الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا
École Nationale Supérieure de Technologie
Département : Génie Electrique et Informatique Industrielle

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

De Master

Filière : **Télécommunication**
Spécialité : **Système de Télécommunication et Réseaux**

Radar Secondaire de surveillance Monopulse MSSR

Réalisé par:
BENMAKHLOUF Hayet

Présente et soutenue publiquement le 04/07/2023
Composition du Jury :

Président	Mme. BOUTERFAS Malika ,	M.C.A	ENST
Promoteur 1	M. ATROUZ Brahim,	Dr	ENST
Promoteur 2	M. BOUROUIBA Abdelhalim Chawki ,	Chef de service	ENNA
Examinateur 1	M. CHOUTRI Kheireddine,	M.C.B	USD-Blida
Examinateur 2	M. BOUCHACHI Islem,	M.C.B	ENST

Année universitaire : 2022-2023.

Radar Secondaire Monopulse MSSR

BENMAKHLOUF Hayet, BOUROUIBA Abdelhalim Chawki, ATROUZ Brahim
Etablissement National de la Navigation Aérienne ENNA
Génie électrique Et Informatique Industrielle GEII
Ecole Nationale Supérieure des Technologies avancées ENSTA
Email: h_benmakhlouf@enst.dz , abdelhalim-bourouiba@enna-dz.com , brahim.atrouz@enst.dz

Résumé— **Cet article se concentre sur l'examen du concept de la technique monopulse utilisée dans le contexte du radar secondaire de surveillance MSSR. La technique monopulse est une approche couramment utilisée dans les radars du domaine d'aviation.**

Mots-clés : **radar de surveillance secondaire, monopulse, réseaux d'antenne, phase.**

I. INTRODUCTION

Le radar secondaire monopulse (MSSR - Monopulse Secondary Surveillance Radar) a été développé pour résoudre un problème fréquent rencontré avec les systèmes de radar de surveillance. Ce problème concerne la diminution de la précision de la détection lorsque des avions sont détectés à longue distance par le radar secondaire.

La technique monopulse a été développée pour résoudre ce problème, et nous allons l'explorer en détail par la suite.

II. METHODOLOGIE

Les systèmes radar de surveillance secondaire monopulse (MSSR) sont utilisés pour détecter avec précision les avions et déterminer leur position. [1]

Pour la détection, les avions doivent être équipés d'un transpondeur qui génère des impulsions en réponse aux interrogations au sol. [1]

Pour une position précise, le radar monopulse utilise des antennes spéciales avec des éléments rayonnants multiples et des phases et niveaux de signal précis. [1]

La méthode de mesure de direction monopulse généralement utilisée pour le SSR (Secondary Surveillance Radar) consiste à diviser les éléments d'un réseau d'antennes linéaires en deux moitiés, appelées GAUCHE et DROITE.

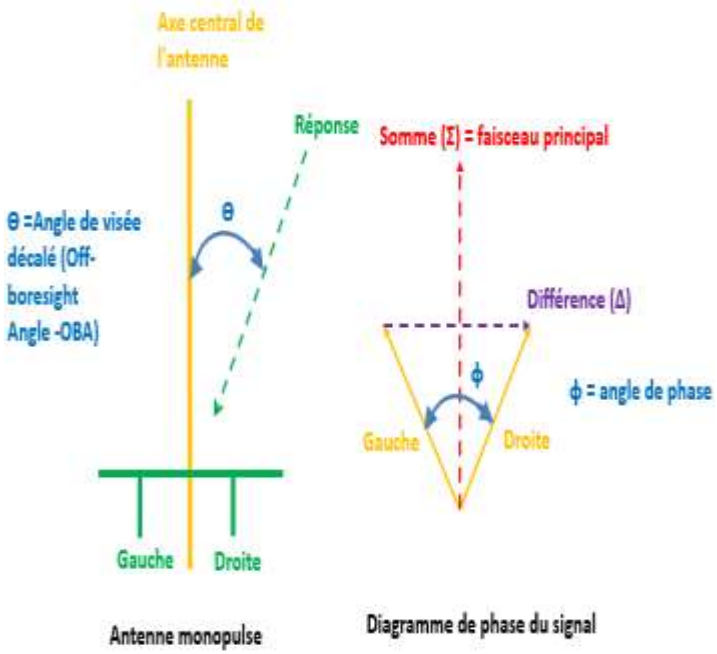


Figure 1. Principe monopulse.

