## ONERA

 $J_{\Omega}$ 

#### THE FRENCH AEROSPACE LAB

## retour sur innovation





www.onera.fr



# Analyse Temps-Fréquence Appliquée à l'Imagerie SAR Polarimétrique

Mickaël Duquenoy 20 Octobre 2009 Directeur de thèse : Prof Eric Pottier Encadrant ONERA : Dr Jean-Philippe Ovarlez Encadrant IETR : Dr Laurent Ferro-Famil





THE FRENCH AEROSPACE LAB





retour sur innovation

### Contexte

#### Exemples de SER de cibles canoniques

Géométrie	Туре	Dépendance		E
		Fréquence	Taille	Formule
- ************************************	Réflecteur trièdre tri- rectangulaire	F <sup>2</sup>	L <sup>4</sup>	$\sigma = \frac{12 \pi a^4}{\lambda^2}$
A CO	Réflecteur dièdre droit rectangulaire	F	L	$\sigma = \frac{8 \pi a^2 b^2}{\lambda^2}$
	Plaque rectangulaire plane	$\mathbf{F}^{2}$	L	Maximum $\sigma = \frac{4 \pi a^2 b^2}{\lambda^2}$ Incidence normale
Géométrie	Туре	Dépeno Fréquence	lance Taille	Formule
Géométrie b	<b>Type</b> Cylindre	Dépend Fréquence F	dance Taille L <sup>3</sup>	For mule Maximum $\sigma = \frac{2 \pi a b^{2}}{2}$
Géométric b b c e	Type Cylindre Sphere	Dépend Fréquence F	L <sup>3</sup>	For mule Maximum $\sigma = \frac{2 \pi a b^{2}}{2}$ Incidence nor male Maximum $\sigma = \pi a^{2}$

3

Définition de la SER  
$$\sigma = \lim_{R \to \infty} 4\pi R^2 \frac{|\overrightarrow{E^s}|^2}{|\overrightarrow{E^i}|^2} = \lim_{R \to \infty} 4\pi R^2 \frac{|\overrightarrow{H^s}|^2}{|\overrightarrow{H^i}|^2}$$

La SER est dépendante :

Fréquence émise.

Polarisation incidente et de réception.

Orientation de la cible.

Nature de la cible.

#### Hypothèses sur les diffuseurs en imagerie RADAR Modèles des "points brillants"

Diffuseurs ponctuels

- Diffuseurs isotropes
- Diffuseurs non-dispersifs ou blancs

Hypothèses valables en bande étroite et en faible excursion angulaire mais obsolètes pour les nouvelles techniques d'imagerie (THR)

ONERA

## Contexte : Mise en évidence de la dispersivité de certains diffuseurs sur des données THR



 $\lambda = 3.4cm$   $\lambda = 3.2cm$  $\lambda = 3cm$ 

stationnaire des diffuseurs

comportement non-

Hyperimages + Imagerie de laboratoire (Ondelettes bi-dimensionnelles) [Bertrand-Ovarlez 1994].

Application imagerie SAR + Cibles déterministes (Ondelettes bi-dimensionnelles) [Ovarlez-Tria 2003].

Non-stationnarité polarimétrique + H/Alpha + milieux naturels (Sous-Ouvertures et TFCT bi-dimensionnelle) [Ferro-Famil 2004].



Application PollnSAR + optimisation de cohérence (Ondelettes bi-dimensionnelles) [Colin-Tria 2005].

Identification + corrélation de signatures (Ondelettes bi-dimensionnelles) [Tria 2005].

Classification + zone urbaines + signatures tempsfréquence polarimétriques (TFCT bi-dimensionnelle) [Leducq-Ferro-Famil 2006].



Limitations des études précédentes : Seules les ondelettes continues et la TFCT ont été utilisées.

Généralisation du concept d'hyperimages ?

Apport d'information = anisotropie et/ou dispersivité ?

Avantages et limitations des distributions tempsfréquence usuelles ?



Limitations des études précédentes : La nonstationnarité énergétique ou polarimétrique n'a pas été reliée aux caractéristiques de cibles.

- Non-stationnarité au sens énergétique = ? SER (orientation, nature, fréquence) ?
- Causes Non-stationarité polarimétrique =
   Limitations des distributions temps-fréquence ?
   Phénomènes physiques reliés à des caractéristiques de cible ?

