

## INFORME UIT-R RA.2126

**Técnicas para reducir la interferencia de radiofrecuencia  
en el servicio de radioastronomía**

(Cuestión UIT-R 237/7)

(2007)

**1 Introducción**

El presente Informe es un resumen técnico conciso del estado actual de las técnicas tendentes a reducir la interferencia de radiofrecuencia (RFI) en el servicio de radioastronomía. Concretamente, en el Informe se examina una serie de técnicas de reducción de la interferencia antropogénica que se origina fuera del instrumento considerado, por lo cual escapa al control del operador del instrumento. En el Informe el criterio seguido para determinar si una señal determinada es interferente en radiofrecuencia consiste simplemente en que la señal sea una parte no deseada pero detectable de una observación deseada y que pueda degradar la realización eficaz de dicha observación. Ahora bien, no es tarea sencilla reducir este tipo de interferencia cuando su detección resulta difícil.

El objetivo de las técnicas de la reducción de la RFI estriba en permitir la observación a los niveles de sensibilidad especificados en la Recomendación UIT-R RA.769 y con un porcentaje de pérdida de datos comprendido entre los límites que se señalan en la Recomendación UIT-R RA.1513. En estas Recomendaciones se indican las condiciones necesarias para realizar observaciones eficaces en el servicio de radioastronomía, así como las bases numéricas para calcular las condiciones tolerables de RFI en los estudios de compartición y compatibilidad. Los métodos de reducción que no se basan en una simple escisión de los datos contaminados por la interferencia de radiofrecuencia (RFI) no se utilizan por lo general en el servicio de radioastronomía, ante todo por el hecho de que tales métodos no son fáciles de diseñar o aplicar y pueden requerir el desarrollo de una gran cantidad de soporte lógico especial.

Hasta fecha reciente, los modos de observación normalizados y las técnicas de procesamiento de la señal utilizados durante las observaciones aparejaban por su propia naturaleza un nivel de reducción de la interferencia que se adecuaba a la obtención de datos astronómicos útiles en presencia de cierto grado de interferencia.

Así por ejemplo, la utilización del método de «supresión de franjas» en la formación de imágenes con síntesis de apertura suele decorrelacionar la RFI recibida de un conjunto de antenas muy separadas entre sí, lo que tiende a suprimir la RFI en los productos de correlación afines [Thompson, 1982]. Tratándose de algunos radiotelescopios de síntesis, dicha interferencia puede hacer que aparezca una fuente brillante espuria en el polo celeste representado en los mapas, lo que hace que sea difícil si no imposible realizar observaciones con una declinación elevada. Los púlsares generan impulsos de ruido en banda ancha, razón por la cual se requiere una anchura de banda significativa para el receptor, si se desea obtener una relación señal-ruido útil. El ruido de los impulsos está sujeto a dispersión dependiente de la frecuencia a medida que se propaga a través de los plasmas enrarecidos del medio interestelar. Cuando se observa un pulsar con un radiotelescopio, los impulsos se dispersan deliberadamente utilizando soporte lógico y equipo con el fin de recuperar una representación exacta (no dispersada) del perfil intrínseco de los impulsos. Este proceso suele reducir la RFI, ya que el proceso de dispersión de la señal del pulsar dispersa la RFI. Estos procesos sólo permiten reducir hasta cierto punto la RFI.

La interferencia degrada en todos los casos los datos y es cada vez mayor el número de astrónomos que opinan que la intensidad y densidad temporal/espectral de la RFI es tal que las observaciones

quedan «saturadas» por la RFI y pierden toda utilidad. Acaso las observaciones más vulnerables son aquéllas que se efectúan con radiotelescopios monoparabólicos (continuum o espectroscopia), debido a que el mejoramiento de la sensibilidad ante las señales astronómicas que se logra incrementando el tiempo de integración hace aumentar proporcionalmente la sensibilidad ante las señales RFI. Si bien ciertos modos de observación son intrínsecamente robustos frente a niveles bajos de la RFI, la reducida intensidad de las señales recibidas de las emisiones radioeléctricas cósmicas explica que la radioastronomía sea muy vulnerable ante la interferencia.

