

# NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

---

ELIMINATION DE BRUIT COLORE EN RADAR DOPPLER  
UTILISANT UNE MODELISATION AUTOREGRESSIVE (AR)

M. J.L. ZOLESIO

LABORATOIRE CENTRAL DE TELECOMMUNICATIONS  
18-20 RUE GRANGE-DAME-ROSE 78140 VELIZY

---

## RESUME

Une part importante du traitement du signal dans les radars Doppler consiste à éliminer du signal reçu les échos de fouillis.

Dans cet article, on expose une méthode d'élimination adaptative des échos de fouillis spatialement étendus tels que ceux de sol, mer, pluie... (éventuellement simultanés). L'adaptativité de la méthode réside dans le calcul en temps réel d'une modélisation autoregressive de ces échos.

Après avoir justifié cette modélisation et exposé cette méthode, on montre des exemples d'élimination d'échos de fouillis sur des signaux simulés. Pour une charge de calcul peu supérieure à celle des méthodes basées sur l'estimation Doppler, la transposition et le filtrage double soustraction, cette méthode conduit à des performances nettement supérieures.

## SUMMARY

A large part of the Doppler radar signal processing consists in cancelling the clutter signal in the received signal.

This paper shows a method of adaptative filtering of clutter signals like ground, sea, rain...echoes (alone or together). The adaptativity of the method is based on an autoregressive model of these signals which is computed in real time.

After this model has been justified this paper describes some examples of filtering on simulated signals. This method provides better results than those obtained by Doppler estimation, shift and second order canceller although with a slightly bigger computational load.



## 1. INTRODUCTION

Une part importante du traitement du signal dans les radars Doppler consiste à éliminer du signal composite reçu, le bruit coloré correspondant aux échos provenant de cibles parasites créés par la végétation, la mer ou les précipitations atmosphériques naturelles ou artificielles. Ces échos parasites, appelés échos de fouillis, ont les particularités suivantes :

- 1) ils sont à spectre étroit (voir [1], [2])
- 2) ils sont spatialement étendus
- 3) ils sont localement stationnaires tant spatialement que temporellement (voir [2], [3]).

L'objet de cet article est de présenter une méthode d'élimination de ces échos de fouillis basée sur une modélisation en temps réel de ceux-ci. Par nature, cette méthode est très résistante aux pertes de stationnarité temporelle dues par exemple aux coups de vent.

Cette méthode utilise comme connaissance a priori les trois caractéristiques des échos de fouillis rappelées ci-dessus. En particulier, la première d'entre elles permet d'effectuer une modélisation autorégressive (AR) de ces signaux. La paragraphe 2 établit ce point.

Les deux autres caractéristiques des échos de fouillis sont utilisées pour obtenir un signal qui ne soit représentatif que du fouillis et non d'éventuelles cibles utiles. Ce résultat est obtenu par une intégration spatiale la plus cohérente possible et fait l'objet du paragraphe 3.

Au paragraphe 4, on montre comment la modélisation AR est utilisée pour éliminer les échos de fouillis.

Enfin, des exemples d'élimination d'échos simulés de fouillis simultanés de mer et de grêle sont présentés au paragraphe 5.

## 2. MODELISATION AR DES SIGNAUX A SPECTRE PEU ETENDU

Un signal provenant d'échos de fouillis peut être considéré, après démodulation en quadrature, comme étant une fonction aléatoire complexe  $f(t)$  définie sur  $[0, T]$  par une mesure spectrale  $df(\nu)$  nulle en dehors d'un intervalle  $D$  :

$$f(t) = \int_D e^{2\pi i \nu t} df(\nu)$$

Soit  $\nu_0$  et  $\Delta\nu$  tels que  $D$  soit inclus dans  $D_0$  avec  $D_0 = ]\nu_0 - \Delta\nu, \nu_0 + \Delta\nu[$  ; en posant

$$\nu = \nu_0 + \xi \quad \text{on a,}$$

$$f(t) = e^{2\pi i \nu_0 t} \int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} e^{2\pi i \xi t} df(\nu_0 + \xi)$$

En développant l'exponentielle, on obtient alors :

$$f(t) = e^{2\pi i \nu_0 t} \cdot \left[ \int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} df(\nu_0 + \xi) + P(t) \right]$$

avec

$$P(t) = \sum_{p \geq 1} \frac{(2\pi i t)^p}{p!} \int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} \xi^p df(\nu_0 + \xi)$$

On voit donc que  $f(t)$  peut se mettre sous la forme d'une somme d'une sinusoïde de fréquence  $\nu_0$  et de moyenne quadratique égale à l'énergie du signal et d'un terme correctif  $P(t) \cdot e^{2\pi i \nu_0 t}$  qui dans le cas de signaux à spectre étroit est une perturbation de faible puissance instantanée.

