



ECOLE
POLYTECHNIQUE
DE BRUXELLES

ELEC-H311 Rapport de Projet: Simulation d'un radar FMCW

Lucas Placentino
Salman Houdaibi

Cours:
ELEC-H311 — François Horlin

Année académique:
2023-2024

Table des matières

Introduction	1
1 FMCW Signal	3
1.1 Objectifs	3
1.2 Résultats	3
2 Radar Processing	6
2.1 Objectifs	6
2.2 Résultats	6
3 Radar Performance Analysis	9
3.1 Objectifs	9
3.2 Résultats	9
Visite imec	13
Conclusion	15
Bibliographie	16

Introduction

Des recherches sont actuellement en cours concernant l'utilisation simultanée d'une antenne de communication existante pour un radar, et vice versa. Cela permettrait une utilisation plus efficace des ressources spectrales et des infrastructures, tout en offrant des avantages en termes de coût, d'espace et de complexité du système. Cette approche innovante a le potentiel de révolutionner les applications dans des domaines variés, tels que l'automobile, la maison connectée, la surveillance aérienne et maritime, et les communications mobiles en milieu public.

Ce projet vise initialement à simuler un tel système conjoint de communication et de radar. Cependant, pour cette itération 2023-2024 du projet, c'est uniquement la partie radar qui sera réalisée. La partie communication ayant été remplacée par une visite dans les laboratoires de télécommunications de l'**imec** afin d'avoir un aperçu de leurs recherches dans le domaine. Un court rapport de visite composé de réponses à des questions sur cette visite est placé en fin de document.

Simulation d'un radar FMCW

Un radar FMCW (Frequency-Modulated Continuous-Wave) est un système radar sophistiqué qui utilise la modulation en fréquence afin de déterminer la distance et la vitesse des objets cibles. Ce type de radar se distingue par sa capacité à mesurer avec une certaine précision de petites distances et vitesses. La simulation d'un radar FMCW dans ce projet implique l'analyse détaillée des signaux radar en termes de leur spectre de fréquence, leur puissance et leur phase, et comment ces caractéristiques varient en réponse à une ou plusieurs cibles en mouvement dans l'environnement du radar. Cette simulation est utile pour comprendre le fonctionnement du radar dans des scénarios réels et pour optimiser sa conception et ses performances.

Implémentation

L'implémentation du projet a été faite en Python. Tout le code se trouve dans notre repository Github, accessible via ce lien :

<https://github.com/LucasPlacentino/FMCW-PSK-JCR/blob/main/src/>

Step 1

FMCW Signal

1.1 Objectifs

Implémentations

- Générer la fréquence instantanée $f_i(t)$ en fonction du temps sur une durée d'un seul chirp
- Générer le signal FMCW correspondant en bande de base $e^{j\phi(t)}$;
- Calculer la transformée de Fourier du signal et en déduire la largeur de bande.

Résultats attendus

- Illustrer le chirp dans le domaine temporel (partie réelle) et dans le domaine fréquentiel (module) ;
- Discuter de l'impact de la durée du chirp sur la largeur de bande.

1.2 Résultats

Création du signal FMCW

Pour créer notre chirp, nous avons une équation qui décrit la croissance de la fréquence f_i en fonction du temps. L'équation $f_i = \beta t$, avec $\beta = BT$ et $B = 200$ MHz. Pour un range de $T = [100; 400]\mu s$, le β vaut donc 10^{12} . Ceci est représenté dans le graphe Figure [1.1].

