

Détecteur temps réel de signaux cyclostationnaires

Principe et implémentation

Rodolphe Weber⁽¹⁾ et Christian Faye⁽²⁾

⁽¹⁾LESI-ESPEO, Université d'Orléans,
45067 Orléans, France,
weber@lesi.univ-orleans.fr

⁽²⁾ETIS- ENSEA, 6 Avenue du Ponceau,
95014 Cergy-Pontoise, France

RÉSUMÉ

L'impact des brouilleurs radioélectriques sur la qualité des observations de radiosources est un sujet de préoccupation croissante pour la communauté des radioastronomes. Dans le cadre des techniques de time-blanking, une méthode de détection en temps réel de brouilleurs cyclostationnaires est proposée. Elle repose sur la transformation d'un signal possédant une périodicité cachée en un signal périodique plus facilement détectable. Cet article expose la méthode proprement dite, ainsi que les résultats de simulations obtenus avec des signaux de synthèse. Enfin, une implémentation électronique à partir d'un composant logique programmable est proposée.

ABSTRACT

The negative impact of radio frequency interference on the quality of radio astronomical observations is a matter of increasing concern for the radio astronomy community. The integrity of the data can be preserved by detecting the interference in order to blank the receiver in real time. The proposed detector uses cyclostationary properties of the interference. It converts the known hidden periodicity into a true one more easily detectable. In this paper, the method is explained and simulations with typical interference are presented. Finally, a dedicated electronic board using an programmable logic array is defined.

1 Introduction

Du fait de l'essor des moyens de télécommunications, les radioastronomes sont confrontés à un nombre croissant d'observations rendues inexploitable par la présence d'émissions radioélectriques parasites [1]. Notamment, la prolifération de brouilleurs intermittents, qui peuvent polluer des pages entières de données par effet de moyenne (*cf.* figure 1), est un sujet d'actualité dans la communauté radioastronomique. Un des remèdes envisagés est alors de pouvoir suspendre *en temps réel* le fonctionnement du récepteur lorsqu'un brouilleur est détecté (time-blanking).

Dans ce cadre, des méthodes de détection ont été proposées. Elles reposent sur une comparaison en temps réel entre les spectres mesurés et une référence spectrale *ad-hoc* [2], [3]. Spécifiques et lourdes à mettre en oeuvre, ces méthodes exploitent uniquement des connaissances sur le signal utile. Il nous a donc paru intéressant, d'une part d'examiner des systèmes de détection plus souples et d'autre part d'utiliser des informations *a priori* sur le parasite. Devant la généralisation des émissions radioélectriques à base de modulations numériques, nous nous sommes orientés vers un *a priori* lié aux propriétés cyclostationnaires inhérentes à cette catégorie de brouilleurs, et plus précisément, vers la détection de leur périodicité cachée.

Dans une première partie, nous exposerons la manière dont le caractère cyclostationnaire du brouilleur a été exploité. Dans une seconde partie, nous donnerons les performances de dé-

tection obtenues par simulation sur des brouilleurs typiques. Enfin, dans une troisième partie, nous proposerons une implémentation du dispositif sur un composant logique programmable de type FPGA¹ en vue d'une exploitation en temps réel.

2 Principe du détecteur

Un brouilleur $b(t)$ est dit cyclostationnaire si sa fonction d'autocorrélation $R(t, \tau)$ est périodique en t . Notons T cette périodicité, appelée aussi périodicité cachée, que nous supposons connue :

$$R(t + T, \tau) = R(t, \tau) \quad (1)$$

Classiquement, le caractère cyclostationnaire d'un signal est mis en évidence sur son spectre cyclique, $S(\alpha, \nu)$, version fréquentielle de $R(t, \tau)$, où α (*respectivement* ν) représente la fréquence cyclique (*resp. spectrale*) duale de t (*resp. de* τ). En effet, cette représentation 2D (*cf.* figure 2) fait apparaître pour le brouilleur cyclostationnaire, $b(t)$, de l'information aux seules fréquences cycliques α multiples de $\frac{1}{T}$ [4]. Par contre, pour le signal utile, $u(t)$, qui dans notre contexte est stationnaire, l'information reste cantonnée à la fréquence cyclique $\alpha = 0$. Cette technique permet donc de séparer efficacement les deux hypothèses suivantes :