Limitations des études précédentes : Les processus de classification développés sont limités à un type de cible ou à une signature

Approche de Tria par corrélation des signatures : Sensible à l'orientation des diffuseurs. L'approche par corrélation est-elle pertinente ?

Approche de Leducq sur des zones urbaines mais pas sur d'autres types de cibles



Limitations des études précédentes : Aucune étude exhaustive sur l'analyse de cibles déterministes (cibles artificielles) alors que la littérature suggère que ces cibles présentent un caractère anisotrope et dispersif prononcé.



Analyse temps-fréquence multi-dimensionnelle appliquée à l'imagerie radar SAR :

Caractérisation des diffuseurs par l'analyse temps-fréquence et la polarimétrie RADAR :

Classification des diffuseurs basée sur l'information polarimétrique d'anisotropie et de dispersivité :

Conclusion & Perspectives



### Plan : Partie I

Analyse temps-fréquence multi-dimensionnelle appliquée à l'imagerie radar SAR :

Principe de l'imagerie RADAR et limitations.

 Transformées temps-fréquence bi-dimensionnelles : concept d'hyperimage.

Mise en évidence des phénomènes d'anisotropie et de dispersivité des diffuseurs.



# Partie I : Principe de l'imagerie radar classique et limitations



# Partie I : Principe de l'imagerie radar classique et limitations



## Exemple d'un modèle théorique de diffuseurs **anisotropes** et **dispersifs**



L'image classique SAR seule ne permet pas de retrouver l'information d'anisotropie et de dispersivité

ONERA

#### Partie I : Transformées temps-fréquence bidimensionnelles : Concept d'hyperimage



#### Partie I : Apport d'information sur l'anisotropie et la dispersivité des diffuseurs par la classe de Cohen





#### Partie I : Apport d'information sur l'anisotropie et la dispersivité des diffuseurs par la classe de Cohen





#### Partie I : Apport d'information sur l'anisotropie et la dispersivité des diffuseurs par la classe Affine



#### Partie I : Mise en évidence de l'anisotropie et de dispersivité des diffuseurs sur des données THR

#### **Scalogramme 2D**

#### Spectrogramme 2D



#### **Partie I : Conclusion**

L'imagerie SAR haute-résolution n'est pas adaptée à imager des diffuseurs anisotropes et dispersifs :

Les résultats en simulation montrent que la qualité d'image est dégradée.

La régle d'inversion n'est pas adaptée : perte de l'information d'anisotropie et de dispersivité.

L'analyse temps-fréquence bi-dimensionnelle permet de retrouver l'information d'anisotropie et de dispersivité des diffuseurs selon les propriétés des distributions temps-fréquence

- Section of the sectio
- Ondelettes continues limitées par les relations d'incertitude (dit principe d'Heisenberg) (maillage dépendant de la fréquence et de l'orientation)
- Wigner-Ville limitée par les termes d'interférence
- PWVL limitée par les relations d'incertitude (dit principe d'Heisenberg)

L'application des hyperimages sur des images SAR hauterésolution a mis en évidence des diffuseurs de cible déterministe anisotropes et dispersifs

Pour caractériser les diffuseurs, nécessité d'utiliser l'information fournie par les hyperimages en complément d'une autre source d'information radar : la polarimétrie.



### Plan : Partie II

Caractérisation des diffuseurs par l'analyse tempsfréquence et la polarimétrie RADAR :

Décompositions polarimétriques cohérentes et noncohérentes.

Les hyperimages polarimétriques.

Applications sur des données de chambre anéchoïque pour relier l'information aux caractéristiques de cible.



