التقريـــر ITU-R RA.2126

تقنيات تخفيف تداخل الترددات الراديوية في تطبيقات علم الفلك الراديوي

(المسألة ITU-R 237/7)

(2007)

1 مقدمة

يرمي هذا التقرير إلى تقديم خلاصة تقنية مقتضبة لأحدث خطوات التقدم المحرزة في تقنيات تخفيف تداخل الترددات الراديوية (RFI) في تطبيقات علم الفلك الراديوي. وعلى وجه التحديد، يتناول هذا التقرير تقنيات تخفيف التداخل الذي هو من صنع الإنسان والذي يصدر عن خارج الجهاز وبالتالي يخرج عن نطاق تحكم مشغّل الجهاز. ولأغراض هذا التقرير، فإن معيار تصنيف إشارة ما على أنها تداخل ترددات راديوية (RFI) هو بكل بساطة أنها إشارة غير مرغوب فيها ولكنها جزء يمكن كشفه من عملية رصد مرغوب فيها تنطوي على احتمال انحطاط أو منع نجاح القيام بعملية الرصد. وقد لا يكون من اليسير الكشف عن بعض التداخل ومع ذلك فإنه لا يزال يسبب الانحطاط في عمليات الرصد. وتخفيف هذا التداخل عملية عسيرة جداً.

والهدف من تقنيات التخفيف هو تمكين عملية الرصد عند سويات من الحساسية معينة في التوصية ITU-R RA.769، بوجود نسبة مئوية من خسارة البيانات ضمن الحدود المعينة في التوصية ITU-R RA.1513. وتتناول هاتان التوصيتان شروط كفاءة الرصد في تطبيقات علم الفلك الراديوي، وتوفران الأساس العددي لحساب شروط تداخل الترددات الراديوية المسموح بها في دراسات التقاسم والتوافق. وطرائق التخفيف، فيما عدا مجرد "بتر" البيانات الملوثة بتداخل الترددات الراديوية، ليست مستخدمة على نطاق واسع في تطبيقات علم الفلك الراديوي، وذلك بالدرجة الأولى لأنها ليست ميسورة التصميم أو الأداء وقد تتطلب برمجيات خاصة معقدة.

وحتى عهد قريب، كانت أساليب الرصد المعيارية وتقنيات معالجة الإشارة المستخدمة في سياق عمليات الرصد توفر قدراً متأصلاً من تخفيف التداخل كافياً لتوفير بيانات فلكية راديوية مفيدة في وجود بعض التداخل.

مثال ذلك أن "توقيف الحواف" في تصوير ذي فتحة تركيبية يميل إلى تفكيك ارتباط تداخل الترددات الراديوية (RFI) التي تستقبلها هوائيات متباعدة جداً، والتي تميل إلى كبت تداخل الترددات الراديوية في نواتج الارتباط المصاحبة [Thompson, 1982]. وفي حالة بعض التلسكوبات الراديوية التركيبية، قد يؤدي مثل هذا التداخل إلى مصدر ناصع طفيلي يبدو في الخرائط عند القطب السماوي، مما يجعل عمليات الرصد عالية الانحناء صعبة أو مستحيلة. ومن المعروف أن النجوم "النابضة" ترسل نبضات ضوضاء عريضة النطاق، بحيث يحتاج الأمر إلى عرض نطاق كبير في جهاز الاستقبال من أجل التوصل إلى نسبة مفيدة من الإشارة إلى الضوضاء. وتخضع الضوضاء التي تشكل النبضات لعملية تشتت تتوقف على التردد وهي في طور انتشارها عبر الأغشية الرقيقة في الوسط ما بين النجوم. وعندما يلاحظ نجم نابض بواسطة تلسكوب راديوي، تحدث إزالة التشتت عمداً باستخدام مجموعة من المعدات والبرمجيات وذلك لاستعادة تمثيل دقيق (غير مشتت) لمعالم النبضة الأصيلة. وتميل هذه العملية إلى تخفيض تداخل الترددات الراديوية، لأن عملية إزالة تشتت إشارة "النابض" تؤدي بدورها إلى تشتيت تداخل الترددات الراديوية. ولا تسفر هذه العمليات سوى عن تخفيف محدود.

وتتعرض البيانات دائماً إلى الانحطاط بوجود التداخل. ويجد علماء الفلك الراديوي على نحو متزايد أن قوة هذا التداخل وكثافته الزمنية/الطيفية كبيرة بحيث "تتشبع" عمليات الرصد بهذا التداخل وتصبح عديمة الفائدة. ولعل أكثر عمليات الرصد تأثراً هي تلك التي تجري بواسطة تلسكوبات راديوية وحيدة المكافئ (استمرار الحيز أو التصوير الطيفي)، وذلك لأن التحسين في الحساسية للإشارات الفلكية الذي يتحقق بفضل زيادة زمن التكامل يؤدي إلى زيادة متناسبة في الحساسية لإشارات تداخل الترددات الراديوية. ولئن كانت بعض أساليب الرصد توفر قدراً من المتانة الأصيلة إزاء سويات منخفضة من التداخل، فإن قوى الإشارة المنخفضة الواردة من الإرسالات الراديوية الكونية تجعل عمليات الفلك الراديوي شديدة التأثر بالتداخل.

