

Un spectrographe pour la radioastronomie aux ondes courtes, au voisinage de la coupure ionosphérique.

Alain Lecacheux^{*}, Cedric Dumez-Viou^{**} et Karl-Ludwig Klein^{*}

^{*} LESIA et ^{**} Station de Radioastronomie de Nançay, CNRS-Observatoire de Paris

Mots-clefs : radioastronomie, parasites radio-fréquence; radioastronomy, RFI mitigation.

Résumé

Le défi majeur que rencontre aujourd'hui la radioastronomie pour sonder l'Univers consiste à devoir s'adapter à l'accroissement de l'utilisation active du spectre électromagnétique par la technologie humaine. Mais cette même technologie procure aussi des ressources pour relever ce défi. Nous présentons ici les premiers résultats obtenus à Nançay avec le Réseau Décamétrique et un spectromètre numérique de type nouveau, robuste aux émetteurs "ondes courtes", et développé dans le but d'étudier la Couronne Solaire aux fréquences radio les plus basses observables depuis le sol. L'observation radio astronomique dans la gamme des longueurs d'ondes (5-30 MHz, dites "ondes courtes"), est bien sûr limitée vers le bas par la fréquence de coupure ionosphérique, variable entre 5 et 20 MHz à Nançay en fonction de l'activité solaire et de l'heure dans la journée. Mais les observations effectives s'arrêtent généralement à une fréquence minimale plus élevée (~30 MHz), à cause du brouillage par les nombreux émetteurs en propagation directe ou réfléchi. Grâce à l'utilisation de techniques de traitement du signal numérique embarqué et d'algorithmes de filtrage adaptés, le spectromètre délivre en temps réel des spectres très sensiblement améliorés, permettant l'exploration de cette gamme de fréquences, longtemps crue réservée à l'observation radio astronomique depuis l'espace, en satellite ou depuis une base lunaire.

1. Spectroscopie dynamique du Soleil en ondes décamétriques

L'activité solaire est surveillée depuis le sol en ondes radio jusqu'à des longueurs d'onde d'environ 10m (fréquences > 30 MHz), puis depuis l'espace à des longueurs d'ondes dépassant 20m (fréquences \lesssim 15 MHz ; p.ex. satellite WIND ou STEREO). Les émissions dans ces domaines du spectre sont produites par des électrons non thermiques accélérés sporadiquement dans les régions actives en éruption ou aux ondes de choc qui traversent la couronne lors d'une éjection de masse [1]. Le spectre radio aux longueurs d'onde métriques et décamétriques procure ainsi des diagnostics précieux des phénomènes transitoires dans la moyenne et haute couronne, une région charnière entre l'atmosphère solaire et le milieu interplanétaire.

De telles observations jouent un rôle clef dans le traçage des processus éruptifs dans la Couronne Solaire et de leur propagation vers l'Héliosphère. L'observation radio fournit des diagnostics uniques de la connexion magnétique entre la couronne et l'Héliosphère, via les émissions des faisceaux d'électrons (type III) et des ondes de choc (type II), ainsi que des processus d'accélération de longue durée de particules. Ce sont des outils précieux dans la compréhension des éjections de masse et de l'origine et de la propagation des particules de haute énergie, tous deux des vecteurs importants des relations Soleil-Terre qui ont un impact sur la technologie spatiale, les télécommunications et l'environnement plasma de la Terre.

2. Méthodologie

La plus grande partie des RFI dans la bande de fréquence considérée est constituée d'émetteurs (radiodiffusion, industriels, etc...) à bande étroite (en modulation AM autour d'une porteuse) qui sont d'activité très variable, mais localisés dans leur « bande d'allocation » qui est de l'ordre du kHz. La figure 1 montre un exemple d'un spectre typique pris dans les conditions diurnes au voisinage des 15-20 MHz. Il est constitué d'une myriade de raies d'émissions très étroites qui sont bien distinguées par une analyse spectrale de résolution ~1 kHz (courbe grise), au-dessus du niveau de

bruit galactique de faible pente décroissante vers les hautes fréquences. Leur filtrage par des procédés analogiques est clairement impossible.

