

RAPPORT UIT-R RA.2126

**Techniques de limitation des brouillages
radioélectriques en radioastronomie**

(Question UIT-R 237/7)

(2007)

1 Introduction

Le présent rapport est un résumé technique concis des techniques les plus récentes en matière de limitation des brouillages radioélectriques (RFI) en radioastronomie. Il y est plus particulièrement question des techniques de réduction des brouillages artificiels qui proviennent de l'extérieur de l'instrument et échappent ainsi au contrôle de l'opérateur de l'instrument. Pour les besoins du présent rapport, le critère retenu pour considérer un signal comme un brouillage radioélectrique est simplement qu'il s'agit d'une partie non désirée, mais détectable, d'une observation souhaitée qui risque de détériorer, ou d'empêcher le déroulement satisfaisant de l'observation. Bien qu'ils ne soient pas faciles à détecter, certains brouillages peuvent néanmoins entraîner une dégradation des observations et il est d'autant plus difficile de les réduire.

L'objectif des techniques de réduction des brouillages est de permettre l'observation aux niveaux de sensibilité prescrits dans la Recommandation UIT-R RA.769, avec des pourcentages de perte de données conformes aux limites fixées dans la Recommandation UIT-R RA.1513. Ces Recommandations décrivent les conditions permettant d'effectuer des observations efficaces en radioastronomie et fournissent les bases numériques du calcul de conditions de brouillages radioélectriques admissibles dans les études de partage et de compatibilité. Les méthodes de réduction des brouillages autres que l'éradication pure et simple des données contaminées par des brouillages radioélectriques ne sont guère utilisées en radioastronomie, essentiellement parce qu'elles ne sont pas faciles à concevoir ou à mettre en œuvre et parce qu'elles nécessitent la conception d'un logiciel spécifique très complet.

Récemment encore, les modes d'observation et les techniques de traitement des signaux généralement utilisés pendant les observations permettaient un degré inhérent de réduction des brouillages qui se révélait suffisant pour obtenir des données utiles en radioastronomie en présence de quelques brouillages.

Ainsi, le «blocage de frange», en imagerie à synthèse d'ouverture, tend à décorrélérer les brouillages radioélectriques reçus au niveau d'antennes largement espacées, ce qui supprime généralement ces brouillages dans les produits de corrélation associés [Thompson, 1982]. Dans le cas de certains radiotélescopes à synthèse d'ouverture, ces brouillages peuvent engendrer une source lumineuse non essentielle qui apparaît sur les cartes au niveau du pôle céleste, ce qui rend difficiles, voire impossibles, les observations de fortes déclinaisons. Les pulsars produisent des impulsions de bruit large bande de sorte qu'on a besoin d'une largeur de bande importante au niveau du récepteur pour obtenir un rapport signal/bruit utile. Le bruit présent dans les impulsions fait que celles-ci font l'objet d'une dispersion dépendant de la fréquence lorsqu'elles se propagent dans les plasmas raréfiés du milieu interstellaire. Lorsqu'on observe un pulsar avec un radiotélescope, l'impulsion est délibérément dédispersée au moyen de divers matériels et logiciels, afin d'obtenir une représentation précise (non dispersée) du profil intrinsèque des impulsions. Ce processus réduit généralement les brouillages radioélectriques, car le processus de dédispersion du signal du pulsar disperse en conséquence les brouillages radioélectriques, mais il n'aboutit qu'à une réduction limitée des brouillages.

Les brouillages entraînent toujours une dégradation des données. Les astronomes ont constaté que le champ et la densité spectrale/temporelle des brouillages radioélectriques sont tels que les observations sont «saturées» de brouillages de ce type et deviennent inutilisables. Les observations les plus vulnérables sont sans doute celles qui sont effectuées avec des radiotélescopes à réflecteur unique (observations du continuum ou spectroscopie), car l'amélioration de la sensibilité aux signaux astronomiques qu'offre l'augmentation du temps d'intégration conduit à une augmentation proportionnelle de la sensibilité aux signaux des brouillages électriques. Bien que certains modes d'observation présentent une certaine robustesse intrinsèque à de faibles niveaux de brouillages radioélectriques, la faible intensité des signaux reçus des émissions radioélectriques d'origine cosmique fait que le service de radioastronomie est très vulnérable aux brouillages.

Les brouillages radioélectriques n'ont pas seulement pour effet d'empêcher ou d'altérer certaines observations ou certains types d'observations, mais limitent aussi la productivité globale de la station de radioastronomie, ce qui rend les observations extrêmement difficiles ou onéreuses pour ce qui est du temps d'observation nécessaire, de la complexité du traitement et des frais d'exploitation. A titre d'exemple, on est de plus en plus souvent amené à mettre en forme manuellement les données après les observations pour supprimer les brouillages radioélectriques, comme cela se fait parfois dans le domaine de l'imagerie à synthèse d'ouverture [Lane *et autres*, 2005]. Même si ce procédé est efficace, il est difficile à automatiser et devient en conséquence extrêmement fastidieux à mesure que la durée de l'observation et la largeur de bande observée augmentent. La présence de brouillages radioélectriques impose parfois une augmentation spectaculaire des besoins en termes de personnel et de temps d'observation, ce qui est aussi contraignant sur le plan scientifique que les conséquences de ces brouillages, qui masquent irrémédiablement les émissions d'observées.