ويمتد تأثير هذا التداخل إلى أبعد من مجرد منع أو الحط من بعض عمليات الرصد أو بعض أنواعها. كما أنه يحد من الإنتاجية الإجمالية لمحطة الفلك الراديوي، مما يجعل الرصدات المرغوبة بالغة الصعوبة أو باهظة من حيث متطلبات زمن الرصد وتعقيد عملية المعالجة وتكاليف التشغيل الثابتة. مثال ذلك الحاجة المتزايدة إلى عملية تنقيح البيانات يدوياً بعد عملية الرصد لإزالة هذا التداخل، كما يحدث أحياناً في عملية التصوير ذات الفتحة التركيبية [Lane *et al.*, 2005]. وهذه الطريقة فعالة إلى حد كبير، ولكن من الصعب جعلها أوتوماتية ولذلك فهي تصبح مرهقة إلى حد كبير بازدياد طول عملية الرصد وعرض النطاق المرصود. ويتمثل وجود التداخل في بعض الأحيان في زيادة هائلة من المتطلبات من حيث العمالة ووقت التلسكوب على السواء، مما يفرض قيوداً على علم الفلك الراديوي لا تقل عن التداخل الذي يطمس إلى غير رجعة الإرسال المرصود.

وقد حفزت هذه المسائل الأبحاث لإيجاد تقنيات من أجل تخفيف التداخل والتي يمكن اعتبارها "أوتوماتية" أو "في الوقت الفعلي" من حيث أن أي تقنية تكون أساساً جزءاً لا يتجزأ من الجهاز وتعمل دون تدخل بشري. وهذا هو السياق الذي تقدم فيه التقنيات الموصوفة في القسم التالي.

2 تقنيات التخفيف من تداخل الترددات الراديوية (RFI)

كانت دراسة تقنيات تخفيف التداخل الذي يلوث الخرج التماثلي لمستقبلات التلسكوب الراديوي موضوع اهتمام شديد في السنوات القليلة الماضية، وقد دفعت بها خطوات التقدم التكنولوجي المحرز التي مكنت مناهج معالجة الإشارة لتخفيف التداخل في الوقت الفعلي. وثمة تقديم مفيد في هذا المجال نجده في المحاضر الموجزة لمؤتمرات حديثة العهد تناولت الموضوع، انظر مثلاً [Bell *et al.*, 2000 and Ellingson, 2005]. ولأغراض هذا التقرير، يمكن تصنيف تقنيات تخفيف التداخل بإيجاز على النحو التالي:

1. *البتر*، بمعنى "إزالة" تداخل الترددات الراديوية (RFI). إذ يمكن مثلاً تخفيف هذا التداخل الذي يتألف من نبضات قصيرة بطمس البيانات بوجود النبضة، وهذا عبارة عن بتر *زمني*. ويمكن بديلاً من ذلك تخفيف التداخلات الملحة باستعمال صفيفة تقنيات في شكل حزمة لتوجيه نقاط الخمود في المخطط في الاتجاهات التي يكون فيها التداخل وارداً، وهذا عبارة عن بتر *مكاني*. ومن الخصائص الشائعة لجميع تقنيات البتر بعض الخسارة في بيانات الفلك الراديوي، وربما تشوه البيانات الباقية بسبب "المصطنعات" المدخلة بحكم عملية البتر. وبما أن الطمس أساساً خسارة في زمن الرصد، هنالك زيادة متزامنة في زمن الرصد المطلوب للتوصل إلى الحساسية المطلوبة أو دقة القياس.
2. *الإلغاء*، بمعنى "طرح" التداخل (RFI) من خرج التلسكوب. وعملية الإلغاء تتفوق ضمناً على عملية البتر من حيث إزالة التداخل دون تأثير على عملية الفلك الراديوي ومن حيث أنها توفر مقدرة "إنعام النظر" خالية أساساً من "المصطنعات" المرتبطة بمجرد عملية "إزالة" البيانات ولكن عملية المعاوضة، كما يناقش أدناه، بالنسبة لعملية البتر هي أن الإلغاء محدود عادةً بحكم تقدير التداخل الذي يتعرض له التلسكوب الراديوي.
3. *مضاد الصدفة*، ويعني إجمالاً تمييز التداخل (RFI) باستغلال واقع تباعد الهوائيات بحيث تدرك الإشارات الفلكية بصورة متماثلة، ولكنها تدرك إشارات التداخل بصورة مختلفة. وفي هذه الحالات يسهم التداخل في سوية ضوضاء الخلفية في كل هوائي بدلاً من أن يسهم في الإشارات المترابطة. وهذا ينحدر بمستوى الإشارة المترابطة المتلقاة، مما قد يتطلب زيادة في زمن الرصد بغية التوصل إلى النسبة المطلوبة من الإشارة إلى الضوضاء.