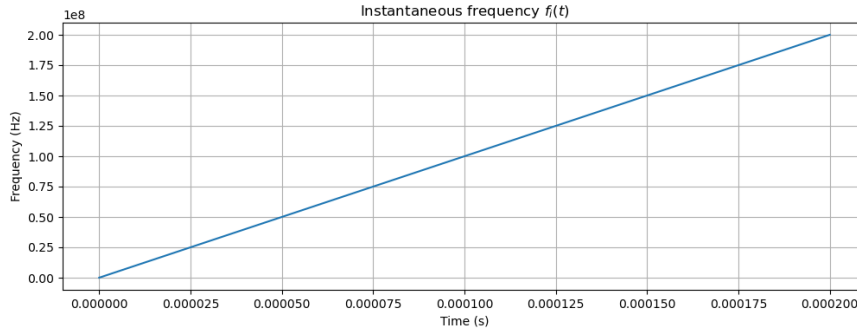


FIGURE 1.1 – Fréquence instantanée du chirp en fonction du temps.

La forme du signal modulé en fréquence $s(t)$ est obtenue en utilisant l'équation $s(t) = \cos(2\pi f_c t + \phi_i(t))$, où f_c est la fréquence porteuse de 24 GHz et $\phi_i(t)$ est la phase instantanée, qui vaut pour notre cas spécifique¹, $\phi_i(t) = \pi\beta t^2$. Nous avons le signal représenté en bande de base $\tilde{s}(t) = e^{j\phi(t)}$ dans la Figure [1.2].

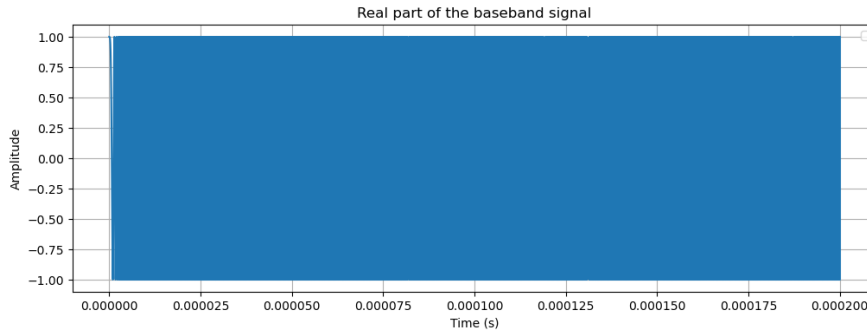


FIGURE 1.2 – Partie réelle du signal modulé en bande de base

On voit sur la figure 1.2 qu'il est difficile de discerner convenablement la forme du signal. Ce qui est normal compte tenu de la phase instantanée qui augmente très fortement par rapport à notre plage de temps. Nous pouvons néanmoins observer la forme du signal sur les premières 10 μ s sur le graphe Figure [1.3].

1. Voir énoncé pour plus de précisions sur comment obtenir ce résultat.

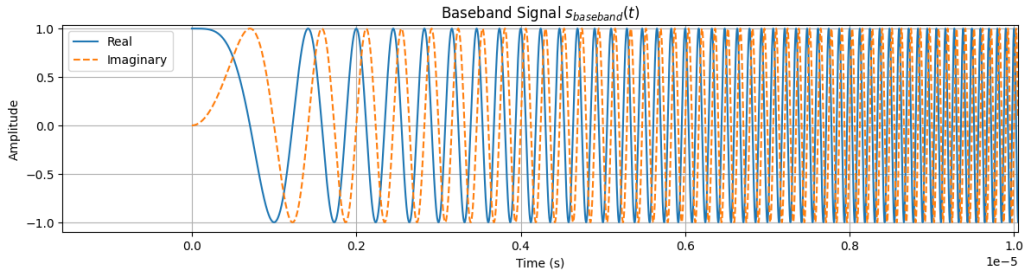


FIGURE 1.3 – Signal modulé en bande de base, zoomé sur les 10 premières μs^2

La FFT (*Fast Fourier Transform*) de ce signal modulé (seulement la partie réelle) se trouve Figure [1.4].