Avec la résolution spectrale ~ 100 fois moins bonne, couramment utilisée en spectroscopie solaire, l'effet est catastrophique (courbe rouge) : les raies sont mélangées et élargies, et le niveau de bruit (seuil de détection) est amplifié par un ordre de grandeur.

En introduisant une analyse spectrale embarquée à haute résolution (10^5 canaux), suivie d'un filtrage adaptatif adéquat, il est possible d'améliorer très sensiblement (courbe bleue) la qualité du signal et le pouvoir de détection, à débit d'information gardé constant (10^2 canaux en sortie).

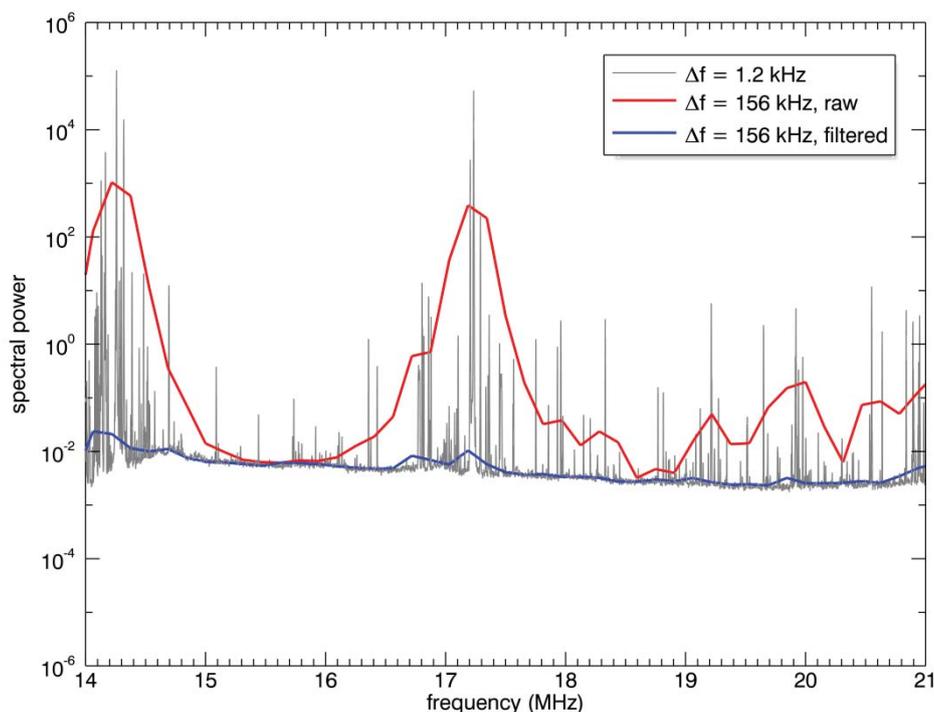


Figure 1

3. Réalisation :

Depuis le milieu des années 1990, l'Observatoire de Paris conçoit et développe des dispositifs numériques pour l'analyse spectrale à large bande, haute définition et grande dynamique des signaux radio astronomiques [2]. Les instruments qui en résultent sont testés puis exploités sur différents radio télescopes, en particulier ceux de la Station de Radioastronomie de Nançay.

Le récepteur dont il est question est basé sur la carte HPBB développée par la société ALSE, incluant numériseurs et circuits FPGA programmables. Le logiciel embarqué effectue l'acquisition à grande dynamique (14 bits) des deux voies en polarisation circulaire du Réseau Décamétrique, directement échantillonnées à 80 MHz (pour obtenir la bande utile 5-35 MHz), puis l'estimation, de manière classique, de leurs densités spectrales de puissance par transformation de Fourier à court-terme, fenêtrée.

