

УДК 520.272.5

О ПОЛЕ ЗРЕНИЯ И ПРОНИЦАЮЩЕЙ СИЛЕ РАТАН-600

© 2008 Е. К. Майорова¹, Ю. Н. Парийский¹, Н. Н. Бурсов¹

¹ Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 20 марта 2008 г.; принята в печать 14 апреля 2008 г.

Уточненные данные об инструментальном дифракционном рассеянии РАТАН-600 позволили существенно расширить поле зрения телескопа на высоких углах места. Рассмотрен метод, с помощью которого можно восстанавливать параметры источников, проходящих от оси диаграммы направленности на расстояниях, в десятки раз превышающих ее полуширину по уровню половинной мощности. Знание широкого рассеяния РАТАН-600 дало возможность на порядок снизить шум фоновых радиосточников в Зените и на столько же повысить проникающую силу радиотелескопа, не прибегая к двумерному картографированию. Предложены и опробованы методы чистки одномерных записей RZF-обзора с использованием модельных сканов, полученных по данным NVSS-обзора, а также с помощью МНАТ-фильтрации. Последняя оказалась особенно эффективна для подавления шума неба и выделения источников в центральном сечении обзора. Оценена предельная проникающая сила РАТАН-600 с учетом новых возможностей.

Key words: *методы астрономических наблюдений, приборы и инструменты*

1. ВВЕДЕНИЕ

РАТАН-600 — основной радиотелескоп России, работающий в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. Радиотелескоп является многоцелевым и многопрограммным, более 50% наблюдательного времени на нем выделяется сторонним наблюдателям.

Увеличение чувствительности приемно-измерительного комплекса за последние 10 лет и востребованность программ, в которых реализуются предельные параметры радиотелескопа, таких как исследование фоновых излучений неба и выделение слабых радиосточников, потребовали поиска эффективных методов подавления мешающих шумов и более глубокого учета инструментальных эффектов. Значительный прогресс в уточнении диаграммы направленности (ДН) РАТАН-600 вплоть до уровня (-20) дБ позволил реализовать несколько простых путей продвижения в этом направлении.

В данной работе мы покажем, как уточненная теория дифракционного рассеяния инструмента, проверенная экспериментально на больших расстояниях от электрической оси радиотелескопа, позволяет получать информацию об объектах, проходящих через ДН на расстояниях, превышающих полуширину ее главного лепестка более чем на порядок.

Кроме того, мы остановимся на методах, использующих информацию о структуре ДН, с помощью которых можно убрать шум, связанный с

фоновыми источниками, даже из одномерных кривых прохождения (сканов) неба, что приводит к существенному повышению отношения сигнал/шум радиотелескопа.

Основное внимание будет уделено проблеме снижения шума от известных фоновых радиосточников. Снижение этого шума позволяет с большей глубиной исследовать как радиосточники, не попавшие в существующие каталоги, так и упростить выделение фоновых компонент радиоизлучения неба.

2. ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ РАТАН-600

Геометрия антенны РАТАН-600 — антенны переменного профиля (АПП) — не имеет аналогов, а ее диаграмма направленности существенно отличается от ДН параболоидов. Нестандартные свойства антенны радиотелескопа потребовали значительных усилий при создании теории АПП и исследовании ее диаграммы как теоретическими, так и экспериментальными методами [1–8].

Особый интерес представляет изучение дифракционного рассеяния РАТАН-600 на больших расстояниях от главного лепестка диаграммы направленности. Стоит отметить, что это дифракционное рассеяние аналогично функции рассеяния точечного источника (PSF — Point source Spread Function) в оптической астрономии. Кардинальное

отличие состоит в том, что рассеяние радиотелескопов достаточно стабильно и даже предсказуемо, его можно учесть с высокой степенью точности. В оптических же телескопах PSF, как правило, определяется фазовыми искажениями в атмосфере и может быть учтено лишь весьма приблизительно.