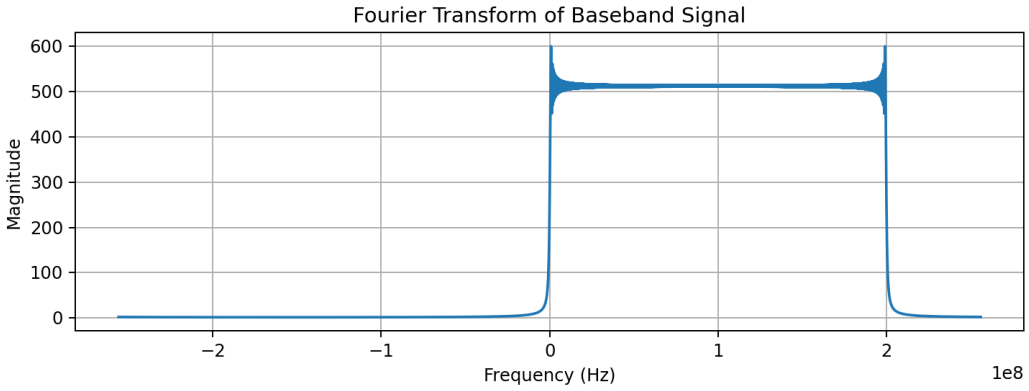


FIGURE 1.4 – FFT du signal modulé

La durée du chirp influence la bande passante de notre signal. En effet, la règle de Carlson [Hor23a] nous dit :

$$B_T = 2\Delta f \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad \text{où} \quad \beta = \frac{\Delta f}{T} \quad (1.1)$$

Où Δf est l'excursion de fréquence, soit 200MHz dans notre cas, β est la pente et T est la durée du chirp, soit $B_T = 2\Delta f + 2T$.

Nous voyons donc que plus elle est longue, plus la bande passante B_T est importante (mais négligeable face à l'excursion de fréquence). Dans notre cas, elle vaut environ 400MHz.

2. Permet de plus facilement visualiser l'augmentation en fréquence du signal que le graphe Figure [1.2].

Step 2

Radar Processing

2.1 Objectifs

Implémentations

- Réaliser le signal pour K chirps ;
- Simuler l'impact d'une seule (et plusieurs) cible(s) sur le signal FMCW ;
- Mixer le signal de la cible avec le signal envoyé ;
- Échantillonnage à une fréquence F_s ;
- Conversion série vers parallèle du signal par chirps ;
- FFT sur les dimensions temporelles rapide et lente.

Résultats attendus

- Une RDM pour une et plusieurs cibles ;
- Les résolutions de distance et de fréquence de Doppler ;
- Discussion sur l'importance des paramètres du radar pour le scénario considéré.

2.2 Résultats

En utilisant le modèle simplifié (valide pour les paramètres de notre radar) du radar FMCW [Hor23b], le signal produit par les cibles peut se modéliser par :

$$x^*(t) = \kappa e^{j2\pi f_B t'} e^{j2\pi f_D k T} \quad (2.1)$$

Où κ est un facteur complexe, f_B est la fréquence de battement, f_D est la fréquence de Doppler, $k = 0, \dots, (K - 1)$ est le chirp, et T la durée du chirp. Nous concaténons ce signal à chaque chirp k .

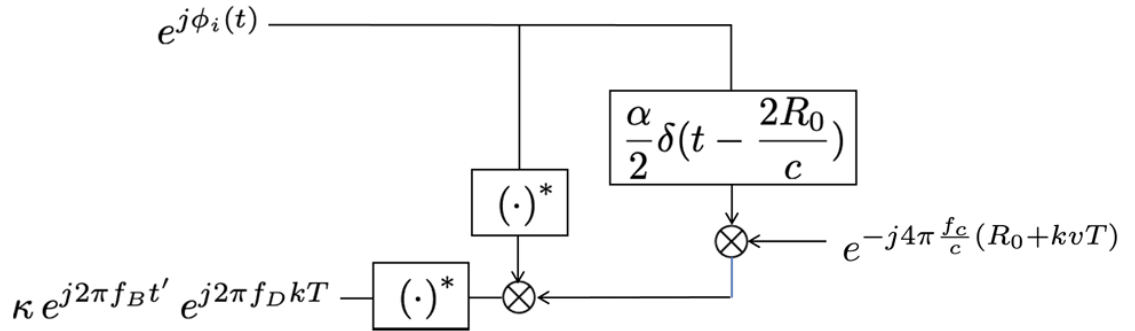


FIGURE 2.1 – Mixage du signal de la cible avec le signal transmis [Hor23b]