إن طرائق التخفيف التي تستعمل غالباً أو روتينياً في المراصد تعتمد في معظمها على عملية البتر الزمني، أي حذف البيانات التي يعتقد أنها ملوثة بالتداخل (RFI). وهذه الطرائق موصوفة في الفقرة 1.2. وقد أمكن تجريب طريقة البتر المكاني (الفقرة 2.2) وطرائق الحذف (الفقرتان 3.2 و4.2) باستعمال بيانات فلكية حقيقية أو في ظروف محاكاة، ولكنها في معظم الحالات قيد المزيد من التطوير أو تستعمل فقط في ظروف خاصة. ويتطلب مختلف أشكال البتر المكاني عموماً قدراً كبيراً من البرمجيات الخاصة وزيادة في قدرة الحاسوب. وتوفر تقنيات "مضاد الصدفة" (الفقرة 5.2) وسيلة فعالة جداً في التعرف إلى البيانات الملوثة بالتداخل (RFI)، ولكن لا يمكن تصنيفها بمثابة تقنيات تخفيف لأنها لا توفر وسيلة لإزالة التداخل فيما عدا البتر زمنياً.

1.2 البتر الزمني (الطمس)

لعل هذه أقدم وأشهر استراتيجية لتخفيف التداخل (RFI) النابض في الوقت الفعلي. ويبدو أن الاهتمام بعملية الطمس قد برز أولاً استجابة إلى المشكلات التي صودفت في عملية الرصد في النطاق 215 1-400 1 MHz بسبب رادارات الطيران المنصوبة على الأرض. وترسل هذه الرادارات عموماً ترددات ثابتة نابضة أو موجات زقزقة جيبية يتراوح فيها طول النبضة في حدود 2-400 ms، في حدود 1-27 ms بين النبضات المرسلة، وتكون فيها عروض النطاق في حدود 1 MHz. وغالباً ما يُكشف عن هذه النبضات عبر الفص الجانبي للتلسكوبات الراديوية على بعد مئات الكيلومترات. ومع أن دورة تشغيل الإرسال منخفضة نسبياً (أقل من 0,1 % عموماً)، فإن دقة الطمس تصبح صعبة بسبب قصر الفترة بين النبضات. وثمة عامل آخر يجعل طمس نبضات الرادار مسألة صعبة وهو أن الانعكاسات من التضاريس الأرضية ومن الطائرة تولد نسخاً إضافية من النبضة التي تعقب بعد فترة طويلة نبضة "المسير المباشر" (انظر مثلاً التذييل في [Ellingson and Hampson, 2003]). ومن الشائع أن تكون هذه النبضات متعددة المسيرات قوية بما فيه الكفاية لإفساد عملية الرصد الفلكي ولكنها مع ذلك ضعيفة جداً بحيث لا يمكن التعويل على كشفها. ولذلك، فإن فترة طمس تطلقها نبضة مكتشفة يجب أن تكون عموما أطول بعدة مرات من النبضة المكتشفة، وذلك للتأكد من أن جميع النسخ متعددة المسيرات للنبضة المكتشفة قد طمست أيضاً. ويتطلب الأمر عموماً فترات طمس تصل إلى مئات الميكروثانية (أي 10-100 ضعف مدة النبضة) [Ellingson and Hampson, 2003].

وقد جرى اقتراح وتطوير عدد من الأساليب للبتر الزمني في الوقت الفعلي وذلك لدرجات متفاوتة. وكل من فريدمان [1996] وويبر وغيره [1997] وليشيم [2000] يصف طرائق للكشف عن التداخل النبضي ولطمس الخرج تبعاً لذلك. وقد طور المركز الوطني لعلم الفلك والأيونوسفير (NAIC) وسيلة للتخفيف في الوقت الفعلي من نبضات الرادار المحلية القوية في مرصد أريسيبو (بورتوريكو). وتعمل هذه النبيطة بتعقب النمط المعروف للتوقيت بين النبضات لذلك الرادار تحديداً، ومن ثم تعمد إلى طمس خرج المستقبل في نافذة زمنية حوالي الأوقات المتوقعة لوصول النبضة. وهنالك المزيد من الأعمال التي جرت مؤخراً في هذا المجال، بما فيها النتائج التجريبية، وهي موصوفة في [Ellingson and Hampson, 2003; Fisher *et al.*, 2005 and Zheng *et al.*, 2005]، ويتناول آخر مرجعين المشكلة المماثلة للتداخل النبضي من تجهيزات قياس المسافة للطيران (DME).