Классическая теория дифракции в случае круглой равномерно облученной апертуры зеркала дает рассеяние в виде функции Бесселя $J_1(x)/x$. Случайные ошибки поверхности добавляют лишь слабый рассеянный фон, аппроксимируемый гауссианой, полуширина которой определяется характерным масштабом источников ошибок. Для понимания особенностей диаграммы направленности РАТАН-600 остановимся сначала на режиме работы радиотелескопа с полной кольцевой апертурой (наблюдения на углах места $H \sim 90^\circ$). В этом случае диаграмма направленности равна разности диаграмм двух круглых зеркал диаметром D и $D+h$ и описывается функцией $J_0(x)$ (D — диаметр кольца главного зеркала РАТАН-600, h — проекция эффективного вертикального размера отражающего элемента главного зеркала на плоскость, перпендикулярную фронту падающей волны). Диаграмма по мощности имеет четко выраженное симметричное ядро размером порядка $0.7\lambda/D$ и медленно спадающие лепестки с огибающей, асимптотически приближающейся к функции $1/x$. Протяженность рассеянного фона достигает эффективных размеров порядка λ/h , что на два порядка превышает полуширину главного лепестка ДН по мощности ($HPBW_0$) $\sim 0.7\lambda/D$ ($D \sim 600$ м, $h \sim 6$ м).

При наблюдениях на горизонте ($H \sim 0^\circ$) в режиме работы радиотелескопа с одним сектором ($1/4$ кольца) диаграмма направленности при равномерном облучении апертуры близка к диаграмме прямоугольного раскрытия с лепестками типа $(\sin x/x)^2$. Широкое рассеяние в этом случае на порядок меньше, чем при наблюдениях вблизи местного Зенита. Таким образом, как форма самой ДН, так и протяженность рассеянного фона существенно зависят от режима работы радиотелескопа и от угла места наблюдаемого источника.

При работе с полной кольцевой апертурой ДН имеет “игольчатое” ядро с расходящимся осесимметричным рассеянным фоном; при работе отдельным сектором вблизи местного Зенита ($H \sim 90^\circ$) — узкий несимметричный главный лепесток и протяженный веерообразный фон, размеры которого в вертикальной плоскости больше чем на порядок превышают $HPBW_0$. С уменьшением угла места размеры главного лепестка в вертикальной плоскости увеличиваются, а протяженность рассеянного фона уменьшается. На горизонте диаграмма направленности превращается в ножевую,

а протяженность рассеянного фона становится соизмеримой с протяженностью рассеянного фона параболоида тех же размеров.

Теоретические и экспериментальные исследования последних лет [6, 8, 9] дали возможность существенно уточнить свойства ДН на больших расстояниях от электрической оси и дать соответствующие рекомендации пользователям РАТАН-600.

Расчет диаграммы направленности с учетом дифракционных эффектов в пространстве между главным и вторичным зеркалами, а также учет конечной ширины кольца главного зеркала и положений его отдельных отражающих элементов позволили окончательно согласовать расчетную и экспериментальную диаграммы в большом телесном угле [6].

Измерения ДН, проводившиеся по ярким калибровочным источникам во всем диапазоне длин волн и углов места в период 2001–2002 гг. [8] и исследования экспериментальной диаграммы в процессе проведения околозенитного обзора (РАТАН-600 Zhenit Field — RZF [10]) с 1998 по 2003 гг. [9] позволили оценить точность, с которой экспериментальная ДН совпадает с расчетной, ее стабильность во времени, а также выявить влияние ряда факторов на форму ДН на больших расстояниях от оси.

На Рис. 1 показана экспериментальная двумерная ДН, построенная по результатам наблюдений “точечных” источников с известными спектрами в период проведения RZF-обзора на волне 7.6 см.

Для дальнейших исследований интерес представляют вертикальная диаграмма направленности F_v и зависимость $HPBW(dH)$, где $HPBW$ — полуширина ДН в горизонтальном сечении, удаленном от центрального сечения на величину dH . Эти зависимости приведены на Рис. 2 и 3.

