

UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE 422 :
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION, DES TÉLÉCOMMUNICATIONS ET
DES SYSTÈMES

ONERA — *The French Aerospace Lab*
L2S — Laboratoire des Signaux et Systèmes (CentraleSupélec–CNRS–Univ. Paris-Sud)

THÈSE DE DOCTORAT

GÉNIE INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

par

Mathieu CATTENOZ

Traitements Radar MIMO pour Prévenir et Pallier les Défauts du Monde Réel

Date de soutenance : 27 mai 2015

Composition du jury :

Rapporteurs :

Philippe FORSTER
Xavier NEYT

Professeur (Univ. Paris-Ouest et SATIE, ENS Cachan)
Professeur (Ecole royale militaire, Bruxelles)

Examineurs :

François LE CHEVALIER
Josef WORMS
Pascal CHEVALIER
Sylvie MARCOS
Laurent SAVY

Professeur (Université technologique de Delft et Thales)
Mathématicien (FHR, Fraunhofer-Gesellschaft)
Professeur et Expert (CNAM et Thales-Communications-Security)
Directrice de thèse, Directrice de recherche (L2S)
Encadrant de thèse, Ingénieur (ONERA)

Invités :

Chin Yuan CHONG
Erwan COMTE
Philippe BROUARD
Laurent CONSTANCIAS

Chercheuse (DSO National Laboratories, Singapore)
Responsable ingénierie radar (Direction Générale de l'Armement)
Encadrant de thèse, Ingénieur (ONERA)
Encadrant de thèse, Ingénieur (ONERA)

Contents

| | |
|---|------------|
| Abstract (English) | iii |
| Résumé (français) | v |
| Résumé long (français) | 1 |
| Contexte et Problématique de la Thèse | 1 |
| Les Codes de Phase Comme Formes d'Onde : Motivations et Défis | 3 |
| Développement de Traitements Supprimant les Lobes Secondaires Résiduels | 7 |
| Écarts au Modèle : Analyse d'Impact et Stratégies de Prévention | 12 |
| Evaluation des Traitements sur les Signaux Expérimentaux | 14 |
| Conclusions | 18 |
| Bibliography | 23 |
| Publications & Communications | 25 |

Abstract

The MIMO radar concept promises numerous advantages compared to today's radar architectures: flexibility for the transmitting beampattern design – including wide scene illumination and fine resolution after processing – and system complexity reduction, through the use of less antennas and the possibility to transfer system control and calibration to the digital domain. However, the MIMO radar is still at the stage of theoretical concept, with insufficient consideration for the impacts of waveforms' lack of orthogonality and system hardware imperfections.

The ambition of this thesis is to contribute to paving the way to the operational MIMO radar. In this perspective, this thesis work consists in anticipating and compensating the imperfections of the real world with processing techniques. The first part deals with MIMO waveform design and we show that phase code waveforms are optimal in terms of spatial resolution. We also exhibit their limits in terms of sidelobes appearance at matched filter output. The second part consists in taking on the waveform intrinsic imperfections and proposing data-dependent processing schemes for the rejection of the induced residual sidelobes. We develop an extension for the Orthogonal Matching Pursuit (OMP) that satisfies operational requirements, especially localization error robustness, low computation complexity, and nonnecessity of training data. The third part deals with processing robustness to signal model mismatch, especially how it can be prevented or anticipated to avoid performance degradation. In particular, we propose a digital method of transmitter phase calibration. The last part consists in carrying out experiments in real conditions with the Hycam MIMO radar testbed. We exhibit that some unanticipated encountered distortions, even when limited at the matched filter output, can greatly impact the performance in detection of the data-dependent processing methods.

Keywords: MIMO radar, MIMO waveform, sidelobe mitigation, data-dependent processing, OMP, IAA, model mismatch, MIMO experiment.

Résumé

Le concept du radar MIMO est prometteur en raison des nombreux avantages qu'il apporte par rapport aux architectures radars actuelles : flexibilité pour la formation de faisceau à l'émission — large illumination de la scène et résolution fine après traitement — et allègement de la complexité des systèmes, via la réduction du nombre d'antennes et la possibilité de transférer des fonctions de contrôle et d'étalonnage du système dans le domaine numérique. Cependant, le radar MIMO reste au stade du concept théorique, avec une prise en compte insuffisante des impacts du manque d'orthogonalité des formes d'onde et des défauts matériels.

Ce travail de thèse, dans son ambition de contribuer à ouvrir la voie vers le radar MIMO opérationnel, consiste à anticiper et compenser les défauts du monde réel par des traitements numériques. La première partie traite de l'élaboration des formes d'onde MIMO. Nous montrons que les codes de phase sont optimaux en termes de résolution spatiale. Nous présentons également leurs limites en termes d'apparition de lobes secondaires en sortie de filtre adapté. La seconde partie consiste à accepter les défauts intrinsèques des formes d'onde et proposer des traitements adaptés au modèle de signal permettant d'éliminer les lobes secondaires résiduels induits. Nous développons une extension de l'Orthogonal Matching Pursuit (OMP) qui satisfait les conditions opérationnelles, notamment par sa robustesse aux erreurs de localisation, sa faible complexité calculatoire et la non nécessité de données d'apprentissage. La troisième partie traite de la robustesse des traitements vis-à-vis des écarts au modèle de signal, et particulièrement la prévention et l'anticipation de ces phénomènes afin d'éviter des dégradations de performance. En particulier, nous proposons une méthode numérique d'étalonnage des phases des émetteurs. La dernière partie consiste à mener des expérimentations en conditions réelles avec la plateforme radar MIMO Hycam. Nous montrons que certaines distorsions subies non anticipées, même limitées en sortie de filtre adapté, peuvent impacter fortement les performances en détection des traitements dépendant du modèle de signal.

Mots-clés : radar MIMO, forme d'onde MIMO, réduction des lobes secondaires, traitement dépendant du modèle de signal, OMP, IAA, écart au modèle, expérimentation MIMO.

Résumé long : Traitements Radar MIMO pour Prévenir et Pallier les Défauts du Monde Réel

Nous proposons ici de donner une version courte en français de la thèse (rédigée initialement en anglais). L'objectif est plus de donner les principaux résultats et contributions de la thèse que d'entrer en profondeur dans les développements analytiques.

Contexte et Problématique de la Thèse

La notion de MIMO (multiple-input multiple-output) fait référence à l'utilisation de plusieurs sites d'émission et de réception. Le concept est appliqué initialement dans le domaine des télécommunications. La transposition au domaine du radar est plus récente, les premiers travaux datant de la fin des années 80 [1].

Contrairement aux radars actuels, le radar MIMO permet l'émission de différentes formes d'onde sur chaque élément d'antenne, de façon simultanée, ce que l'on nomme codage spatio-temporel en émission. Un filtre adapté est appliqué en réception pour chaque forme d'onde et la formation de faisceau est ainsi effectuée par le calcul à la réception. On distingue le radar MIMO statistique où les émetteurs sont distants afin de bénéficier de la diversité spatiale, du radar MIMO cohérent où les émetteurs sont disposés sur le même site afin de pouvoir bénéficier de la propriété de convolution des géométries de l'antenne d'émission avec l'antenne de réception, permettant ainsi de mettre en place des antennes lacunaires tout en conservant une directivité forte. La thèse est basée sur ce dernier type de radar MIMO.

Le concept du radar MIMO est prometteur vis-à-vis des nombreux avantages qu'il

apporte par rapport aux architectures radars actuelles [2] [3] [4] [5] : flexibilité pour la formation de faisceau à l'émission – large illumination de la scène tout en récupérant une résolution fine après traitement – et réduction de la complexité des systèmes, via la réduction du nombre d'antennes et la possibilité de transférer des fonctions de contrôle et d'étalonnage du système dans le domaine numérique.

Nous décrivons ensuite le concept de fonction d'ambiguïté en sortie de filtre adapté qui représente l'énergie équivalente rayonnée dans le domaine distance/Doppler/angle et permet ainsi de représenter les capacités de détection du système. L'écriture des expressions analytiques permet de mettre en évidence les trois étapes du traitement MIMO : application du filtre adapté (y compris le traitement Doppler) correspondant à chaque forme d'onde, formation de faisceau d'émission pour récupérer la directivité d'émission, formation de faisceau de réception. Nous introduisons trois paramètres utilisés dans ce travail : M le nombre d'émetteurs, N_c le nombre de moments élémentaires composant les codes de phase, et K le nombre d'échantillons du signal reçu.