La RFI no sólo impide realizar o degrada ciertas observaciones o tipos de observación, sino que también limita la productividad global de las estaciones de radioastronomía, puesto que hace que las observaciones deseadas resulten demasiado difíciles u onerosas, debido al tiempo necesario de observación, la complejidad del procesamiento y los elevados gastos generales de funcionamiento. En este contexto, podemos citar a modo de ejemplo la creciente necesidad de proceder a editar manualmente los datos después de las observaciones para eliminar la RFI, como se hace a veces cuando se trata de formar imágenes con síntesis de apertura [Lane *et al.*, 2005]. Aunque este tipo de edición resulta muy eficaz, es difícil de automatizar, por lo cual, se convierte en una tarea sumamente tediosa si aumenta la duración de la observación y la anchura de banda que ha de observarse. La presencia de RFI se traduce ocasionalmente en una mayor necesidad de mano de obra y tiempo de telescopio, lo que constituye para la ciencia un límite tan estricto como la RFI, que puede obliterar irremediabilmente la emisión objeto de observación.

Estos problemas han llevado a investigar técnicas de reducción de la RFI que podrían considerarse «automáticas» o «en tiempo real», en el sentido de que todas ellas son nominalmente parte integral del instrumento considerado y se aplican sin intervención humana. Teniendo esto presente, a continuación se describen dichas técnicas.

## 2 Técnicas para reducir la RFI

El estudio de las técnicas encaminadas a reducir la RFI que contamina la salida analógica de los receptores de los radiotelescopios ha sido un tema que ha suscitado cada vez mayor interés en los últimos años, pues los avances tecnológicos obtenidos han permitido idear una serie de métodos para procesar la señal en tiempo real y reducir así la RFI. Una útil introducción a este tema está constituida por los sumarios de las recientes conferencias organizadas para abordarlo, por ejemplo [Bell *et al.*, 2000 y Ellingson, 2005]. A los efectos del presente Informe, un resumen conciso de las técnicas de reducción puede ser el siguiente:

- 1) *Escisión*, en el sentido de «recorte» de la RFI. Por ejemplo, una RFI que consista en impulsos breves, podría mitigarse eliminando los datos cuando dichos impulsos estén presentes, es decir, procediendo a una escisión *temporal*. Por otra parte, una RFI persistente podría reducirse utilizando técnicas de formación de haces en redes de antenas para orientar nulos de diagrama en las direcciones en las cuales la RFI es incidente, lo que constituye una escisión *espacial*. Todas las técnicas de escisión dan lugar a cierta pérdida de datos astronómicos y hay que señalar que los parásitos generados por el proceso de escisión pueden distorsionar los datos restantes. Como la eliminación se traduce esencialmente en una pérdida de tiempo de observación sería necesario aumentar este último para obtener la sensibilidad o la exactitud de medición requeridas.
- 2) *Cancelación*, en el sentido de «substraer» la RFI de la salida del telescopio. La cancelación es un método más eficaz que la escisión, toda vez que permite eliminar la RFI sin afectar las operaciones astronómicas, aportando una capacidad de «ver a través» que está libre nominalmente de los parásitos asociados con el simple «recorte» de datos. Con todo y como se examina más abajo, la desventaja de este método con respecto a la escisión es que normalmente la supresión queda limitada por el valor estimado de la interferencia recibida por el radiotelescopio.

- 3) *Anticoincidencia*, que remite en términos generales a la discriminación de la RFI cuando se aprovecha el hecho de que una serie de antenas muy separadas entre sí deberían percibir las señales astronómicas de manera idéntica pero no así la RFI. En tales casos la RFI ejerce mayor influencia en el nivel de ruido de fondo en cada antena que en las señales correladas. Esto degrada la señal correlada recibida, por lo que puede exigir aumentar el tiempo de observación para lograr la relación señal-ruido necesaria.