Ces problèmes ont incité les chercheurs à concevoir des techniques de réduction des brouillages radioélectriques que l'on pourrait considérer comme «automatiques» ou «en temps réel», en ce sens qu'une technique donnée fait théoriquement partie intégrante de l'instrument et fonctionne sans intervention humaine. Tel est le contexte dans lequel sont présentées les techniques décrites ci-après.

2 Techniques de réduction des brouillages radioélectriques

L'étude des techniques de réduction des brouillages radioélectriques qui perturbent le signal de sortie analogique des récepteurs des radiotélescopes suscite un regain d'intérêt depuis quelques années, en raison des avancées techniques qui permettent de réduire les brouillages radioélectriques en utilisant des méthodes de traitement des signaux en temps réel. On trouvera sur ce sujet des indications utiles dans les résumés de conférences récentes sur la question (voir par exemple [Bell *et autres*, 2000 et Ellingson, 2005]). Pour les besoins du présent rapport, on peut classer les techniques de réduction des brouillages dans les catégories suivantes:

- 1) *Eradication* («suppression» des brouillages radioélectriques): des brouillages radioélectriques composés de brèves impulsions pourraient être réduits en supprimant les données en présence de l'impulsion: il s'agit de l'éradication *temporelle*. On peut aussi atténuer les brouillages radioélectriques persistants en utilisant des techniques de mise en forme du faisceau de l'antenne pour orienter les zéros d'un diagramme dans les directions par rapport auxquelles les brouillages radioélectriques sont incidents: il s'agit de l'éradication *spatiale*. L'une des caractéristiques communes de toutes les techniques d'éradication est la perte de données d'astronomie, les données restantes risquant d'être altérées en raison de défauts introduits par le processus d'éradication. Etant donné que la suppression entraîne une diminution du temps d'observation, il en résulte une augmentation du temps d'observation nécessaire pour obtenir la sensibilité ou la précision de mesure voulues.

- 2) *Annulation*: consiste à «soustraire» les brouillages radioélectriques de la sortie du télescope. L'annulation peut donner de meilleurs résultats que l'éradication, en ce sens que les brouillages radioélectriques sont supprimés sans incidences pour le service de radioastronomie, en offrant une capacité d'observation en principe exempte des défauts associés à la simple «élimination» des données. Toutefois, comme indiqué ci-dessous, la solution de compromis en ce qui concerne l'éradication est généralement que la suppression est limitée par l'estimation des brouillages subis par le radiotélescope.
- 3) *Anticoïncidence*: consiste en général à écarter les brouillages radioélectriques en tirant parti du fait que des antennes très espacées devraient percevoir de la même façon les signaux astronomiques, mais différemment les brouillages radioélectriques. En pareil cas, la contribution du brouillage radioélectrique concerne le niveau du bruit de fond pour chaque antenne et non pas les signaux corrélés, ce qui entraîne une dégradation du signal corrélé reçu et nécessite parfois un accroissement du temps d'observation pour obtenir le rapport signal/bruit nécessaire.

Les méthodes de réduction des brouillages qui sont souvent ou régulièrement utilisées dans les observatoires sont pour la plupart fondées sur l'éradication temporelle, c'est-à-dire sur la suppression des données qui sont censées être contaminées par les brouillages radioélectriques. Ces méthodes sont décrites au § 2.1. L'éradication spatiale (§ 2.2) et les méthodes fondées sur l'annulation des brouillages (§ 2.3 et 2.4) ont fait l'objet de démonstrations au moyen de données astronomiques réelles ou simulées, mais sont encore pour l'essentiel en cours de mise au point, ou ne sont utilisées que dans certains cas. Les différents types d'éradication spatiale nécessitent en général un logiciel spécialisé très important et une puissance de calcul accrue. Les techniques d'anticoïncidence (§ 2.5) offrent un moyen très efficace d'identifier les données qui sont contaminées par des brouillages radioélectriques, mais ne peuvent pas être considérées au sens strict comme des techniques de réduction des brouillages, puisqu'elles permettent uniquement l'éradication temporelle des brouillages.