Pour l'implémentation de systèmes MIMO, le choix de la forme d'onde est crucial, dans la mesure où chacune présente des avantages et limites propres en termes d'orthogonalité – c'est à dire la capacité à pouvoir extraire les formes d'onde du signal reçu – et de performance en détection. Un nombre limité de travaux présente et compare les caractéristiques des formes d'onde les plus représentatives [6] :

- **TDMA (Time Division Multiple Access)** : il peut s'agir d'activer les émetteurs les uns après les autres, ou d'émettre simultanément une unique forme d'onde (par exemple un chirp, c'est-à-dire un signal à rampe de fréquence) avec un décalage temporel sur chaque émetteur.
- **FDMA (Frequency Division Multiple Access)** : il s'agit d'émettre sur des supports fréquentiels disjoints
- **CDMA (Code Division Multiple Access)** : il s'agit d'émettre des codes de phase ayant des propriétés de quasi-orthogonalité entre eux. De nombreuses séquences de code existent, et nous allons considérer plus spécialement les codes de Gold [7] qui montrent de bonnes propriétés en termes d'autocorrélation et intercorrélation.
- **DDMA (Doppler Division Multiple Access)** : il s'agit de décaler différemment les fréquences de chaque émetteur d'un pulse à l'autre.

Nous avons évoqué les avantages prometteurs du radar MIMO, cependant, les travaux existants prennent insuffisamment en compte les impacts du manque d'orthogonalité des formes d'onde. Par ailleurs, les effets des défauts matériels sont souvent négligés, alors qu'ils peuvent être potentiellement conséquents. Le radar MIMO reste donc encore aujourd'hui au stade du concept théorique. D'où notre problématique : **comment dépasser les imperfections intrinsèques des formes d'onde MIMO tout en garantissant des contraintes d'implémentation opérationnelle acceptables ?**

Dans ce contexte, nous citons néanmoins quelques tentatives visant à optimiser la conception des formes d'onde afin de respecter certains critères [8] [9] [10], au prix cependant d'une baisse des performances sur d'autres plans ; ainsi que certains travaux visant à définir des traitements optimisés, tels les traitements adaptatifs [11] [12], le Compressed Sensing [13] ou encore le calcul de filtres désadaptés optimisés [14]. Ces travaux ne permettent cependant que d'apporter une réponse partielle à la problématique.

Le travail de thèse consiste donc à mettre en place des traitements adaptés aux signaux MIMO permettant d'anticiper et de compenser les défauts du monde réel. Cela se fera en quatre temps :

- Déterminer la famille de formes d'onde présentant le meilleur potentiel pour l'émission MIMO
- Développer des traitements prenant en compte le modèle de signal pour compenser les défauts de la forme d'onde
- Analyser la sensibilité des traitements vis-à-vis des écarts au modèle et proposer des stratégies de prévention
- Évaluer les traitements sur des signaux MIMO acquis en conditions réelles

Les Codes de Phase Comme Formes d'Onde : Motivations et Défis

Nous souhaitons étudier ici les différents types de formes d'onde afin de montrer que les codes de phase, de façon générale, ont le meilleur potentiel pour être utilisés dans les architectures MIMO, en nous basant sur des critères de performance en détection. Nous allons également étudier leurs limites en termes de lobes secondaires induits.

Nous nous référons en premier lieu aux analyses comparatives fournies par la littérature [15], notamment :

- **TDMA** : bonne orthogonalité mais utilisation sous-optimale des ressources (par exemple puissance d'émission ou résolution distance fortement réduites)
- **FDMA** : bonne orthogonalité mais nombreux lobes secondaires dans le plan distance-Doppler
- **CDMA** : faible niveau de lobes secondaires dans le plan Doppler mais haut niveau de lobes secondaires dans le plan distance-angle
- **DDMA** : bonne orthogonalité mais ambiguïtés Doppler

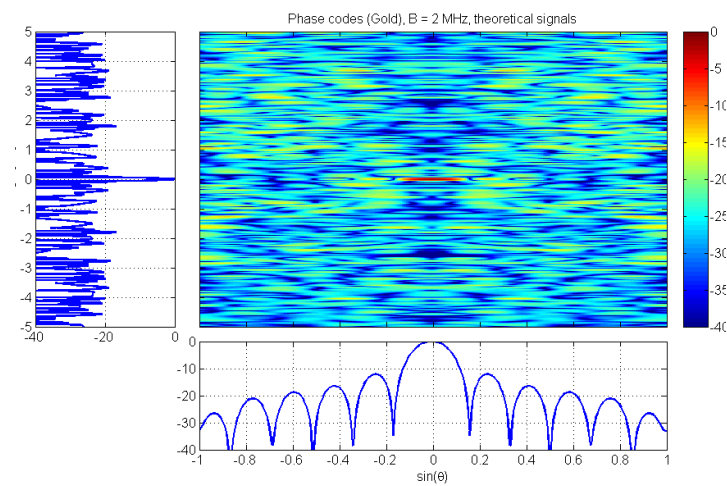
Nous relevons également des travaux sur la borne de Cramér-Rao des différentes formes d'onde [16]. Cette borne correspond à la borne inférieure pouvant être atteinte par un estimateur, donnant ainsi des informations sur la résolution spatiale intrinsèque. Il est montré que les codes de phase présentent le plus petit contour pour cette borne dans l'espace distance-angle, témoignant ainsi d'une meilleure résolution spatiale.

Pour compléter l'analyse, nous définissons quatre métriques de performance pouvant être calculées à partir de la fonction d'ambiguïté, afin de pouvoir comparer les formes d'onde sur des indicateurs quantitatifs :

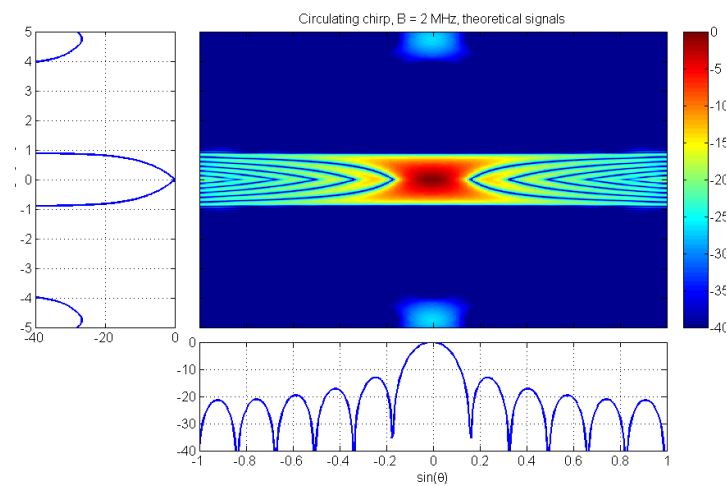
- **Résolution en distance** : capacité à localiser une cible sur l'axe de la distance
- **Résolution en angle** : capacité à localiser une cible sur l'axe de l'angle
- **Sensibilité au fouillis** : capacité à éliminer la contribution d'un fouillis homogène sur le plan distance-angle
- **Sensibilité à une cible ponctuelle** : capacité à éliminer les interférences ponctuelles de forte puissance

Ces deux dernières métriques s'inspirent de l'Integrated Side Lobe Ratio (ISLR) et du Peak Side Lobe Ratio (PSLR) utilisées en SAR (Synthetic Aperture Radar) [17].

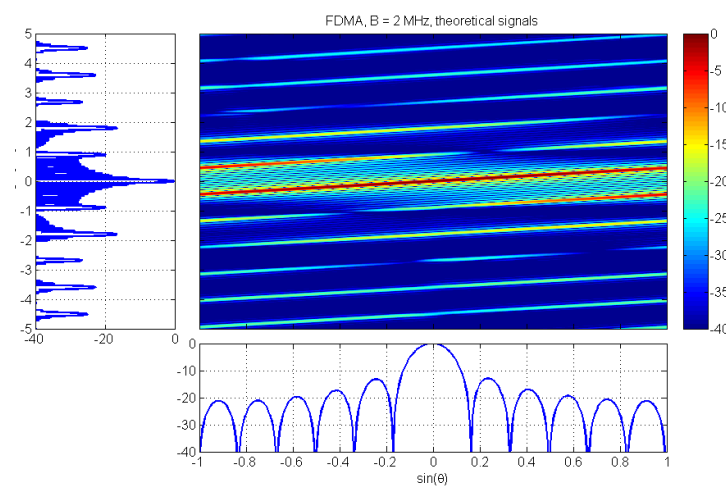
Nous générons des formes d'onde synthétiques avec notamment les paramètres suivants : 12 émetteurs, bande de fréquence de 2 MHz, pulse de 64 μ s, cible ponctuelle



(a) Codes de phase (séquences Gold).



(b) Chirp circulant.



(c) FDMA.

FIGURE 1.1 – Fonctions d’ambiguïté (sorties de filtre adapté) pour différentes formes d’onde.

