

ОТЧЕТ МСЭ-R RA.2126

Методы ослабления радиочастотных помех в радиоастрономии

(Вопрос МСЭ-R 237/7)

(2007)

1 Введение

Настоящий Отчет предназначен для предоставления в сжатой форме краткой технической информации о текущем уровне развития методов ослабления радиочастотных помех (РЧП) в радиоастрономии. В частности, в настоящем Отчете рассматриваются методы ослабления помех искусственного происхождения, возникающих вне прибора и потому не контролируемых его оператором. В целях настоящего Отчета критерием классификации сигнала как РЧП просто является то, что он представляет собой нежелательную, но обнаруживаемую часть полезного сигнала наблюдения, которая может ухудшить наблюдение или препятствовать его успешному проведению. Некоторые помехи нельзя просто обнаружить, однако они по-прежнему ухудшают наблюдение. Их ослабление представляет собой гораздо более сложную задачу.

Цель методов ослабления состоит в том, чтобы обеспечить проведение наблюдения на уровнях чувствительности, указанных в Рекомендации МСЭ-R RA.769, при этом процент потери данных ограничивается рамками, указанными в Рекомендации МСЭ-R RA.1513. В этих рекомендациях приводятся условия для эффективного проведения наблюдений в радиоастрономии и предоставляется числовая основа для расчета приемлемых условий РЧП при исследованиях совместного использования частот и совместимости. Методы ослабления, кроме простого удаления данных, загрязненных РЧП, широко не используются в радиоастрономии, главным образом, поскольку их сложно разработать или реализовать и так как для них может потребоваться создание объемного специального программного обеспечения.

До последнего времени стандартные режимы наблюдения и методы обработки сигнала, используемые в ходе осуществления наблюдений, обеспечивали свойственную им степень ослабления помех, которая оказывалась достаточной для предоставления пригодных астрономических данных в присутствии некоторых помех.

Например, "блокирование граничной зоны" при формировании изображения с использованием синтеза апертуры имеет тенденцию к декорреляции РЧП, принятых на значительно разнесенные антенны, что способствует подавлению РЧП в соответствующих продуктах корреляции [Thompson, 1982]. В случае ряда радиотелескопов с синтезом апертуры такие помехи могут приводить к паразитному яркому источнику на картах в области небесного полюса, делая наблюдения при большом склонении сложными или невозможными. Пульсары создают импульсы широкополосного шума, поэтому для получения пригодного отношения сигнал/шум требуется значительная ширина полосы приемника. Сигнал шума, образующий импульсы, подвергается частотно-зависимой дисперсии, поскольку он распространяется через разжиженную плазму в межзвездной среде. При наблюдении пульсаров при помощи радиотелескопа импульс специально подвергается процессу, обратному дисперсии, с использованием сочетания аппаратного и программного обеспечения для восстановления точного (не подвергнутого дисперсии) представления истинного профиля пульсара. Этот процесс содействует снижению РЧП, поскольку в результате процесса, обратного дисперсии сигнала пульсара, происходит последовательное рассеивание РЧП. Такие процессы обеспечивают только ограниченное ослабление помех.

Данные всегда теряются в присутствии помех. Все в большей степени астрономы обнаруживают, что напряженность и временная/спектральная плотность РЧП таковы, что наблюдения "насыщаются" РЧП и становятся бесполезными. Возможно, наиболее уязвимыми наблюдениями являются те, которые осуществлены с использованием однозеркальных радиотелескопов (непрерывные наблюдения или спектроскопия), поскольку повышение чувствительности к астрономическим сигналам, реализуемое за счет времени интеграции, приводит к пропорциональному повышению

чувствительности к сигналам РЧП. В то время как некоторые режимы наблюдения обеспечивают свойственную им устойчивость к низким уровням РЧП, низкие уровни напряженности принимаемого сигнала космических радиоизлучений делают радиоастрономию весьма уязвимой по отношению к помехам.