2.1 Eradication temporelle (suppression)

Il s'agit probablement de la technique la plus ancienne et la plus connue pour réduire en temps réel les brouillages radioélectriques par impulsions. On s'est apparemment intéressé pour la première fois à la technique de suppression des brouillages pour remédier aux problèmes dus à des radars aéronautiques au sol lors de l'observation de la bande 1 215-1 400 MHz. En général, ces radars transmettent des fréquences d'impulsion fixes ou des signaux sinusoïdaux modulés avec des longueurs d'impulsion de 2 à 400 ms et de 1 à 27 ms entre les impulsions émises ainsi qu'une largeur de bande de l'ordre de 1 MHz. Ces impulsions sont souvent détectables via le lobe latéral des radiotélescopes à des centaines de kilomètres de distance. Bien que le facteur d'utilisation de la transmission soit relativement peu élevé (il est généralement inférieur à 0,1%), une suppression précise des brouillages est rendue difficile par le bref laps de temps entre les impulsions. Un autre facteur rend difficile la suppression des impulsions radar: la réflexion causée par le terrain et l'aéronef génère des copies additionnelles de l'impulsion qui arrivent longtemps après l'impulsion du «trajet direct» (voir par exemple l'Appendice de [Ellingson et Hampson, 2003]). Généralement, ces impulsions se propageant par trajets multiples sont suffisamment fortes pour altérer l'observation astronomique mais encore trop faibles pour pouvoir être détectées avec fiabilité. En conséquence, un intervalle de suppression déclenché par une impulsion détectée doit en général être beaucoup plus long que l'impulsion détectée, afin de garantir que toutes les copies d'une impulsion détectée se propageant par trajets multiples soient également supprimées. Les intervalles de suppression doivent avoir des longueurs pouvant atteindre plusieurs centaines de microsecondes (c'est-à-dire 10 à 100 fois la durée de l'impulsion) [Ellingson et Hampson, 2003].

Diverses techniques d'éradication temporelle en temps réel ont été proposées et mises au point. Friedman [1996], Weber *et autres* [1997] et Leshem *et autres* [2000] décrivent chacun des méthodes permettant de détecter des brouillages par impulsions et de supprimer le signal de sortie en conséquence. Le Centre national pour l'astronomie et l'étude de l'ionosphère (NAIC) a conçu un dispositif permettant d'atténuer en temps réel de fortes impulsions radar locales dans l'Observatoire d'Arecibo (Puerto Rico). Ce dispositif consiste à suivre la structure connue de la synchronisation entre les impulsions pour ce radar, puis à supprimer le signal de sortie du récepteur dans une fenêtre temporelle à l'instant d'arrivée prévue de l'impulsion. Des travaux plus récents dans ce domaine, notamment des résultats expérimentaux, sont décrits dans [Ellingson et Hampson, 2003; Fisher *et autres*, 2005 et Zheng *et autres*. 2005], les deux derniers ouvrages traitant d'un problème analogue de brouillages par impulsions causés par des équipements aéronautiques de mesure de la distance (DME).

Le principal inconvénient de la technique de suppression des brouillages concerne la qualité de la détection. En effet, une fois qu'une impulsion d'un brouillage radioélectrique est détectée, elle peut être complètement éliminée par la technique de suppression mais, une partie des impulsions de faible intensité – mais potentiellement préjudiciable – ne sera pas détectée. Toutefois, à l'échelle temporelle d'une seule impulsion, les signaux astronomiques présentent généralement un rapport signal/bruit (SNR) inférieur à 1, si bien que les brouillages radioélectriques doivent être détectés de manière fiable à ces niveaux, afin d'être réellement supprimés dans la sortie intégrée. Cette opération est relativement délicate et les bons résultats obtenus dernièrement au moyen de la technique de suppression décrite plus haut sont imputables au fait que l'on connaissait bien au préalable le signal du brouillage radioélectrique, ce qui permet de compenser dans une certaine mesure un rapport signal/bruit peu satisfaisant.

Il est possible d'apporter de nouvelles améliorations à la qualité de la détection en utilisant certains aspects du signal du brouillage radioélectrique qui peuvent être exploités sans connaître en particulier ce signal, par exemple la cyclostationnarité ([Britteil et Weber, 2005], ont appliqué cet aspect au système à satellites HIBLEO2 (Iridium) et au système de poursuite de Kalman et [Dong *et autres*, 2005] l'ont appliqué à des radars aéronautiques). Un autre problème épineux est de savoir comment fixer les seuils de détection et la longueur de la fenêtre de suppression pour trouver un compromis acceptable entre une réduction des brouillages radioélectriques robuste (niveaux de seuil peu élevés et longues fenêtres) et une dégradation réduite de la sensibilité, et l'apparition de défauts de suppression (niveaux de seuil élevés et fenêtres courtes), sujet qui a été étudié par [Niamsuwan, Johnson et Ellingson, 2005]. En outre, le temps consacré à la «suppression» constitue du temps d'observation perdu et peut exiger une augmentation de la durée d'observation pour obtenir la sensibilité voulue.