Ce signal est ensuite échantillonné ainsi que converti de série à parallèle. On y applique ensuite une FFT sur les colonnes de notre matrice, puis sur les lignes. Ceci nous donne alors la RDM qui, une fois convertie en image, nous donne la Figure [2.2] pour 4 cibles.

Nous obtenons une résolution de distance de 0.75m et une résolution de Doppler d'environ 19.53Hz.

- La gamme de fréquences B détermine directement la résolution de distance, de manière inversement proportionnelle. Dans notre cas, elle est fixée à 200MHz.
- La durée du chirp détermine directement la résolution de la fréquence Doppler, de manière inversement proportionnelle. Dans notre cas, elle est fixée entre 0.1 et 0.4 ms.
- Le nombre de chirps détermine directement la résolution de la fréquence Doppler, de manière inversement proportionnelle. Dans notre cas, il est limité à 256.

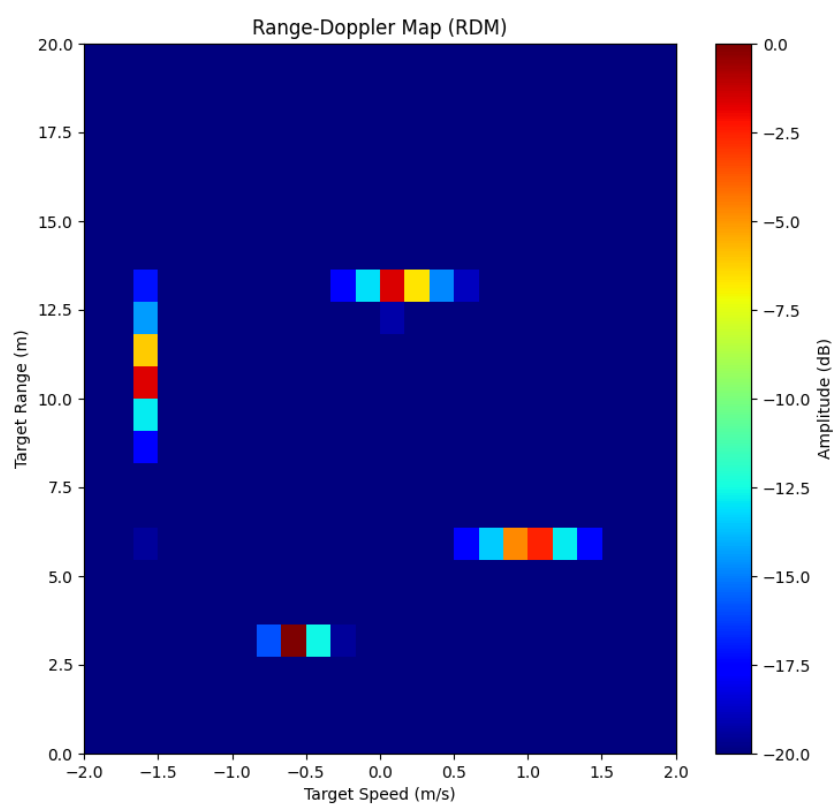


FIGURE 2.2 – Range-Doppler Map pour 4 cibles générées aléatoirement

Step 3

Radar Performance Analysis

3.1 Objectifs

Implémentations

- Ajouter de l'*Additive White Gaussian Noise* (AWGN, bruit blanc additif Gaussien) au signal reçu ;
- Comparer les RDM avec et sans bruit ;
- Trouver la probabilité de fausse alarme et de non-détection selon un seuil pour différentes valeurs de *Signal-to-Noise Ratio* (SNR, ratio signal-bruit) ;
- Visualiser la *Receiver Operating Curve* (ROC, courbe de fonctionnement du récepteur).