Los métodos de reducción que se utilizan de manera frecuente o rutinaria en los observatorios se basan en su mayoría en la escisión temporal, esto es, en la supresión de datos que se consideran contaminados por la RFI, métodos que se describen en el § 2.1. La escisión espacial (§ 2.2) y los métodos que entrañan cancelación (§ 2.3 y 2.4) se han demostrado utilizando datos astronómicos reales o simulados, pero en la mayoría de los casos se encuentran en una fase ulterior de desarrollo y se utilizan únicamente en circunstancias especiales. Los diferentes tipos de escisión espacial requieren por regla general una gran cantidad de soporte lógico especial y computadores de mayor potencia. Las técnicas de anticoincidencia (§ 2.5) son muy eficaces cuando se trata de identificar datos contaminados por la RFI, pero en rigor no pueden considerarse como métodos de reducción, ya que sólo permiten suprimir la interferencia mediante escisión temporal.

## 2.1 Escisión temporal (eliminación)

Ésta es quizá la estrategia más antigua y más conocida de reducción en tiempo real de la RFI impulsiva. La técnica de eliminación parece haber comenzado a interesar para solucionar los problemas que planteaban los radares de aviación basados en tierra a la observación en la banda 1 215-1 400 MHz. Típicamente, estos radares transmiten formas de onda de impulsos con frecuencia fija o sinusoidales con modulación de frecuencia y longitudes de impulso de 2 a 400 ms, 1-27 ms entre los impulsos transmitidos y anchuras de banda del orden de 1 MHz. Estos impulsos suelen detectarse en los lóbulos laterales de los radiotelescopios a cientos de kilómetros de distancia. Aunque el ciclo de trabajo de la transmisión es relativamente bajo (típicamente inferior a 0,1%), el breve periodo comprendido entre dos impulsos dificulta la exactitud de la supresión. La supresión de los impulsos de radar resulta difícil también, por el hecho de que la refracción que ocasionan las características del terreno y las aeronaves genera copias adicionales del impulso, copias que llegan mucho tiempo después del impulso de «trayecto directo» (véase por ejemplo el apéndice de [Ellingson y Hampson, 2003]). Es frecuente que, aunque estos impulsos multitrayecto sean lo suficientemente intensos como para corromper las observaciones astronómicas, resulten demasiado débiles para ser detectados con cierto grado de fiabilidad. Así pues, el intervalo de supresión activado por un impulso detectado debe ser típicamente mucho más largo que dicho impulso, si la idea es garantizar que se supriman también todas las copias multitrayecto del impulso. Típicamente, resultan necesarios intervalos de supresión de longitudes de hasta 100 microsegundos (es decir, 10-100 veces la duración del impulso) [Ellingson y Hampson, 2003].

Se han propuesto y desarrollado en cierta medida varias técnicas en tiempo real para llevar a cabo la escisión temporal. Friedman [1996], Weber *et al.* [1997], y Leshem *et al.* [2000] describen diferentes métodos para detectar la interferencia impulsiva y suprimir la correspondiente salida. El Centro Nacional de Astronomía e Ionosfera (NAIC) ha desarrollado un dispositivo de reducción en tiempo real de impulsos locales intensos de radar en el Observatorio de Arecibo (Puerto Rico). Este dispositivo realiza un seguimiento del diagrama conocido de temporización entre impulsos para este radar y acto seguido suprime la salida del receptor en una ventana temporal situada en torno a los tiempos previstos de llegada de los impulsos. Los trabajos más recientes efectuados en esta esfera y los correspondientes resultados experimentales se describen en [Ellingson y Hampson, 2003; Fisher *et al.*, 2005 y Zheng *et al.*, 2005]. En estas dos últimas referencias se aborda el problema consistente en la interferencia impulsiva ocasionada por el equipo de aviación para medir distancias (DME).

La limitación básica de la supresión viene representada por la eficiencia de la detección. Esto obedece al hecho de que, si bien una vez que se ha detectado un impulso de RFI, puede eliminarse completamente mediante supresión, resulta inevitable que no se detecten ciertas partes del impulso, por ser débiles, pero no por ello inocuas. Ahora bien, durante la escala temporal de un sólo impulso las señales astronómicas tienen una relación rutinaria señal-ruido (SNR)  $\ll 1$ , por lo cual la RFI debe ser detectada de manera fiable a estos niveles, si la idea es suprimir eficazmente dicha interferencia en la salida integrada. Esto resulta bastante difícil y los éxitos logrados recientemente en lo que respecta a la supresión mencionada se han basado en un conocimiento avanzado y detallado de la forma de onda de la RFI, que permite compensar en cierta medida una relación señal-ruido inadecuada.