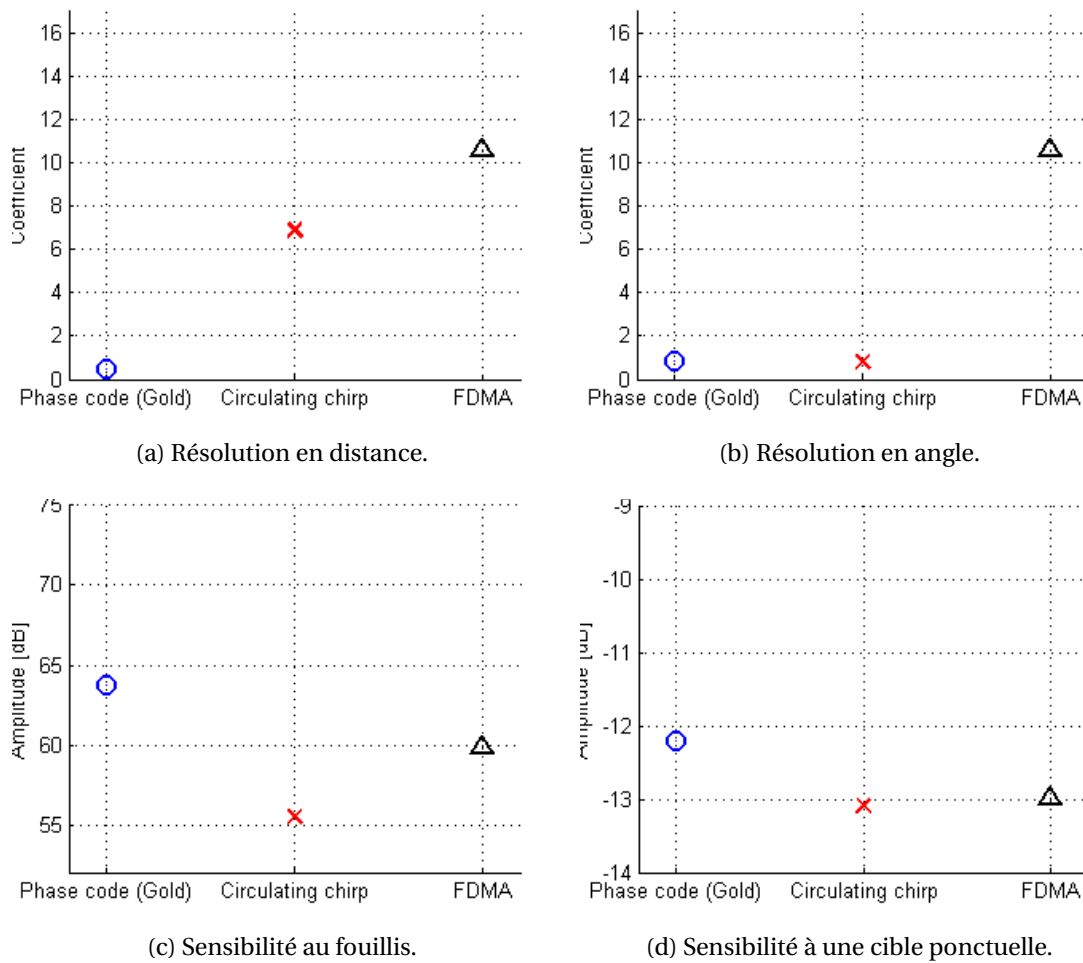


FIGURE 1.2 – Métriques de performance pour la quantification des performance en détection des formes d’onde CDMA, TDMA et FDMA. Les faibles valeurs correspondent aux meilleures performances.

placée à l’origine. Nous traitons ensuite les données jusqu’au filtre adapté (fig. 1.1), ce qui nous permet ensuite de calculer les différentes métriques de performance (fig. 1.2). Celles-ci confirment à nouveau le caractère optimal des codes de phase en termes de résolution spatiale, mais met également en avant leur sensibilité forte aux interférences du fait des nombreux lobes secondaires résiduels induits.

Afin d’analyser l’origine des lobes résiduels, nous avons défini un formalisme mathématique pour l’expression des signaux traités. Dans le modèle de signal, nous prenons en compte les propriétés intrinsèques des formes d’onde, et donc les défauts des codes de phase. Nous mettons ainsi en évidence que le “plancher” de lobes résiduels est dû à la somme des autocorrélations et intercorrélations des codes de phase. Nous

montrons ensuite que ce défaut peut avoir plusieurs conséquences néfastes sur les performances en détection, notamment :

- **Désensibilisation vis-à-vis des cibles secondaires** : les lobes secondaires peuvent être au dessus du niveau de bruit et ainsi "cacher" des cibles secondaires qui auraient pu normalement être détectées
- **Perte de puissance** : le lobe principal perd quelques dB en puissance du fait de l'"éparpillement" de l'énergie, ce qui réduit la probabilité de détection
- **Sensibilité au fouillis** : la présence des lobes résiduels induit une sensibilité accrue aux interférences provenant de distances et angles divers.

En considérant que nous puissions supprimer les lobes résiduels qui dégradent fortement les performances en détection, nous pouvons estimer que les codes de phase peuvent être particulièrement adaptés aux émissions MIMO.

Développement de Traitements Supprimant les Lobes Secondaires Résiduels

Nous faisons le constat que le filtre adapté, conçu pour optimiser le rapport signal à bruit, ne permet pas la réduction des lobes résiduels. Nous proposons ici de développer des traitements basés sur un modèle de signal intégrant les propriétés des formes d'onde et notamment leur manque d'orthogonalité. Nous étudions ici différents traitements existants et analysons s'ils peuvent satisfaire les conditions d'emploi en situation réelle.

Nous étudions d'abord les traitements adaptatifs de type Capon, connus pour offrir une bonne résolution spatiale tout en éliminant les lobes secondaires [11]. Nous proposons ici d'adapter le traitement à l'estimation d'un jeu de deux paramètres : la distance et l'angle. Nos simulations montrent qu'il est possible de supprimer l'ensemble des lobes résiduels, cependant cela nécessite au préalable de calculer une matrice de covariance de taille $MN_c \times MN_c$, et dans la plupart des situations opérationnelles, il n'est pas possible de disposer d'assez de récurrences pour estimer correctement cette matrice. Nous avons ensuite l'idée d'appliquer le traitement Capon sur un seul paramètre et d'utiliser l'autre dimension pour fournir des données permettant d'estimer la

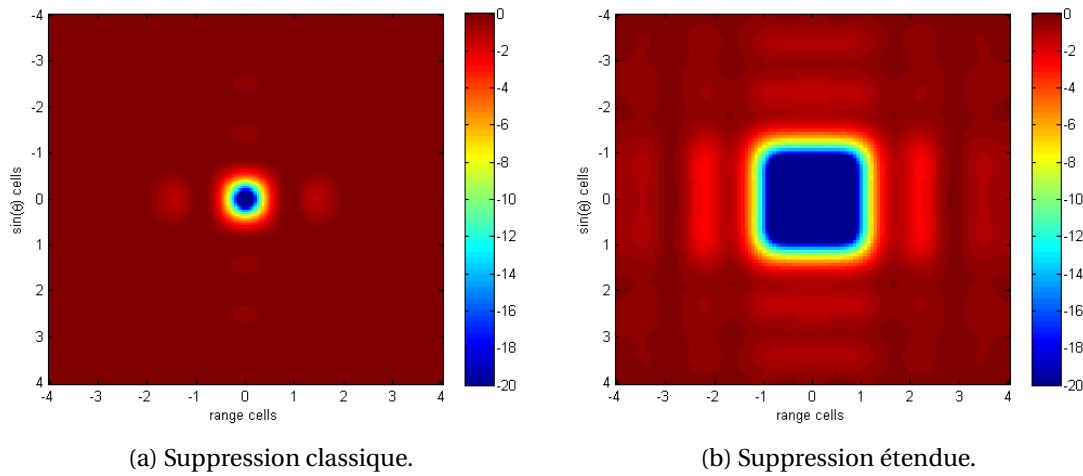
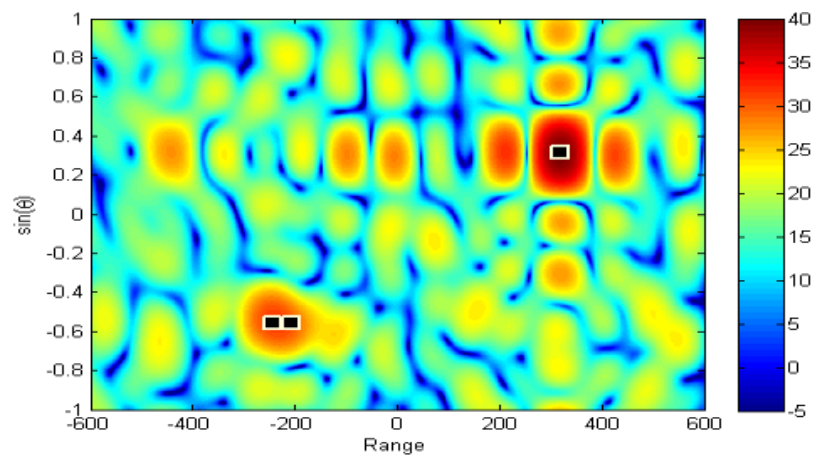


FIGURE 1.3 – Gain en puissance dans l’espace des paramètres de cible après une itération de l’OMP.