## Partie II : Décompositions polarimétriques cohérentes et non-cohérentes



#### Partie II : Décompositions polarimétriques cohérentes



#### Pauli

#### Interprétation

- $\alpha$ le simple rebond
- le double rebond 17
- la diffusion de volume



#### **Cameron**

#### Interprétation

N-R : Non-réciproque As : Asymétrique Rh : Hélice droite Lh : Hélice gauche T : Trièdre D : Dièdre Dp : Dipole C : Cylindre Nd : Dièdre étroit Wd : Quart d'onde



(wd)

(nd)

(c)

(dp)

(d)

(ss)

(as)

#### **Krogager**

-300

#### Interprétation

- $k_s$ la composante sphère
- $k_d$ la composante dièdre

 $k_h$ la composante hélice

ONERA

# Partie II : Décompositions polarimétriques incohérentes

25



JNIVERSITÉ DE

ONERA

that PRENCH ADDRESS OF LA



Contrainte : l'analyse temps-fréquence doit préserver l'information de la phase relative entre les canaux polarimétriques : vérifiée par les décompositions atomiques (linéaires) :

- Transformée de Fourier à court-terme
- Transformée en ondelettes continues

#### Le choix des outils polarimétriques dépend des applications :

- Décompositions cohérentes : onde totalement polarisée : Outils adaptés à l'imagerie en chambre anéchoique
- Décompositions cohérentes + test de cohérence (Touzi) : Outils adaptés à l'imagerie SAR
- Décompositions non cohérentes : onde partiellement polarisée : Outils adaptés à l'imagerie SAR







#### Tête : Isotropique et non-dispersive Sphère

**Ailes** : Réponse directive, mélange des contributions du bord d'attaque et du bord de fuite : Limitations des relations d'incertitude d'Heisenberg



**Entrée d'air** : Réponse anisotrope et dispersive

Sortie d'air fermée : Réponse directive, phénomène de guide d'onde Réflexion spéculaire

Dérives : Réponse anisotropique, expliquée par le fait que le radar ne voit pas la dérive pour tous les angles, Réponse symétrique Géométrie symétrique

31





Sphere, Helix, Diplane Decomposition





Huynen Orientation (PSI)



### **Partie II : Conclusion**

 Le span étendu met en évidence des diffuseurs anisotropiques et dispersifs au sens énergétique du terme
 Parfois, le span étendu exprime l'orientation dans le plan horizontal dans le cadre de réponses directives.
 Le span étendu explique la formation d'image.
 Limitations : relations d'incertitude dit d'Heisenberg.

Parfois les hyperimages polarimétriques décrivent les diffuseurs par leur nature, leur orientation absolue dans le plan vertical (Huynen) et leur orientation relative dans le plan horizontal :

Les hyperimages de Cameron présentent la meilleure source d'information.

Les hyperimages polarimétriques mettent en évidence un comportement polarimétrique non-stationnaire

- Mélange des contributions causé par le principe d'incertitude d'Heisenberg.
- Réponse anisotropique : le radar ne voit pas la même géométrie pour tous les angles d'observation dans la même cellule de résolution.

Utilisation de l'information fournie par les hyperimages polarimétriques pour classifier les diffuseurs.



### Plan : Partie III

- Classification des diffuseurs basée sur l'information polarimétrique d'anisotropie et de dispersivité :
  - Extraction de paramètres caractéristiques.
  - Classification basée sur les paramètres physiques.
  - Classification supervisée par réseaux de neurones.





**Besoin de paramètres caractéristiques pour identifier les états** 

JNIVERSITÉ DE

ONERA

 $\begin{aligned} \text{Densité marginale en angle} \\ \text{Marginal}(x, y, \theta) &= \frac{\int_f \text{Span}(x, y, f, \theta) df}{\int_\theta \int_f \text{Span}(x, y, f, \theta) d\theta df} \end{aligned}$ 

#### Statistiques basiques extraites de cette densité :

- Valeur moyenne exprime l'orientation du diffuseur
- Ecart type représente la directivité des diffuseurs :
  - Valeur faible : la réponse du diffuseur est directive.
  - Autrement la réponse du diffuseur est non-directive.





#### Densité marginale en fréquence

 $\mathrm{Marginal}(x,y,f) = \frac{\int_{\theta} \mathrm{Span}(x,y,f,\theta) d\theta}{\int_{\theta} \int_{f} \mathrm{Span}(x,y,f,\theta) d\theta df}$ 

# Statistiques basiques extraites de cette densité :

- La valeur moyenne exprime la fréquence centrale de la réponse du diffuseur.
- L'écart type représente le comportement résonant ou non du diffuseur
  - Valeur faible : la réponse du diffuseur est résonante.
  - Autrement la réponse du diffuseur est non-résonante.