2.2 Eradication spatiale (annulation)

Lorsqu'un instrument est constitué de plusieurs éléments d'antenne, il est parfois possible de manipuler le signal de sortie de l'élément considéré pour créer un zéro dans la direction du brouillage radioélectrique incident [Van Veen et Buckley, 1988]. La technique de base est bien connue dans le cadre de ses applications militaires, avec les communications «antibrouillage», et des applications commerciales de télécommunication cellulaire [Liberti et Rappaport, 1999]. En principe, les mêmes techniques sont applicables à la radioastronomie, mais dans la pratique, certains facteurs compliquent les choses. Premièrement, en radioastronomie, à la différence des applications commerciales et militaires classiques, les brouillages radioélectriques sont préjudiciables même lorsque le rapport brouillage/bruit est inférieur à 1. En conséquence, pour être efficaces, les algorithmes de formation de zéros doivent détecter et localiser avec succès les brouillages radioélectriques à ces niveaux. Par contre, dans les applications commerciales et militaires, les brouillages radioélectriques ne posent généralement pas de problèmes tant que le rapport brouillage/bruit est de l'ordre de 1. C'est pourquoi la plupart des algorithmes de formation de zéros

conçus dans le cadre d'applications militaires ou commerciales sont fondés sur la stratégie du filtre de Wiener (qui inclut des algorithmes dit de la puissance minimale et de la variance minimale, qui donnent des résultats médiocres pour un rapport brouillage/bruit inférieur à 1 [Ellingson et Hampson, 2002]). On sait que les techniques de filtrage de Wiener permettent seulement d'atténuer le rapport brouillage/bruit proportionnellement à ce rapport, c'est-à-dire qu'on peut facilement ramener les brouillages radioélectriques à un niveau de rapport brouillage/bruit de 1 et qu'il est relativement difficile de le réduire davantage. En conséquence, pour que ces techniques soient efficaces en radioastronomie, il faut généralement adopter d'autres mesures pour accroître le rapport brouillage/bruit apparent fourni à l'algorithme de réduction des brouillages. Certaines de ces techniques sont examinées ci-dessous.

En radioastronomie, les observations dépendent du rendement de l'antenne (gain, profil du faisceau, distribution dans les lobes latéraux par exemple). En général, on procède à des mesures précises et rigoureuses pour faire en sorte que les paramètres ne varient pas avec le temps. Des variations du diagramme des lobes latéraux risquent de fausser les algorithmes d'auto-étalonnage utilisés pour obtenir des images offrant une plage dynamique importante en interférométrie à synthèse d'ouverture. Pour les systèmes de traitement des signaux et de commande d'antenne largement utilisés aujourd'hui, la difficulté consiste à maintenir ou, du moins, à connaître les variations de ces paramètres à mesure que le faisceau de l'antenne et le diagramme des lobes latéraux sont modulés pour réduire les brouillages.

Pour remplacer les techniques traditionnelles de formation de zéros fondées sur le filtrage de Wiener, on peut recourir aux techniques fondées sur des projections «subspatiales». Ces techniques reposent sur le principe selon lequel il est possible d'identifier les brouillages en termes de corrélations entre les éléments du réseau, qui peuvent à leur tour être utilisées pour déterminer des coefficients de conformation du faisceau permettant d'obtenir des diagrammes qui rejettent les brouillages, sans que cela influe sur les caractéristiques du lobe principal. Mathématiquement, une projection subspatiale est un processus en deux étapes qui consiste:

- à identifier les vecteurs propres de la matrice de covariance spatiale (ensemble de corrélations par paires entre éléments) et;
- à faire en sorte que le vecteur des coefficients de conformation du faisceau soit perpendiculaire (opération de «projection») au vecteur propre associé au brouillage («sous-espace» de brouillage).

On admet en principe que les brouillages dominent la puissance reçue par le réseau d'antenne, de sorte que le sous-espace de brouillage est toujours celui qui est associé à la valeur propre la plus grande de la covariance spatiale. Cela pose des problèmes lorsque les brouillages sont relativement faibles, en particulier si le rapport brouillage/bruit est inférieur à 1 [Ellingson et Hampson, 2002]. Cependant, il a été démontré que la projection subspatiale présentait des avantages non négligeables en radioastronomie lorsqu'elle était correctement employée [Raza et autres, 2002]. Bien que ces techniques ne constituent pas une solution idéale au problème de la mauvaise qualité de la détection et de la localisation, elles offrent une distorsion réduite du diagramme d'antenne et, dans une certaine mesure, un comportement plus facile à prévoir et à modifier. On peut même corriger la distorsion générée par les techniques de cette catégorie en imagerie à synthèse d'ouverture en tant qu'opération post-traitement [Leshem et autres, 2000].

En général, la formation de zéros s'applique surtout à la réduction des brouillages radioélectriques causés par des satellites et est en principe un peu moins efficace contre les brouillages radioélectriques de Terre. En effet, les brouillages radioélectriques de Terre sont souvent diffusés par le relief intercalaire et parviennent fréquemment au niveau du radiotélescope non pas sous la forme d'une onde plane, mais plutôt comme un front d'ondes complexe et variable dynamiquement, dont la direction d'incidence apparente est répartie sur une plage angulaire importante. Les

techniques de formation de zéros classiques subissent généralement des dégradations en présence d'étalement angulaire et ce problème s'accroît lorsque le rapport brouillage/bruit diminue.