На Рис. 2 показано центральное вертикальное сечение диаграммы направленности (вертикальная ДН) на волне 7.6 см, построенное по измерениям опорных источников в процессе проведения околозенитного обзора на склонении $\delta_0 = 41^\circ 30' 42''$ ($H = 88^\circ$) (незаполненные кружки). Сплошной линией представлена расчетная вертикальная диаграмма. Зависимости построены в логарифмическом масштабе по оси ординат.

На Рис. 3 показаны зависимости $HPBW(dH)$, полученные по измерениям опорных источников (незаполненные кружки) и расчетным путем (сплошная линия) для $\lambda 7.6$ см и $H = 88^\circ$. Ввиду симметрии $F_v(dH)$ и $HPBW(dH)$ относительно центрального горизонтального сечения ($dH = 0$) на рисунках эти зависимости приведены только для положительных значений dH .

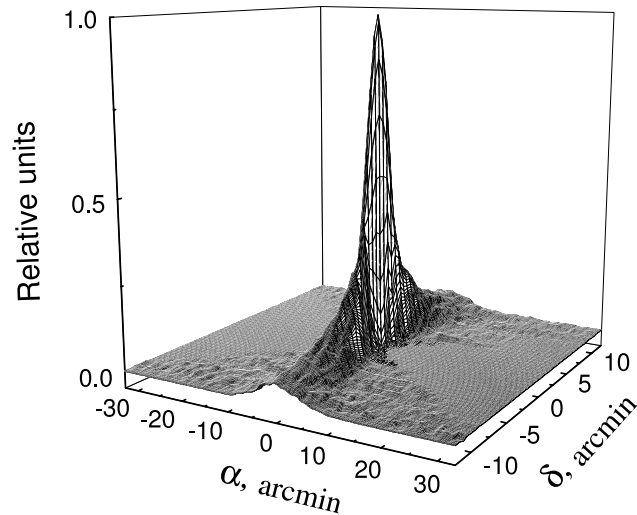


Рис. 1. Экспериментальная диаграмма направленности РАТАН-600 по мощности, построенная по результатам наблюдений источников в процессе проведения RZF-обзора на волне 7.6 см ($H = 88^\circ 42'$).

Из графиков, представленных на Рис. 2 и 3, видно, что при наблюдениях вблизи Зенита рассеянный фон диаграммы направленности спадает как $1/x$, а его полуширина практически линейно возрастает по мере удаления от центрального сечения ДН.

Зависимости $HPBW(dH)$ позволяют разделять источники на одномерных сканах RZF-обзора, а также решать проблему привязки их координат по склонению. С помощью зависимостей $F_v(dH)$ осуществляется пересчет антенных температур источников к центральному сечению обзора и определяются потоки источников.

Данные, полученные о структуре диаграммы на значительных расстояниях от электрической оси, позволяют полнее использовать информацию о далеких космических объектах и, тем самым, увеличивать проникающую силу РАТАН-600 на длинах волн, на которых чувствительность определяется шумом фоновых радиоисточников (шумом насыщения).

Совпадение расчетной и экспериментальной диаграмм направленности на уровне от 1% до 6% [8, 9] дает возможность использовать расчетную диаграмму для моделирования обзоров, а также при разработке методик, направленных на увеличение чувствительности телескопа и его поля зрения.

3. ПОЛЕ ЗРЕНИЯ РАТАН-600

Поле зрения РАТАН-600 максимально при наблюдениях на Южном секторе с плоским отражателем (режим Юг+Плоский). Первоначальный

проект РАТАН-600 был дополнен плоским зеркалом по аналогии с радиотелескопом в Нансей именно с целью расширения поля зрения телескопа. Отчасти это было стимулировано успехами Техасского обзора [11] в режиме транзита неба. Суточное поле зрения в режиме Юг+Плоский достигает величины порядка $2\pi\lambda/h$, что в B/h раз больше поля зрения в режиме работы радиотелескопа с одним сектором на высоких углах места. B — глубина раскрыва главного зеркала в режиме работы с одним сектором. На высоких углах места B составляет примерно 80 м.