Résultats attendus

- Comparaison des RDM avec et sans bruit ;
- Des courbes ROC pour différentes valeurs de SNR ;
- Discussion sur le choix de valeurs de SNR.

3.2 Résultats

La simulation demande lors de l'exécution un SNR voulu par l'utilisateur, celui-ci est utilisé pour générer un AWGN, qui est ensuite simplement ajouté au signal¹. Nous pouvons observer la différence d'un signal reçu avec et sans bruit Figure [3.1] pour deux valeurs de SNR différentes (8dB et -8dB). Traîté comme

1. Utilisons comme simplification que le bruit est simplement ajouté au signal au receveur.

au Step 2, ceci nous génère alors une RDM (pour 5 cibles) visible Figure [3.2] pour un SNR de 18dB, et Figure [3.3] pour un SNR de -8 dB.

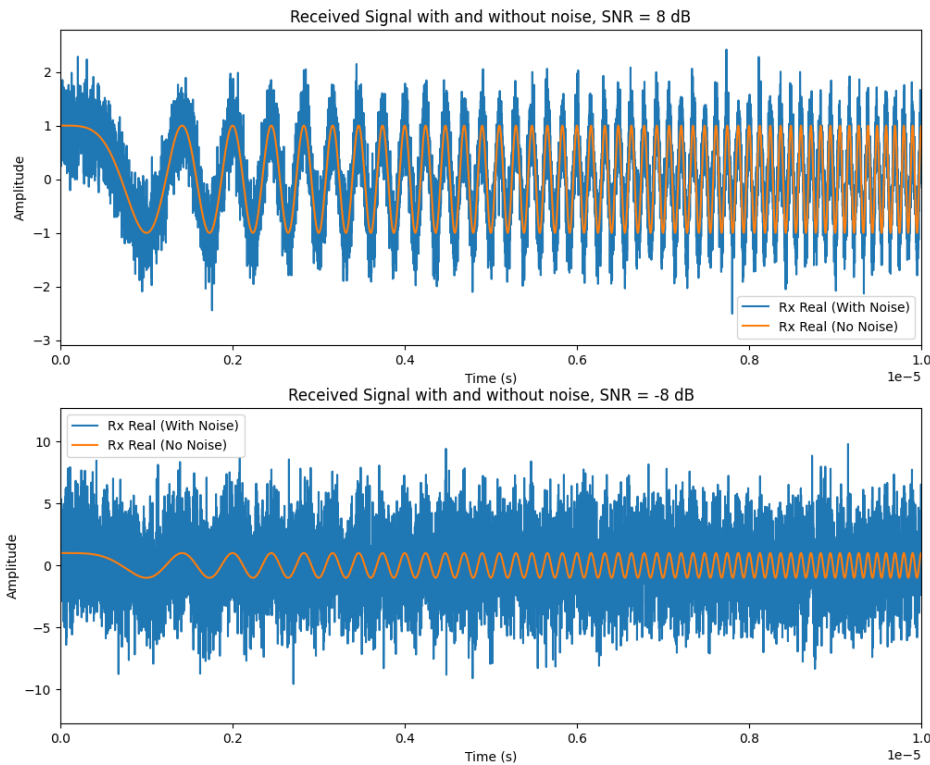


FIGURE 3.1 – Signal reçu avec et sans bruit, zoomé sur les premières $10 \mu\text{s}$.²

Les courbes ROC sont visibles Figure [3.4]. Nous pouvons remarquer que plus le SNR augmente, moins les probabilités de fausse alarme et non-détection sont hautes. On peut également voir que pour un même SNR, plus la probabilité de fausse alarme diminue, plus la probabilité de non-détection augmente, et inversement.