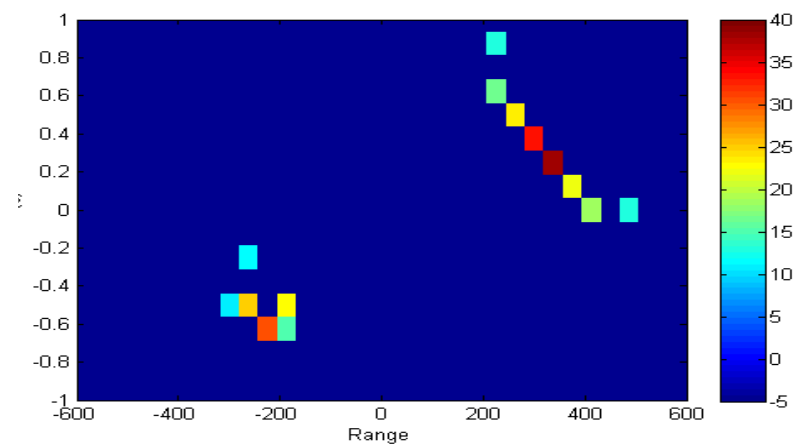
matrice de covariance. Cependant, nos simulations montrent que nous ne disposons pas de suffisamment de degrés de liberté pour obtenir des résultats meilleurs que ceux du filtre adapté. Nous introduisons ensuite le Compressed Sensing qui exploite le caractère “creux” (*sparse*) des signaux reçus. Certains travaux [13] présentent des résultats performants, cependant nous établissons que dans notre contexte, la complexité calculatoire induite n’est pas compatible avec une implémentation opérationnelle.

Nous introduisons ensuite l’Iterative Adaptive Approach (IAA), basé sur les moindres carrés pondérés [18], dont l’intérêt repose sur une précision similaire au Capon tout en ne nécessitant qu’un nombre très limité de données d’apprentissage (moins de 10 typiquement). Cependant, il s’agit d’un processus itératif imposant d’inverser une matrice de taille $MK \times MK$ à chaque étape, ce qui est incompatible avec les capacités calculatoires en conditions réelles. Nous gardons néanmoins cette technique comme une “référence” pour effectuer des comparaisons avec d’autres traitements.

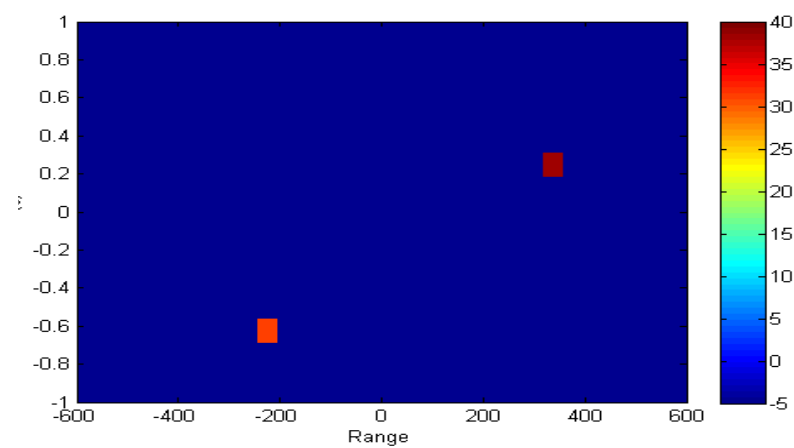
Nous étudions maintenant l’Orthogonal Matching Pursuit (OMP) qui est un algorithme itératif basé sur la décomposition d’un signal en les contributions de plusieurs formes d’onde spécifiques [19]. Chaque itération consiste à déterminer la valeur maximale de la sortie du filtre adapté – correspondant à la cible prépondérante –, et à retirer la contribution de cette cible du signal reçu. La complexité calculatoire est largement réduite, étant donné que la matrice à inverser pour la $k^{\text{ème}}$ cible n’est plus que de taille $k \times k$.



(a) Sortie du filtre adapté. Les cibles sont localisées par les marques noires.

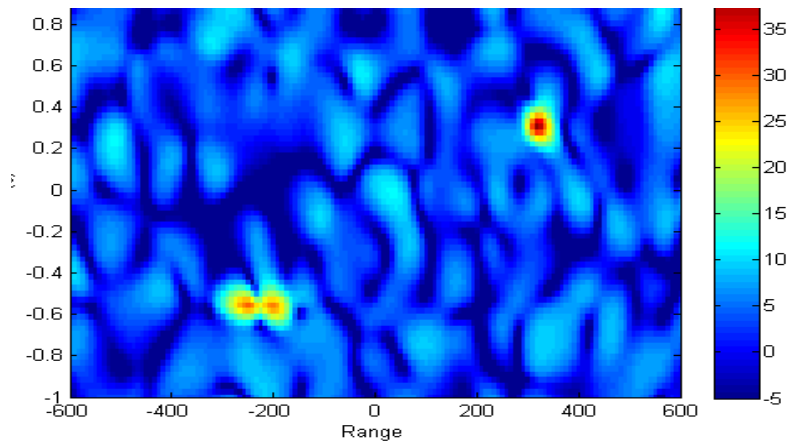


(b) Sortie de l'OMP – suppression classique.



(c) Sortie de l'OMP – suppression étendue.

FIGURE 1.4 – Détection de cibles avec le scénario “pernicieux” proposé, issus de codes de phase simulés. Largeur de la cellule de résolution en distance = 75 m. Largeur de la cellule de résolution en angle = 0,25.

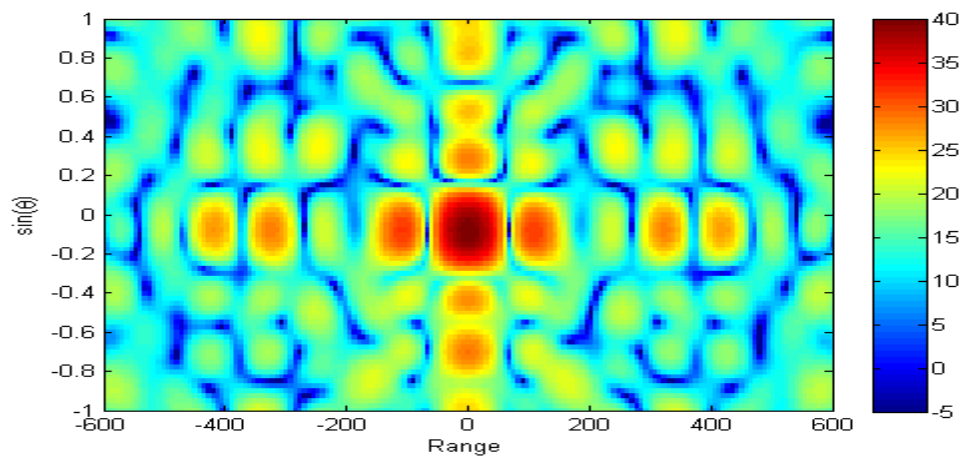


(d) Sortie de l'IAA (itération 11).

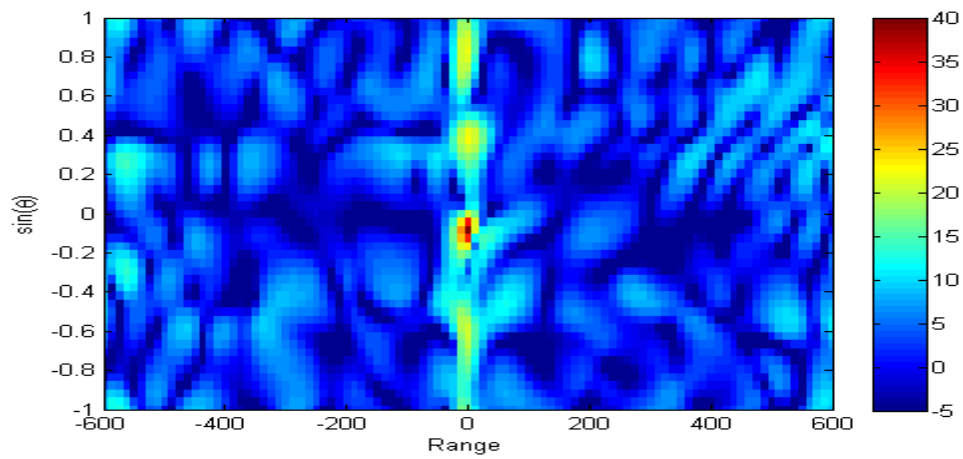
FIGURE 1.4 – *Suite*.

