www.onera.fr

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Synthèse de formes d'onde Radar et communications par réseau MIMO

Référence : **PHY-DEMR-2024-18**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 10/2024	**Date limite de candidature :** 03/2024

Mots clés

Radar – MIMO – optimisation – Communication

Profil et compétences recherchées

Grande école d'ingénieur ou Master 2 avec excellent dossier. Bonnes connaissances en traitement du signal, connaissances en optimisation, des connaissances en radar seraient un plus.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Le radar MIMO (Multiple Input Multiple Output) cohérent colocalisé est une technique d'émission récente de signal radar à partir d'un réseau d'antennes : contrairement à un réseau phasé classique pour lequel toutes les antennes du réseau émettent la même forme d'onde, le radar MIMO émet des formes d'onde différentes avec les différentes antennes du réseau. Selon les formes d'onde employées, il est alors possible de générer une très grande variété de diagrammes d'émission adaptés à des problématiques et des applications différentes.

Cette thèse a pour objectif de proposer des algorithmes d'optimisation de formes d'ondes d'un radar Multiple Input Multiple Output, s'inscrivant dans un cadre applicatif radar multifonctions. Plus précisément, les formes d'ondes devront à terme permettre d'assurer deux fonctions simultanées : le radar (détection de cibles, pistage), et la communication (transmission d'information). On parle alors de système Dual-Function Radar and Communication (DFRC).

Parmi les méthodes de DFRC existantes, le MIMO permet de synthétiser des formes d'ondes souhaitées dans un certain nombre de directions, permettant ainsi d'assurer les fonctions correspondantes dans ces directions.

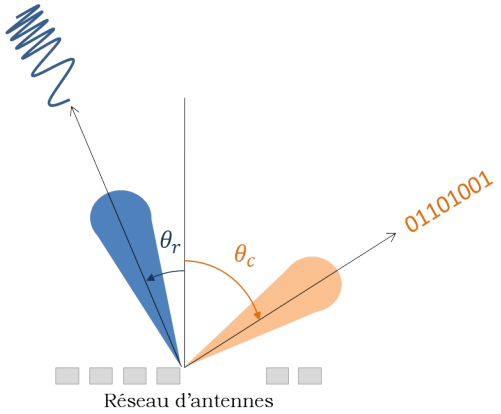

Figure 1 : Système MIMO DFRC. Les formes d'ondes se recombinent en un signal radar dans la direction θ_r, et un signal de communication dans la direction θ_c.

La littérature sur le sujet est cependant laconique sur la robustesse des signaux, notamment lorsqu'un écart angulaire est présent. Or, il est assez peu probable que les cibles d'intérêt soient localisées exactement dans les directions envisagées. De fait, les formes d'ondes peuvent alors présenter des écarts avec celles initialement prévues, conduisant alors à une dégradation potentiellement importante des performances

attendues. En particulier, pour le radar, les lobes secondaires ainsi que le gain de compression se retrouvent détériorés. Similairement, les formes d'ondes de communication deviennent plus difficiles à décoder.

On s'intéressera donc dans cette thèse à la synthèse de formes d'onde particulières par radar MIMO cohérent colocalisé, en prenant en compte en particulier un besoin important de robustesse des formes d'onde synthétisées.

Le premier objectif de la thèse sera de faire un état de l'art des méthodes d'optimisation existantes dans la littérature pour synthétiser les formes d'onde radar MIMO dans le cadre particulier DFRC, et de proposer une ou plusieurs méthodes permettant cette optimisation. En particulier, on pourra utiliser, améliorer et accélérer des méthodes de type MM (Majoration Minimisation), visant à remplacer des fonctions compliquées à optimiser par des fonctions plus simples, et présentant de bonnes propriétés pour l'optimisation (par exemple, la convexité). Il conviendra par ailleurs d'étudier et de quantifier les erreurs commises, en fonction de l'angle, des formes d'ondes, et du nombre d'émetteurs. En particulier, le type de formes d'ondes à sélectionner pour un décodage optimal en communication peut être impactant - certaines constellations / modulations pourront se révéler plus robustes aux erreurs – et il sera donc intéressant d'étudier la sensibilité aux erreurs en fonction du type de modulation considéré.

Le deuxième objectif de la thèse portera sur les traitements appliqués à la réception : on étudiera les algorithmes qui peuvent permettre de corriger les erreurs causées par les décalages angulaires, en se basant sur certaines connaissances a priori du système émetteur (constellation, nombre d'émetteurs).

La robustesse des signaux vis-à-vis des multi-trajets pourra également être étudiée. En effet, dans un environnement urbain, plusieurs échos, plus ou moins retardés, d'un signal plus ou moins dégradé par un écart angulaire, vont se recombiner. Il conviendra donc d'étudier cet effet, et de proposer des méthodes permettant une réception correcte du signal en communication, ou un traitement approprié pour la détection en radar.