Le "choix" de la valeur de SNR a pour but d'optimiser la courbe ROC, c'est-à-dire à obtenir la probabilité de non-détection la plus faible possible pour la probabilité de fausse alarme la plus faible possible, ce qui, selon l'application du radar, signifie avoir un SNR le plus élevé possible.

En réalité, il faudrait éliminer le bruit autant que possible et augmenter la puissance du signal pour obtenir un SNR élevé.

². Zoomé afin de visualiser plus facilement la montée en fréquence et la différence entre les deux signaux

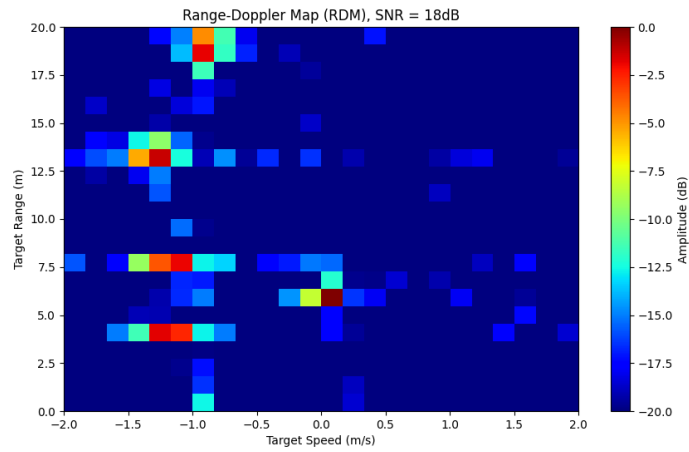


FIGURE 3.2 – RDM avec bruit (SNR=18dB) pour 5 cibles générées aléatoirement

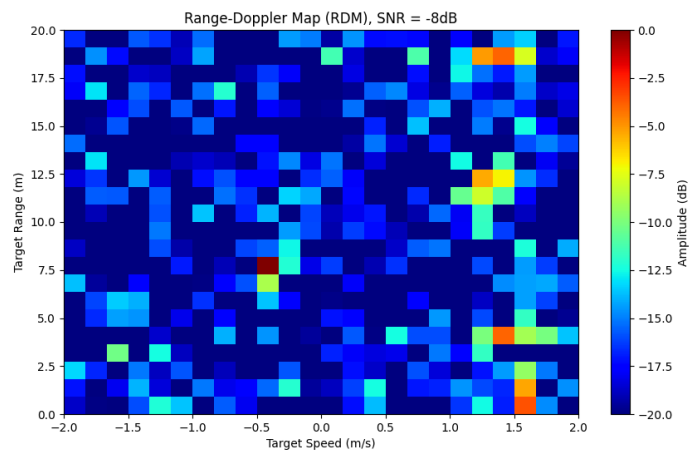


FIGURE 3.3 – RDM avec bruit (SNR=-8dB) pour 5 cibles générées aléatoirement

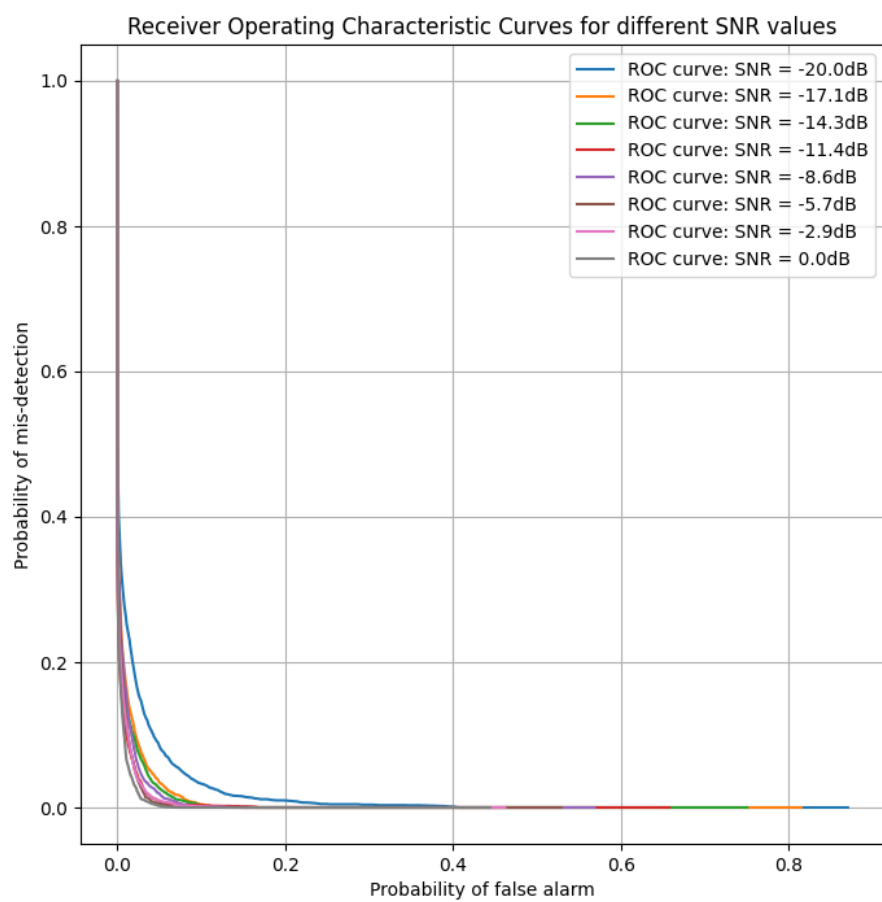


FIGURE 3.4 – ROC pour différentes valeurs de SNR

Visite *imec*

La visite de l'**imec** a été une belle opportunité pour nous permettre de découvrir la recherche qui s'y tient, particulièrement au département *Advanced RF Group*, dans le sujet des radars, et d'avoir plus de détails concernant les FMCW. Notamment l'importance non seulement du SNR mais aussi des spécificités de l'ADC dans les performances du radar. Nous devions, durant la visite, récolter des informations et répondre aux quatre questions qui suivent.