Cabe la posibilidad de obtener una serie de mejoras en la eficiencia de la detección recurriendo a ciertos aspectos de la forma de onda de la RFI, sin necesidad de conocer concretamente dicha forma de onda, como ocurre con la cicloestacionareidad ([Britteil y Weber, 2005], aplicada por ambos autores a las señales del satélite HIBLEO2 (Iridium), y el seguimiento de Kalman [Dong *et al.*, 2005] que fue aplicado a los radares de aviación. Otro problema de talla es determinar cómo deben fijarse los umbrales de detección y la longitud de la ventana de eliminación, para llegar a un compromiso aceptable entre una reducción de la RFI robusta (lo que remite a reducidos umbrales y grandes ventanas), el hecho de limitar la degradación de la sensibilidad y la introducción de parásitos debidos a la supresión (lo que remite a umbrales elevados y ventanas reducidas), compromiso que fue estudiado por [Niamsuwan, Johnson y Ellingson, 2005]. Además, dado que el tiempo «eliminado» es tiempo perdido de observación, podría ser necesario aumentar este último para lograr la sensibilidad requerida.

## 2.2 Escisión espacial (formación de nulos)

Cuando un instrumento está integrado por varios elementos de antena, cabría la posibilidad de manipular la salida de dichos elementos para crear un nulo en la dirección de la RFI incidente [Van Veen y Buckley, 1988]. La técnica básica es muy conocida, debido a sus aplicaciones en las comunicaciones militares contra la interferencia deliberada, así como en las aplicaciones comerciales de las telecomunicaciones celulares [Liberti y Rappaport, 1999]. Aunque en principio dichas técnicas resultan aplicables en la radioastronomía, en la práctica existen factores que complican su aplicación. Hay que señalar que, a diferencia de las aplicaciones comerciales y militares tradicionales, en la radioastronomía una RFI resulta perjudicial incluso cuando la relación interferencia-ruido (INR)  $\ll 1$ . Así pues, para realizar las operaciones necesarias de manera eficiente habría que emplear algoritmos de formación de nulos que detecten y localicen la RFI a dichos niveles. Por el contrario, en las aplicaciones comerciales y militares la RFI no plantea normalmente ningún problema, siempre que la INR no alcance valores en torno a 1. Por esta razón, la mayoría de los algoritmos de formación de nulos ideados en el contexto a las aplicaciones militares y comerciales se basan en la estrategia de filtrado de Wiener (que incluye los así llamados algoritmos de «minimización de potencia» y «varianza mínima»), cuya eficacia es limitada para una  $INR < 1$  [Ellingson y Hampson, 2002]. Se sabe que las técnicas basadas en el filtrado de Wiener se circunscriben a reducir la INR en proporción a la misma, lo que quiere decir que resulta fácil suprimir la RFI a un nivel de  $INR-1$  y relativamente difícil reducirla más allá de ese nivel. En consecuencia, para que dichas técnicas resulten eficaces en el caso de la radioastronomía, normalmente es necesario realizar mediciones adicionales para incrementar la INR aparente a la que se aplicará el algoritmo de reducción. Más adelante se examinarán algunas de estas técnicas.

Las observaciones de radioastronomía dependen de la calidad de funcionamiento de la antena (por ejemplo ganancia, perfil del haz, distribución del lóbulo lateral). Esto se ha conseguido por regla general realizando medidas precisas y estando atento a garantizar que los parámetros no se modifiquen con el tiempo. Las variaciones sobrevenidas en el diagrama de lóbulos laterales pueden resultar confusas para los algoritmos de autocalibración utilizados con el fin de generar imágenes de

gama muy dinámica en la interferometría con síntesis de apertura. Mantener constantes estos parámetros o al menos conocer su variación a medida que se modula el haz de antena y el diagrama de los lóbulos laterales para reducir la interferencia plantea un problema para los sistemas de procesamiento de la señal y de control de la antena más frecuentemente utilizados en nuestros días.