Dans l'ensemble, les techniques d'éradication spatiale n'ont pour ainsi dire toujours pas été testées en raison de leur complexité et des coûts techniques importants liés à leur conception et à leur mise en œuvre. Cependant, des progrès notables continuent d'être accomplis, comme en attestent des travaux menés récemment [Boonstra et Van der Tol, 2005; Hansen *et autres*, 2005]. Même dans les cas les plus favorables, les données recueillies n'auront pas la qualité que l'on aurait obtenue en l'absence de brouillages.

2.3 Annulation temporelle

Un algorithme d'annulation temporelle monoparabole optimal comprend les opérations suivantes:

Opération 1: Détection et estimation du signal du brouillage radioélectrique.

Opération 2: Synthèse d'une version exempte de bruit du signal du brouillage radioélectrique.

Opération 3: Soustraction du signal du brouillage radioélectrique de synthèse dans les données affectées.

Comme indiqué ci-dessous, il est possible de mettre en œuvre un processus équivalent dans le domaine fréquentiel. Comme pour l'éradication des brouillages, on dispose de nombreuses données d'expérience s'agissant de l'utilisation d'algorithmes d'annulation dans les applications commerciales et militaires [Haykin, 2001]. Cette stratégie a été étudiée pour la première fois dans le contexte de la radioastronomie [Barnbaum et Bradley, 1998], qui a employé l'algorithme bien connu «des moindres carrés» (LMS) reposant sur le principe du filtrage de Wiener. En conséquence, l'application de cette technique à la radioastronomie est limitée en raison de la nécessité de disposer d'un rapport brouillage/bruit à l'entrée supérieur à 1 pour obtenir de bons résultats. Pour obtenir un rapport brouillage/bruit à la sortie inférieur à 1 avec cette méthode, il faut généralement recourir à certains moyens permettant de recevoir les brouillages radioélectriques avec un rapport brouillage/bruit supérieur à celui perçu par l'instrument principal. Pour y parvenir (il s'agit en fait de l'approche préconisée par [Barnbaum et Bradley], on peut notamment utiliser une antenne directive distincte pour recevoir les brouillages radioélectriques. Étant donné que la plupart des grandes paraboles présentent un gain dans les lobes latéraux qui est quasi isotrope dans le lobe latéral éloigné, on peut améliorer le rapport brouillage/bruit proportionnellement au gain de l'antenne auxiliaire utilisée pour recevoir les brouillages radioélectriques. Ainsi, l'utilisation d'une antenne Yagi ayant un gain de 20 dB permettrait d'améliorer d'environ 20 dB le rapport brouillage/bruit fourni à l'algorithme d'annulation, ce qui permettrait de réduire ce rapport d'un facteur comparable à la sortie du télescope. Des travaux menés ultérieurement [Jeffs *et autres*, 2005] décrivent l'extension de cette approche fondée sur un «signal de référence» pour obtenir une efficacité accrue contre les brouillages radioélectriques causés par des satellites, moyennant l'utilisation de plusieurs signaux auxiliaires provenant de paraboles avec des gains de l'ordre de 30 dB.

[Ellingson, 2002] aborde ce problème sous un autre angle et d'un point de vue plus théorique et indique que la suppression obtenue au moyen d'un algorithme d'annulation a pour limite supérieure le produit du rapport brouillage/bruit à l'entrée et de L , L étant le nombre d'échantillons utilisés pour estimer les paramètres du signal, en admettant que la largeur de bande du bruit soit égale à la largeur de bande de Nyquist, et correspond sinon au rapport entre la largeur de bande de bruit et la largeur de bande de Nyquist. Ainsi, pour supprimer un signal présentant un rapport brouillage/bruit égal à -20 dB de 20 dB supplémentaires, il faut analyser au moins $10\,000$ échantillons de fréquence de Nyquist et un nombre proportionnellement plus élevé si la largeur de bande de bruit est inférieure à la fréquence de Nyquist. Bien entendu, les caractéristiques du signal doivent également être fixes pendant ce laps de temps, de sorte que cela peut facilement devenir un facteur restrictif.

Les techniques d'annulation fondées sur l'emploi d'antennes auxiliaires pour obtenir un signal de référence avec un rapport brouillage/bruit élevé présentent un autre inconvénient, à savoir qu'elles peuvent facilement se détériorer et aboutir à une éradication. Ainsi, un radiotélescope monoparabole associé à une antenne auxiliaire ayant un gain élevé peut se comporter comme un réseau d'antenne à deux éléments, ce qui a pour conséquence que l'algorithme d'annulation peut synthétiser un diagramme de rayonnement nul en direction des brouillages radioélectriques, avec les mêmes incidences que celles décrites ci-dessus pour la formation de zéros.

Il faut également tenir compte du fait qu'il peut être très onéreux de localiser et de pointer des antennes de référence pour chaque source de brouillage radioélectrique affectant une observation.