L'axe de référence de l'antenne (boresight) est dans la direction normale du réseau d'antennes (voir figure 1). Un signal de réponse entrant dans l'antenne avec un angle décalé (θ) produira un signal de même amplitude dans les moitiés GAUCHE et DROITE de l'antenne, mais il y aura une différence de phase (ø) entre eux. [2]

Les signaux GAUCHE et DROITE sont ajoutés vectoriellement à l'intérieur de l'antenne pour produire une sortie SOMME (Σ) (ce qui est identique à la sortie du faisceau principal d'une antenne non monopulse). De même, ils sont soustraits vectoriellement pour produire une sortie DIFFÉRENCE (Δ). Le signal Δ sera déphasé de ± 90° par rapport au signal Σ. [2]

Lorsque la réponse arrive exactement dans la direction de l'axe de référence, les signaux GAUCHE et DROITE seront en phase et produiront ainsi l'amplitude maximale pour Σ, tandis que le signal Δ tendra vers zéro. [2]

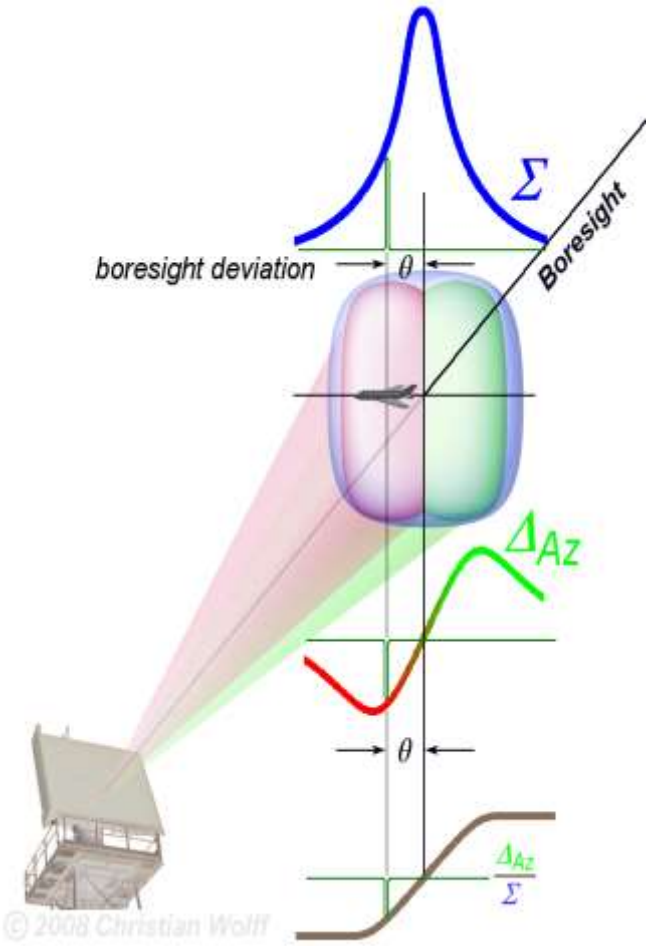


Figure 2. Principe du système monopulse (Boresight = Angle de visée). [3]

En transmission (Tx), chaque groupe est synchronisé en phase pour contribuer à la moitié du diagramme d'émission total, appelé diagramme Somme (Σ) et représenté en bleu dans la figure 2. Dans le graphique supérieur de la figure 2, Σ représente le diagramme d'émission de l'antenne. [3]

En réception (Rx), le signal de retour est capté par les deux moitiés de l'antenne. Il est alors possible de faire la somme (Σ), tout comme en émission, ou de calculer la différence (Δaz) de leur intensité.