La clase de técnicas basadas en «proyecciones a subespacios» representa una opción en lo que concierne a las técnicas tradicionales de formación de nulos basadas en el filtrado de Wiener. La idea que preside la proyección a subespacios es que la interferencia puede identificarse en términos de correlaciones entre los elementos de una red, que pueden utilizarse, a su vez, para determinar los coeficientes de formación de haces que redunden en diagramas que rechazan la interferencia con escaso efecto o nulo sobre las características del lóbulo principal. Desde el punto de vista matemático la proyección a subespacios es un proceso integrado por las dos siguientes etapas:

- identificar los eigenvectores de la matriz de covarianza espacial (el conjunto de correlación entre cada dos elementos);
- conseguir que el vector de coeficientes de formación de haces sea ortogonal (operación de «proyección») al eigenvector asociado con la interferencia (el «subespacio» de interferencia).

Se supone que la interferencia predomina en la mayoría de los casos sobre la potencia recibida por la red de elementos, de tal modo que su espacio de interferencia es siempre el asociado con el eigenvalor más elevado de la covarianza espacial. Esto suscita problemas cuando la interferencia es relativamente débil, sobre todo si la relación interferencia-ruido es inferior a 1 [Ellingson y Hampson, 2002]. Con todo, se ha demostrado que la proyección a subespacios de interferencia brinda ventajas significativas en radioastronomía cuando se utiliza adecuadamente [Raza *et al.*, 2002]. Dichas técnicas no son una panacea para resolver el problema representado por una detección insuficiente y una localización poco eficaz, pero permiten, sin duda, reducir la distorsión del diagrama de antena y, en cierta medida, obtener comportamientos que resultan más fáciles de prever y modificar. La distorsión que genera la aplicación de este tipo de técnicas puede incluso corregirse en una operación de postprocesamiento durante la formación de imágenes con síntesis de apertura [Leshem *et al.*, 2000].

Aunque en general la formación de nulos es una técnica muy eficaz para reducir la RFI ocasionada por satélites, es de esperar que sea algo menos eficiente cuando se trate de proteger los sistemas de radioastronomía contra la RFI terrenal. En efecto, este tipo de interferencias tiende a ser dispersada por el terreno y a menudo llega al radiotelescopio no en una onda plana sino en un frente de ondas complejo y dinámicamente variable con una dirección de incidencia aparente que se dispersa a lo largo de una gama angular significativa. Las técnicas tradicionales de formación de nulos suelen ser menos eficientes en presencia de dispersión angular, problema que se agudiza cuando se reduce la INR.

En general, las técnicas de escisión espacial siguen sin haberse probado en medida significativa, debido a su gran complejidad y a sus elevados costos de desarrollo e implementación. Con todo, se sigue progresando como pone de relieve el trabajo realizado recientemente en este campo [Boonstra y Van der Tol, 2005; Hansen *et al.*, 2005], pese a lo cual, aun en el caso más favorable, los datos obtenidos actualmente no tienen la calidad de los que se hubieran registrado en ausencia de interferencia.

### 2.3 Cancelación temporal

Un algoritmo óptimo de cancelación temporal con una única antena parabólica entraña los siguientes pasos:

*Paso 1:* Detección y estimación de la forma de onda de la RFI.

*Paso 2:* Síntesis de la versión libre de ruido de la forma de onda de la RFI.

*Paso 3:* Substracción en los datos sujetos a degradación de la forma de onda de la RFI sintetizada.

