicitaire est ensuite configuré via *bt_le_ext_adv_set_data()*, incluant le nom de l'appareil.

L'émission du CTE est configurée avec *bt_df_set_adv_cte_tx_param()*, où plusieurs paramètres sont définis : une durée de signal (*cte_len*), le nombre d'émissions par événement (*cte_count*), ainsi que le mode utilisé (AoA ou AoD). En cas de mode AoD, une séquence de commutation d'antennes est définie pour permettre aux récepteurs de calculer précisément la direction du signal. Une fois ces paramètres appliqués, la fonction *bt_df_adv_cte_tx_enable()* active la transmission du CTE.

La publicité périodique est ensuite paramétrée via *bt_le_per_adv_set_param()*, avec un intervalle de publicité défini par BT_GAP_ADV_SLOW_INT_MIN et BT_GAP_ADV_SLOW_INT_MAX. Une fois cette configuration effectuée, elle est activée avec *bt_le_per_adv_start()*. Enfin, l'ensemble publicitaire étendu est démarré grâce à *bt_le_ext_adv_start()*, ce qui lance effectivement l'émission de l'émetteur BLE.

Un callback *adv_sent_cb()* est mis en place pour suivre les événements d'envoi des trames de publicité. Il permet d'afficher le nombre de messages envoyés et de surveiller le bon fonctionnement du dispositif. Enfin, l'application récupère l'adresse Bluetooth locale via *bt_le_ext_adv_oob_get_local()* et l'affiche, facilitant ainsi l'identification du périphérique.

Ce programme met en œuvre un émetteur BLE avancé, combinant publicité périodique et signaux CTE, permettant aux récepteurs compatibles de se synchroniser et de mesurer précisément l'angle d'arrivée du signal pour des applications de positionnement et de suivi en temps réel.

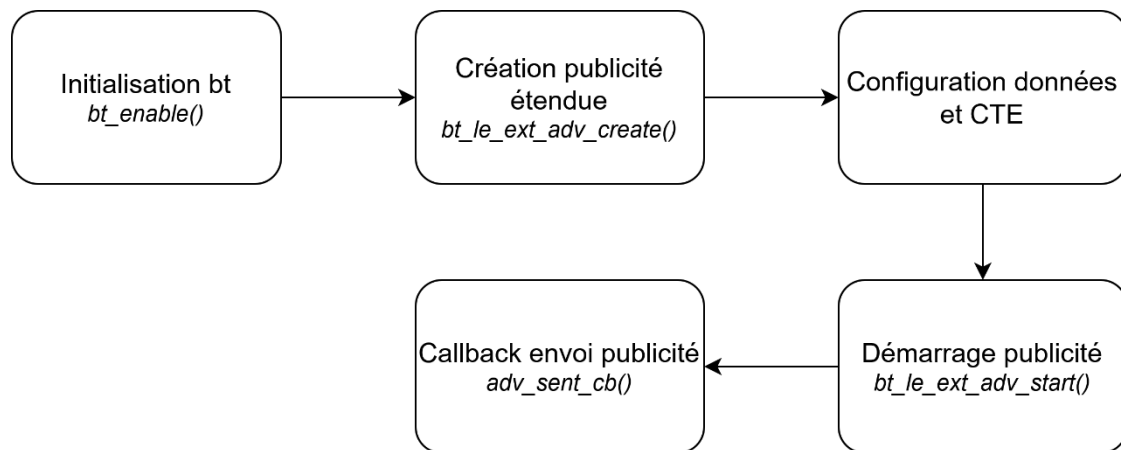


Figure 14 : schéma code d'émission

5.2.Code de réception

Ce code implémente un récepteur AoA (Angle of Arrival) pour traiter les signaux Bluetooth Direction Finding. Il permet d'extraire les informations de phase des signaux **CTE (Constant Tone Extension)** afin d'estimer l'angle d'arrivée (**theta**) d'un signal émis par un périphérique Bluetooth.