Воздействие РЧП выходит за рамки простого препятствия проведению определенных наблюдений или типов наблюдения или их ухудшению. Оно ограничивает также эффективность радиоастрономической станции, делая желаемые наблюдения чрезмерно сложными или дорогостоящими в плане требований к времени наблюдения, сложности обработки и эксплуатационных накладных затрат. Примером является возрастающая необходимость ручного редактирования данных после проведения наблюдения для изъятия РЧП, что иногда практикуется при формировании изображения с использованием апертурного синтеза [Lane *et al.*, 2005]. Будучи достаточно эффективным, этот способ сложно автоматизировать, и поэтому он становится чрезвычайно трудоемким по мере увеличения продолжительности наблюдений и расширения наблюдаемой полосы частот. Присутствие РЧП иногда обуславливает весьма завышенные требования к трудовым ресурсам и времени работы телескопа, использование которого ограничено научными целями в условиях РЧП, которые навсегда маскируют наблюдаемое излучение.

Эти проблемы стимулировали проведение исследования методов ослабления РЧП, которые могут считаться "автоматическими" или "реальновременными" в том смысле, что любой данный метод номинально является неотъемлемой частью прибора и работает без вмешательства человека. Таковы рамки, в которых в разделах ниже представлены описанные методы.

2 Методы ослабления РЧП

В последние годы исследование методов ослабления РЧП, загрязняющих аналоговый выход приемников радиотелескопов, вызывало повышенный интерес, подогреваемый технологическими достижениями, которые обеспечивают возможность использования подходов реальновременной обработки сигналов для ослабления РЧП. Полезное введение в эту область представляет краткая информация о последних конференциях, на которых рассматривался данный вопрос; см., например, [Bell *et al.*, 2000 and Ellingson, 2005]. В целях настоящего Отчета методы ослабления могут быть в сжатом виде классифицированы следующим образом:

- 1 *Удаление*, в смысле "вырезание" РЧП. Например, РЧП, состоящие из коротких импульсов, могут быть ослаблены путем бланкирования данных в присутствии импульса; это *временное* удаление. В ином случае, непрерывные РЧП могли бы быть ослаблены с помощью методов формирования лучей антенной решетки для ориентации нулей диаграммы направленности в направлениях откуда приходят РЧП; это *пространственное* удаление. Общим свойством всех методов удаления является некоторая потеря астрономических данных, возможные искажения оставшихся данных, обусловленные помехами, вносимыми процессом удаления. Поскольку подавление является, главным образом, потерянным временем наблюдения, имеет место сопутствующее возрастание времени наблюдения, требуемое для достижения необходимой чувствительности или точности измерений.
- 2 *Подавление*, в смысле "вычитание" РЧП из сигнала на выходе телескопа. Подавление, возможно, лучше удаления в том смысле, что устранение РЧП осуществляется без оказания воздействия на радиоастрономические данные при номинальном обеспечении возможности "просмотра", условно свободного от помех, связанных с простым "вырезанием" данных. Однако, как рассмотрено ниже, компромисс в отношении удаления обычно состоит в том, что подавление ограничено оценкой помех, принятых радиотелескопом.
- 3 *Антисовпадение*, селекция РЧП в широком смысле на основании использования того факта, что разнесенные на большое расстояние антенны должны одинаково принимать астрономические сигналы и по-разному – сигналы РЧП. В таких случаях РЧП вносят вклад в уровень фонового шума в каждой антенне, а не в коррелированные сигналы. Это ухудшает принимаемый коррелированный сигнал, что может потребовать увеличения времени наблюдения для получения необходимого отношения сигнал/шум.

Методы ослабления помех, которые часто или обычно используются в обсерваториях, в основном, основаны на временном удалении, т. е. исключении данных, которые считаются загрязненными РЧП. Эти методы описаны в п. 2.1. Метод пространственного удаления (п. 2.2) и методы, связанные с подавлением (п. 2.3 и п. 2.4), были продемонстрированы с применением реальных или моделированных данных, однако в большинстве случаев они находятся в дальнейшей разработке или используются в особых обстоятельствах. Для различных форм пространственного удаления обычно требуется объемное специальное программное обеспечение и повышенная мощность компьютера. Методы антисовпадения (п. 2.5) предоставляют собой очень эффективные средства выделения данных, загрязненных РЧП, однако не могут быть строго классифицированы как методы ослабления помех, поскольку не обеспечивают средств устранения помех, кроме временного удаления.