Como se ha señalado antes, cabe implementar un proceso equivalente en el dominio de frecuencias. Como ocurre en el caso de la escisión, se dispone de un considerable número de experiencias en lo que respecta a la utilización de algoritmos de cancelación en las aplicaciones comerciales y militares [Haykin, 2001]. La estrategia de cancelación fue investigada por vez primera en el contexto de la radioastronomía por [Barnbaum y Bradley, 1998], que utilizaron el popular algoritmo de mínimos cuadrados medios (LMS), técnica basada en los principios del filtrado de Wiener. Sin embargo en radioastronomía, esta tecnología es de aplicación limitada, debido a la necesidad de contar con una  $INR > 1$  a la entrada para poder realizar observaciones significativas. La obtención de una  $INR \ll 1$  a la salida, utilizando este método, exigirá normalmente adoptar ciertas medidas para recibir la RFI con una  $INR$  mayor que la percibida por el instrumento primario. Una forma de conseguir esto, preconizada, de hecho, por [Barnbaum y Bradley] consiste en utilizar una antena direccional separada para recibir la RFI. Como las antenas parabólicas más grandes tienen una ganancia de lóbulo lateral que es aproximadamente isotrópica en el lóbulo lateral lejano, la  $INR$  puede mejorarse aproximadamente en proporción a la ganancia de la antena auxiliar utilizada para recibir la RFI. Así pues, si se utiliza por ejemplo una antena yagi con una ganancia de 20 dB, podría mejorarse en unos 20 dB la  $INR$  a la que habría que aplicar el algoritmo de cancelación, lo que, a su vez, podría reducir en un factor comparable la  $INR$  a la salida del telescopio. En el trabajo realizado ulteriormente por [Jeffs *et al.*, 2005] se describe la extensión de este enfoque de «señal de referencia» para lograr una protección más eficaz contra la RFI generada por satélites, recurriendo a múltiples señales auxiliares de antenas parabólicas con ganancias del orden de 30 dB.

Un enfoque más teórico es el de [Ellingson, 2002], según el cual la supresión que se logra aplicando un algoritmo de cancelación está limitada aproximadamente en los valores superiores por el producto de la  $INR$  a la entrada y  $L$ , siendo  $L$  el número de muestras que se utilizan para estimar los parámetros de la forma de onda, suponiendo una anchura de banda del ruido igual a la anchura de banda de Nyquist, y, de no ser así, obteniendo dicha igualdad al multiplicar el valor de la primera anchura por el cociente entre la anchura de banda del ruido y la anchura de banda de Nyquist. Así pues, para suprimir, por ejemplo, una señal con una  $INR$  de  $-20$  dB, introduciendo 20 dB adicionales, habrá que analizar al menos 10 000 muestras de la frecuencia de Nyquist y proporcionalmente más si la anchura de banda del ruido es inferior a dicha tasa de Nyquist. Hay que decir que las características de las señales deben ser también estacionarias en este marco temporal, hecho que puede convertirse fácilmente en el factor de limitación.

Otra limitación de las técnicas de cancelación que emplean antenas auxiliares para obtener una señal de referencia con una  $INR$  elevada, consiste en que resulta fácil que dichas técnicas pierdan eficacia y queden en cuanto a utilidad a un nivel que correspondería a un método de escisión. Así por ejemplo, un radiotelescopio monoparabólico combinado con una antena auxiliar de elevada ganancia puede comportarse como una red integrada por dos elementos, lo que puede hacer que el algoritmo de cancelación sintetice un nulo de diagrama en la dirección de la RFI y aparejaría así las consecuencias asociadas a la formación de nulos antes descritas. Otro hecho que debe tomarse en consideración es que localizar y apuntar antenas de referencia para cada fuente de RFI que afecte una observación puede resultar un ejercicio oneroso.

Existe un método alternativo de cancelación temporal para evitar estos problemas y que consiste en sintetizar señales de referencia distinguibles directamente a partir de la salida del telescopio, aprovechando un conocimiento a priori de las características de modulación. Así por ejemplo, [Ellingson *et al.*, 2001] demostraron una técnica para reducir la RFI ocasionada por un satélite del sistema GLONASS, que consistía en demodular parcialmente la señal y acto seguido remodular el resultado para obtener una estimación libre de ruido de la RFI. Estos autores demostraron que podría reducirse la  $INR$  en más de 20 dB, pese al hecho de que la RFI se recibiese con una  $INR$  del orden de  $-20$  dB. En este caso, el «déficit» de las  $INR$  fue compensado con creces por el incremento efectivo de la  $INR$  que produjo el proceso de demodulación. Cabe indicar que la técnica

mencionada puede utilizarse también para mejorar en mayor medida la INR, recurriendo a antenas auxiliares. Desafortunadamente, la modulación de la señal del tipo de la utilizada por el sistema GLONASS (esto es, la de espectro ensanchado por secuencia directa) representa únicamente «una solución menor» en relación con la capacidad para obtener grandes mejoras de la INR mediante demodulación parcial. En la mayoría de las demás señales no se han logrado esas grandes mejoras aplicando un procesamiento similar y la situación puede ser incluso peor cuando la modulación sea analógica o se desconozca su estructura. Por ejemplo, en el trabajo realizado por [Roshi, 2002] sobre una estrategia similar en el caso de señales analógicas de televisión se obtiene únicamente una supresión de 12 dB, pese a que el valor inicial de la INR es considerable, y [Ellingson y Hampson, 2002] han demostrado que puede lograrse una supresión del orden de 16 dB contra la interferencia generada por impulsos de radares, utilizando la estrategia estimar-sintetizar-sustraer.