L'exécution débute par l'**initialisation du Bluetooth** via la fonction `bt_enable()`, qui active la pile Bluetooth de l'appareil. Une fois cette étape terminée, le **scan des périphériques Bluetooth** à proximité est activé à l'aide de la fonction `scan_enable()`. Cela permet au récepteur de détecter les **annonces publicitaires périodiques** émises par un autre périphérique Bluetooth. Chaque fois qu'un annonceur émet une publicité, la fonction `scan_recv()` est appelée pour analyser ces publicités. Si l'annonceur correspond à un périphérique qui émet des publicités périodiques, des informations comme l'adresse de l'annonceur et son identifiant de publicité (SID) sont extraites.

En parallèle, le code gère les événements liés à la **connexion** et à la **synchronisation** avec l'annonceur Bluetooth. Lorsqu'un périphérique est détecté et que sa publicité périodique est analysée, la synchronisation est initiée par la fonction `create_sync()`, qui utilise l'adresse et l'ID de l'annonceur pour créer une **synchronisation avec l'annonceur périodique** via l'API `bt_le_per_adv_sync_create()`. Cela permet au récepteur de se synchroniser avec le flux de publicité périodique émis par le périphérique.

Une fois la synchronisation réussie, le callback `sync_cb()` est appelé pour confirmer que la synchronisation a été établie avec succès. Cela implique la réception de données publicitaires synchronisées à une fréquence régulière. Le récepteur peut alors commencer à recevoir des **échantillons IQ** (In-phase et Quadrature) des signaux CTE transmis par l'émetteur. En cas de perte de synchronisation, lorsque le récepteur n'arrive plus à se synchroniser au flux de publicité périodique, le callback `term_cb()` est exécuté. Il gère la fin de la synchronisation et relance le processus de détection du périphérique périodique pour établir une nouvelle synchronisation.

Lorsque la synchronisation est établie, le récepteur commence à recevoir des **échantillons IQ** des publicités périodiques. Les **échantillons IQ** sont des données complexes qui représentent les composantes en phase et en quadrature des signaux reçus. Ces échantillons sont capturés et stockés par le récepteur dans des structures dédiées. Le callback `cte_recv_cb()` est utilisé pour traiter ces échantillons et les analyser afin de calculer l'angle d'arrivée θ du signal.

Pour recevoir le signal de chaque antenne de manière indépendante, un **switch RF** est utilisé, contrôlé par deux **GPIO** : **P0.3 et P0.4**. Chaque antenne est numérotée de **0 à 3** et leur sélection s'effectue en binaire selon le tableau suivant :

Antenne	Sélection binaire
0	00
1	01
2	10
3	11

Le **GPIO P0.3** correspond au **bit de poids faible**, tandis que **P0.4** représente le **bit de poids fort**. Ainsi, pour sélectionner l'antenne **N°3**, les GPIO **P0.3 et P0.4** doivent être mis à **1**.

En plus de la sélection des antennes, il est nécessaire de définir **l'ordre de commutation des antennes**, c'est-à-dire l'antenne qui récupérera en premier le **PDU** du signal et la séquence de commutation utilisée par le récepteur pour analyser la phase du signal Bluetooth. Dans notre cas, nous avons choisi le schéma d'antenne suivant : **{2, 0, 1, 3}**, ce qui signifie que la réception commencera sur l'antenne **2**, puis passera successivement aux antennes **0, 1 et 3**.

Les échantillons IQ reçus sont constitués de **composantes I (In-phase) et Q (Quadrature)**, et la phase est extraite en utilisant la fonction `atan2(Q, I)`, qui permet de calculer l'angle de phase du signal reçu. L'angle de phase permet de déterminer la différence de phase entre les signaux reçus par différentes antennes du récepteur.