[1] F. Liu, C. Masouros, A. P. Petropulu, H. Griffiths and L. Hanzo, "Joint Radar and Communication Design: Applications, State-of-the-Art, and the Road Ahead," in IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 6, pp. 3834-3862, June 2020.

[2] P. M. McCormick, S. D. Blunt and J. G. Metcalf, "Simultaneous radar and communications emissions from a common aperture, Part I: Theory," 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, WA, USA, 2017, pp. 1685-1690.

[3] X. Liu, T. Huang, N. Shlezinger, Y. Liu, J. Zhou and Y. C. Eldar, "Joint Transmit Beamforming for Multiuser MIMO Communications and MIMO Radar," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 68, pp. 3929-3944, 2020.

[4] L. Liu, X. Liang, Y. Li, Y. Liu, X. Bu, and M. Wang, "A Spatial–Temporal Joint Radar-Communication Waveform Design Method with Low Sidelobe Level of Beampattern," Remote Sensing, vol. 15, no. 4, p. 1167, Feb. 2023.

Collaborations envisagées

Laboratoire d'accueil à l'ONERA	**Directeur de thèse**
Département : Electromagnétisme et radar	Nom : Breloy Arnaud
Lieu (centre ONERA) : Palaiseau	Laboratoire : CNAM-CEDRIC
Contact : Abigael Taylor, Olivier Rabaste	Tél. :
Tél. : +33 1 80 38 63 14 Email : abigael.taylor@onera.fr ; olivier.rabaste@onera.fr	Email : arnaud.breloy@lecnam.net

Pour plus d'informations : https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche

NOTA :

La proposition de sujet de thèse est destinée à être publiée et doit être rédigée à destination des candidats. Eviter les acronymes et le jargon technique. Mettre en avant les compétences qui seront acquises au cours de la thèse.

La motivation de la proposition de sujet et les compléments à destination de la DSG sont à renseigner ci-dessous.

Le sujet doit impérativement être validé par le département du proposant et diffusé à la DSG par l'intermédiaire de l'Adjoint Scientifique.

PARTIE DESTINEE EXCLUSIVEMENT A LA DSG

Les rubriques suivantes doivent être dûment renseignées :

1. Domaine et thématique scientifique, défi et feuille de route adressés

Domaine scientifique principal (MAS / MFE / PHY / SNA / TIS) : PHY

Thématique scientifique principale (liste ici) : TSRGE

Défi du PSS (liste ici) : 10

Feuille(s) de route (liste ici) : 5.2, 6.3

2. Objet de la thèse

La thèse a pour objet de proposer et évaluer des algorithmes d'optimisation de formes d'ondes, afin de réaliser un système MIMO (Multiple Input Multiple Output) multifonctions, à savoir Radar et communications.

3. Descriptif de la thèse

a. Quels sont les problèmes qui se posent ?

Les formes d'ondes se basent sur une combinaison linéaire de formes d'ondes unitaires, dont les poids complexes dépendent de l'angle. Les signaux souhaités sont en général définis pour un angle d'intérêt précis, et toute déviation par rapport à cette angle entraînera des modifications de la forme d'onde synthétisée. La robustesse des formes d'ondes vis-à-vis de ces écarts angulaires doit donc être étudiée.

Les limites théoriques de ce type d'approche n'ont pas encore été établies.

Les algorithmes doivent être accélérés, pour tendre vers un système capable de générer en temps réel des signaux de communications.

b. Quel est l'état de l'art ?

De nombreux algorithmes existent déjà pour l'optimisation du problème de base, à savoir la synthèse de formes d'ondes précises dans des directions particulières [1] [2]. L'étude de la robustesse des formes d'ondes proposées n'en est qu'à ses prémices ; notamment, l'impact d'une erreur/d'un écart d'angle sur les formes d'ondes synthétisées n'a été que peu étudiée [3] [4]. En particulier, la question du décodage de la forme d'onde de communication, s'il y a un décalage angulaire, n'a pas été traitée. La rapidité des algorithmes n'a à notre connaissance pas été étudiée, de même que les limites théoriques de l'approche.

c. Quels sont les objectifs généraux et les perspectives au-delà de la thèse proprement dite ?

Les systèmes réalisant conjointement les fonctions Radar et Communications constituent un axe de recherche d'intérêt pour résoudre les problèmes d'encombrement du spectre électromagnétique.

Les approches MIMO, compte-tenu des rapides variations des formes d'ondes avec l'angle, pourrait être une approche d'intérêt dans le cadre de communications discrètes, difficiles à intercepter.

4. Programme de la thèse

a. Quelles sont les questions scientifiques traitées ?

