

Detection, characterization and classification of LPI radar signal through Deep Learning methods

Mazouz

Reihan

2^{ème} année

Thématique référencée ONERA :
DEMR & L2S & Avantix

Mail : reihan.mazouz@centralesupelec.fr

Tél. : 31337

Directeur(s) de thèse (nom, prénom, institution)	José Picheral, L2S, Centralesupelec
Encadrant(s) ONERA (nom, prénom, dépt/unité)	Jonathan, Bosse, DEMR Abigael, Taylor, DEMR
Site	PALAISEAU
Thèse financée par	Avantix, Eviden

Mots clés : LPI, traitement du signal, deep learning, réseaux de convolution, image temps fréquence

English Abstract

Radar signal **detection** and **interception** are vital aspects of electronic warfare, forming the backbone of modern military strategies. Capturing and analyzing enemy radar emissions plays a critical role in intelligence gathering, signal jamming, and deploying countermeasures. However, advancements in radar technologies have led to increasingly sophisticated signals, challenging the effectiveness of existing surveillance systems. This research aims to develop innovative approaches for **detecting, characterizing, and classifying** Low Probability of Interception (**LPI**) radar signals.

LPI signals are deliberately designed to **evade detection** by dispersing their energy across wide frequency bands and/or prolonged durations. This reduces their spectral power density, rendering them nearly indistinguishable from background noise. Traditional systems of signals interception, which rely on simplified assumptions or prior knowledge, face significant limitations when addressing such challenges. Conventional detection techniques, such as time-frequency integration, often prove inadequate against modern LPI signals.

Deep Learning offers transformative potential in overcoming these challenges. Convolutional Neural Networks (CNNs), capable of processing high-dimensional data without predefined features or rigid assumptions, have shown remarkable success in uncertain environments. This research integrates deep learning models with **signal processing techniques** to develop robust and adaptive solutions, advancing the state of the art in electronic warfare and addressing the growing complexity of LPI signal detection.

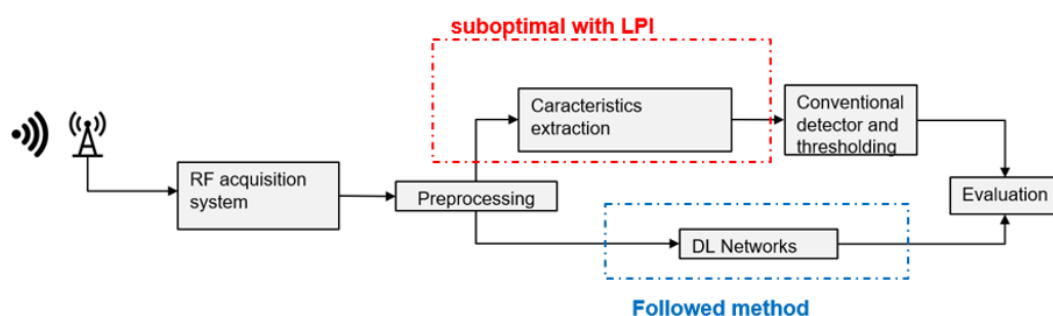


Figure 1 – Block diagram comparing the conventional detection chain with the Deep Learning-based chain.

Objectifs

Cette thèse vise à développer des approches innovantes pour la détection, la caractérisation et la classification des signaux radar à faible probabilité d'interception (LPI). L'objectif est de répondre aux défis posés par leur furtivité et leur complexité croissante, mettant à défaut les méthodes de détection conventionnelles.

Les principaux objectifs, classés par ordre d'importance, sont :

- Proposer des méthodes de détection des formes d'ondes LPI dans des conditions de faibles SNR.
- Caractériser et classifier les signaux détectés
- Concevoir des solutions pratiques adaptées aux besoins industriels en guerre électronique.

Contexte

La détection et l'interception des signaux radar jouent un rôle essentiel dans la guerre électronique, une composante stratégique des conflits modernes. Les radars, utilisés pour surveiller, localiser et identifier des cibles, évoluent rapidement avec l'introduction de technologies avancées rendant leurs signaux de plus en plus complexes. Parmi ces technologies, les radars à faible probabilité d'interception (LPI) se distinguent par leur capacité à dissimuler leurs émissions en dispersant leur énergie sur de larges bandes de fréquences ou plages temporelles, réduisant ainsi leur densité spectrale de puissance et les rendant difficiles à distinguer du bruit ambiant.

Les méthodes de détection traditionnelles, comme l'intégration temps-fréquence, reposent sur des hypothèses simplificatrices qui limitent leur efficacité face aux signaux LPI modernes. Ces limitations soulignent le besoin de solutions plus robustes et adaptatives pour relever les défis liés à la furtivité et à la variabilité de ces signaux radar.

Dans ce contexte, l'émergence des techniques d'apprentissage profond offre de nouvelles perspectives. En exploitant des modèles capables de traiter des données complexes, tels que les réseaux de neurones convolutifs (CNNs), il est désormais possible de dépasser les performances des approches traditionnelles. Cette thèse s'inscrit dans cette dynamique, avec pour ambition d'explorer et de développer des solutions innovantes pour améliorer la détection, la caractérisation et la classification des signaux radar LPI.

Objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques sont :

- Trouver la représentation permettant d'extraire au mieux le signal du bruit.
- Se rapprocher des performances d'un filtre adapté, maximisant le SNR lorsque la forme d'onde émise est connue lors de la réception.
- Avoir un temps de traitement raisonnable.

Démarche, déroulement et principaux résultats obtenus

La méthodologie suivie dans cette thèse s'articule autour de plusieurs étapes clés :

- **Analyse et formalisation du problème** : Une revue bibliographique approfondie a permis d'identifier les caractéristiques des formes d'ondes LPI et d'explorer des méthodes de traitement du signal susceptibles d'améliorer leur détection.
- **Conception d'un simulateur** : Le cadre confidentiel de cette thèse nécessite l'utilisation de données simulées. Un simulateur a donc été développé pour générer différentes formes d'ondes LPI tout en intégrant les contraintes liées aux systèmes d'émission et d'interception radar.
- **Sélection d'un modèle de détection deep learning** : Le modèle CNN YOLOv8 a été choisi comme algorithme principal de détection (cf. Fig. 2), en raison de ses nombreux avantages :
 - Détection, caractérisation et classification en une seule étape.
 - Faible temps d'inférence pour un modèle de Deep Learning.
 - Facilité d'utilisation grâce à sa disponibilité en open source.
 - Multiples configurations pré-entraînées pour un démarrage rapide.
- **Comparaison des performances** : Une méthode de détection conventionnelle, le Generalized Likelihood Ratio Test (GLRT), a été mise en œuvre pour servir de référence. Les performances des deux approches ont

été comparées en termes de probabilité de détection, de taux de fausses alarmes et de robustesse à différents niveaux de SNR.

Les résultats obtenus valident l'efficacité des modèles de Deep Learning, notamment YOLOv8, dans la détection des signaux LPI, en particulier dans des environnements bruités. Le détecteur par deep learning a en moyenne un gain de 5 dB en termes de SNR pour une probabilité de détection fixée par rapport au détecteur conventionnel.

Ces travaux ouvrent la voie à de futures recherches sur la caractérisation et la classification des signaux, ainsi qu'à l'intégration de scénarios plus complexes et réalistes.

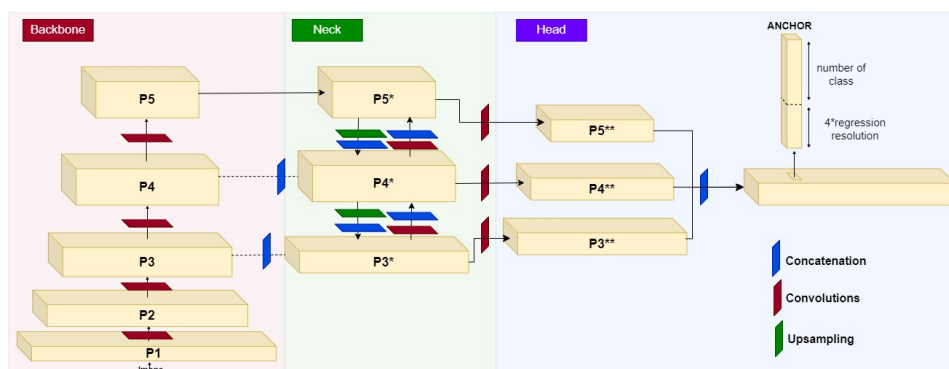


Figure 2 – Architecture du modèle YOLOv8.

Perspectives

Les travaux futurs offrent de nombreuses opportunités d'amélioration et d'approfondissement, notamment dans les axes suivants :

- **Renforcer le contexte de simulation :**
 - Intégrer de nouvelles formes d'ondes, comme les radars basés sur des signaux de bruit.
 - Ajouter des signaux d'interférences.
 - Traiter plusieurs signaux par inférence.
- **Explorer de nouvelles approches de prétraitement :** Tester des techniques permettant d'extraire plus efficacement le signal du bruit lors des étapes de prétraitement.
- **Améliorer les détecteurs conventionnels :** Optimiser leur performance pour établir des comparaisons plus pertinentes avec les approches basées sur le Deep Learning.
- **Optimiser le modèle de Deep Learning :**
 - Adapter la fonction de coût pour améliorer la détection dans des conditions de faible SNR.
 - Réviser l'architecture du modèle pour accroître sa robustesse face aux défis de détection et de classification des signaux dans les images temps-fréquence.

Liste des publications (publiées, acceptées, soumises, en cours)

Liste des communications (acceptées, soumises, prévues)

Mazouz, Reihan, et al. "Low Probability of Interception Radar Signals Detection, Comparison of a YOLOv8 Model and a Conventional Signal Processing Method" Radar Conf 2024.

Liste des brevets (publiés, déposés, en cours)

Un brevet est en cours avec Avantix