2.1 Временное удаление (бланкирование)

Это, возможно, самая старая и наиболее известная стратегия ослабления импульсных РЧП в реальном времени. Представляется, что интерес к бланкированию впервые возник в ответ на проблемы, которые были вызваны наземными авиационными радарными наблюдениями в полосе 1215–1400 МГц. Эти радары обычно передают импульсные сигналы или ЛЧМ-сигналы с длительностями импульсов 2–400 мс, интервалами между импульсами 1–27 мс и полосами шириной порядка 1 МГц. Эти импульсы часто обнаруживаются за сотни километров в боковых лепестках радиотелескопов. Хотя коэффициент заполнения при передаче является относительно низким (обычно ниже 0,1%), точное бланкирование усложняется короткими периодами между импульсами. Другой фактор, который делает сложным бланкирование импульсов радаров, состоит в том, что отражения от рельефа местности и воздушного судна создают дополнительные копии импульсов, которые поступают со значительной задержкой относительно импульса "прямого луча" (см., например, дополнение к [Ellingson and Hampson, 2003]). Общим для этих многолучевых импульсов является то, что они вполне достаточны для искажения астрономического наблюдения, а еще они слишком слабы для надежного обнаружения. Таким образом, интервал бланкирования, вызванный обнаружением импульса, обычно должен быть в несколько раз длиннее обнаруженного импульса, с тем чтобы обеспечить бланкирование всех его многолучевых копий. Обычно необходимы интервалы бланкирования, имеющие длительности до сотен микросекунд (т. е. в 10–100 раз больше, чем длительность импульса) [Ellingson and Hampson, 2003].

Был предложен ряд методов временного удаления в реальном времени, которые были разработаны в различной степени. В [Friedman [1996], Weber *et al.* [1997] и Leshem *et al.* [2000]], соответственно, описываются методы обнаружения импульсных помех и бланкирования выходного сигнала. В Национальном астрономическом и ионосферном центре (NAIC) было разработано устройство для ослабления в реальном времени сильных импульсов местного радара, используемое в обсерватории Аресибо (Пуэрто-Рико). Работа этого устройства основана на отслеживании известной схемы синхронизации импульсов для данного конкретного радара и последующем бланкировании выходного сигнала приемника на временном интервале, приблизительно охватывающем моменты прихода ожидаемых импульсов. Результаты более новой работы, включая экспериментальные данные, описаны в [Ellingson and Hampson, 2003; Fisher *et al.*, 2005 and Zheng *et al.*, 2005], при этом в двух последних ссылках рассматривается аналогичная проблема импульсных помех со стороны авиационных дальномеров (DME).

Главным ограничением бланкирования является качество обнаружения, поскольку после того, как импульс РЧП обнаружен, он может быть полностью удален путем бланкирования. Однако неизбежно некоторая часть слабого, но потенциально искажающего импульса, не будет обнаружена. Тем не менее, во временном масштабе одного импульса астрономические сигналы обычно имеют отношение сигнал/шум (ОСШ) $\ll 1$; таким образом, РЧП должны быть надежно обнаружены на этих уровнях для их эффективного подавления в общем выходном сигнале. Это достаточно сложно осуществить, и успех последних работ в области бланкирования, упомянутых выше, обусловлен наличием детальной предварительной информации о сигнале РЧП, которая затем может использоваться для некоторой компенсации недостаточного ОСШ.

Дополнительные улучшения качества обнаружения становятся возможными при использовании параметров сигнала РЧП, например циклической стационарности, которые могут применяться при отсутствии конкретной информации о сигнале ([Britteil and Weber, 2005] применили этот параметр

для сигналов спутника HIBLEO2 (Iridium) и отслеживания Кальмана, а [Dong *et al.*, 2005] применили его для авиационных радаров). Другая насущная проблема состоит в том, каким образом установить пороги обнаружения и длительность временного интервала бланкирования, так чтобы достичь приемлемого компромисса между устойчивым ослаблением РЧП (рекомендуются низкие пороги и длинные интервалы), ограничением ухудшения чувствительности и появления связанных с бланкированием искажений (рекомендуются высокие пороги и короткие интервалы), который был исследован в [Niamsuwan, Johnson and Ellingson, 2005]. Кроме того, "бланкированное" время является потерянным временем наблюдения, и для получения требуемой чувствительности может потребоваться его увеличение.