Quelles sont les limitations théoriques sur la qualité des formes d'ondes obtenues, pour un réseau d'antenne donné ? Le choix des formes d'ondes impacte-t-il la difficulté du problème d'optimisation à résoudre ?

Comment contrôler l'énergie des formes d'onde émise ?

Comment accélérer les méthodes existantes pour envisager une application concrète de communications, où l'information à transmettre change au cours du temps ?

Peut-on décoder un signal intercepté si l'on est positionné avec un petit écart angulaire par rapport au récepteur visé ?

L'emploi d'un réseau non régulier peut-il permettre d'améliorer la robustesse des formes d'onde dans certaines directions de l'espace ?

b. Quelles sont les approches scientifiques proposées : point de départ des travaux, démarches envisagées, moyens mis en œuvre ou expérimentations prévues ?

Concernant l'accélération des codes, les approches Majoration-Minimization pourraient être un point de départ, ces méthodes étant relativement rapides et permettant de simplifier des problèmes d'optimisation complexes. Un découpage en sous-problèmes pourrait aussi accélérer les algorithmes, selon le type de formes d'onde considérées notamment pour la mission de communication.

Concernant le décodage d'un système intercepté, un récepteur multivoies sera considéré. A partir de ces mesures, une position de l'émetteur pourra être estimée. Il faudra alors tenter, à partir de ces informations, de reconstruire la forme d'onde transmise vers la direction de l'émetteur ciblé. On pourra s'appuyer sur une connaissance préexistante du type de modulation employé pour la transmission de l'information et de la constellation utilisée pour la communication.

Une expérimentation sur le Radar HYCAM pourra, en fonction de l'avancement des travaux, être réalisée.

c. Programme prévu

Le début de la thèse consistera à prendre en main la problématique Radar+Communications MIMO, en réalisant une bibliographie sur les algorithmes existants, ainsi que les algorithmes Majoration-Minimization.

Ces derniers pourront alors être utilisés pour proposer un premier algorithme accéléré d'optimisation de formes d'ondes. Cet algorithme devra alors être évalué, notamment sur la qualité des formes d'ondes générées.

Une simulation considérant un émetteur, des cibles radar, et plusieurs récepteurs communication pourra alors être réalisée, pour évaluer la pertinence de l'approche en détection radar, ainsi qu'en transmission de communication.

Ces premiers éléments devraient permettre une bonne compréhension des limites d'un système, et alimenter une réflexion sur la quantification théorique de ces limites, notamment en terme de qualité des formes d'onde émise selon les directions visées.

Suivant l'avancement de la thèse, le problème d'interception du signal pourra être étudié, en se basant sur des simulations.

d. Résultats attendus

Cette thèse devrait permettre d'accélérer les méthodes déjà proposées d'optimisation de formes d'ondes, d'établir les limites théoriques de synthèse, et d'étudier la problématique de reconstruction d'un signal intercepté inconnu.

5. Références

1 BIBLIOGRAPHIE

[1] P. M. McCormick, "Spatially Diverse Dual-Fonction Radar-Communications with Reduced Self-Interference," *IEEE Radar Conference*, 2022.

[2] F. Liu et al., "Toward Dual-Fonctionnal Radar-Communications Systems: Optimal Waveform Design," *IEEE Transactions on signal processing*, 2018.

[3] Abigael Taylor and Olivier Rabaste, "Let it GUWO: Waveform optimization for angular blanking and robustification in a MIMO Dual-Fonctional Radar-Communication system," *IEEE Transactions on Radar Systems*, 2024.

[4] L. Liu et al., "A Spatial–Temporal Joint Radar-Communication Waveform Design Method with Low Sidelobe Level of Beampattern," *Remote Sensing*, 2023.

6. Compléments

a. Personnes participant à l'encadrement en plus des (co)directeur(s) de thèse

Abigael Taylor, Olivier Rabaste.

b. Liens avec des projets de recherche et/ou avec d'autres thèses menées à l'ONERA

Le sujet découle des travaux réalisés dans le PR NEW WAVE, et s'appuie sur l'expertise MIMO de l'unité MATS.

c. Verrous scientifiques ou techniques, risques potentiels

Les principaux verrous concernent la robustesse des formes d'onde générées, et l'accélération des méthodes d'optimisation considérées.

d. Objectif de valorisation des travaux
Pour les deux premières années de thèse, des articles de conférence pourront être soumis. La troisième année devrait mener à la publication d'un article de revue.

7. Financement envisagé

Cocher dans la colonne de droite

Type de bourse	
ONERA	☒
DGA	☒
CNES	☐
Région	☐
CIFRE (préciser ci-dessous le financeur et éventuellement le candidat envisagé)	☐
Contrat doctoral (préciser ci-dessous le % de financement extérieur attendu)	☐
Autre (préciser ci-dessous le financeur et le % de financement extérieur attendu)	☐

Précisions sur le financement :

Candidat éventuel :