Cependant, nous avons identifié la sensibilité particulière de l'OMP aux erreurs de localisation des cibles. Ces erreurs peuvent être induites par la "granularité" de la grille de recherche (la position d'une cible est associée au nœud le plus proche) ou par l'influence de deux cibles proches. Nous proposons d'augmenter la robustesse par rapport à ce problème en étendant la zone de rejet à chaque itération. Plus précisément, en plus de la contribution à la position détectée, nous proposons de retirer également les contributions des 8 positions à proximité (à des distances d'une demi-case de résolution). Nous montrons que cela permet de créer un "masque" qui retire toutes les contributions éventuelles sur une zone à peine plus large qu'une case de résolution (fig. 1.3). Nous notons néanmoins que le signal distant d'une case de résolution (c'est-à-dire en bordure de masque) subit une perte de puissance de l'ordre de 15 dB.

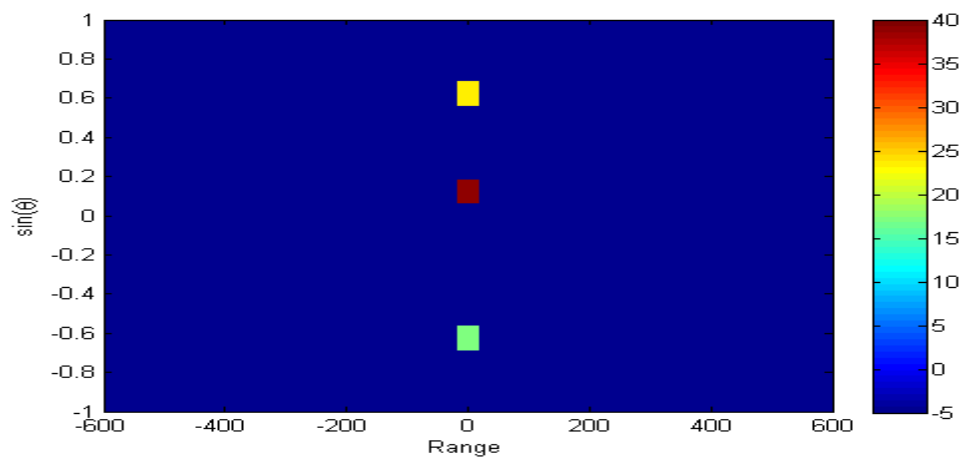
Afin d'illustrer le gain de robustesse vis-à-vis des erreurs de localisation, nous mettons en place un scénario "pernicieux" constitué de trois cibles non situées sur des nœuds de la grille, la prépondérante étant isolée, et les deux plus faibles étant placées à une demi-case de résolution de distance l'une de l'autre. Ce scénario permet ainsi de générer une des pires situations en termes de création d'erreurs de localisation de cibles. Les résultats (fig. 1.4) montrent que l'OMP avec suppression classique est sujet à de nombreuses fausses alarmes alors que l'OMP avec suppression étendue ne présente aucune fausse alarme (les deux cibles proches sont détectées dans la même case distance, ce qui était attendu). Le calcul de la sortie de l'IAA permet, en parallèle, de confirmer que cette technique donne une précision de détection correcte tout en réduisant les lobes résiduels au niveau du bruit.



(a) Sortie du filtre adapté.



(b) Sortie de l'IAA (itération 10).



(c) Sortie de l'OMP – suppression étendue.

FIGURE 1.5 – Application des différents traitements sur les données issues de codes de phase simulés, avec simulation d'erreurs sur les émetteurs. Largeur de la cellule de résolution en distance = 75 m. Largeur de la cellule de résolution en angle = 0,25.

Écarts au Modèle : Analyse d'Impact et Stratégies de Prévention

Les traitements basés sur un modèle de signal sont connus pour être particulièrement sensibles aux écarts au modèle. C'est pourquoi il est crucial d'étudier les possibles distorsions auxquelles peuvent être soumis les signaux lors de leur génération et propagation, ainsi que les façons d'empêcher les dégradations de performance, que ce soit en éliminant les distorsions ou en les intégrant au modèle de signal.

Dans un premier temps, nous présentons quelques unes des origines des écarts qui ne sont habituellement pas pris en compte dans le modèle de signal :

- **Non linéarités dans la chaîne radar** : certains composants par exemple fonctionnent en dehors des zones linéaires, leur comportement peut également varier en fonction des conditions environnementales
- **Manque d'alignement entre les voies** : il peut arriver que les voies d'émission ne soient pas alignées, du fait de différences de chemin électrique ou d'une mauvaise synchronisation temporelle des générateurs de formes d'onde
- **Couplage mutuel d'antenne** : l'influence électromagnétique entre éléments d'une antenne provoque l'induction de courants dans les éléments voisins
- **Cibles rapides** : nous avons fait l'hypothèse de cibles lentes, ainsi, une cible rapide (à partir de 100 m/s dans notre contexte) serait sujette à une évolution de sa phase durant le pulse dûe au Doppler.

Pour estimer la sensibilité des traitements proposés vis-à-vis des écarts au modèle, nous définissons une simulation avec des émetteurs chacun sujet à des erreurs aléatoires sur la phase et le module (avec des écarts types respectivement de $2\pi/10$ et de 10% du module). Les résultats obtenus (fig. 1.5) montrent l'apparition de lobes à distance de la cible de façon équivalente pour l'IAA et l'OMP, certains jusqu'à des puissances de 18 dB en dessous de celle de la cible.

Dans un deuxième temps, avant d'illustrer des stratégies de protection contre les écarts au modèle, nous présentons la plateforme Hycam installée à l'ONERA. Il s'agit d'une plateforme expérimentale multifonction de radar de surface en bande S pouvant générer jusqu'à 12 formes d'onde différentes simultanément, et recevoir sur



FIGURE 1.6 – La plateforme Hycam installée à l’ONERA (site de Palaiseau). Le doctorant est donné à titre indicatif.

16 antennes (fig. 1.6). Notons à titre d’illustration que lors de la conception de ce système [20], des contraintes ont été imposées sur les éléments rayonnants et les amplificateurs pour prévenir certaines distorsions.

Par ailleurs, nous relevons le fait que le radar MIMO apporte une flexibilité permettant de transférer des fonctions de contrôle et d’étalonnage du système dans le domaine numérique, ouvrant ainsi la voie au radar “tout numérique” et permettant d’alléger les contraintes et ressources nécessaires à la conception.

Nous profitons de cette propriété du radar MIMO pour définir une méthode numérique d’étalonnage des phases des émetteurs “après coup”. Il s’agit d’un processus automatique qui, basé sur des signaux d’opportunité, estime le décalage de phase à l’origine de chaque émetteur à partir de chaque forme d’onde extraite du signal reçu, puis qui applique la correction correspondante afin d’aligner chacun des signaux émis. Afin d’illustrer le fonctionnement de cette méthode, nous mettons en place une expérimentation en conditions réelles avec la plateforme Hycam. Nous générons une famille de codes de Gold de 1023 moments transmise sur une bande de fréquence de 20 MHz par trois sous-réseaux d’émission intentionnellement non alignés en phase. Nous faisons une acquisition isotropique du fouillis environnant qui contient nos