En effet, pour  $T$  donné et pour  $\Delta\nu$  petit devant  $1/T$ ,  $P(t)$  peut s'approximer au 1er ordre en  $\xi$  par :

$$P(t) \sim 2\pi i t \cdot \int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} \xi df(\nu_0 + \xi)$$

On peut alors déterminer la variable aléatoire  $\nu_0$  de manière à annuler ce 1er ordre. En prenant :

$$\nu_0 = \int_D \xi df(\xi) / \int_D df(\xi) \quad (1)$$

on a :

$$\int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} \xi df(\nu_0 + \xi) = 0$$

Avec ce choix de  $\nu_0$ , on a alors :

$$P(t) \sim o \left[ (\Delta\nu \cdot T)^2 \right]$$

Lorsque  $\Delta\nu$  est petit, on peut donc approximer  $f(t)$  par une sinusoïde de fréquence  $\nu_0$  déterminée par (1) sans commettre d'erreur notable en puissance instantanée, donc par un signal autorégressif d'ordre 1.

Plus généralement, on peut scinder l'intervalle  $D$  en plusieurs intervalles  $D_i = (\nu_i - \Delta\nu_i, \nu_i + \Delta\nu_i)$   $i = 1, \dots, N$  de façon à se ramener au cas où les  $\Delta\nu_i$  sont petits et ainsi approximer  $f(t)$  par un signal autorégressif d'ordre  $N$ , ceci n'ayant d'intérêt en pratique que si  $N$  est assez petit ( $\leq 4$ ).

Le signal  $f(t)$  sera donc modélisé comme suit :

$$f(t) = x(t) + p(t) \quad \text{où } x(t)$$

est un signal autorégressif d'ordre  $N$  et où  $p(t)$  est une perturbation de faible puissance (l'analyse de simulations montre que  $p(t)$  se situe au niveau du bruit thermique).

ELIMINATION DE BRUIT COLORE EN RADAR DOPPLER  
UTILISANT UNE MODELISATION AUTOREGRESSIVE (AR)

3. OBTENTION D'UN SIGNAL REPRESENTATIF DU FOUILLIS

Le paysage radar est observé sous forme de cellules selon un réseau régulier en coordonnées polaires ; l'ouverture angulaire des secteurs étant égale à la largeur du lobe d'antenne et la profondeur radiale des cellules correspondant au pouvoir séparateur en distance du radar. Le senseur radar délivre des signaux provenant de chacune de ces cellules dites cellules de résolution, sous la forme suivante :

$$S_i(t) = C_i(t) + f_i(t) + b_i(t) , t \in [0, T]$$

où l'indice  $i$  repère la cellule de résolution et où :

- $C_i(t)$  est le signal provenant d'une éventuelle cible
- $f_i(t)$  est le signal provenant du fouillis
- $b_i(t)$  est le bruit thermique du radar

Le fouillis étant étendu spatialement, contrairement aux cibles utiles, et étant localement stationnaire, en considérant  $M$  cellules de résolution adjacentes (donc observées par le radar pratiquement simultanément), les signaux  $f_i(t) \ i = 1, \dots, M$  provenant de celles-ci sont en fait différentes réalisations du même processus aléatoire représentatif du fouillis (homogène) contenu dans ces cellules.

En faisant une intégration spatiale, c'est-à-dire en moyennant sur l'indice  $i$  on obtient un signal

$$S(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_i(t)$$

qui est de la forme suivante :

$$S(t) = \frac{1}{M} C_{i_0}(t) + f(t) + b(t) \quad (2)$$

où  $i_0$  désigne l'éventuelle cellule parmi les  $M$  considérées contenant une cible utile,  $f(t)$  le signal représentatif du fouillis pendant cette observation et  $b(t)$  un bruit gaussien blanc.