$$H_0 \quad : \quad s(t) = u(t) \quad (2)$$

¹Field Programmable Gate Array

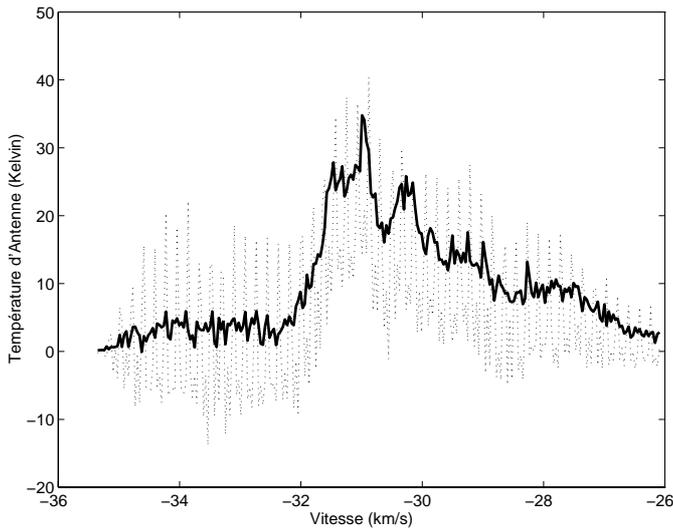


FIG. 1 — Profil spectral de l'enveloppe de l'étoile évoluée OH104.9, mesuré avec le Radiotélescope Décimétrique de Nançay (en trait continu le profil normal et en trait pointillé le profil contaminé par un satellite de radiolocalisation russe GLONASS).

$$H_1 : s(t) = u(t) + b(t) \quad (3)$$

Cependant, comme toute technique 2D, elle reste lourde à mettre en oeuvre dans le cas d'une application en temps réel. Pour palier cet inconvénient majeur, le détecteur proposé permet de revenir à un espace monodimensionnel tout en conservant l'éventuelle signature cyclique du brouilleur. Dans ce but, et de manière imagée, une projection, notée $P(\alpha)$, du spectre cyclique $S(\alpha, \nu)$ sur l'axe des fréquences cycliques α est réalisée (cf. figure 2). En pratique, $P(\alpha)$ est obtenue par le calcul de l'autocorrélation de la transformée de Fourier, notée $S_a(\nu)$, du signal analytique associé à $s(t)$:

$$P(\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_a(\nu) S_a^*(\nu - \alpha) d\nu \quad (4)$$

L'utilisation du signal analytique permet d'éviter l'apparition de raies parasites dues aux corrélations entre les fréquences positives et négatives. $P(\alpha)$ se compose d'un spectre de raies périodiques dû au brouilleur cyclostationnaire $b(t)$, auquel se superpose un spectre continu dû au signal utile $u(t)$ (cf. figure 2). Par transformée de Fourier inverse, le dual temporel de $P(\alpha)$, noté $m(t)$, contient une composante T -périodique qu'il est alors facile de détecter par un simple moyennage synchrone ou un filtrage en peigne. Pratiquement, $m(t)$ s'écrit simplement comme :

$$m(t) = TF^{-1}[P(\alpha)](t) = |s_a(t)|^2 \quad (5)$$

où $s_a(t)$ est le signal analytique associé à $s(t)$ et TF^{-1} représente la transformée de Fourier inverse.

Ainsi, la chaîne complète de détection (cf. figure 2) se réduit à des opérations de filtrage linéaire (un filtrage de Hilbert pour le calcul du signal analytique, un centrage pour éliminer la composante continue ; un moyennage synchrone pour la détection de la composante T -périodique et des sommateurs pour intégrer les données) et à quelques quadrations, le tout étant facilement implémentable en temps réel.

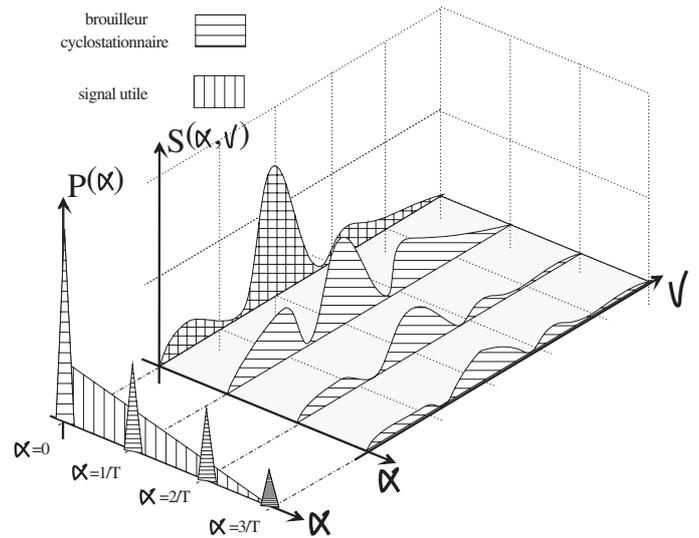


FIG. 2 — Répartition respective du brouilleur cyclostationnaire $b(t)$ de périodicité cachée T (hachures horizontales) et du signal utile $u(t)$ (hachures verticales) dans la représentation 2D $S(\alpha, \nu)$ et dans la représentation monodimensionnelle $P(\alpha)$.