ONERA

 Densité polarimétrique de classe extraite de l'hyperimage de Cameron :

#### Interprétation :

- Si une classe atteint le maximum 1, alors le diffuseur est stationnaire.
- Autrement, le diffuseur est considéré comme polarimétriquement nonstationnaire.
- En pratique nous avons choisi un seuil de 50% pour identifier les diffuseurs stationnaires ou non



# Partie III : Classification basée sur les paramètres physiques



# Partie III : Classification basée sur les paramètres physiques

#### Classification H/A/Alpha

#### Classification Temps-Fréquence





# Partie III : Classification supervisée par réseaux de neurones



#### Partie III : Classification supervisée par réseaux de neurones / Résultats chambre anéchoïque



#### Classification



#### Classification





# Partie III : Classification supervisée par réseaux de neurones / Résultats chambre anéchoïque

#### Base d'apprentissage de Krogager



#### Base d'apprentissage de Cameron



#### Classification



Classification





## Partie III : Classification supervisée par réseaux de neurones / Résultats Image SAR

#### Paramètre alpha



#### Classification





## Partie III : Classification supervisée par réseaux de neurones / Résultats Image SAR

**Freeman-Durden signatures** 

2 1.9 Angle, degree

#### Frequency Country 3 Parking **Observation** Angle Classification by Multilayer perceptron (reiected) Freeman-Durden Decomposition (Building) 100 -200 Building (Champ1) Country 2 (Champ2) 200 × 250 (Champ3) Bange 300 (Parking) (road) 400 2 1.8 450 Crossnge Y, meters Country 1 Road Trihedral 500 (rejected 500 450 400 350 300 250 200 150 100 50 Cross-range Y meters

Classification

2 1.9 Angle, degree

## **Partie III : Conclusion**

- Recherche de paramètres caractéristiques :
  - Mise en évidence du caractère résonant ou non, directif ou non, au sens énergétique :
    - Ecart type en angle (directivité).
    - Ecart type en fréquence (résonant)
  - Paramètre caractéristique de la stationnarité polarimétrique :
    - Densité énergétique de Classe
- Développement d'un processus de classification hiérarchique :
  - Résultats satisfaisants en chambre anéchoïque mais discutables sur des données SAR
  - Résultats de classification dépendant des seuils fixés manuellement.
  - Besoin de rechercher des paramètres caractéristiques plus significatifs



### **Partie III : Conclusion**

- Développement d'un processus de classification supervisée par réseaux de neurone :
  - Span étendu présente les meilleurs résultats sur des données de chambre anéchoïque mais n'est pas significatif sur des données SAR.
  - Sur des données SAR, les cibles déterministes sont correctement classifiées contrairement à la végétation et la canopée : signatures polarimétriques temps-fréquence des cibles déterministes significatives.
  - Problème pour la végétation
  - Problème du choix des centres de rétrodiffusion (effectué manuellement)







## Conclusion

51

- Généralisation du concept d'hyperimage aux transformées temps-fréquence usuelles
- Développement du concept d'hyperimages polarimétriques :
  - Caractérisation des diffuseurs selon leur nature, leur orientation absolue dans le plan vertical (Huynen) et leur orientation relative dans le plan horizontal
  - Mise en évidence de la non-stationnarité polarimétrique.
- Développement d'un processus de classification hiérarchique :
  - Recherche de paramètres caractéristiques qui synthétisent l'information fournie par les hyperimages polarimétriques :
    - Diffuseurs dispersifs ou non.
    - Diffuseurs anisotropes ou isotropes.
    - Diffuseurs polarimétriquement stationnaires ou non.
  - Résultats satisfaisants en chambre anéchoïque mais discutables sur des données SAR

#### Conclusion

Développement d'un processus de classification supervisée par réseaux de neurones :

Span étendu présente les meilleurs résultats sur des données de chambre anéchoïque mais n'est pas significatif sur des données SAR.

Sur des données SAR, les cibles déterministes sont correctement classifiées contrairement à la végétation et la canopée : signatures polarimétriques temps-fréquence des cibles déterministes significatives.