Bien entendu, on a intérêt à effectuer une intégration aussi cohérente que possible de manière à augmenter le rapport fouillis à bruit  $f(t)/b(t)$ . (voir [4]). Ceci ne peut se faire qu'approximativement (car les  $f_i(t)$  ne sont en général pas monofréquentiels) en remettant en phase les signaux  $S_i(t)$  ce qui sera appelé une intégration pseudo-cohérente.

Pour un nombre de cellules  $M$  assez important la contribution de la cible utile dans  $S(t)$  devient négligeable comme le prouve les 2 exemples de la figure 1

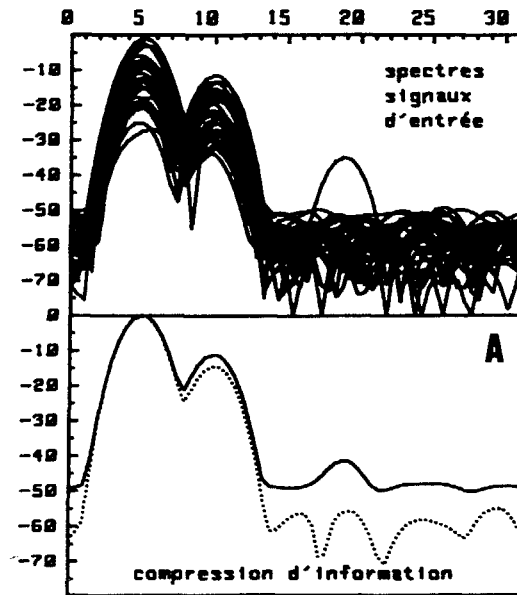


Figure 1.a

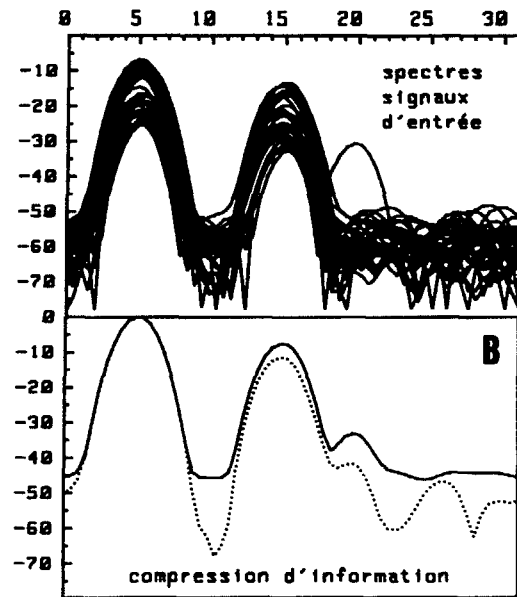


Figure 1.b

Figures 1.a et 1.b

Sur les parties du haut figurent les spectres de signaux simulés provenant de 32 cellules de résolution contenant un fouillis bi-modal et dont l'une contient en plus une cible utile. Sur les parties respectives du bas sont tracés :

- en trait plein, le spectre moyen des 32 signaux
- en trait pointillé, le spectre du signal obtenu par intégration pseudo-cohérente.

- les abscisses sont graduées en fréquences réduites.
- les ordonnées sont graduées en décibels.



ELIMINATION DE BRUIT COLORE EN RADAR DOPPLER  
UTILISANT UNE MODELISATION AUTOREGRESSIVE (AR)

4. METHODE D'ELIMINATION DU FOULLIS

En considérant le signal  $s(t)$  défini par (2) et en modélisant  $F(t)$  par un signal autorégressif comme au paragraphe 1 :

$$F(t) = x(t) + p(t)$$

avec :

$$x(t) = \sum_{k=1}^N a_k x(t - k\Delta t) + e(t)$$

où  $e(t)$  est un bruit blanc, les coefficients  $a_k$  peuvent être calculés en temps réel par un algorithme d'analyse autorégressive (voir [5]).

Un filtre transversal de coefficients  $a_k$  permet alors de filtrer les signaux  $S_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, M$  de manière à supprimer (à  $p(t)$  près) la composante due au fouillis.

Cette méthode est résumée par le synoptique de la figure 2.