Cette différence, connue sous le nom de différence d'azimut ou diagramme Delta-azimut, est représentée dans le graphique Δaz de la figure 2. Il indique la différence de réception en azimut pour une cible située à droite de l'axe du faisceau.

En divisant Δaz par Σ, comme illustré dans le graphique inférieur, on obtient l'azimut réel de la cible. L'écart d'angle par rapport à l'angle de visée du radar est appelé angle hors-azimut, représenté ici par OBA. [3]

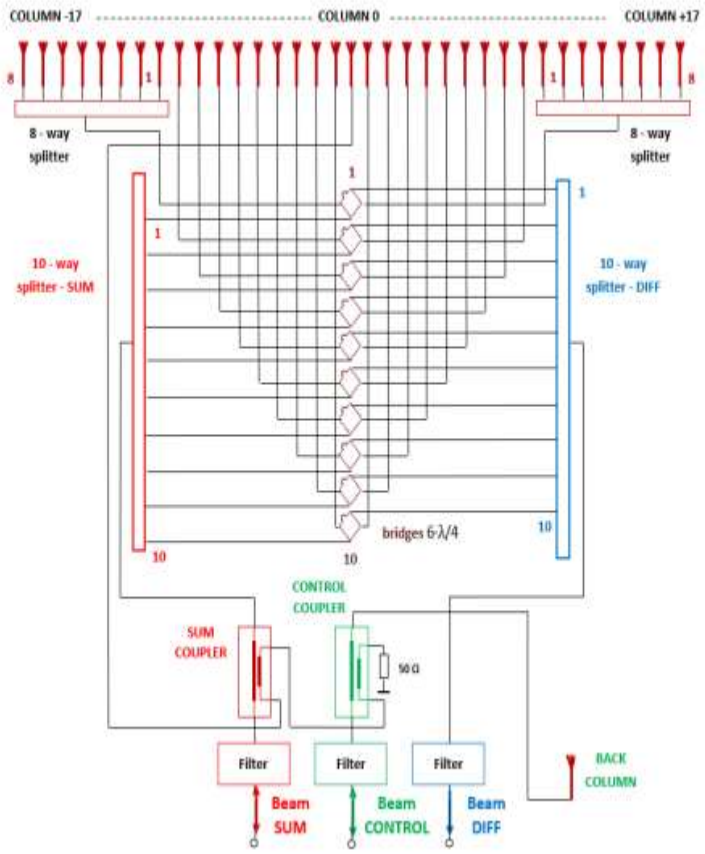


Figure 3. Diagramme fonctionnel de l'antenne MSSR proposée. [1]

Les exigences de l'ICAO ont conduit à la conception d'une antenne MSSR combinant trois faisceaux : **SUM, CONTROL et DIFFERENCE**. (Voir figure 3) .[1]
Le faisceau SUM doit être étroit horizontalement pour une couverture de 256 NM et large verticalement pour la détection des avions dans la moitié supérieure de l'espace vertical. L'antenne utilise 35 colonnes frontales verticales et une colonne arrière verticale. [1]

Les faisceaux SUM, CONTROL et DIFFERENCE dépendent de la manière dont les 36 colonnes. .[1]

Le faisceau SUM est obtenu en utilisant les 35 colonnes frontales et partiellement la colonne arrière. Il est utilisé pour le dialogue entre le MSSR et l'avion. .[1]

Le faisceau CONTROL est obtenu en utilisant la colonne arrière et les 35 colonnes frontales avec inversion de phase. Il est utilisé pour la validation des demandes MSSR dans le transpondeur de l'avion et la validation des réponses de l'avion dans l'extracteur MSSR. [1]

Le faisceau DIFFERENCE est calculé à partir des différences de signal entre les paires de colonnes frontales droite-gauche. [1]

À mesure que l'angle décalé par rapport à l'axe de référence (OBA) (θ) augmente, la différence de phase (ø) et les sorties correspondantes Σ et Δ vont changer.