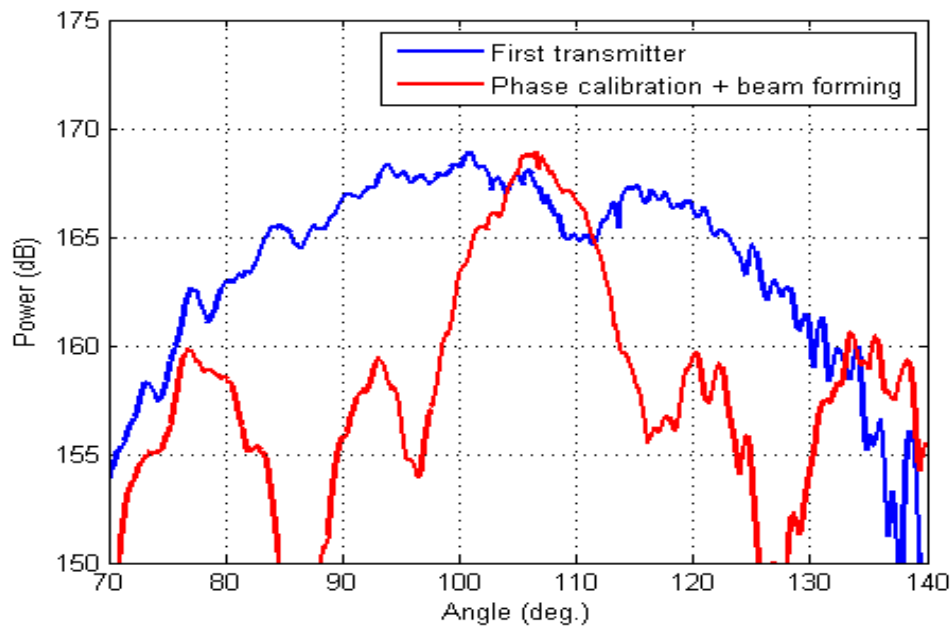


FIGURE 1.7 – Effet de la calibration sur des signaux expérimentaux : coupe à distance fixée de la contribution d’un point brillant. En bleu : un seul émetteur. En rouge : après étalonnage des 3 émetteurs et formation de faisceau.

signaux d’opportunité. Nous appliquons ensuite l’ensemble de la chaîne de traitement sur les données obtenues, ainsi que la méthode d’étalonnage numérique. Là où l’absence d’étalonnage aurait donné une figure d’interférence chaotique, nous obtenons ici une focalisation correcte de l’énergie (fig. 1.7), ce qui permet ainsi d’apporter une preuve de concept de la possibilité de numériser des fonctions d’ajustement du système d’une architecture MIMO.

Evaluation des Traitements sur les Signaux Expérimentaux

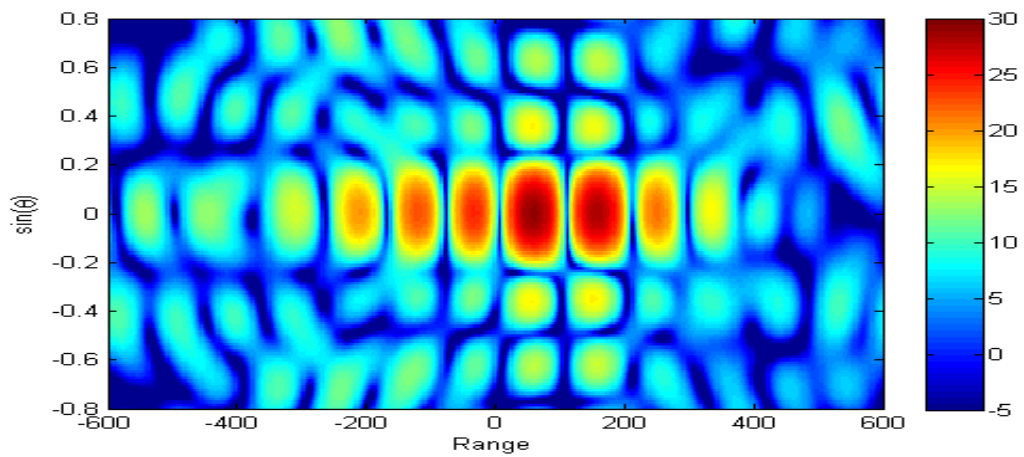
La plateforme MIMO Hycam constitue une opportunité toute particulière pour acquérir des signaux en conditions réelles, d’autant plus que ce genre d’acquisitions est particulièrement rare dans la littérature. Cela nous permet ici de tester en pratique la robustesse des techniques développées aux imperfections du monde réel.

Dans cette optique, nous définissons deux niveaux de configurations expérimentales :

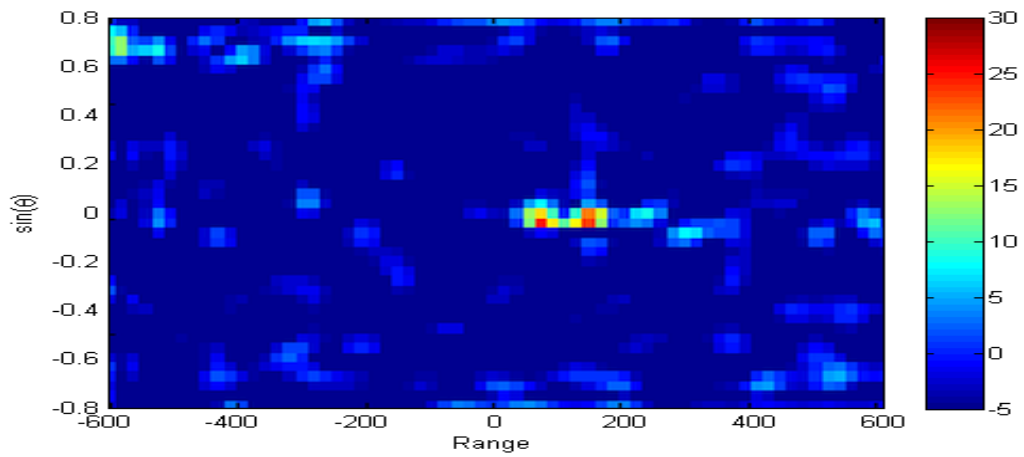
- **Configuration boucle fermée** : le circuit de transmission du radar est rebouclé juste avant les antennes sur le circuit de réception, ce qui permet de ne se confronter qu'aux composants internes.
- **Configuration avec simulateur de cible** : le signal est émis en direction d'un simulateur de cible composé d'un calibrateur actif, de composants électro-optiques et d'antennes directives, permettant ainsi de modifier le signal reçu de façon à simuler une cible à une certaine distance et avec un certain Doppler. Cette configuration plus générale permet de se confronter également à l'émission et la propagation des signaux.

Concernant les paramètres expérimentaux, nous choisissons une bande de fréquence de 2 MHz, une longueur de pulse de 50 μ s, 12 formes d'onde générées pour chaque famille considérée, à savoir codes de phase Gold, chirp circulant et FDMA. Par ailleurs, l'émission des formes d'onde s'effectue séquentiellement dans la mesure où Hycam, à cette date, peut gérer jusqu'à 3 voies montantes simultanément. Au cours des acquisitions, plusieurs phénomènes prépondérants non anticipés ont été relevés :

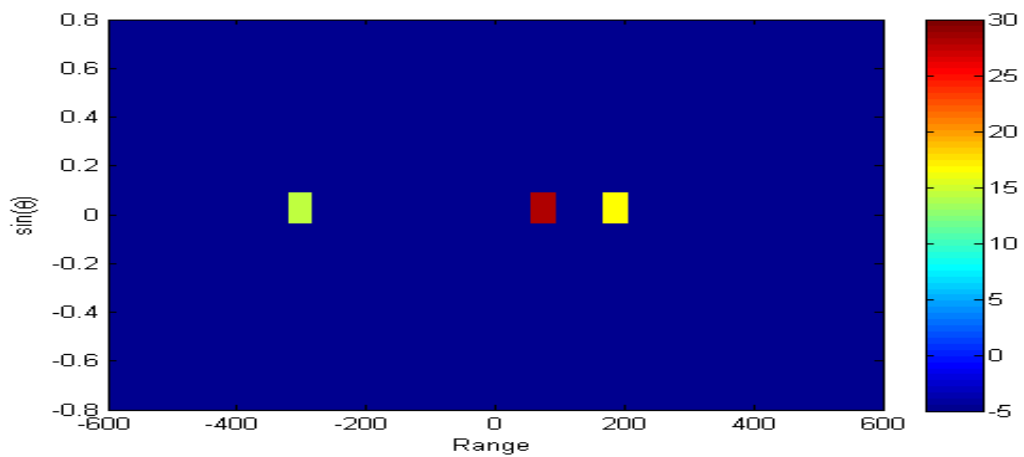
- **Isolation imparfaite du mélangeur** : nous avons relevé que le mélangeur (qui fournit les signaux permettant de monter en fréquence à l'émission et de descendre en fréquence à la réception) n'était pas parfaitement isolé électriquement, ce qui entraîne l'existence d'une deuxième boucle fermée, celle-ci étant plus courte que celle créée intentionnellement. Cela peut cependant être une opportunité d'étude de deux échos proches l'un de l'autre.
- **Troncature du signal d'intérêt** : nous avons remarqué après coup que la fenêtre d'acquisition était décalée par rapport à l'écho reçu, du fait d'une fibre optique défectueuse. Cela s'est traduit par la perte d'environ 10 % du signal d'intérêt.
- **Manque d'alignement des phases** : étant donné l'émission séquentielle des formes d'onde, l'absence de synchronisation induit une phase initiale aléatoire pour chaque émetteur. Cela a cependant été corrigé grâce à la méthode de calibration numérique des phases.
- **Couplage mutuel d'antenne** : afin d'estimer l'impact de ce phénomène, nous avons calculé la matrice de couplage à partir de la matrice des paramètres S (mesurée lors des phases de validation d'Hycam). Nous en avons déduit que l'impact était marginal, en comparaison des autres distorsions existantes.