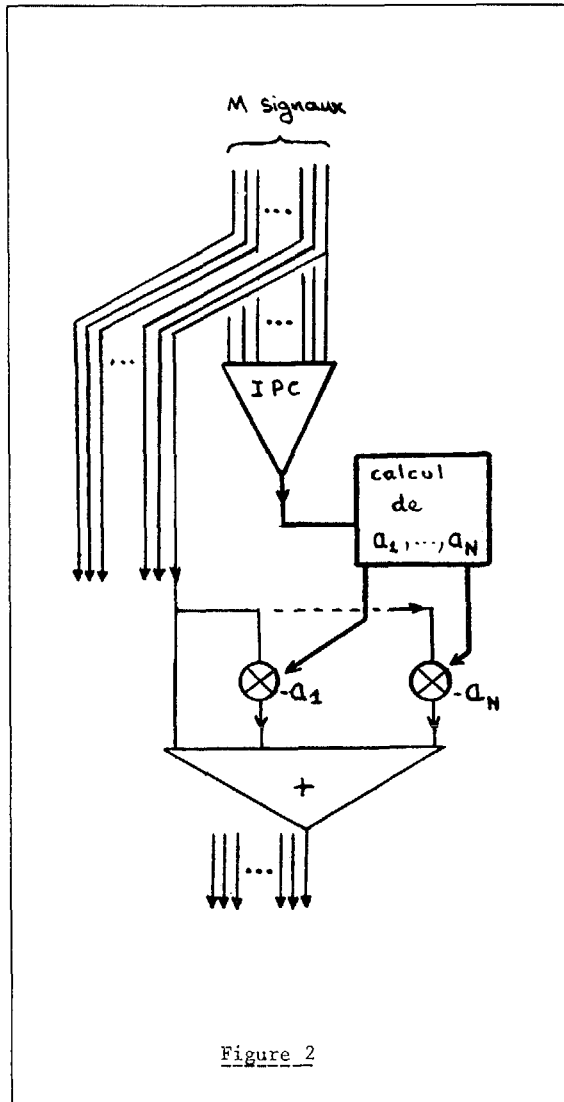


Figure 2

5. EXEMPLES D'ELIMINATION D'ECHOS DE FOULLIS

La figure 3 permet d'apprécier sur des signaux simulés sur ordinateur l'efficacité de la méthode et en particulier la très bonne adaptativité du filtre d'élimination de fouillis dont la fonction de transfert est tracée en pointillé.

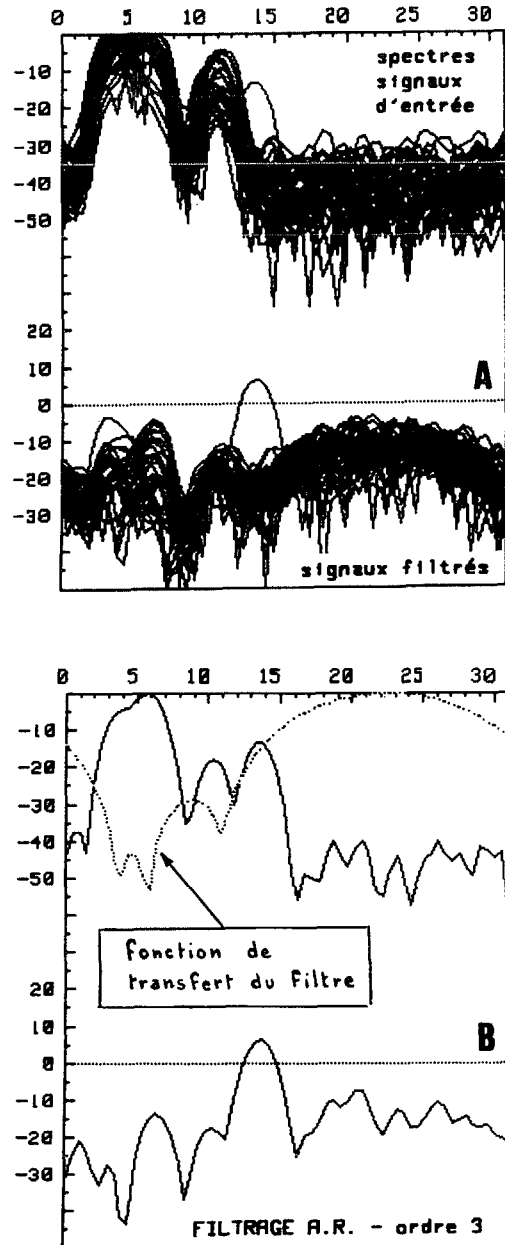


Figure 3

Partie A : spectres des signaux provenant de 32 cellules de résolution contenant un fouillis homogène et dont l'une contient une cible utile-avant et après filtrage transversal.