Des augmentations supplémentaires de l'OBA entraîneront une ambiguïté de l'angle de phase (ø), mais cela se produira au-delà de la largeur du faisceau principal de l'antenne. L'objectif du traitement monopulse est essentiellement de déterminer l'angle de phase (ø) produit par la réponse. Il existe essentiellement deux méthodes pour y parvenir :

1) La méthode de somme - différence : utiliser la somme (Σ) et la différence (Δ) pour déterminer la phase Φ.

2) La méthode de traitement de phase : Mesurer directement (et précisément) l'angle de phase ø entre GAUCHE et DROITE.

A) Techniques de mise en œuvre du monopulse (méthode de somme-différence)

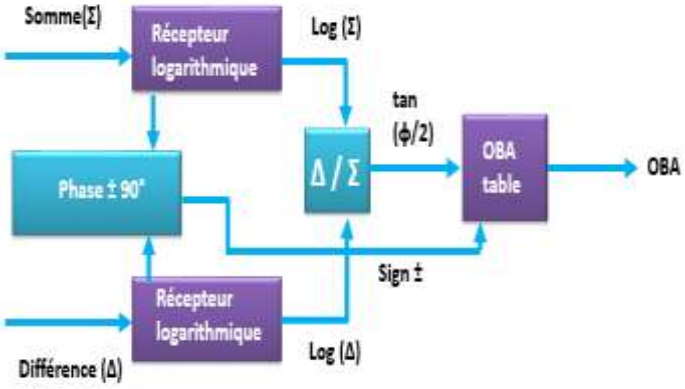


Figure 4. Principe de la méthode de somme-différence.

Ici, les signaux de somme (Σ) et de différence (Δ) provenant de l'antenne sont amplifiés par des récepteurs logarithmiques. Ces deux récepteurs doivent avoir des caractéristiques de gain de sortie précises et identiques (dans la mesure du possible).

Étant donné que les récepteurs fournissent une sortie logarithmique, le rapport d'amplitude requis Δ/Σ peut simplement être déterminé en soustrayant une valeur de sortie de l'autre (log Δ – log Σ).

Cette valeur est ensuite utilisée pour déterminer l'OBA en utilisant la table de recherche OBA. La table de recherche est calibrée pour correspondre aux caractéristiques spécifiques de Δ/Σ de l'antenne.

Le signe (±) de l'OBA est déterminé à partir de la phase relative de Σ et Δ (qui devrait être ± 90°). Cela peut être fait avec un détecteur de phase relativement simple.

En principe, l'angle de phase entre Σ et Δ bascule entre -90° et +90° en travers de l'axe de référence de l'antenne. En pratique, le bruit du récepteur et d'autres imperfections du système rendront l'angle de phase ± 90° incertain pour de faibles OBA. Dans ce cas, un signe incertain peut être déclaré pour le signal.

B) Techniques de mise en œuvre du monopulse (méthode de traitement de phase).

La méthode de traitement de phase du monopulse mesure directement l'angle de phase ø entre GAUCHE et DROITE à l'aide de détecteurs de phase précis.

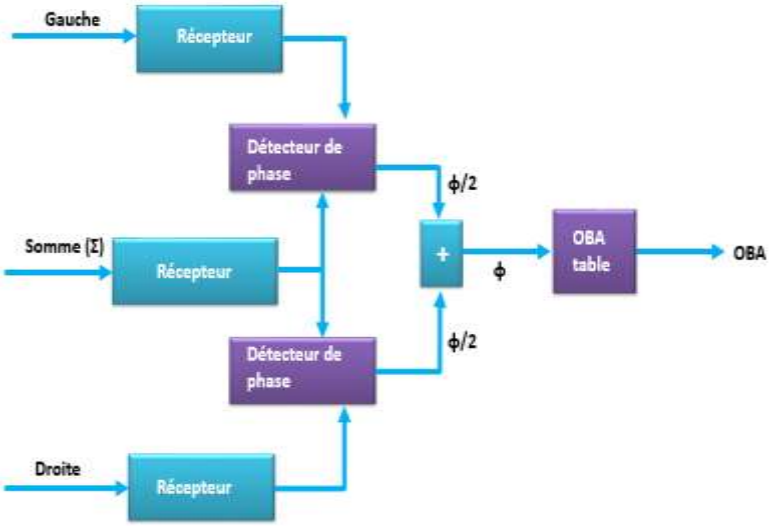


Figure 5. Le principe de la méthode de traitement de phase.