Pour estimer l'**angle d'arrivée (AoA)** du signal, le code utilise plusieurs antennes pour capturer les signaux, puis calcule la différence de phase entre les antennes. Cette différence de phase, notée $\Delta\phi$, est ensuite utilisée dans la formule :

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\lambda * \Delta\phi}{2\pi d} \right)$$

Où λ est la longueur d'onde, d est la distance entre les antennes, et $\Delta\phi$ est la différence de phase entre les antennes.

Le calcul de θ repose sur l'estimation des différences de phase entre les signaux capturés par les antennes. La longueur d'onde est calculée à partir de la fréquence f du signal Bluetooth (2,4 GHz dans ce cas) selon la relation :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Où c : la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s). La distance entre les antennes (d) est estimée en fonction de la configuration de l'antenne, et les différences de phase sont utilisées pour calculer θ à l'aide de la fonction inverse du sinus (arcsin).

Enfin, le programme prend en compte l'**optimisation de la réception des CTE** en activant un récepteur spécifique pour ce type de signal via `enable_cte_rx()`. Cette fonction configure les paramètres du récepteur pour gérer différents types de **CTE (Constant Tone Extension)**, comme AOA (Angle of Arrival), AOD (Angle of Departure), et autres configurations de durée de slots pour adapter les besoins du récepteur aux conditions de signal.