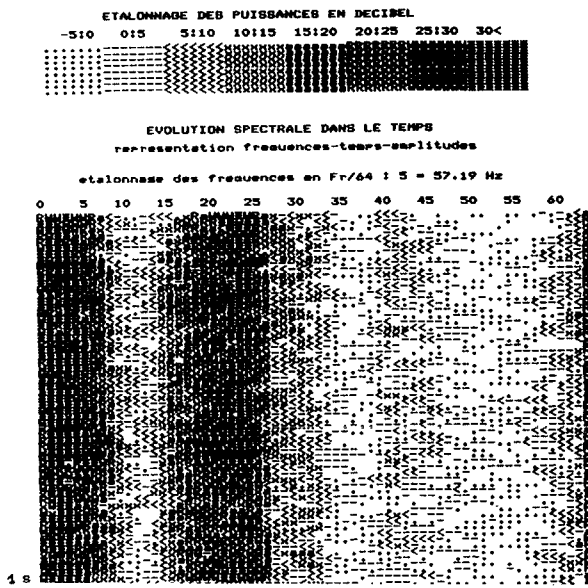
Partie B : idem concernant la cellule contenant la cible utile - abscisses graduées en fréquences réduites, ordonnées graduées en décibels.

ELIMINATION DE BRUIT COLORE EN RADAR DOPPLER  
UTILISANT UNE MODELISATION AUTOREGRESSIVE (AR)

La figure 4 présente l'évolution spectrale dans le temps de signaux simulés provenant de fouillis simultanés de mer et de grêle - avant et après filtrage.

6. CONCLUSION

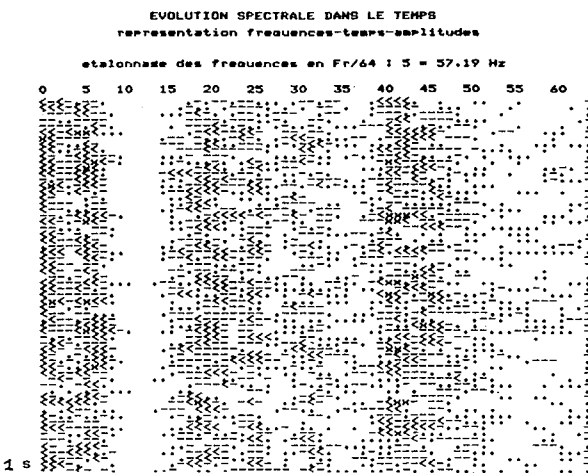
La méthode d'élimination d'échos de fouillis ou de bruit coloré développée grâce au soutien de la DRET, que nous remercions pour l'autorisation de publication qu'elle nous a accordée, possède une très bonne adaptativité. Ceci permet d'accroître le facteur de visibilité, notamment de cible utile spectralement proche du fouillis (voir Figure 3). D'autre part, un filtre unique étant calculé pour  $M$  cellules de résolution radar, la charge de calcul de l'algorithme ramenée à une cellule n'est pas beaucoup plus importante que celle des filtrages habituellement réalisés dans les radars, pour des performances nettement supérieures.



Avant filtrage

REFERENCES

- 1 *An Experimental Classification of Radar Clutter*  
S. HAYKIN, S. KESLER, B. CURRIE  
*Proc. IEEE* Vol. 67 - N° 2 - Février 1979
- 2 *Radar Clutter*  
Johns HOPKINS University - Applied Physics  
Laboratory - Silver Spring, Maryland - Juin 1971
- 3 *Radars - Vol. 5*  
D.K. BARTON - Raytheon Comp. Bedford  
Massachusetts
- 4 *Physique et théorie du radar*  
J. DARRICAU - Ed. SODIPE - Paris 1973
- 5 *Algorithmes rapides pour le traitement des systèmes dynamiques linéaires. Colloque d'Aussois*  
21 - 25 Septembre 1981 - INRIA



Après filtrage

Figure 4 : Elimination d'échos de fouillis par modélisation AR.

Abscisses : fréquence réduite

Ordonnées (de haut en bas) : seconde