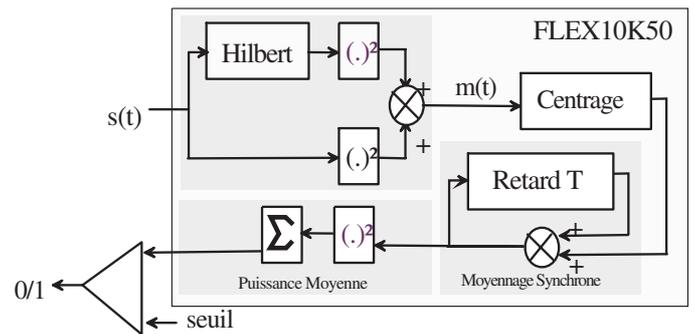


FIG. 3 — Principe du détecteur

3 Simulations

La méthode décrite précédemment a été simulée avec des signaux de synthèse reproduisant des configurations réelles rencontrées au Radiotélescope Décimétrique de Nançay (NRT). Citons par exemple les émissions à spectre étalé dues à des satellites de radiolocalisation (GLONASS² ou GPS³), qui sont une source fréquente de perturbations pour les radioastronomes. Elles présentent effectivement une périodicité cachée, soit du fait de la structure même du signal (par exemple la largeur des impulsions dans les modulations BPSK⁴), soit du fait d'une translation fréquentielle qui vient détruire une périodicité initialement présente dans le signal (par exemple un effet Doppler affectant la clef binaire qui code l'information). Les figures 3.a, 3.b et 3.c donnent les spectres caractéristiques des trois brouilleurs $b(t)$ utilisés dans les simulations. Leur périodicité cachée, T , vaut respectivement 4, 8, 66 en temps normalisé. Le signal utile $u(t)$ est un bruit gaus-

²Global Navigation Satellite System.

³Global Positioning System.

⁴Binary Phase Shift Keying.

sien centré et blanc. La détection de la période T se fait par moyenne synchrone sur $1024 * T$ échantillons, puis par calcul de la puissance moyenne sur une période.

La figure 3 donne les courbes COR tracées à partir de 100 réalisations des hypothèses H_0 et H_1 . Les résultats obtenus montrent que des parasites présentant un rapport parasite sur bruit (RPB) de -14 dB sont détectés avec une probabilité de détection de 95% , avec une probabilité de fausse alarme de 5% et avec un nombre réduit d'échantillons. A titre de comparaison, avec le même nombre d'échantillons que le cas de la figure 4.c, la méthode de détection actuellement utilisée au NRT (détection par seuils sur le spectre mesuré) n'atteindrait qu'un RPB de -1 dB avec la résolution spectrale la plus favorable. D'autre part, de manière asymptotique, une augmentation du temps de détection d'un facteur 100 permettrait de descendre le seuil minimal de détection de 10 dB.

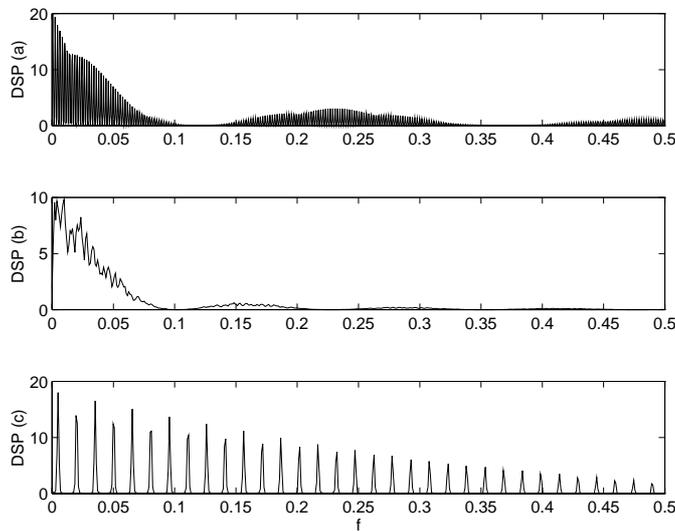


FIG. 4 — Densité spectrale de puissance (DSP) des 3 brouilleurs utilisés en simulation. Ils ont été filtrés et translatés en fréquence. Pour (a) et (b), la périodicité cachée correspond à la largeur de l'impulsion élémentaire d'un signal BPSK. Pour (c), la périodicité cachée correspond à la période d'une clé binaire associée à un signal BPSK.

4 Implantation

Le détecteur proposé fait actuellement l'objet d'une implantation sur un circuit électronique dans l'optique d'une expérimentation sur des signaux réels à la station de radioastronomie de Nançay. Son principe se découpe comme suit :

Dans un premier temps le signal est mis en forme en vue de son traitement numérique. Outre le classique filtre anti-repliement, un contrôle automatique de gain a été développé. Il permet de s'affranchir des fluctuations de puissance ($\approx 10\%$) que présente habituellement le signal utile.