(a) Sortie du filtre adapté.

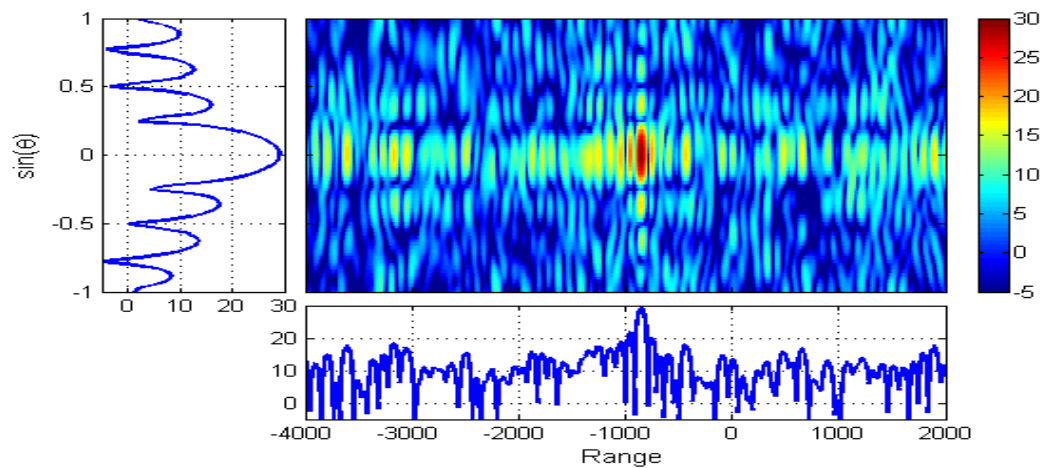


(b) Sortie de l'IAA (itération 7).

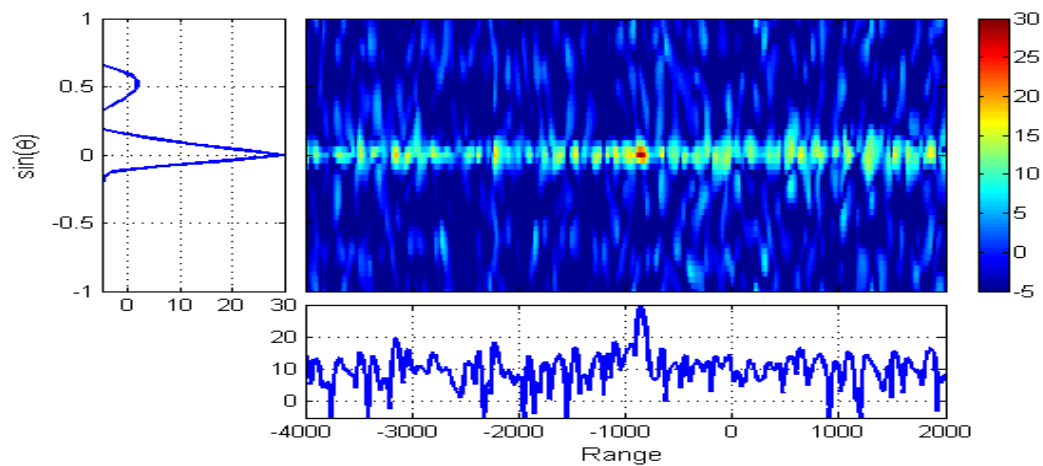


(c) Sortie de l'OMP – suppression étendue.

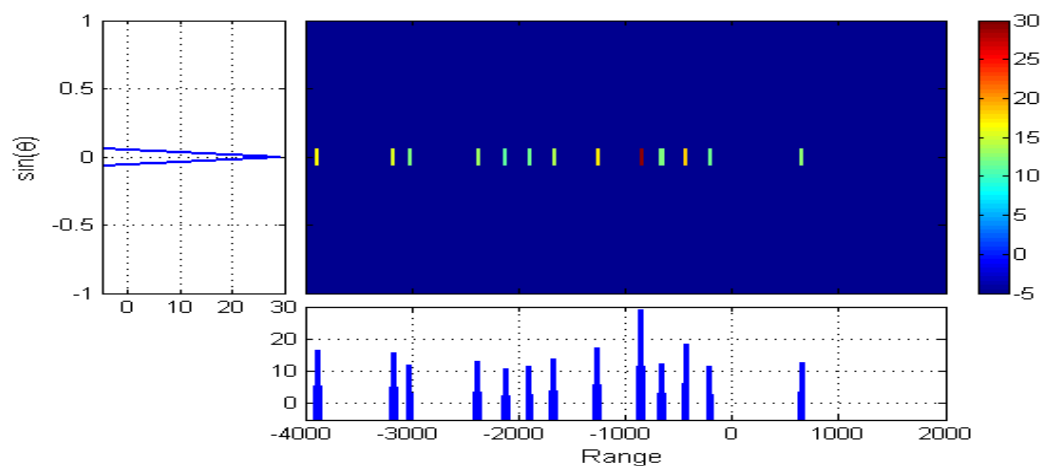
FIGURE 1.8 – Application des différents traitements sur les données expérimentales issues de la configuration boucle fermée. Largeur de la cellule de résolution en distance = 75 m. Largeur de la cellule de résolution en angle = 0,25.



(a) Sortie du filtre adapté.



(b) Sortie de l'IAA (itération 6).



(c) Sortie de l'OMP – suppression étendue.

FIGURE 1.9 – Application des différents traitements sur les données expérimentales issues de la configuration avec le simulateur de cible. Largeur de la cellule de résolution en distance = 75 m. Largeur de la cellule de résolution en angle = 0,25.

Par la suite, nous appliquons les métriques de performance en sortie du filtre adapté, ce qui nous permet de relever qu'aucune valeur ne s'écarte particulièrement des valeurs théoriques. Nous en déduisons que l'impact des défauts réels dans les deux configurations expérimentales est marginal en sortie de filtre adapté. Cependant, lorsque nous appliquons ensuite les traitements basés sur un modèle de signal, les dégradations s'avèrent plus conséquentes dans certains cas, même si la grande majorité des lobes secondaires est supprimée. Ainsi, en configuration boucle fermée (fig. 1.8), l'OMP permet la détection des deux échos attendus et d'une fausse alarme, là où l'IAA fournit uniquement les deux échos attendus. Dans la configuration avec le simulateur de cible (1.9), les deux traitements fournissent de nombreuses fausses alarmes à l'angle de la cible sur une grande partie de l'axe distance. A ce stade, il est difficile d'isoler précisément le phénomène à l'origine de cette dégradation de performance, néanmoins nous pouvons conclure que l'IAA et l'OMP peuvent être, dans certains cas, beaucoup plus sensibles aux écarts au modèle que le filtre adapté.

Conclusions

Nous avons évoqué les avantages du radar MIMO par rapport aux radars actuels, notamment vis-à-vis de sa flexibilité pour la formation de faisceau à l'émission et les possibilités de réduire la complexité des systèmes. Nous avons également mentionné l'insuffisance de prise en compte dans les travaux actuels des défauts intrinsèques des formes d'onde et des imperfections matérielles. Cela a justifié l'ambition de cette thèse de contribuer à ouvrir la voie vers le radar MIMO opérationnel, en proposant des méthodes d'anticipation et de compensation des défauts du monde réel.

Nous avons ainsi établi, à partir de critères de performance quantitatifs, la résolution spatiale optimale qu'apportent les codes de phase. Ils peuvent ainsi être préconisés pour l'émission MIMO, à la condition que le niveau de lobes secondaires qu'ils induisent soit résolu. Nous avons proposé d'accepter ces défauts et de concentrer les efforts sur le traitement à la réception. Cependant, l'optimisation de séquences de code peut être menée en parallèle.

Nous avons ensuite expliqué pourquoi de nombreuses techniques d'estimation ne peuvent s'appliquer à notre problématique, notamment du fait des contraintes inhérentes à l'implémentation opérationnelle. A l'inverse, nous avons montré que l'OMP est une technique satisfaisante vis-à-vis de ces contraintes. Nous avons cependant

mis en évidence la sensibilité particulière de l'OMP aux erreurs de localisation des cibles. En conséquence, nous avons proposé une extension de l'algorithme résolvant le problème. Nous avons également introduit l'IAA qui fournit une précision toute particulière, néanmoins au prix d'une complexité calculatoire inadéquate.