2.2 Пространственное удаление (формирование нулей)

Если прибор состоит из множества антенных элементов, то можно управлять выходным сигналом элемента для создания нуля в направлении прихода РЧП [Van Veen and Buckley, 1988]. Базовый метод хорошо известен по его применениям в военной "антипомеховой" связи, а также применениям в коммерческой сотовой связи [Liberti and Rappaport, 1999]. В принципе, аналогичные методы применимы в радиоастрономии. Однако на практике существуют факторы, усложняющие их использование. Во-первых, в отличие от традиционных коммерческих или военных применений, в радиоастрономии РЧИ вносят искажения, даже если отношение помех к шуму (ОПШ) $\ll 1$. Таким образом, эффективные алгоритмы формирования нулей должны с успехом обнаруживать и определять местонахождение РЧП при этих уровнях. Напротив, РЧП в коммерческих и военных применениях обычно не создают проблем, до тех пор пока значение ОПШ составляет порядка 1. По этой причине большинство алгоритмов формирования нулей, разработанных в рамках военных и коммерческих применений, основаны на стратегии фильтра Винера (который включает так называемые алгоритмы "минимизации мощности" и "минимального изменения"), который неудовлетворительно работает при ОПШ < 1 [Ellingson and Hampson, 2002]. Известно, что фильтры, основанные на фильтрации Винера, ограничены снижением ОПШ пропорционально ОПШ; т. е. легко подавить РЧП до уровня ОПШ-1, и относительно сложно уменьшить их еще больше. Таким образом, для того чтобы сделать такие методы эффективными для радиоастрономии, обычно требуются дополнительные меры для увеличения наблюдаемого ОПШ, предоставляемого алгоритму ослабления помех; несколько алгоритмов рассматривается ниже.

Радиоастрономические наблюдения зависят от качественных показателей антенны (например, коэффициента усиления, профиля луча, распределения боковых лепестков). Традиционно, их получали путем проведения точных измерений, уделяя внимание обеспечению неизменности параметров во времени. Изменения диаграммы направленности боковых лепестков могут сбить с толку алгоритмы с автокалибровкой, используемые в интерферометрии с апертурным синтезом для создания изображений с большим динамическим диапазоном. Задача широко используемых в настоящее время систем обработки сигналов и управления антеннами состоит в том, чтобы поддерживать изменение этих параметров или, по крайней мере, знать о нем, поскольку луч антенны и диаграмма направленности боковых лепестков модулируются с целью ослабления помех.

Альтернативой традиционным методам формирования нулей на базе фильтрации Винера является класс методов, основанных на "субпространственных проекциях". Основная идея субпространственной проекции состоит в том, что помехи могут быть определены исходя из корреляций между элементами решетки, которая, свою очередь, может быть использована для определения коэффициентов формирования лучей, в результате чего получают диаграммы направленности, которые устраняют помехи при небольшом влиянии на характеристики главного лепестка или его отсутствии. Выражаясь математическим языком, субпространственная проекция является двухступенчатым процессом:

- определения собственных векторов матрицы пространственной ковариации (набора парных корреляций между элементами), после которого следует
- обеспечение ортогональности вектора коэффициентов формирования луча (операция "проекции") собственному вектору, связанному с помехами ("подпространство" помех).

Обычно предполагается, что мощность помех доминирует в мощности сигнала, принятого решеткой, так что подпространство помех всегда является подпространством, связанным с самым большим

собственным вектором пространственной ковариации. Это приводит к проблемам в случае, когда помехи являются относительно слабыми, особенно если отношение помехи/шум меньше 1 [Ellingson and Hampson, 2002]. Тем не менее, субпространственная проекция при ее правильном использовании продемонстрировала наличие значительных преимуществ для радиоастрономии [Raza *et al.*, 2002]. Такие методы не являются панацеей для решения проблемы неудовлетворительного качества обнаружения и определения местонахождения помех, однако обеспечивает уменьшение искажения диаграммы направленности антенны и, в некоторой степени, поведение, которое проще предвидеть или изменить. Возможна даже коррекция искажения, вносимого этим классом методов, при формировании изображений с апертурным синтезом, реализуемая как операция последующей обработки [Leshem *et al.*, 2000].