والقيد الرئيسي على عملية الطمس هو أداء الكشف. وذلك لأنه حالما تكتشف نبضة تداخل (RFI)، فإن بالإمكان إزالتها كلياً بعملية الطمس. ولكن لا مفر من عدم كشف جزء من نبضات ضعيفة ولكنها تنطوي على إمكانية الضرر. ومع ذلك، وفي الإطار الزمني لنبضة واحدة، يكون للإشارات الفلكية روتينياً نسبة إشارة إلى الضوضاء (SNR) << 1؛ وهكذا يجب الكشف عن التداخل (RFI) بصورة موثوقة في هذه السويات للتمكن من إزالته بشكل فعال في الخرج المتكامل. وهذه مسألة صعبة جداً، وعمليات النجاح التي تحققت حديثاً باستعمال عملية الطمس المذكورة أعلاه تعزى إلى توفر معرفة مفصلة مسبقة لموجة التداخل (RFI) يمكن استعمالها لمعاوضة نسبة إشارة إلى ضوضاء (SNR) غير كافية إلى حد ما.

ويبدو أن المزيد من التحسينات في أداء الكشف أمر ممكن باستعمال ملامح موجة التداخل (RFI) التي يمكن استغلالها دون معرفة محددة بشكل الموجة، كما هو الحال مثلاً في حالة السكون الدوري [Britteil and Weber, 2005] التي طبقت على إشارات ساتل HIBLEO2 (Iridium) وتعقب كالمان [Dong *et al.*, 2005] الذي طبق على رادار الطيران. وثمة مشكلة شائكة أخرى وهي كيفية تحديد عتبات الكشف وطول نافذة الطمس بحيث يمكن تحقيق قدر مقبول من الموازنة بين تخفيف قوي للتداخل (RFI) (أي عتبات منخفضة ونوافذ طويلة) من جهة والحد من تدهور الحساسية ومن ظهور "مصطنعات" طمس (أي عتبات عالية ونوافذ قصيرة) من جهة أخرى، وهو ما عكف على دراسته [Niamsuwan, Johnson and Ellingson, 2005]. وعلاوة على ذلك، فإن الوقت "المطموس" زمن رصد مفقود وقد يستدعي زيادة في زمن الرصد لتحقيق الحساسية المطلوبة.

2.2 البتر المكاني (الإخماد)

عندما يتألف جهاز ما من عناصر هوائي متعددة، قد يكون من الممكن التصرف بعنصر الخرج لإحداث إخماد في اتجاه التداخل (RFI) الوارد [Van Veen and Buckley, 1988]. والتقنيات الأساسية معروفة جيداً من حيث تطبيقاتها في الاتصالات العسكرية "لصد التداخل" وكذلك تطبيقات الاتصالات الخلوية التجارية [Liberti and Rappaport, 1999]. ومن حيث المبدأ، فإن نفس التقنيات قابلة للتطبيق في الفلك الراديوي. ولكن هنالك على صعيد الواقع بعض العوامل المعقدة. أولاً يكون التداخل في تطبيقات الفلك الراديوي، خلافاً لما هو الحال في التطبيقات التقليدية التجارية والعسكرية، مسبباً للضرر حتى عندما تكون نسبة التداخل إلى الضوضاء INR << 1. ولذلك، ولكي تكون هذه الأساليب فعالة، يتعين أن تنجح خوارزميات تشكيل الإخماد في الكشف عن حالات التداخل وتحديد موقعها في هذه المستويات. وعلى النقيض من ذلك فإن التداخل في التطبيقات التجارية والعسكرية لا يسبب مشكلة عموماً إلى أن تصل نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR) في حدود 1. ولهذا السبب، فإن غالبية خوارزميات تشكيل الإخماد التي طورت في سياق التطبيقات العسكرية والتجارية تقوم على أساس استراتيجية مرشاح فينر (الذي يشمل ما يسمى خوارزمية "تقليل القدرة" وخوارزمية "التغاير الأدنى")، والتي تكون رديئة الأداء عندما تكون النسبة INR > 1 [Ellingson and Hampson, 2002]. والمعروف أن التقنيات التي تقوم على أساس ترشيح فينر تقتصر على تخفيض النسبة INR بما يتناسب مع هذه النسبة، أي من الميسور كبت التداخل RFI إلى سوية INR-1، ومن الصعب نسبياً تخفيضه أكثر من ذلك. ولذلك، ولكي تكون هذه التقنيات فعالة بالنسبة لتطبيقات الفلك الراديوي، فإن الأمر يحتاج عموماً إلى تدابير إضافية لزيادة النسبة الظاهرة INR المدخلة في خوارزمية التخفيف، وبعض هذه التدابير تناقش أدناه.