L'étape suivante est plus originale : les spectres sont d'abord ré échantillonnés suivant l'axe des fréquences, puis suivant l'axe des temps, par application successive d'algorithmes robustes d'estimation de la moyenne. En d'autres termes, les valeurs extrêmes des points du plan temps-fréquence, analysé à haute résolution, sont considérées comme des points aberrants (« outliers ») dans le calcul de la valeur moyenne constituant chaque point du plan, ré échantillonné à basse résolution. Cette hypothèse est valide dans le cas particulier de l'analyse d'événements d'origine solaire, qui ne contiennent pas, pour des raisons physiques (diffusion dans la Couronne Solaire, mécanismes d'émission), de composante spectrale rapide ni à bande étroite.

Plusieurs estimateurs robustes sont envisageables pour ce calcul : dans la classe des M-estimateurs ("Tukey's biweight")

par exemple), qui appliquent le principe du maximum de vraisemblance à une distribution des écarts tronquée par rapport à la distribution gaussienne ; ou dans la classe des L-estimateurs (médiane, moyenne interquartile, etc....) qui combinent plusieurs statistiques. Nous avons choisi l'estimateur de la médiane pour sa simplicité, - il demande seulement l'implémentation d'un algorithme de tri de complexité $O(N)$ -, au prix d'un biais de -1.6 dB facile à corriger et d'une perte de sensibilité (variance augmentée de 2.0 dB) négligeable dans notre cas.

Ce traitement, adapté à la nature des brouilleurs présents dans cette bande (signaux modulés à bande étroite (émetteurs AM), signaux brefs à bande d'occupation large (orages, sondeurs ionosphériques, etc....)), permet, sinon de les éliminer, au moins de les diminuer très fortement. Il assure également une compression importante du débit de l'information en aval, compatible avec une bonne utilisation scientifique.

4. Exemple d'observation

La figure 2, obtenue au cours d'une période d'activité solaire de type « orage de types III », compare le spectrogramme obtenu de manière classique (en haut) avec le spectrogramme filtré (en bas), tous deux produits par le nouveau récepteur. Les coupures basse (~9 MHz) et haute (~36 MHz) sont d'origine instrumentale (filtre anti-repliement). Les sursauts solaires sont les événements brefs (quelques secondes) qui dérivent des hautes vers les basses fréquences et correspondent à l'émission de faisceaux d'électrons relativistes qui s'échappent dans le milieu interplanétaire. Le gain sur les parasites ondes courtes est évident. On peut aussi noter l'élimination des traces de sondages ionosphériques et de la plupart des signaux brefs dus à des impulsions d'origine locale. La transmission ionosphérique dans la direction du Soleil, ce jour là en pleine matinée, rendait les observations possibles à partir de ~12 MHz.

5. Conclusion

Le spectromètre présenté est un exemple opérationnel de récepteur de radioastronomie sur antenne unique intégrant un traitement de signal en temps réel destiné à améliorer la caractérisation du signal étudié, en présence de brouilleurs intenses. Cette atténuation (« mitigation ») des effets de conditions d'observation perturbées s'appuie sur une modélisation a priori des brouilleurs (hypothèses de signaux à bande étroite ou brefs) et du signal étudié (variations lentes).

Au vu des puissances de calcul qu'il est désormais possible d'embarquer, on peut imaginer, dans d'autres contextes et pour d'autres objectifs de radioastronomie, des traitements plus adaptatifs utilisant par exemple une modélisation plus sophistiquée ou un apprentissage non supervisé des conditions d'observations. Cette démarche est probablement l'une des clés pour la radioastronomie future, qui exige toujours plus de sensibilité et de profondeur, malgré un environnement électromagnétique de plus en plus occupé.

Références bibliographiques

- [1] Dulk, G.R.A., "Solar radio astronomy at low frequencies", in *Lecture Notes in Physics*, 362, pp 83-96, 1990
- [2] Kleewein, P., C. Rosolen, and A. Lecacheux, "New digital spectrometers for ground based decameter radio astronomy", in *Planetary Radio Emission IV*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and A. Lecacheux, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 349-358, 1997.