Вообще, формирование нулей наиболее применимо для ослабления РЧП со стороны спутников, и можно ожидать, что оно отчасти менее эффективно для борьбы с наземными РЧП, поскольку они часто рассеиваются рельефом местности и часто приходят на радиотелескоп не в виде плоской волны, а как динамически изменяющийся и сложный волновой фронт с наблюдаемым направлением прихода, распространенном в значительном диапазоне углов. Традиционные методы формирования нулей обычно хуже работают при наличии углового разброса, и проблема обостряется при уменьшении ОПШ.

В общем, методы пространственного удаления остаются в значительной степени неиспытанными из-за высокой сложности и больших технических затрат, связанных с разработкой и внедрением. Однако, как показано в новых работах [Boonstra and Van der Tol, 2005; Hansen *et al.*, 2005], продолжается достижение постепенного прогресса. Но даже в самых благоприятных ситуациях качество полученных данных будет отличаться от качества, которое имело бы место при отсутствии помех.

2.3 Временное подавление

Оптимальный алгоритм временного подавления для однозеркального телескопа включает следующие шаги:

Шаг 1: Обнаружение и оценка сигнала РЧП.

Шаг 2: Синтез бесшумового варианта сигнала РЧП.

Шаг 3: Вычитание синтезированного сигнала РЧП из пораженных данных.

Как рассмотрено ниже, эквивалентный процесс может быть также реализован в частотной области. Как и в случае удаления, существует большой опыт использования алгоритмов подавления в коммерческих и военных применениях [Haykin, 2001]. Впервые в рамках радиоастрономии данная стратегия была исследована в [Barnbaum and Bradley, 1998], где был использован распространенный алгоритм "минимальной среднеквадратичной ошибки" (LMS) – метод, который основан на принципах фильтра Винера. В результате, применение данной технологии в радиоастрономии ограничено из-за необходимости обеспечить ОПШ > 1 по входу для достижения существенных преимуществ. Для получения ОПШ $\ll 1$ по выходу с использованием данного метода обычно необходимо внедрять некоторые средства для приема РЧП с ОПШ большим, чем ОПШ, воспринимаемое главным прибором. Один из путей достижения этого (и фактически подход, отстаиваемый в [Barnbaum and Bradley]) состоит в использовании отдельной направленной антенны для приема РЧП. Поскольку у большинства больших параболических антенн коэффициент усиления боковых лепестков является приблизительно изотропным в области дальних боковых лепестков, ОПШ может быть улучшено примерно пропорционально усилению вспомогательной антенны, используемой для приема РЧП. Таким образом, например, антенна Яги с усилением 20 дБ могла бы улучшить ОПШ, используемое алгоритмом подавления, примерно на 20 дБ, что могло бы уменьшить ОПШ на выходе телескопа на коэффициент сравнимой величины. В последующей работе [Jeffs *et al.*, 2005] описывается расширение этого подхода "эталонного сигнала" для достижения лучшего качества подавления РЧП со стороны спутников путем использования множества вспомогательных сигналов параболических антенн с коэффициентами усиления порядка 30 дБ.

Другое перспективное направление решения этой проблемы с более теоретической точки зрения представлено в [Ellingson, 2002], где показано, что устранение помех, достигаемое алгоритмом

подавления, приближенно ограничено сверху произведением ОПШ по входу и L (где L – число выборок, используемых для оценки параметров сигнала) в предположении, что ширина полосы шума равна ширине полосы Найквиста, а в противоположном случае масштабируется с учетом отношения ширины полосы к ширине полосы Найквиста. Таким образом, например, для подавления сигнала с ОПШ, равным -20 дБ, на дополнительные 20 дБ требуется проанализировать, по крайней мере, $10\,000$ выборок со скоростью Найквиста и пропорционально больше, если ширина полосы шума меньше скорости Найквиста. Конечно, характеристики сигнала должны быть также стационарными в пределах данного периода времени, следовательно, это легко может стать ограничивающим фактором.