تتوقف رصدات الفلك الراديوي على أداء الهوائي (مثال ذلك الكسب وجانبية الحزمة والتوزع في الفصوص الجانبية). وكان يتحقق ذلك تقليدياً بكفالة دقة القياس والحرص على عدم تغير المعلمات بتغير الزمن. وقد تؤدي التغيرات في مخطط الفص الجانبي إلى تضليل خوارزميات المعايرة الذاتية المستعملة لإنتاج صور بمجال عالية الدينامية في قياس التداخل ذي الفتحة التركيبية. ويعتبر الحفاظ على التغير في هذه المعلمات، أو على الأقل معرفتها، لدى تشكيل مخطط حزمة الهوائي والفص الجانبي من أجل تخفيف التداخل تحدياً أمام أنظمة معالجة الإشارة والتحكم في الهوائي المستعملة على نطاق واسع في الوقت الحاضر.

وكبديل لتقنيات فينر التقليدية لتشكيل الإخماد على أساس الترشيح هناك زمرة من التقنيات التي تقوم على أساس "الإسقاط دون الفضائي". والفكرة الرئيسية وراء الإسقاط دون الفضاء هي أن بالإمكان تعرف التداخل من حيث علاقات الارتباط بين عناصر الصفيف والتي يمكن استعمالها بدورها لتحديد معامِلات تشكيل الحزمة التي تفضي إلى مخططات تتخلص من التداخل دون تأثير يذكر على خصائص الفص الرئيسي. ومن الناحية الرياضية، فإن "الإسقاط دون الفضائي" عملية من خطوتين:

- تحديد المتجهات الذاتية لصفيفة التغير المكاني المصاحب (مجموعة الترابطات المتزاوجة بين العناصر) يعقبه
- جعل معامِلات تشكيل متجه الحزمة متعامدة (عملية "الإسقاط") مع المتجه الذاتي المرتبط بالتداخل ("الفضاء الدوني" للتداخل).

ويفترض عادةً أن التداخل يهيمن على القدرة التي يتلقاها الصفيف، بحيث يكون الفضاء الدوني للتداخل دائماً التداخل المصحوب بأكبر قيمة ذاتية للتغير المكاني المصاحب. وهذا يؤدي إلى مشكلات عندما يكون التداخل ضعيفاً نسبياً، لا سيما عندما تكون نسبة التداخل إلى الضوضاء أقل من 1 [Ellingson and Hampson, 2002]. ومع ذلك، فقد ثبت أن الإسقاط دون الفضائي له مزايا لا بأس بها بالنسبة لتطبيقات علم الفلك الراديوي عندما يستخدم على النحو الملائم [Raza *et al.*, 2002]. وهذه التقنيات ليست دواءً شافياً لمشكلة رداءة الكشف وأداء تحديد الموقع، ولكنها تمكّن من تخفيض تشوه مخطط الهوائي وإلى حد ما من معرفة سلوك من الأيسر توقعه وتعديله. بل حتى من الممكن تصحيح التشويه الذي تُدخله هذه الزمرة من التقنيات في التصوير ذي الفتحة التركيبية كعملية لاحقة للمعالجة [Leshem *et al.*, 2000].

وعموماً، ينطبق تشكيل الإخماد خاصة على تخفيف التداخل (RFI) من السواتل، ومن المتوقع أن يكون إلى حد ما أقل فعالية إزاء التداخل من الأرض. وذلك لأن التداخل من الأرض غالباً ما يكون مشتتاً بحكم التضاريس، وغالباً ما يصل إلى التلسكوب الراديوي لا كموجة مستوية وإنما كواجهة موجة متغيرة ديناميا ومعقدة ويكون اتجاه ورودها الظاهر منتشراً عبر مجال زاوي لا بأس به. وتتعرض تقنيات تشكيل الإخماد التقليدية عموماً إلى الانحطاط بوجود انتشار زاوي، وتتفاقم هذه المشكلة بتناقص نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR).

ويلاحظ إجمالاً أن تقنيات البتر المكاني ما زالت غير مختبرة إلى حد كبير وذلك بسبب شدة تعقيدها والتكاليف الهندسية الكبيرة المرتبطة بعملية التطوير والتنفيذ. ولكن التقدم يسير حثيثاً في هذا المجال كما يتبين في الأعمال حديثة العهد [Boonstra and Van der Tol, 2005; Hansen *et al.*, 2005]. وحتى في أفضل الأحوال لن تكون البيانات التي يتم التوصل إليها بنفس مستوى الجودة كما لو كانت الحال في غياب التداخل.

3.2 الإلغاء الزمني

تتضمن أي خوارزمية مثالية للإلغاء الزمني في هوائي وحيد المكافئ الخطوات التالية:

الخطوة 1: كشف شكل موجة التداخل وتقديرها.

الخطوة 2: تركيب صيغة خالية من الضوضاء لموجة التداخل.

الخطوة 3: طرح موجة التداخل المركّبة من البيانات المصابة.