On peut employer une autre méthode d'annulation temporelle pour surmonter ces difficultés. Cette méthode consiste à synthétiser des signaux de référence distincts directement à partir du signal de sortie du télescope, en tirant parti de la connaissance a priori des caractéristiques de modulation. Ainsi, [Ellingson et autres, 2001] a procédé à des démonstrations d'une technique de réduction des brouillages radioélectriques causés par un satellite GLONASS, en démodulant partiellement le signal, puis en le remodulant pour obtenir une estimation exempte de bruit du brouillage radioélectrique. Il a été démontré qu'on pouvait réduire de plus de 20 dB le rapport brouillage/bruit, en dépit du fait que les brouillages radioélectriques étaient reçus avec un rapport brouillage/bruit de l'ordre de -20 dB. En l'espèce, ce «déficit» du rapport brouillage/bruit a été surmonté par l'augmentation de fait du rapport brouillage/bruit associé au processus de démodulation. A noter que l'on peut aussi utiliser cette même technique pour améliorer encore le rapport brouillage/bruit au moyen d'antennes auxiliaires. Malheureusement, les modulations du signal analogues à celles utilisées par le satellite GLONASS (c'est-à-dire l'étalement du spectre à séquence directe) ne représentent que la solution la plus facile à mettre en œuvre pour ce qui est de la capacité d'obtenir de nettes améliorations du rapport brouillage/bruit par le biais de la démodulation partielle. La plupart des autres signaux ne présentent pas d'améliorations aussi importantes avec un traitement similaire et on obtient de moins bons résultats si la modulation est analogique ou sur sa structure est inconnue. Ainsi, les travaux menés par [Roshi, 2002] au sujet d'une stratégie comparable pour des signaux de télévision analogique n'ont permis d'obtenir qu'une suppression de l'ordre de 12 dB malgré l'utilisation initiale d'un rapport brouillage/bruit élevé et les travaux effectués par [Ellingson et Hampson, 2002] ont démontré qu'une suppression de l'ordre de 16 dB pour des impulsions radar était possible avec la stratégie «estimation-synthèse-soustraction».

En résumé, même si l'annulation temporelle des brouillages est théoriquement préférable à l'éradication, il existe un risque important que le signal ne soit pas correctement estimé et qu'en conséquence, il ne soit pas complètement supprimé lorsque le signal synthétisé est soustrait. Alors que l'efficacité de l'éradication des brouillages est essentiellement limitée par la capacité de détecter les brouillages radioélectriques, l'efficacité de l'annulation est essentiellement limitée par la capacité d'estimer le signal de ces brouillages. La capacité d'observation offerte par l'annulation se fait au détriment de la qualité, qui risque d'être plus limitée et moins robuste que les techniques comparables d'éradication des brouillages. Toutefois, des travaux novateurs et utiles se poursuivent dans ce domaine. Ainsi, [Kesteven, 2005] a démontré dernièrement qu'il était possible d'utiliser avec profit des techniques d'annulation adaptatives dans le domaine de la radioastronomie des pulsars et [Poulsen, 2003] a procédé à une démonstration avec du matériel en temps réel pour mettre en œuvre la technique d'annulation adaptative.

Avec cette technique, la capacité d'annuler les brouillages dépend de la qualité du signal d'annulation en tant qu'estimation du signal du brouillage reçu par le radiotélescope. Toute défaillance dans ce processus d'estimation conduit à une certaine dégradation des données.

2.4 Annulation postcorrélation

Une autre solution intéressante pour annuler les brouillages dans le domaine temporel consiste à procéder à une annulation «postcorrélation». La «corrélation» désigne ici la multiplication des signaux de sortie de l'antenne indépendants (polarisations ou antennes séparées d'un réseau par exemple), suivie du calcul de la moyenne de l'ensemble des produits. Les radiotélescopes monoparabole sont généralement corrélés pour obtenir des paramètres de Stokes et les réseaux de paraboles font l'objet d'une corrélation croisée des paraboles pour synthétiser les images. De même, il est possible d'effectuer une corrélation croisée des antennes de référence auxiliaires avec les antennes principales. Tant que les antennes auxiliaires reçoivent les signaux astronomiques recherchés avec un rapport signal/bruit très faible, on peut facilement modifier les produits de corrélation détériorés par les brouillages radioélectriques en utilisant des produits de corrélation hybrides (signal de sortie du télescope corrélé avec l'antenne auxiliaire). Cette technique a été décrite pour la première fois par [Briggs, Bell et Kesteven, 2000] et il a été démontré ultérieurement qu'elle était pour l'essentiel équivalente à l'annulation dans le domaine temporel («précorrélation»), si ce n'est que l'on obtient un rapport brouillage/bruit additionnel sans trop de difficultés par le biais de l'intégration des produits de corrélation. Cette technique est particulièrement prometteuse pour la nouvelle génération des réseaux de radiotélescopes, pour lesquels il devrait être possible de synthétiser des faisceaux auxiliaires à gain élevé provenant des mêmes antennes, sans avoir à utiliser d'autres éléments d'antenne «physiques». Par ailleurs, les corrélateurs destinés aux radiotélescopes modernes sont extrêmement complexes et coûteux et cette approche nécessite une augmentation de la capacité du corrélateur pour calculer les autres produits de corrélation requis et pour pouvoir les appliquer de façon à annuler les brouillages radioélectriques. En outre, la plupart des signaux des brouillages radioélectriques sont dynamiques, ce qui limite le niveau d'intégration qui peut être appliqué pour utiliser efficacement cette technique. Des «délais de suppression» de l'ordre de 10 s de ms sont parfois nécessaires pour réduire les signaux du satellite ou les signaux subissant des évanouissements par trajets multiples. L'augmentation nécessaire de la capacité des corrélateurs associée à des délais de suppression réduits risque d'accroître le coût et la complexité au-delà des limites acceptables et le niveau accru de traitement des données aboutira à une certaine dégradation des données.