En pratique, les détecteurs de phase ne peuvent mesurer que des angles entre ± 90°, mais l'angle de phase ø varie entre ± 180° à travers le faisceau principal.

Par conséquent, il est courant d'utiliser une méthode d'angle demi, comme indiqué dans la figure 5, dans laquelle la phase des signaux GAUCHE et DROITE est mesurée par rapport au signal de somme (Σ) (c'est-à-dire qu'il s'agit de faire deux mesures de ø/2).

Les deux mesures sont ensuite additionnées pour donner une mesure de l'angle de phase ø. Cette valeur est ensuite utilisée pour déterminer l'OBA en utilisant la table de recherche OBA, calibrée pour correspondre aux caractéristiques particulières de l'antenne.

Les signaux GAUCHE et DROITE doivent d'abord être reconstitués à partir des signaux de somme (Σ) et de différence (Δ) conventionnellement produits par l'antenne monopulse.

III. SIMULATION

Il est possible de réaliser des mesures des diagrammes de rayonnement simultanés de somme et de différence, ainsi que du diagramme Σ/Δ (figure.6) [4].

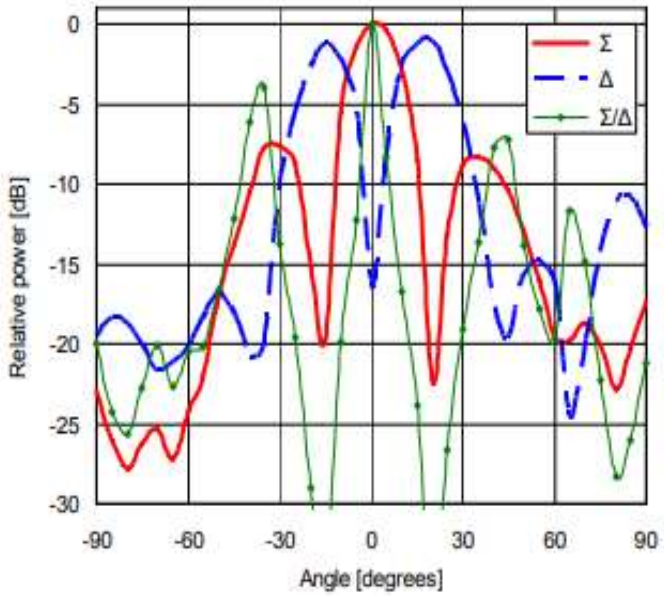


Figure 6. Diagrammes de somme (Σ) et de différence (Δ) mesurés obtenus par un système d'antenne. [4]

Ce dernier peut être directement mesuré à l'aide de l'analyseur de réseau ou calculé à partir des valeurs mesurées des diagrammes de somme et de différence. [4]

Le diagramme Σ/Δ présente un faisceau plus étroit, ce qui explique pourquoi l'utilisation d'un système monopulse améliore la précision de mesure de la coordonnée angulaire. [4]

Les diagrammes de somme et de différence dans la figure.6 sont normalisés en fonction de la valeur maximale du diagramme de somme (valeur à 0°). Quant au diagramme Σ/Δ, il est normalisé par rapport à sa valeur maximale à 0. [4]

IV. DISCUSION

A) Avantages du SSR monopulse

Le monopulse offre les avantages suivants par rapport aux solutions techniques précédentes (et est recommandé pour toute nouvelle mise en œuvre de système) :

Certains des avantages du SSR monopulse sont les suivants :

- Un taux d'interrogation plus bas (fréquence d'interrogation) est possible car moins de réponses sont nécessaires dans le traitement pour la station au sol. Cela permet une réduction significative du nombre d'interrogations envoyées (et donc des réponses générées) et a un effet positif sur l'environnement RF du SSR.