وكما يرد أدناه، من الممكن أيضاً تطبيق عملية مكافئة في مجال التردد. وعلى غرار عملية البتر، هنالك قدر لا بأس به من التجربة في استعمال خوارزميات الإلغاء في التطبيقات التجارية والعسكرية [Haykin, 2001]. وكانت هذه الاستراتيجية موضع البحث أولاً في سياق تطبيقات الفلك الراديوي من قِبَل [Barnbaum and Bradley, 1998]، اللذان استخدما خوارزمية "أدنى متوسط التربيعات" (LMS) – وهو أسلوب يقوم على أساس مبادئ مرشاح فينر. ونتيجة لذلك، فإن هذه التقنية محدودة في تطبيقها في مجال الفلك الراديوي نظراً إلى الحاجة إلى إدخال نسبة تداخل إلى الضوضاء INR > 1 من أجل التوصل إلى فائدة ملموسة. ومن أجل التوصل إلى خرج INR << 1 باستعمال هذه الطريقة، من الضروري عادةً تنفيذ بعض الأساليب لتلقي التداخل (RFI) بحيث تكون نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR) أكبر من تلك التي يرصدها الجهاز الرئيسي. ومن أساليب تحقيق ذلك (وهو في الواقع المنهج الذي ينادي به [Barnbaum and Bradley]) هو استعمال هوائي توجيهي منفصل لتلقي التداخل (RFI). وبما أن كسب الفص الجانبي في معظم المكافئات الكبيرة متاح تقريباً في الفص الجانبي البعيد، فمن الممكن تحسين النسبة INR تقريباً بنسبة الكسب في الهوائي المساعد المستخدم لتلقي التداخل RFI. إذ من الممكن مثلاً لهوائي من نمط "yagi" له كسب بمقدار 20 dB أن يحسن من نسبة INR في خوارزمية الإلغاء بنحو 20 dB والتي تخفض بدورها نسبة INR عند خرج الهوائي بعامل مماثل. وتصف الأعمال اللاحقة [Jeffs *et al.*, 2005] توسيع نطاق نهج "الإشارة المرجعية" هذا من أجل تحسين الأداء إزاء التداخل RFI من السواتل باستعمال إشارات مساعدة متعددة من هوائيات مكافئة يكون كسبها في حدود 30 dB.

وثمة منظور آخر لهذه المشكلة من وجهة نظر أقرب إلى النظرية يقدمها [Ellingson, 2002] حيث يتبين أن السوية العليا للكبت الذي يتم التوصل إليه بواسطة خوارزمية الإلغاء محددة تقريباً بواسطة جداء دخل النسبة INR وقيمة L، حيث L عدد العينات المستعملة لتقدير معلمات الموجة، بافتراض أن عرض نطاق الضوضاء يساوي عرض نطاق Nyquist وهو، خلاف ذلك، متعدّل المقياس بنسبة عرض نطاق الضوضاء إلى عرض نطاق Nyquist. مثال ذلك، يستدعي كبت إشارة تساوي نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR) فيها مقدار −20 dB بمقدار 20 dB إضافية تحليل ما لا يقل عن 10 000 عينة من معدلات Nyquist، ونسبياً أكثر من ذلك إذا كان عرض نطاق الضوضاء أقل من معدل Nyquist. ويتعين بالطبع أن تكون خصائص الإشارة أيضاً في حالة سكون طوال هذا الزمن، وبالتالي سرعان ما يصبح ذلك عاملاً مقيداً.

وهنالك تقييد آخر لتقنيات الإلغاء التي تستخدم الهوائيات المساعدة للحصول على إشارة مرجعية تكون فيها نسبة INR مرتفعة وهو أن هذه التقنيات قد تنحط بسهولة إلى عملية بتر. ففي حالة تلسكوب راديوي وحيد المكافئ مثلاً مشفوع بهوائي مساعد عالي الكسب قد يعمل بمثابة صفيف ثنائي العنصر، مما يؤدي إلى احتمال تركيب خوارزمية الإلغاء في شكل مخطط إخماد في اتجاه التداخل (RFI)، مما يؤدي إلى نفس العواقب الموصوفة أعلاه والمرتبطة بتشكيل الإخماد. ومن الاعتبارات الأخرى كذلك أن مهمة تحديد مواقع وتوجيه الهوائيات المرجعية بالنسبة إلى لكل مصدر من مصادر التداخل (RFI) التي تؤثر على عملية رصد قد تكون باهظة التكلفة.