En resumen y aunque nominalmente sea más deseable que la escisión, la cancelación temporal entraña un riesgo significativo por el hecho de que no se calcule adecuadamente la forma de la onda y, por tanto, no se suprima completamente al sustraer la forma de onda sintetizada. La eficacia del método de escisión queda limitada esencialmente por la capacidad para detectar la RFI, mientras que la eficacia de la cancelación se ve limitada básicamente por la capacidad para estimar la forma de onda de la RFI. El precio que hay que pagar para beneficiar de la capacidad de «ver a través» que ofrece el método de cancelación es una eficiencia potencialmente limitada y menos sólida que la que hacen posible las técnicas de escisión comparables. Sin embargo, se sigue realizando un trabajo útil e innovador en este campo: por ejemplo [Kesteven, 2005] demostró la posibilidad de utilizar productivamente la cancelación adaptativa en la astronomía de púlsares y [Poulsen, 2003] hizo otro tanto en lo que concierne al funcionamiento del equipo en tiempo real para implementar la cancelación adaptativa.

En dicha técnica la capacidad para cancelar la interferencia viene dada por la calidad de la forma de onda de la cancelación para estimar la forma de onda de la interferencia recibida por el radiotelescopio considerado. Cualquier insuficiencia que sobrevenga en ese proceso de estimación redundará en cierta degradación de los datos.

## 2.4 Cancelación posterior a la correlación

Una opción elegante en relación con la implementación de la cancelación en el dominio temporal consiste en aplicar una cancelación «posterior a la correlación». En este contexto, el término «correlación» remite a la multiplicación de las salidas de antenas independientes (por ejemplo, polarizaciones o antenas separadas en una red), seguida por la promediación del espectro de los productos. Una práctica común en lo que concierne a los radiotelescopios monoparabólicos es correlacionar variables para obtener parámetros Stokes, y, en el caso de redes de antenas parabólicas, proceder a una correlación cruzada de antenas como una etapa en la síntesis de imágenes. Asimismo, cabe correlacionar de manera cruzada antenas de referencia auxiliares con antenas primarias. Siempre que las antenas auxiliares reciban las señales astronómicas deseadas con una SNR muy baja, será fácil corregir los productos de la correlación corrompidos por la RFI, utilizando para ello productos de correlación híbridos (correlación de la salida del telescopio y las antenas auxiliares). Esta técnica fue descrita por primera vez por [Briggs, Bell y Kesteven, 2000] y ulteriormente pudo verse que era esencialmente equivalente a la cancelación en el dominio temporal («precorrelación»), salvo que la INR adicional se obtenía sin mayor problema integrando los productos de correlación. Esta técnica parece tener un buen futuro si se emplea en la generación incipiente de redes de radiotelescopios, para lo cual habría que sintetizar haces auxiliares de elevada ganancia procedentes de las mismas antenas, en lugar de recurrir a elementos de antena «físicos» adicionales. Por otra parte, los correladores destinados a los radiotelescopios modernos son sistemas extraordinariamente complejos y costosos, y este enfoque exige incrementar en grado considerable la capacidad de los correladores para computar los productos adicionales de correlación requeridos y aplicarlos con el fin de lograr la cancelación de la RFI. Además, la naturaleza dinámica de la

mayoría de las señales de RFI limita el nivel de integración que puede aplicarse para utilizar eficazmente esta técnica. En efecto, podría resultar necesario contar con «tiempos de vaciado» del orden de 10 s o ms para mitigar señales de satélite o señales que experimentan atenuación multitrayecto. El incremento necesario de la capacidad de los correladores, así como el hecho de contar con tiempos de vaciado reducidos, puede incrementar el costo y la complejidad de tal modo que no sea práctico recurrir a esta técnica, y un procesamiento de datos mayor redundaría en degradarlos en cierta medida.