On trouve également dans cette catégorie les techniques d'imagerie à synthèse d'ouverture qui utilisent les produits de corrélation déjà disponibles à des fins analogues. Voir [Cornwell *et autres*, 2004] pour un exemple récent.

2.5 Technique d'anticoïncidence

Enfin, il convient d'examiner la possibilité d'utiliser des techniques d'anticoïncidence pour réduire les brouillages radioélectriques. Comme indiqué ci-dessus, cette stratégie consiste non pas à réduire directement les brouillages radioélectriques, mais à traiter le problème de «détection» évoqué plus haut. Les stratégies d'anticoïncidence consistent à se protéger contre les brouillages radioélectriques en tirant parti du fait que les antennes largement espacées devraient percevoir de la même manière les signaux astronomiques, mais différemment les brouillages radioélectriques. Cette technique est surtout utilisée dans les recherches sur les transitoires astronomiques, qui sont fortement affectés par les brouillages radioélectriques par impulsions. En fonction de la portée des signaux brouilleurs, des espacements de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres sont parfois nécessaires, ce qui rend cette stratégie difficile à appliquer sauf dans les rares cas où une distance suffisante sépare des télescopes analogues et où ceux-ci ont le même champ d'observation. L'annulation ne peut être parfaite et les fluctuations aléatoires résiduelles entraîneront une dégradation des données, mais cette technique a été appliquée avec succès dans les recherches sur les transitoires dans tout le ciel [Katz, 2003] et dans les recherches sur les impulsions «géantes» émises par des pulsars [Bhat *et autres*, 2005].

3 Conclusions

Les techniques de réduction des brouillages radioélectriques offrent des avantages non négligeables pour la radioastronomie, mais il reste beaucoup à faire pour concevoir des techniques ayant une utilité pratique et applicables dans les opérations courantes. Il est évident que les techniques de réduction des brouillages radioélectriques ne peuvent être considérées comme une solution autonome pour résoudre les problèmes de brouillages radioélectriques externes causés aux radiotélescopes actuels et futurs. L'efficacité d'une technique donnée dépend en effet:

- de l'architecture de l'instrument ou de sa configuration pour une observation donnée;
- du mode d'observation (spectroscopie, observation du continuum par imagerie à synthèse d'ouverture, recherches sur la dispersion des pulsars par exemple);
- la nature des brouillages radioélectriques eux-mêmes (brouillages persistants ou intermittents, à cohérence spatiale ou diffusés par trajets multiples par exemple, etc.).

La réduction des brouillages permet simplement de réduire le degré de dégradation ou de suppression des données par les brouillages et se traduit par une augmentation des coûts d'exploitation. En outre, il convient de noter qu'il n'existe pas une seule et même technique capable de traiter tous les scénarios possibles en radioastronomie.

Références

- BARNBAUM, C. et BRADLEY, R. F. [1998] A new approach to interference excision in radio astronomy: real-time adaptive cancellation. *Astronom. Journ.*, p. 116, 2598.
- BELL, J. F., EKERS, R. D. et BUNTON, J. D. [2000] Summary of the Elizabeth and Frederick White Conference on radio frequency interference mitigation strategies. *Publication of Astronomical Society of Australia*, p. 17, 3.
- BHAT, N. D. R., CORDES, J. M., CHATTERJEE, S. et LAZIO, T. J. W. [2005] Radio frequency interference identification and mitigation using simultaneous dual frequency observations. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S14.
- BOONSTRA, A. J. et VAN DER TOL, S. [2005] Spatial filtering of interfering signals at the initial low frequency array (LOFAR) phased array test station. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S09.
- BRIGGS, F. H., BELL, J. F. et KESTEVEN, M. J. [2000] Removing radio frequency interference from contaminated astronomical spectra using an independent reference signal and closure relations. *Astronom. Journ.*, p. 120, 3351.
- BRITTEIL, S. et WEBER, R. [2005] Comparison of two cyclostationary detectors for radio astronomy interference mitigation in radio astronomy. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S15.
- CORNWELL, T. J., PERLEY, R. A., GOLAP, K. et BHATNAGAR, S. [2004] RFI Excision in synthesis imaging without a reference signal. EVLA Memo, p. 86, NRAO (<http://www.nrao.edu/>).
- DONG, W., JEFFS, B. D. et FISHER, J. R. [2005] Radar interference blanking in radio astronomy using a Kalman tracker. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S04.
- ELLINGSON, S. W., BUNTON, J. D. et BELL, J. F. [2001] Removal of the GLONASS C/A signal from OH spectral line observations using a parametric modeling technique. *Astrophys. Journ.*, Supplement p. 135, 87.
- ELLINGSON, S. W. [2002] Capabilities and limitations of adaptive canceling for microwave radiometry. Proc. IEEE International Geoscience (Remote Sensing Symposium), p. 3, 1685.