Quels sont les paramètres des radars mis en oeuvre (fréquence, bande passante, durée des chirps...) en fonction de l'application visée ?

Le choix des paramètres des radars FMCW est crucial pour optimiser leur performance. Pour les applications automobiles, la fréquence porteuse est entre 77 et 81 GHz, permettant de détecter de petits objets à distance. La bande passante varie (de 150 MHz à plusieurs GHz) affectant la résolution en distance. La durée des chirps est ajustée pour équilibrer résolution en vitesse et portée. Ces paramètres sont optimisés pour la sécurité routière.

Les radars de 2 à 4GHz sont utilisés pour le trafic aérien. Avec des longueurs d'onde de 7,5 à 15 cm, ils détectent efficacement les véhicules volants, configurés pour identifier clairement vitesse et position des aéronefs.

Dans la météorologie, les radars de 8 à 12GHz sont choisis pour leur capacité à détecter précisément les précipitations. Des longueurs d'onde de 2,5 à 3,75 cm distinguent bien les gouttes de pluie ou flocons de neige. Ils utilisent une large bande passante pour une haute résolution spatiale et des chirps courts pour distinguer différents types de précipitations.

Les radars utilisent un réseau d'antennes afin d'estimer la direction des cibles (en plus de la distance et de la vitesse). Est-ce que l'estimation des angles d'arrivée des signaux est réalisée avec une troisième FFT et pourquoi ?