Другое ограничение методов подавления, в которых используются вспомогательные антенны для получения эталонного сигнала с большим ОПШ, состоит в том, что уровень таких методов могут легко снижаться до уровня метода удаления. Например, однозеркальный телескоп в сочетании со вспомогательной антенной, имеющий большой коэффициент усиления, может вести себя как двухэлементная решетка, в результате чего алгоритм подавления может синтезировать ноль диаграммы направленности в направлении РЧП с аналогичными последствиями, которые описаны выше в связи с формированием нулей. Еще одно соображение касается того, что определение местонахождения всех источников РЧП, затрагивающих наблюдение, и ориентация на них эталонных антенн являются потенциально трудной задачей.

В случае альтернативного подхода к временному подавлению, при котором эти трудности исключаются, отдельные эталонные сигналы синтезируются непосредственно из выходного сигнала самого телескопа путем использования априорных знаний о характеристиках модуляции. Например, в [Ellingson *et al.*, 2001] представлен метод ослабления РЧП со стороны спутника ГЛОНАСС путем частичной демодуляции сигнала с последующей повторной модуляцией полученного сигнала для получения свободной от шума оценки РЧП. Авторы показали возможность снижения ОПШ более чем на 20 дБ, несмотря на то что РЧП были приняты при ОПШ порядка -20 дБ. В этом случае "дефицит" ОПШ преодолевался за счет эффективного увеличения ОПШ, связанного с процессом демодуляции. Следует отметить, что аналогичный метод мог бы применяться для дополнительного улучшения ОПШ путем использования вспомогательных антенн. К сожалению, только тип модуляции сигналов, применяемый в системе ГЛОНАСС (т. е. непосредственное расширение спектра псевдослучайной последовательностью), представляет собой простое решение в отношении предоставляемой им возможности получения существенных улучшений ОПШ путем частичной демодуляции. При наличии большинства других сигналов такие значительные улучшения при аналогичной обработке не обеспечиваются, а в случае аналоговой модуляции или модуляции с неизвестной структурой результаты становятся еще скромнее. Например, в работе [Roshi, 2002] по аналогичной стратегии для сигналов аналогового телевидения достигается подавление лишь примерно на 12 дБ, несмотря на начальное использование большого ОПШ, а в работе [Ellingson and Hampson, 2002] продемонстрировано подавление импульсов радаров на величину порядка 16 дБ с использованием стратегии оценки-синтеза-вычитания.

Таким образом, временное подавление, будучи более желательным, чем удаление, связано со значительным риском неправильной оценки сигнала и потому его неполного устранения при вычитании синтезированного сигнала. Тогда как качество метода удаления ограничено, главным образом, его возможностью обнаруживать РЧП, качество метода подавления ограничено, в основном, его возможностью оценивать сигнал РЧП. За преимущество возможности "просмотра", обеспечиваемой методом подавления, платят возможно ограниченным качеством и меньшей устойчивостью, сравнимой с методами удаления. Инновационная и полезная работа еще продолжается в этой области: например, в [Kesteven, 2005] недавно показана эффективность использования адаптивного подавления в астрономии пульсаров, а в [Poulsen, 2003] продемонстрировано работающее в режиме реального времени аппаратное обеспечение для реализации адаптивного подавления.

В этом методе возможность подавления помех определяется качеством сигнала подавления как оценки сигнала помех, принимаемого радиотелескопом. Любой недостаток в этом процессе оценки влечет за собой некоторую потерю данных.