Dans un deuxième temps, après une conversion analogique-numérique, le signal, codé sur 12 bits, est traité par l'algo-

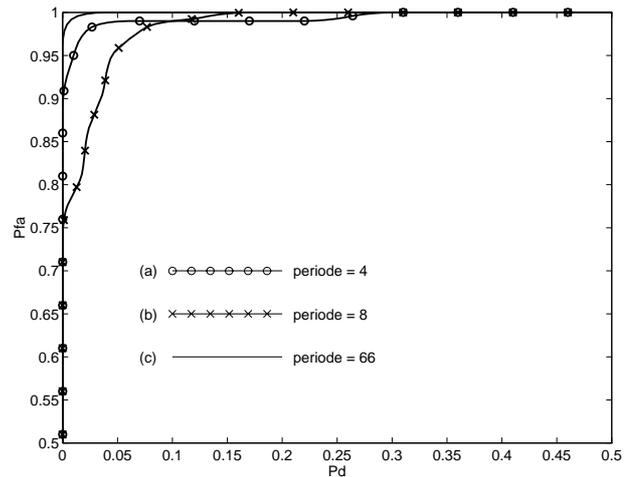


FIG. 5 — Courbes COR. Le rapport puissance du brouilleur sur puissance du signal utile est de -14 dB. Le nombre d'échantillons utilisés est de $1024 * \text{periode}$.

ritme de détection décrit précédemment (cf. figure 2). La fréquence de travail est actuellement de 3 Méch/s.

L'implantation se fait sur un composant logique programmable de la famille FLEX10K50 de la société Altera. Ce type de composant se caractérise par un nombre de portes logiques élevé (≈ 100000 portes) et par la présence de mémoire vive (RAM) qui peut être utilisée, soit pour le routage interne, soit comme moyen de stockage de données. Le filtrage de Hilbert est réalisé en virgule fixe, sous la forme d'un filtre transverse à 33 coefficients. La présence de la RAM interne permet de mémoriser l'ensemble des produits partiels et ainsi de vectoriser complètement les opérations de multiplication. Le gain en vitesse de traitement est considérable. Il peut atteindre 100 Méch/s. Les autres fonctions (quadrature, centrage, moyennage synchrone, intégration) ont été réalisées en virgule flottante (8 bits de mantisse et 7 bits d'exposant) pour limiter les problèmes de dépassement. La réalisation du retard de longueur T utilisé dans le moyennage synchrone exploite efficacement la présence de la RAM interne pour gérer une pile FIFO⁵. Les outils associés au FLEX10K50 facilitent la tâche de programmation du composant. Par contre, le nombre élevé de broches (403 au total) rend très délicat le routage de la carte électronique.

5 Conclusion

Dans le cadre de techniques de time-blanking, le détecteur proposé permet une exploitation originale et en temps réel du caractère cyclostationnaire présent dans certaines émissions radioélectriques parasites. Il permet d'éliminer efficacement des brouilleurs de rapport parasite sur signal plutôt élevé—relativement aux seuils de brouillage préjudiciable en vigueur en radioastronomie (≈ -50 dB)—. D'autre part, l'utilisation d'un composant logique programmable permet d'obtenir une

⁵First In First Out.

électronique compacte et rapide où toutes les fonctionnalités de l'algorithme ont pu être implémentées. Enfin, remarquons que la méthode proposée peut s'utiliser dans d'autres domaines d'application comme par exemple la surveillance en temps réel de l'usure des engrenages dans les turbines ou encore l'analyse rapide de modulations en télécommunications.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Unité Scientifique Nançay de l'Observatoire de Paris, Unité de Service et de Recherche (USR) No. B704 du CNRS pour son support financier.

Références

- [1] E. Gérard. *La radioastronomie face à la saturation du domaine hertzien*. La Vie des Sciences, Comptes rendus, série générale, tome 10, no.3, pp. 175-197, 1993.
- [2] R. Weber R et C. Faye. *Analyse spectrale haut débit à l'aide d'un autocorrélateur 1 bit à la station de radioastronomie de Nançay. Impact des brouilleurs radio-électriques*. 15^{ème} Colloque Grets, Juan les Pins, France, 1995.
- [3] R. Lacasse. *RFI excision on the spectral processor and why it is not used*. Proc. of Workshop on New Generation of Digital Correlators, National Radio Astronomy Observatory, USA, 1993.
- [4] W.A. Gardner W.A. et C.M. Spooner, *Signal interception : Performance advantages of cyclic-feature detectors*. IEEE Transactions on communications, Vol.10, no. 1, pp149-159, 1992.