وثمة منهج إلغاء زمني بديل يتجنب هذه الصعوبات وهو تركيب إشارات مرجعية متميزة مباشرة من خارج التلسكوب ذاته، وذلك باستغلال المعرفة المسبقة بخصائص التشكيل. فقد بيّن [Ellingson *et al.*, 2001] مثلاً تقنية لتخفيف التداخل (RFI) من ساتل GLONASS بإزالة تشكيل الإشارة جزئياً ثم إعادة تشكيل النتيجة للحصول على تقدير خال من الضوضاء للتداخل (RFI). وقد أمكن التوصل إلى تخفيض في نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR) بأكثر من 20 dB على الرغم من تلقي التداخل (RFI) بنسبة تداخل إلى ضوضاء في حدود −20 dB. وفي هذه الحالة، أمكن التغلب على "العجز" في هذه النسبة بالتوصل إلى زيادة فعلية في النسبة المقترنة بعملية إزالة التشكيل. وجدير بالملاحظة أن بالإمكان استعمال نفس الأسلوب لتحسين نسبة التداخل إلى الضوضاء (INR) باستعمال هوائيات مساعدة. ولكن لسوء الحظ لا تمثل تشكيلات الإشارة من النمط المستخدم في الساتل GLONASS (أي طيف تتابع الانتشار المباشر) إلاّ "اللقمة السائغة" فيما يتعلق بالقدرة على تحقيق تحسينات كبيرة في هذه النسبة من خلال إعادة التشكيل الجزئي. إذ إن معظم الإشارات الأخرى لا تبيّن مثل هذا القدر من التحسين عندما تخضع لعملية مماثلة، ولا يتحقق إلا القليل إذا كان التشكيل تماثلياً أو كانت بنيته غير معروفة. فقد حققت أعمال [Roshi, 2002] مثلاً، التي تناولت استراتيجية مماثلة لإشارات تلفزيونية تماثلية، مجرد نحو 12 dB من الكبت على الرغم من الشروع بنسبة كبيرة مبدئياً من التداخل إلى الضوضاء (INR)، كما بيّنت أعمال [Ellingson and Hampson, 2002] كمية كبت في حدود 16 dB إزاء نبضات رادار باستعمال استراتيجية "التقدير والتركيب والطرح".

وخلاصة القول، إذا كان الإلغاء الزمني مرغوباً من حيث المبدأ أكثر من البتر، فإنه ينطوي على محظور هام من حيث أن شكل الموجة لا يقدّر على النحو الملائم وبالتالي لا يمكن إزالته كلياً عندما تُطرح الموجة التركيبية. وإذا كان أداء البتر محدوداً بالدرجة الأولى بحكم كشف التداخل (RFI)، فإن أداء الإلغاء محدود بالدرجة الأولى بحكم القدرة على تقدير موجة هذا التداخل. وتكون فائدة قدرة "الرقابة" التي يوفرها الإلغاء على حساب الأداء المحدود والأقل متانة من تقنيات البتر المقابلة. ومع ذلك، هنالك أعمال مبتكرة ومفيدة تجري في هذا الميدان، فقد بيّن [Kesteven, 2005] مؤخراً مثلاً الاستعمال المفيد للإلغاء التكيّفي في فلك الأجرام النابضة، كما عرض [Poulsen, 2003] برمجية في الوقت الفعلي لتنفيذ الإلغاء التكيفي.

وفي هذه التقنية، تتوقف قدرة إلغاء التداخل على نوعية موجة الإلغاء كتقدير لموجة التداخل التي يتلقاها التلسكوب الراديوي. وأي قصور في عملية التقدير هذه يؤدي إلى قدر ما من انحطاط البيانات.

4.2 الإلغاء بعد الارتباط

وهنالك بديل جذاب لتنفيذ عملية الإلغاء في مجال الزمن وهو يتمثل في عملية الإلغاء "بعد الارتباط". ويشير تعبير "الارتباط" هنا إلى تكاثر خرج هوائيات مستقلة (مثال ذلك استقطابات أو هوائيات منفصلة في صفيف)، متبوعاً بمتوسط طيف النواتج. ومن الشائع للتلسكوبات الراديوية وحيدة المكافئ أن تترابط من أجل الحصول على معلمات Stokes ومن الشائع لصفيفات المكافئات أن تعمد إلى تصالب ارتباط المكافئات كخطوة في تركيب الصور. وعلى غرار ذلك، يمكن تحقيق تصالب ارتباط الهوائيات المرجعية المساعدة مع الهوائيات المرجعية. وطالما تتلقى الهوائيات المساعدة الإشارات الفلكية المرغوبة على أساس مستوى منخفض جداً من نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)، فإن مسألة تصحيح نواتج الارتباط المفسدة جراء التداخل (RFI) مسألة بسيطة باستعمال نواتج الارتباط الهجين (ارتباط خرج التلسكوب بالهوائي المساعد). وقد بادر [Briggs, Bell and Kesteven, 2000] إلى وصف هذه التقنية وتبيّن لاحقاً أنها مكافئة أساساً لعملية إلغاء مجال الزمن ("الارتباط المسبق")، سوى أن نسبة التداخل إلى