Par la suite, nous avons décrit des phénomènes issus de la génération et propagation des signaux pouvant induire des distorsions non intégrées au modèle de signal. Au travers de simulations, nous avons montré que cela pouvait dégrader particulièrement les performances en détection de l'IAA et de l'OMP. Ceci nous a amenés à préconiser d'anticiper voire de prévenir l'apparition de ces distorsions. Dans cette optique, après avoir décrit la plateforme MIMO Hycam, nous avons illustré ces concepts au travers d'une méthode numérique d'étalonnage des canaux d'émission.

En dernier point, nous avons proposé de finaliser le pont avec le monde réel en mettant en place des expérimentations MIMO. Nous avons défini deux configurations distinctes, la première focalisée sur la chaîne matérielle interne, et la seconde prenant en compte également l'émission et la propagation. Nous avons montré sur ces acquisitions que des distorsions ayant un impact très limité sur la sortie du filtre adapté peuvent induire de bonnes performances (cas de la première configuration) ou au contraire de fortes dégradations de performance (cas de la deuxième configuration) en sortie de traitements dépendants du modèle de signal, selon que les écarts au modèle soient suffisamment pris en compte ou non dans ce modèle.

Pour terminer, en termes de perspectives par rapport à ce travail de thèse, nous proposons d'élaborer une méthode combinant rapidité de l'OMP et précision de l'IAA en calculant dans un premier temps la sortie de l'OMP afin de déterminer la matrice de covariance qui en résulte, et dans un second temps d'injecter cette matrice dans l'algorithme de l'IAA, afin de réduire fortement le nombre d'itérations nécessaires. Afin d'augmenter la robustesse aux erreurs de modèle, nous proposons la piste d'intégrer un "écart acceptable" sur la détection du signal d'intérêt, dans l'esprit de l'extension de l'OMP proposée qui consiste à considérer également les positions voisines dans un espace spécifique. Cela permettrait ainsi de tolérer une certaine marge d'erreur sur différents paramètres.

Bibliography

- [1] J Dorey and G Garnier. RIAS, synthetic impulse and antenna radar. *ONDE ELECTRIQUE*, 69(6):36–44, 1989.
- [2] Chun-Yang Chen and Palghat P Vaidyanathan. MIMO radar space–time adaptive processing using prolate spheroidal wave functions. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 56(2):623–635, 2008.
- [3] Vito F Mecca, Dinesh Ramakrishnan, and Jeffrey L Krolik. MIMO radar space–time adaptive processing for multipath clutter mitigation. In *Sensor Array and Multichannel Processing, 2006. Fourth IEEE Workshop on*, pages 249–253. IEEE, 2006.
- [4] Daniel R Fuhrmann and Geoffrey San Antonio. Transmit beamforming for MIMO radar systems using partial signal correlation. In *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on*, volume 1, pages 295–299. IEEE, 2004.
- [5] Petre Stoica, Jian Li, and Yao Xie. On probing signal design for MIMO radar. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 55(8):4151–4161, 2007.
- [6] Ming Xue, Jian Li, and Peter Stoica. MIMO radar waveform design. In Fulvio Gini, Antonio De Maio, and Lee Patton, editors, *Waveform design and diversity for advanced radar systems*, pages 89–120. IET Press, 2012.
- [7] Robert Gold. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing (corresp.). *Information Theory, IEEE Transactions on*, 13(4):619–621, 1967.
- [8] Hai Deng. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 52(11):3126–3135, 2004.

-
- [9] Bo Liu, Zishu He, Jiankui Zeng, and Benyong Liu. Polyphase orthogonal code design for MIMO radar systems. In *Radar, 2006. CIE'06. International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2006.
- [10] KW Forsythe and DW Bliss. Waveform correlation and optimization issues for MIMO radar. In *Signals, Systems and Computers, 2005. Conference Record of the Thirty-Ninth Asilomar Conference on*, pages 1306–1310. IEEE, 2005.
- [11] Jian Li and Petre Stoica. MIMO radar – diversity means superiority. In Jian Li and Petre Stoica, editors, *MIMO Radar Signal Processing*, pages 1–64. Wiley, 2009.
- [12] DW Bliss and KW Forsythe. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: degrees of freedom and resolution. In *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on*, volume 1, pages 54–59. IEEE, 2003.
- [13] Laura Anitori, Arian Maleki, Matern Otten, Richard G Baraniuk, and Peter Hoogeboom. Design and analysis of compressed sensing radar detectors. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 61(4):813–827, 2013.
- [14] Olivier Rabaste and Laurent Savy. Mismatched filter optimization via quadratic convex programming for radar applications. In *Radar Conference (Radar), 2014 International*, pages 1–6, Oct 2014.
- [15] Hongbo Sun, Frédéric Brigui, and Marc Lesturgie. Analysis and comparison of MIMO radar waveforms. In *2014 International Radar Conference*. IEEE, 2014. In press.
- [16] Olivier Rabaste, Laurent Savy, Mathieu Cattenoz, and Jean-Paul Guyvarch. Signal waveforms and range/angle coupling in coherent colocated MIMO radar. In *Radar (Radar), 2013 International Conference on*, pages 157–162. IEEE, 2013.
- [17] Didier Massonnet and Jean-Claude Souyris. From SAR design to image quality. In *Imaging with synthetic aperture radar*, pages 160–162. EPFL Press, 2008.
- [18] Tarik Yardibi, Jian Li, Petre Stoica, Ming Xue, and Arthur B Baggeroer. Source localization and sensing: A nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 46(1):425–443, 2010.

- [19] Geoffrey Davis, Stephane Mallat, Zhifeng Zhang, et al. Adaptive time-frequency approximations with matching pursuits. *Wavelets: theory, algorithms, and applications (Taormina, 1993)*, 5:271–293, 1994.
- [20] P Brouard, L Constancias, A Brun, S Attia, J Peyret, and P Dreuillet. Hycam: a new S-band surface radar testbed. In *International Radar Conference 2013*. IET, 2013.

Publications & Communications

Publication

- **Mathieu Cattenoz**, Sylvie Marcos and Laurent Savy. Extended Orthogonal Matching Pursuit for Robust Localization in MIMO radar. In *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. **Submitted Dec. 2014**.

International Conferences With Proceedings

- Laurent Constancias, **Mathieu Cattenoz**, Philippe Brouard, and Arnaud Brun. Coherent Collocated MIMO radar demonstration for air defence applications. In *IEEE Radar Conference*, 2013, Ottawa (Canada).
- **Mathieu Cattenoz**, Philippe Brouard, Arnaud Brun, Laurent Constancias, and Laurent Savy. Coherent Collocated MIMO Radar: a Study on Real Data. In *International Radar Symposium*, 2013, Dresden (Germany).
- Olivier Rabaste, Laurent Savy, **Mathieu Cattenoz**, and Jean-Paul Guyvarch. Signal Waveforms and Range/Angle Coupling in Coherent Colocated MIMO Radar. In *International Conference on Radar*, 2013, Adelaide (Australia).
- **Mathieu Cattenoz** and Sylvie Marcos. Adaptive Processing for MIMO Radar Realistic Non Perfectly Orthogonal Waveforms. In *IEEE Radar Conference*, 2014, Cincinnati (USA).
- **Mathieu Cattenoz**, Laurent Savy, and Sylvie Marcos. Adaptive Processing Methods for MIMO Radar Experimental Signals. In *International Radar Conference*, 2014, Lille (France).
- **Mathieu Cattenoz** and Philippe Brouard. An Experimental Demonstration of a

Posteriori Digital Calibration of MIMO Radar System. In *International Radar Conference*, 2014, Lille (France).

Conferences Without Proceedings

- **Mathieu Cattenoz**. Emission colorée pour radar MIMO multifonction. Thales PhDay, 2012, Rungis (France)
- **Mathieu Cattenoz**, Philippe Brouard, Arnaud Brun, Laurent Constancias, and Laurent Savy. The HYCAM Collocated MIMO Radar: Practical Experiments and Performance Analysis. SONDRRA Workshop, 2013, La Londe-les-Maures (France)

Intellectual Property

- **Mathieu Cattenoz** and Philippe Brouard. *Enveloppe Soleau*: "Procédé numérique d'étalonnage des phases des voies d'émission d'une antenne réseau radar à capacité MIMO". 2014.
- **Mathieu Cattenoz** and Philippe Brouard. Patent submission: "Procédé numérique d'étalonnage des phases des voies d'émission d'une antenne réseau radar à capacité MIMO". 2015. *Pending submission*.