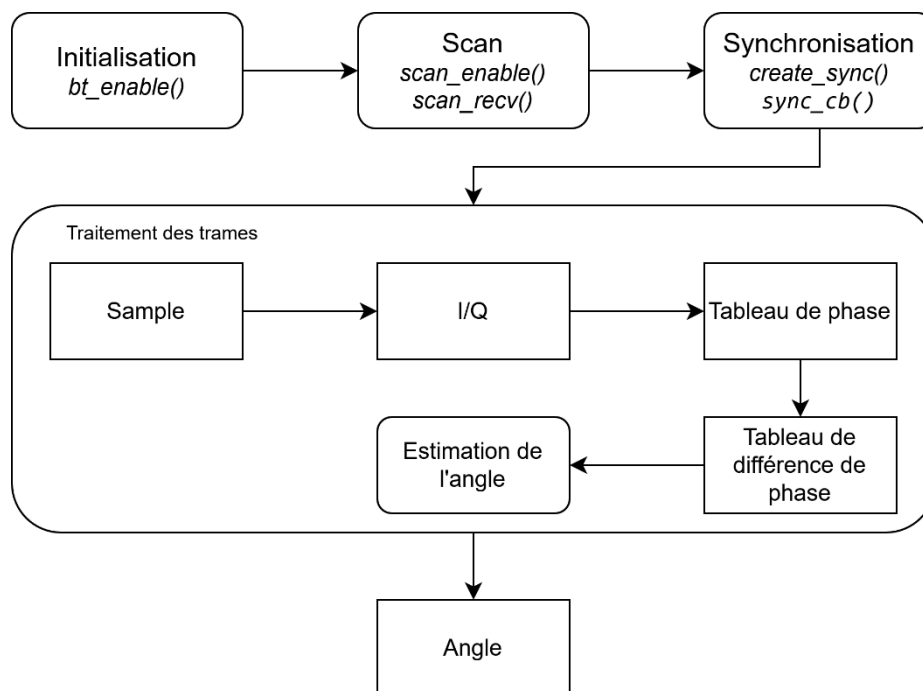


Figure 15 : schéma réception

6. Expérimentations et résultats

6.1. Test d'émission de trames et de réceptions

Nous avons réalisé un test d'émission et de réception de trames Bluetooth afin de valider la bonne synchronisation du récepteur avec l'émetteur.

```
Starting Connectionless Locator Demo
Bluetooth initialization...success
Scan callbacks register...success.
Periodic Advertising callbacks register...success.
Start scanning...success
Waiting for periodic advertising...
success. Found periodic advertising.
Creating Periodic Advertising Sync...success.
Waiting for periodic sync...
PER_ADV_SYNC[0]: [DEVICE]: 05:EF:B3:42:6F:6A (random) synced, Interval 0x0780 (2400 ms), PHY LE 2M
PER_ADV_SYNC[0]: [DEVICE]: 05:EF:B3:42:6F:6A (random), tx_power 127, RSSI -48, CTE AOA, data length 0, data:
success. Periodic sync established.
Enable receiving of CTE...
success. CTE receive enabled.
Scan disable...Success.
Waiting for periodic sync lost...
PER_ADV_SYNC[0]: [DEVICE]: 05:EF:B3:42:6F:6A (random), tx_power 127, RSSI -57, CTE AOA, data length 0, data:
CTE[0]: samples count 45, cte type AOA, slot durations: 2 [us], packet status CRC OK, RSSI -570
[DEVICE]: 31:DC:05:38:03:F2 (random), AD evt type 5, Tx Pwr: 127, RSSI -56 DF Connectionless Beacon App C:0 S:0 D:0 SR:0 E:1 Prim: LE 1M, Se
cn: LE 2M, Interval: 0x0780 (2400 ms), SID: 0
```

Figure 16 :Résultats du test d'émission et de réception des trames Bluetooth

L'image ci-dessus présente les logs obtenus lors du test de transmission et de réception des trames Bluetooth intégrant une extension de tonalité constante (CTE). L'initiation du Bluetooth, la configuration des callbacks et le démarrage de la publicité périodique ont été effectués avec succès. Le dispositif a détecté et synchronisé une trame périodique avec un émetteur distant, comme indiqué par les messages de synchronisation (**PER_ADV_SYNC[0]**). On observe également que le récepteur a bien établi la synchronisation et a reçu des trames contenant le **CTE**, ce qui est essentiel pour l'estimation de l'angle d'arrivée (AoA). Les informations affichées incluent des données telles que la puissance du signal reçu (**RSSI**), le type de CTE et la durée des slots.

Ces résultats confirment que la réception et la synchronisation des trames fonctionnent correctement.