- Le taux de répétition de transmission est généralement environ un tiers de celui d'un système à fenêtre glissante. Le taux d'interrogation plus bas réduit l'occupation des transpondeurs et les interférences mutuelles, au bénéfice de tous les autres systèmes opérant dans le même environnement.

- Un traitement amélioré grâce à la disponibilité d'une valeur de relèvement en plus des informations d'amplitude et de temps pour chaque impulsion. Les systèmes SSR monopulse modernes sont généralement dotés de techniques de traitement avancées. En particulier, le traitement des réponses peut tirer parti du monopulse pour améliorer le décodage.

- Le monopulse est une condition préalable aux systèmes Mode S, ce qui fait du monopulse la voie à suivre.

L'utilisation du SSR monopulse garantit que les exigences opérationnelles mentionnées précédemment, en termes de maintien des minimas de séparation du trafic, peuvent être plus facilement atteintes.

B) Limitations du SSR monopulse

Les limitations connues des systèmes monopulse .sont les suivants :

- La mise en œuvre du SSR monopulse nécessite un équipement de qualité. Cela entraînera des coûts supplémentaires. [2]

- Les performances obtenues avec un SSR monopulse dépendront de l'environnement du site. Le monopulse suppose intrinsèquement que le signal de réponse entrant dans l'antenne provient d'une seule direction. [2]

C) Mesure de l'azimut avec la méthode monopulse

- Pour le SSR : il a été démontré que l'estimation monopulse de l'azimut est la meilleure solution. [2]

- Pour le SSR Mode S : seulement un nombre très limité de réponses doit être extrait par cible, par balayage, pour maintenir une "trajectoire" Mode S. Pour cette raison, le

traitement monopulse dans l'interrogateur est certainement indispensable. [2]

- Les exigences minimales de couverture spécifiées concernent une couverture SSR duplex dans l'espace aérien en route et une couverture SSR duplex plus une couverture PSR simple dans les zones terminales. [2]

Exigences spécifiques pour le SSR et le monopulse :

- Les équipements SSR installés pour répondre aux exigences de surveillance radar de cette norme ou pour remplacer les équipements existants doivent être de type monopulse. [2]
- Recommandation : Les nouveaux systèmes monopulse SSR (MSSR) devraient être capables d'être mis à niveau vers des fonctions de surveillance améliorée Mode S. [2]

V. CONCLUSION

La technique monopulse est une approche importante utilisée dans les radars secondaires de surveillance (MSSR) pour améliorer la précision des mesures d'angles d'azimut et d'élévation. Cette technique repose sur l'utilisation de réseaux d'antennes et sur l'analyse de la phase des signaux reçus.

En utilisant des réseaux d'antennes, le radar MSSR peut diviser le faisceau de transmission en plusieurs lobes ou éléments, ce qui permet de capturer différentes informations sur les cibles aériennes. En analysant la phase des signaux reçus, le radar peut déterminer avec précision l'angle d'azimut et d'élévation des cibles.

Grâce à la technique monopulse, le radar MSSR peut fournir des informations plus précises sur la position et le mouvement des cibles aériennes. Cela est essentiel pour assurer une surveillance efficace et fiable de l'espace aérien, en permettant notamment l'identification des aéronefs.

REFERENCES

[1] Gheorghe Minteuan, Tudor Palade, Emanuel Puschita, Paul Dolea et Andra Pastrav. "Monopulse Secondary Surveillance Radar Coverage

[2] Documents techniques internes de l'équipe ENNA « Monopulse Secondary Surveliance Radar operation »

[3] RadarTutoriel : https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antenne%20monopulse.fr.html

[4] Davor BONEFAČIĆ 1 , Julijana JANČULA 2 , Ninoslav MAJUREC3.“Model of a Monopulse Radar Tracking System for Student Laboratory”