L'estimation des angles d'arrivée des signaux est effectivement réalisée à l'aide d'une troisième transformée de Fourier rapide (FFT). Cette technique, connue

sous le nom de beamforming, exploite la différence de phase du signal reçu par chaque élément d'antenne pour déterminer la direction d'arrivée. La FFT permet de transformer ces informations de phase en données fréquentielles, d'où l'on peut déduire l'angle d'arrivée grâce à la relation entre la fréquence spatiale et l'angle d'incidence. Cette étape est cruciale pour les applications où la localisation précise des objets est requise, comme pour les radars automobiles et les systèmes de surveillance aérienne.

Dans quelle mesure le modèle mathématique du radar mis en oeuvre dans votre projet est correct ? Quelles sont les différences principales avec un hardware réel ?

Notre modèle mathématique simplifie certaines complexités inhérentes à un système radar réel. Bien que nous considérions le bruit comme uniquement gaussien et affectant le signal reçu, en réalité, le bruit peut aussi influencer le signal émis et se composer de diverses sources, telles que les interférences électromagnétiques ambiantes dues à des signaux Wi-Fi. De plus, notre modèle ne prend pas en compte la non-linéarité des composants électroniques, les effets de quantification de l'ADC, ni les artefacts spécifiques comme le *ghosting* ou des *sidelobes*, qui peuvent significativement altérer la qualité du signal radar dans des environnements réels.

Que permettent les radars actuels ? Quelle est l'évolution envisagée par l'imec ?

Les radars actuels sont capables de réaliser des mesures précises de la distance, de la vitesse et de la direction des objets. Ils sont utilisés dans une variété d'applications allant de l'automobile à la surveillance aérienne. L'**imec**, dans sa vision future, envisage d'intégrer les fonctionnalités radar dans les réseaux de communications cellulaires. Cette intégration permettrait de réaliser une analyse de foule en milieu urbain en utilisant l'infrastructure existante, ce qui réduirait les coûts et simplifierait le déploiement de systèmes de surveillance urbaine intelligents. En outre, l'**imec** explore le développement de technologies radar à onde millimétrique (*mmWave*) pour des applications nécessitant une haute résolution et une intégration sur des puces électroniques, ouvrant ainsi la voie à des radars plus compacts et moins coûteux.

Conclusion

À l'issue de ce projet, nous avons acquis une compréhension plus approfondie des radars à modulation de fréquence continue (FMCW). L'étude théorique a éclairé les principes fondamentaux desdits radars. Ensuite, la conception et la simulation ont permis d'explorer pratiquement ces concepts. Les résultats obtenus ont souligné la précision et l'efficacité de ces radars, tout en révélant certains défis spécifiques liés au traitement du signal et au bruit.

Ensuite, la visite à **imec** nous a offert une perspective plus "industrielle/recherche", mettant en lumière les applications actuelles et potentielles.

Ce projet a non seulement renforcé notre compréhension théorique, mais a également souligné l'importance de la recherche continue pour améliorer les technologies radar dans diverses applications pratiques.

Bibliographie

- [Cha23a] Qasim CHAUDHARI. *FMCW Radar Part 1 - Ranging*. 2023. URL : <https://wirelesspi.com/fmcw-radar-part-1-ranging/> (visité le 12/11/2023).
- [Cha23b] Qasim CHAUDHARI. *FMCW Radar Part 2 - Velocity, Angle and Radar Data Cube*. 2023. URL : <https://wirelesspi.com/fmcw-radar-part-2-velocity-angle-and-radar-data-cube/> (visité le 04/12/2023).
- [Cha23c] Qasim CHAUDHARI. *FMCW Radar Part 3 - Design Guidelines*. 2023. URL : <https://wirelesspi.com/fmcw-radar-part-3-design-guidelines/> (visité le 04/12/2023).
- [Hor23a] Francois HORLIN. "ELEC-H311 - Signaux et systèmes de télécommunications". <https://uv.ulb.ac.be/course/view.php?id=116698>. 2023.
- [Hor23b] Francois HORLIN. "FMCW Radar principles and mathematical model". <https://uv.ulb.ac.be/course/view.php?id=116698>. 2023.