6.2. Test du switch et du fonctionnement de chaque antenne

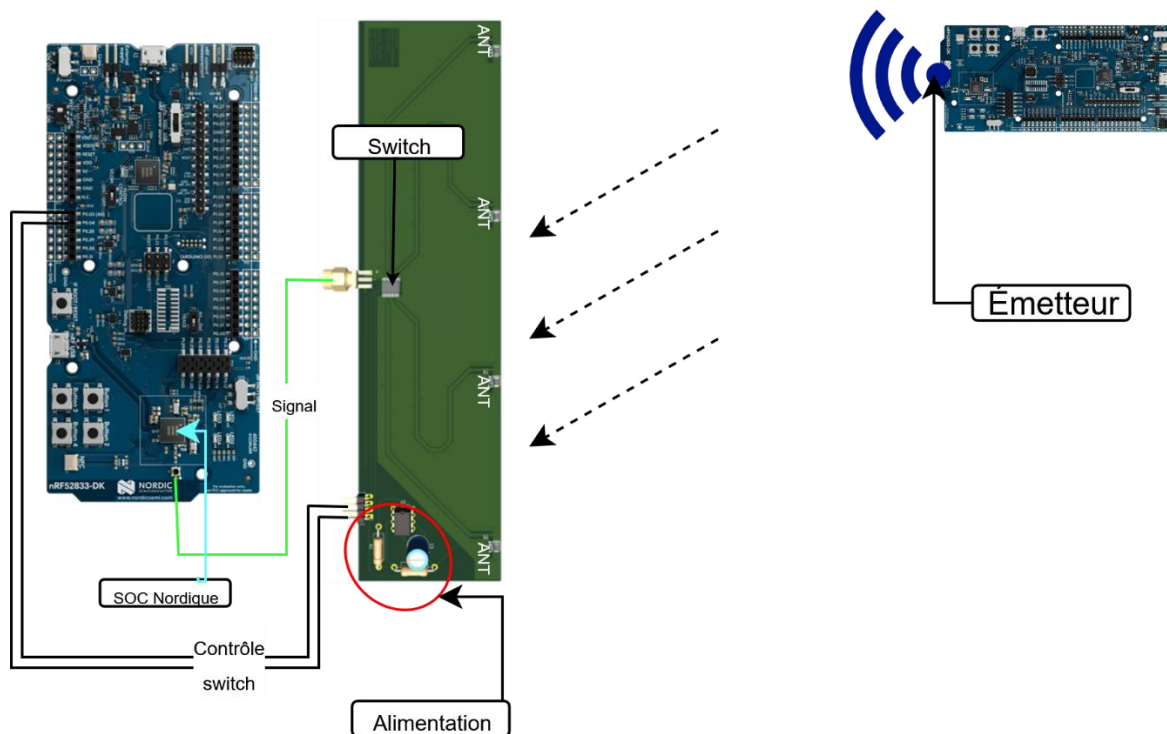


Figure 1717 : Schéma de fonctionnement du système

Pour vérifier le bon fonctionnement individuel de chaque antenne, nous avons développé un programme permettant d'activer les **GPIO P0.3 et P0.4** en fonction de l'appui sur les boutons **Switch 1 et Switch 2**. Simultanément, les **LED 1 et LED 2** s'allumaient en fonction de l'état des GPIO, permettant ainsi de générer manuellement le code binaire correspondant à l'antenne souhaitée

Ce test a confirmé que chaque antenne pouvait être activée indépendamment et que le **switch RF** fonctionnait correctement, assurant une commutation fiable entre les différentes antennes.

6.3. Test de détection d'angle d'arrivée

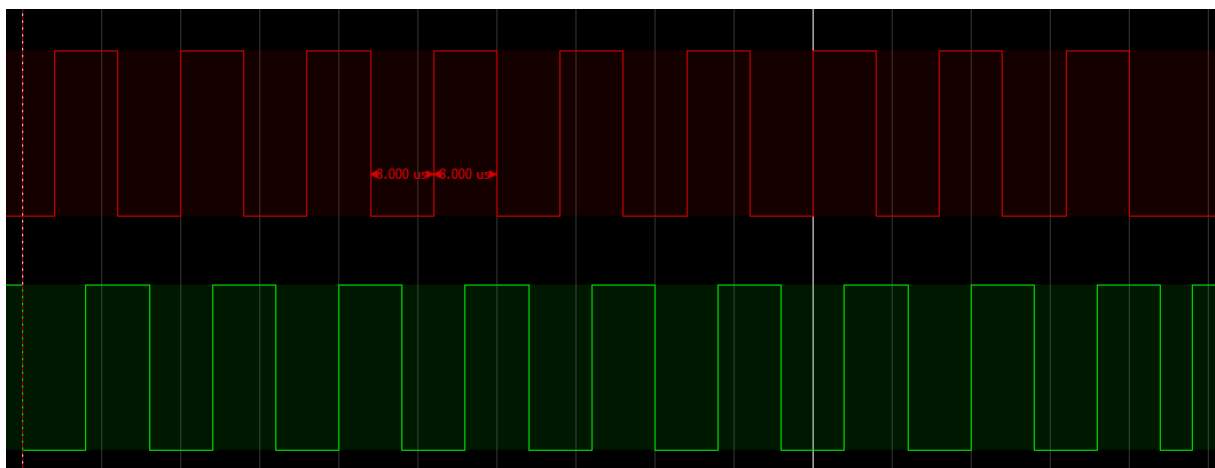


Figure 18 : Acquisition des signaux de commutation des antennes

On a récupéré le signal sorti de P0.3 (en rouge) et P0.4 (en vert). En traduisant les signaux en binaire on obtient :

P0.4	P0.3	N° antenne
1	0	2
0	0	0
0	1	1
1	1	3

Ce qui correspond au schéma d'antenne {2 0 1 3} définit précédemment on remarque aussi que chaque symbole est envoyé pendant une durée de 4 μ s, 2 μ s pour le changement d'antenne et 2 μ s pour la détection de la phase.