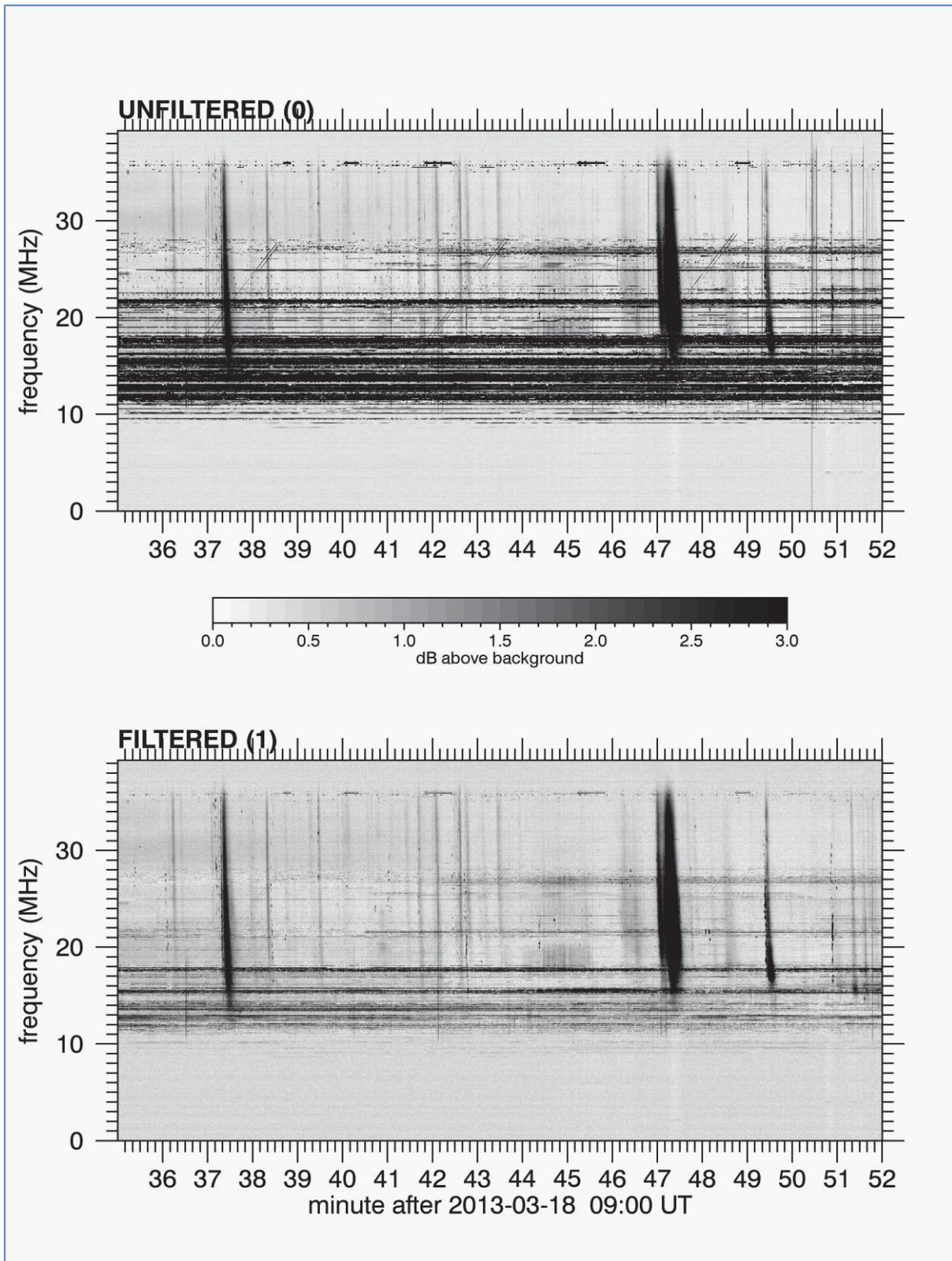


Figure 2