Problème pour la végétation

#### **Perspectives**

53

Campagne de mesures SAR circulaire sur des cibles déterministes full-polar :

- Base de cibles déterministes (militaires)
- Vérifier l'anisotropie (excursion angulaire de 360°) et la dispersivité des diffuseurs
- Etudier l'influence de l'anisotropie et de la dispersivité sur la formation d'images

Rechercher des paramètres significatifs pour améliorer les processus de classification :

- Diffuseurs dispersifs ou non-dispersifs
- Diffuseurs isotropes ou anisotropes

Diffuseurs polarimétriquement stationnaires ou nonstationnaires

#### **Perspectives**



## Améliorer la classification par réseau de neurones :

- Enrichir la base d'apprentissage
- Pour l'application SAR construire un annuaire de cibles décorrélées
- Problématique du choix du centre de rétrodiffusion
- Evolutions des systèmes SAR futurs :
  - Systèmes large bande et forte excursion angulaire pour améliorer la résolution.
  - Réfléchir sur des techniques hyperspectrales (multibandes)

Peut-être que la dispersivité de la végétation sera mise en évidence (EX : FOPEN) ?

### **Publications**

#### Publications revues (3) :

2009 : M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, E. Pottier, « Supervised Classification on SAR Imaging Based On Incoherent polarimetric Time-Frequency Signatures », Article invité suite à l'EUSIPCO 2009, à soumettre à la revue EURASIP Signal Processing

2009 : M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, E. Pottier, C. Morisseau, G. Vieillard, « Characterization of scatterers using neural networks based on polarimetric time-frequency signatures », Article soumis à la revue IET Signal Processing special issue Time-Frequency approach to RADAR Detection, Imaging and Classification le 27 février 2009 et en révision majeure pour le 16 octobre 2009

2008 : M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, E. Pottier, L. Vignaud, « Scatterers characterization in radar imaging using joint time-frequency analysis and polarimetric coherent decompositions », Article soumis à la revue IET Radar Sonar and Navigation, accepté le 05 août 2009

## **Publications**

#### Publications congrés (10) :

**2009** :

- M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, E. Pottier, « Classification supervisée des diffuseurs en imagerie RSO basée sur des signatures polarimétriques non-cohérentes temps-fréquence », GRETSI 2009, Dijon, France, 9-12 septembre 2009.
- M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, E. Pottier, « Supervised Classification on SAR Imaging Based On Incoherent polarimetric Time-Frequency Signatures», EUSIPCO 2009, Glasgow, Royaume-Uni, 24-28 août 2009.
- M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, E. Pottier, « HyperImage Concept : Multidimensional Time-Frequency Analysis Applied To SAR Imaging », IGARSS 2009, Cape town, Afrique du sud, 13-17 juillet 2009.
- M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, E. Pottier, « Supervised classification by neural networks using polarimetric time-frequency signatures», IGARSS 2009, Cape town, Afrique du sud, 13-17 juillet 2009.
- M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, E. Pottier, L. Ferro-Famil, C. Morisseau, G. Vieillard, « Supervised classification using neural networks based on polarimetric time-frequency signatures», POLINSAR, Frascati, Italie, 26-30 janvier 2009

ONERA

## **Publications**

#### Publications congrés :

- **2007** :
  - M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, E. Pottier, L. Vignaud, « Characterization of scatterers by their anisotropic and dispersive behavior
    - », IGARSS 2007, Barcelone, Espagne, 23-27 juillet 2007.
  - M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, L. Vignaud, E. Pottier, « SAR Imaging using Multidimensional Time-Frequency Analysis », PSIP 2007, mulhouse, France, 31 janvier-2 février 2007
  - M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, L. Vignaud, E. Pottier, « Classification based on the Polarimetric Dispersive and Anisotropic Behavior of Scatterers », POLINSAR 2007, Frascati, Italie, 22-26 janvier 2007

#### **2006** :

- M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, L. Vignaud, E. Pottier, « Study of Dispersive and Anisotropic Scatterers Behavior in Radar Imaging Using Time-Frequency Analysis and Polarimetric Coherent Decomposition », EUSAR, Dresde, Allemagne, 16-18 mai 2006.
- M. Duquenoy, J.P. Ovarlez, L. Ferro-Famil, L. Vignaud, E. Pottier, « Study of Dispersive and Anisotropic Scatterers Behavior in Radar Imaging Using Time-Frequency Analysis and Polarimetric Coherent Decomposition », IEEE International Radar Conference, Verona, USA, 24-27 avril 2006.

## Questions