7. Conclusion et perspectives

D'un point de vue matériel, nous avons identifié les composants essentiels à la conception du réseau d'antennes de réception et défini les contraintes à respecter pour la réalisation du PCB. Le bon fonctionnement du circuit imprimé conçu selon ces principes a été validé.

Sur le plan logiciel, nous avons développé des applications permettant d'émettre des trames Bluetooth contenant un CTE et de traiter la réception des signaux afin d'extraire les phases du signal capté par chaque antenne.

Cependant, malgré ces avancées, l'exploitation des phases pour le calcul de l'angle d'arrivée n'a pas abouti aux résultats escomptés. Ce travail ouvre néanmoins la voie à des améliorations futures, notamment en optimisant l'algorithme de traitement du signal et en affinant la conception du réseau d'antennes pour accroître la précision de la localisation.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : masque ARI	3
Figure 2 : trame CTE	5
Figure 3 : Schéma de l'angle d'arrivée du signal sur un réseau d'antennes	5
Figure 4 : Carte de développement nRF52833 DK	6
Figure 5 : Schéma du PCB à réaliser	6
Figure 6 : Alimentation du switch	9
Figure 7 : Circuit de conversion des entrées logiques du switch	10
Figure 8 : Circuit d'adaptation de l'antenne	10
Figure 9 : ligne de transmission choisie avec AppCAD	11
Figure 10 : Routage des lignes de transmission sur le PCB	12
Figure 11 : Extrait de la vidéo de Hans Rosenberg	12
Figure 12 : PCB complet	13
Figure 13 : montage partie réception	13
Figure 14 : schéma code d'émission	15
Figure 15 : schéma réception v1.0	17
Figure 16 : Résultats du test d'émission et de réception des trames Bluetooth	18
Figure : Schéma de fonctionnement du système	19

REFERENCES

- [1 H. Rosenberg, «Avoid this floating ground problem. Flawless PCB design - Part 4,» 5 Août 2024. [En ligne]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=vumYreblXm0>. [Accès le 4 février 2025].
]
- [2 Texas Instruments, «Application Note : Bluetooth® Angle of Arrival (AoA) Antenna Design,» 2023. [En ligne]. Available:
] https://www.ti.com/lit/an/tida029a/tida029a.pdf?ts=1728484171620&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Accès le 5 Février 2025].

Résumé

Ce projet vise à développer une solution de détection de l'angle d'arrivée (AoA) basée sur Bluetooth 5.1 pour la localisation en environnements confinés. Nous utilisons une carte nRF52833 DK et un réseau d'antennes relié via un PCB personnalisé avec un commutateur RF. L'implémentation logicielle sous Zephyr OS permet l'émission et la réception des trames Bluetooth et l'extraction des données IQ pour estimer l'angle d'arrivée. Les tests ont validé les choix matériels et logiciels, mais des améliorations sont nécessaires pour obtenir une mesure d'angle.

Mots Clés : Bluetooth 5.1, Angle d'arrivée (AoA), nRF52833, Antennes, PCB, Localisation.

Summary

This project focuses on developing an Angle of Arrival (AoA) detection system using Bluetooth 5.1 for indoor localization. We employ an nRF52833 DK board with a custom PCB and an RF switch to interface a multi-antenna array. The software implementation on Zephyr OS enables Bluetooth frame transmission and reception, as well as IQ data extraction for angle estimation. Tests have validated the hardware and software choices, but further improvements are needed to obtain angle measurements.

Keywords : Bluetooth 5.1, Angle of Arrival (AoA), nRF52833, Antennas, PCB, Localization.



Ecole Publique d'Ingénieurs en 3 ans

6 boulevard Maréchal Juin, CS 45053
14050 CAEN cedex 04