الضوضاء (INR) الإضافية يمكن الحصول عليها دون جهد كبير من خلال تكامل نواتج الارتباط. وتنطوي هذه التقنية على فائدة كبرى بالنسبة للجيل الناشئ من صفيفات التلسكوب الراديوي، حيث من الممكن تركيب حزم مساعدة عالية الكسب من نفس الهوائيات، بدلاً من اشتراط عناصر هوائيات "مادية" إضافية. ومن جهة أخرى، فإن عوامل الارتباط بالنسبة للتلسكوبات الراديوية الحديثة عبارة عن أنظمة بالغة التعقيد وباهظة التكلفة، وهذا النهج يستدعي زيادة كبيرة في قدرة عنصر الارتباط من أجل حساب نواتج الارتباط الإضافية المطلوبة وتطبيقها للتوصل إلى إلغاء التداخل (RFI). وعلاوة على ذلك، فإن الطابع الدينامي لمعظم إشارات التداخل (RFI) يحد من كمية التكامل التي يمكن تطبيقها من أجل الاستعمال الفعال لهذه التقنية: قد يستدعي الأمر "أزمنة طرح" في حدود عشرات الميكروثانية لتخفيف الإشارات الساتلية أو الإشارات التي تعاني من خبو تعدد المسيرات. وقد تؤدي الزيادة الضرورية في قدرة عناصر الارتباط المرتبطة بأزمنة الطرح المنخفضة إلى زيادة التكاليف والتعقيد إلى أبعد من الحدود العملية، وسوف تؤدي زيادة درجة معالجة البيانات إلى قدر ما من انحطاط هذه البيانات.

ويندرج في هذه الفئة أيضاً تقنيات التصوير ذات الفتحة التركيبية التي تستفيد من نواتج الارتباط المتاحة أصلاً لأغراض مماثلة، انظر [Cornwell *et al.*, 2004] للاطلاع على مثال حديث العهد.

5.2 مضاد الصدفة

وأخيراً، نتناول إمكانية استعمال تقنيات مضادة للصدفة لتخفيف التداخل (RFI). وكما ذكر أعلاه، فإن هذه الاستراتيجية لا تتناول تخفيف التداخل مباشرة، وإنما تتناول مشكلة "الكشف" الموصوفة أعلاه. وتتحيز الاستراتيجيات المضادة للصدفة ضد التداخل RFI بالاستناد إلى أن الهوائيات المتباعدة جداً تتلقى الإشارات الفلكية بصورة متماثلة، ولكنها تتلقى إشارات التداخل بصورة متغايرة. ويكون الاستعمال الأولي لهذه التقنية في عمليات البحث عن الظواهر الفلكية العابرة، والتي يقيدها بشدة التداخل (RFI) النبضي. وتبعاً لمدى الإشارات المتداخلة، قد يحتاج الأمر إلى مسافات فاصلة في حدود مئات الكيلومترات؛ مما يجعل هذه الاستراتيجية عسيرة الاستعمال بالطبع سوى في الحالات النادرة حيث تتباعد التلسكوبات المتماثلة بمقدار المسافة اللازمة وتتشارك نفس مجال الرؤية. ولا يمكن أن يكون الإلغاء كاملاً، ولا بد من أن تؤدي التقلبات العشوائية المتبقية إلى انحطاط البيانات. ومهما يكن من أمر، فقد طبقت هذه التقنية بنجاح في عمليات البحث عن الظواهر العابرة في كل السماء [Katz, 2003] وفي عمليات بحث عن نبضات "عملاقة" وحيدة المرة من أجرام نابضة [Bhat *et al.*, 2005].

3 استنتاجات

يبدو أن تقنيات تخفيف تداخل الترددات الراديوية (RFI) تنطوي على فوائد هامة بالنسبة لعلم الفلك الراديوي، ولكن ما زال الأمر يتطلب الكثير من أجل تطوير تقنيات عملية وقابلة للتطبيق في عمليات روتينية. ويبدو من الواضح أيضاً أن تقنيات تخفيف التداخل RFI لا يمكن اعتبارها حلاً مستقلاً بذاته لمشكلات التداخل RFI من الخارج التي تعاني منها التلسكوبات الراديوية اليوم وفي المستقبل. وتتوقف فعالية أي تقنية حتماً على ما يلي:

- معمارية الجهاز أو تشكيله من أجل عملية رصد معينة؛
- أسلوب الرصد (مثال ذلك التحليل الطيفي والتصوير ذو الفتحة التركيبية المستمرة والبحث عن التشتت النابض)؛
- طابع تداخل الترددات الراديوية (RFI) بالذات (أي مستمر أم متقطع، متماسك مكانياً أم مشتت بحكم تعدد المسيرات، وغير ذلك).

وعملية التخفيف لا تعدو كونها تخفض درجة انحطاط البيانات أو تبديدها بسبب التداخل، وزيادة التكاليف التشغيلية. وعلاوة على ذلك، جدير بالذكر أن ليس هنالك من تقنية وحيدة يمكنها أن تعالج جميع السيناريوهات الممكنة في مجال علم الفلك الراديوي.

المراجع

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.

بيبليوغرافيا

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).

_____