En este grupo de métodos, cabe citar también las técnicas de formación de imágenes con síntesis de apertura que explotan los productos de correlación ya disponibles con fines similares. Un ejemplo reciente figura en [Cornwell *et al.*, 2004].

## 2.5 Anticoincidencia

Por último, hay que abordar la posibilidad de utilizar técnicas anticoincidencias para mitigar la RFI. Como se dijo antes, esta estrategia no entraña directamente la reducción de la RFI pero, permite abordar el problema de «detección» antes descrito. En las estrategias de anticoincidencia se aprovecha el hecho de que una serie de antenas muy separadas entre sí deberían percibir de manera idéntica las señales astronómicas pero no así la RFI. Esta técnica se utiliza esencialmente en la búsqueda de radiaciones astronómicas transitorias que son limitadas en grado considerable por la RFI impulsiva. Dependiendo de la gama existente de señales interferentes, podrían requerirse separaciones entre los telescopios del orden de cientos de kilómetros, lo que hace difícil aplicar dicha estrategia excepto en los pocos casos en que los telescopios similares se encuentren separados por la distancia necesaria y compartan el mismo campo de visión. La cancelación puede no ser perfecta y las fluctuaciones aleatorias residuales pueden degradar los datos. Sin embargo, esta técnica se ha aplicado muy eficazmente en la búsqueda de las radiaciones transitorias en el espacio [Katz, 2003], así como en la búsqueda de impulsos puntuales «gigantes» procedentes de púlsares [Bhat *et al.*, 2005]

## 3 Conclusiones

La tecnología de reducción de la RFI ofrece, al parecer, ventajas significativas en el caso de la radioastronomía, pero aún queda mucho por hacer para desarrollar una tecnología que resulte práctica y aplicable en las operaciones de todos los días. Resulta claro, además, que la tecnología de reducción de la RFI no puede considerarse como una solución aislada para resolver los problemas que plantea y planteará la RFI externa a los radiotelescopios de nuestros días y el futuro. Resulta inevitable que la eficacia de cualquier técnica dependa de:

- la arquitectura del instrumento considerado o de su configuración para realizar una determinada observación;
- el modo de observación (por ejemplo, espectroscopia, formación de imágenes con síntesis de apertura en el continuum, búsqueda de la dispersión de los impulsos procedentes de púlsares);
- la naturaleza de la propia RFI (por ejemplo, persistente o intermitente, espacialmente coherente o con dispersión multitrayecto, etc.).

Estas técnicas, que se traducen en gastos de explotación mayores, pueden reducir únicamente el grado en que la interferencia degrada u oblitera los datos. Por otra parte, habría que señalar que ninguna técnica puede por sí sola resolver todos los problemas que pueden plantearse en la radioastronomía.

## Referencias

- BARNBAUM, C. and 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. and 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. and LAZIO, T. J. W. [2005] Radio frequency interference identification and mitigation using simultaneous dual frequency observations. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S14.
- BOONSTRA, A. J. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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. and 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 al.* [2005] Postcorrelation radio frequency interference excision at low frequencies. *Radio Sci.*, p. 40, RS5S05.
- LESHEM, A., VAN DER VEEN, A.-J. and BOONSTRA, A.-J. [2000] Multichannel interference mitigation techniques in radio astronomy. *Astrophys. Journ.*, Supplement, p. 131, 355.
- LIBERTI, J. C. and RAPPAPORT, T. S. [1999] *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*. Prentice-Hall.
- NIAMSUWAN, N., JOHNSON, J. T. and 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., and 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. and 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. and DANSOU, J. [1997] *Astron. and Astrophys. Supple.*, p. 126, 161.
- ZHENG, Q., ZHENG, Y., WILSON, S. G., FISHER, J. R. and BRADLEY, R. F. [2005] Excision of distance measuring equipment interference from radio astronomy signals. *Astron. Journ.*, p. 129, 2933.

### Bibliografía

- BEAUDET, C. M., *et al.* [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. and 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>).

---