2.4 Подавление после корреляции

Изыщной альтернативой реализации подавления во временной области является внедрение подавления "после корреляции". "Корреляцией" в этом смысле называется произведение выходных сигналов независимых антенн (например, в случае поляризации или отдельных антенн в решетке), после которого осуществляется усреднение спектра продуктов. Общим свойством однозеркальных радиотелескопов является осуществление корреляции для получения параметров Стокса, а для решетки параболических антенн – реализация кросс-корреляции между параболами, представляющей собой шаг синтеза изображений. Аналогичным образом, вспомогательные эталонные антенны могут быть кросс-коррелированы с главными антеннами. До тех пор пока вспомогательные антенны принимают полезные астрономические сигналы с очень низким ОСШ, исправление продуктов корреляции, загрязненных РЧП, с использованием гибридных продуктов корреляции (выходной сигнал телескопа, коррелированный со вспомогательной антенной) является простой задачей. Этот метод впервые был описан в [Briggs, Bell and Kesteven, 2000], а позднее было показано, что по существу он эквивалентен подавлению во временной области ("предварительная корреляция") за исключением того, что дополнительное ОПШ достигается без особых усилий благодаря объединению продуктов корреляции. Этот метод является многообещающим для появляющегося поколения радиотелескопных решеток, в которых должна быть обеспечена возможность синтеза вспомогательных лучей с высоким усилением при использовании тех же антенн без необходимости в дополнительных "физических" элементах антенн. С другой стороны, корреляционные устройства для современных радиотелескопов являются чрезвычайно сложными и дорогими системами, а данный метод требует существенного увеличения мощности корреляционного устройства для вычисления необходимых дополнительных продуктов корреляции и их применения в целях подавления РЧП. Кроме того, динамический характер большинства сигналов РЧП ограничивает степень объединения, которое может применяться с целью эффективного использования этого метода: для ослабления сигналов спутников или сигналов, подвергаемых многолучевым замираниям, может потребоваться "время сброса" порядка десятков микросекунд. Необходимый рост мощности корреляционных устройств в сочетании с уменьшенным временем сброса может увеличить стоимость и сложность сверх практических ограничений, а повышенная степень обработки данных приведет к некоторой потере данных.

К этой же категории относятся методы формирования изображения с синтезом апертуры, в которых применяются продукты корреляции, уже имеющиеся для аналогичных целей; новый пример см. в [Cornwell *et al.*, 2004].

2.5 Антисовпадение

Наконец, рассмотрим возможность использования методов антисовпадения для ослабления РЧП. Как было упомянуто выше, данная стратегия не связана с непосредственным ослаблением РЧП, а скорее решает проблему "обнаружения", описанную выше. В стратегиях антисовпадения осуществляется селекция РЧП на основании использования того факта, что разнесенные на большое расстояние антенны должны принимать астрономические сигналы одинаково, а сигналы РЧП по-разному. Основным использованием данного метода является поиск астрономических переходных процессов, которые сильно ограничены импульсными РЧП. В зависимости от диапазона мешающих сигналов могут потребоваться разнесения порядка сотен километров; это, конечно, делает данную стратегию неудобной для использования за исключением редких случаев, когда аналогичные телескопы разнесены на необходимое расстояние и совместно используют то же поле обзора. Подавление не может быть совершенным, и остаточные случайные флуктуации повлекут потерю данных. Однако этот метод с успехом применялся для поисков переходных процессов на всем небе [Katz, 2003] и поисков одноразовых "гигантских" импульсов пульсаров [Bhat *et al.*, 2005].

3 Выводы

Технология ослабления РЧП появляется для обеспечения существенных преимуществ в радиоастрономии, однако остается большое поле деятельности для создания практической технологии, применимой в повседневной работе. Представляется также понятным, что технология ослабления РЧП не может рассматриваться как обособленное решение проблем внешних РЧП, с

которыми связано нынешнее и будущее использование радиотелескопов. Неизбежно эффективность любого метода зависит от:

- архитектуры прибора и его конфигурации для конкретного наблюдения;
- режима наблюдения (например, спектроскопия, непрерывное наблюдение путем формирования изображения с апертурным синтезом, поиск рассеяния радиоизлучения пульсаров);
- характер самих РЧП (например, непрерывные или прерывистые, пространственно когерентные или рассеянные многолучевостью и др.).

Ослабление помех просто уменьшает степень потерь или уничтожения данных из-за РЧП и увеличивает эксплуатационные затраты. Кроме того, следует отметить, что не существует единого метода, в котором могут рассматриваться все возможные сценарии, касающиеся радиоастрономии.

Справочные материалы

- 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.

Библиография

- 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>).
-