- ELLINGSON, S. W. et HAMPSON G. A. [2002] A subspace-tracking approach to interference nulling for phased array-based radio telescopes. *IEEE Trans. Antenn. and Prop.*, Vol. 50, 1, p. 25-30.
- ELLINGSON, S. W. et HAMPSON G. A. [2003] Mitigation of radar interference in L-band radio astronomy. *Astrophys. Journ.*, Supplement p. 147, 167.
- ELLINGSON, S. W. [2005] Introduction to special section on mitigation of radio frequency interference in radio astronomy. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S01.
- FISHER, J. R., ZHENG, Q., ZHENG, Y., WILSON, S. G. et BRADLEY, R. F. [2005] Mitigation of pulsed interference to redshifted HI and OH observations between 960 and 1215 MHz. *Astronom. Journ.*, p. 129, 2940.
- FRIEDMAN, P. [1996] Proc. 8th IEEE Workshop. *Statistical Signal and Array Processing*, p. 264.
- HANSEN, C. K., WARNICK, K. F., JEFFS, B. D., FISHER, J. R. et BRADLEY, R. [2005] Interference mitigation using a focal plane array. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S15.
- HAYKIN, S. [2001] *Adaptive Filter Theory*. 4th Edition. Prentice Hall.
- JEFFS, B. D., LI, L. et WARNICK, K. F. [2005] Auxiliary antenna-assisted interference mitigation for radio astronomy arrays. *IEEE Trans. Signal Proces.*, Vol 53, 2, p. 439.
- KATZ, C. A. [2003] A Survey for transient astronomical radio emission at 611 MHz. *Publication of Astronomical Society of Australia*, p. 115, 675.
- KESTEVEN, M. [2005] Adaptive filters revisited: radio frequency interference mitigation in pulsar observations. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S06.
- LANE, W. M. et autres. [2005] Postcorrelation radio frequency interference excision at low frequencies. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S05.
- LESHEM, A., VAN DER VEEN, A.-J. et BOONSTRA, A.-J. [2000] Multichannel interference mitigation techniques in radio astronomy. *Astrophys. Journ.*, Supplement, p. 131, 355.
- LIBERTI, J. C. et RAPPAPORT, T. S. [1999] *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*. Prentice-Hall.
- NIAMSUWAN, N., JOHNSON, J. T. et ELLINGSON, S. W. [2005] Examination of a simple pulse-blanking technique for radio frequency interference mitigation. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S03.
- POULSEN, A. J. [2003] Real-time adaptive cancellation of satellite interference in radio astronomy. Masters Thesis, Brigham Young University.
- RAZA, J., BOONSTRA, A.-J., et VAN DER VEEN, A. J. [2002] Spatial filtering of RF interference in radio astronomy. *IEEE Signal Proc. Lett.*, Vol. 9, 2, p. 64-67.
- ROSHI, D. A. [2002] Cancellation of TV interference. NRAO Electronics Division Technical Note No. 193.
- THOMPSON, A. R. [1982] The response of a radio-astronomy synthesis array to interfering signals. *IEEE Trans. Antenn. and Prop.*, Vol. 30, 3, p. 450-456.
- VAN VEEN, B. D. et BUCKLEY, K. M. [April 1988] Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE Acoustic, Speech and Signal Processing Mag.*
- WEBER, R., FAYE, C., BIRAUD, F. et DANSOU, J. [1997] *Astron. and Astrophys. Supple.*, p. 126, 161.
- ZHENG, Q., ZHENG, Y., WILSON, S. G., FISHER, J. R. et BRADLEY, R. F. [2005] Excision of distance measuring equipment interference from radio astronomy signals. *Astron. Journ.*, p. 129, 2933.

Bibliographie

- BEAUDET, C. M., *et autres* [2003] RFI Survey at the ALMA Site at Chajnantor. ALMA Memo, p. 470, <http://www.alma.nrao.edu/memos/>.
- ROGERS, A. E. E., PRATAP, P., CARTER, J. C. et DIAZ, M. A. [2005] Radio frequency interference shielding and mitigation techniques for a sensitive search for the 327 MHz line of deuterium. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S17.
- WEINTROUB, J. [1998] Radio spectroscopy applied to a search for highly redshifted protogalactic structure. Ph. D. Thesis, Harvard University (<http://seti.harvard.edu/grad/jpdf/thesis.pdf>).
-