Соотношение B/h справедливо, если поле зрения рассчитывать исходя из размеров главного лепестка ДН и не учитывать дифракционное рассеяние РАТАН-600. Однако, как уже отмечалось выше, вблизи Зенита (например, на высоте RZF-обзора) дифракционное рассеяние приводит к ненулевой чувствительности телескопа в области, размеры которой существенно больше, чем поле зрения по уровню половинной мощности. Знание этого рассеяния и умение его учитывать позволяет почти на порядок увеличить поле зрения РАТАН-600 на высоких углах места в режиме работы с одним сектором и почти на два порядка в режиме работы со всей кольцевой апертурой.

Реализовать поле зрения таких размеров можно, опираясь на результаты исследований диаграммы направленности РАТАН-600. Яркая выраженная зависимость формы горизонтальных сечений диаграммы от расстояния dH (Рис. 4) позволяет проводить селекцию источников по степени удаленности их от центрального сечения и количественно оценивать плотности потоков.

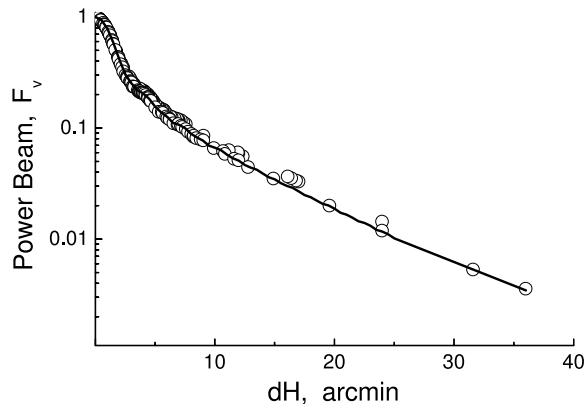


Рис. 2. Вертикальная ДН, построенная по результатам наблюдений источников в RZF-обзоре (кружки), и расчетная (сплошная линия).

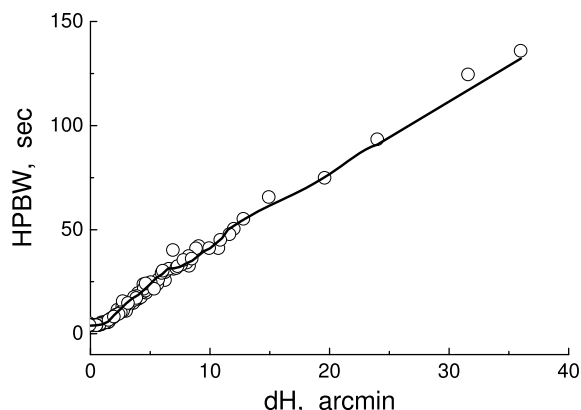


Рис. 3. Зависимость $HPBW(dH)$, построенная по результатам наблюдений источников в RZF-обзоре (кружки), и расчетная (сплошная линия).

Кроме того эта зависимость дает возможность с помощью достаточно простых алгоритмов обработки снижать шум от далеких источников, чьи склонения отличаются от склонения проводимого обзора. Поскольку медианный размер радиосистем зависит от средней плотности потока, для популяции, определяющей шум насыщения РАТАН-600, размеры источников существенно меньше разрешения радиотелескопа на волнах длиннее 3 см. То есть на этих волнах подавляющее число источников можно считать точечными по отношению к диаграмме направленности радиотелескопа.

Шум от этих далеких космических объектов существенно затрудняет оценку параметров источников, проходящих через центральное сечение обзора и снижает чувствительность радиотелескопа. Обе эти задачи решаются с использованием за-

висимостей $F_v(dH)$ и $HPBW(dH)$, приведенных на Рис. 2 и 3.

Метод выделения достаточно ярких космических объектов, удаленных на значительные расстояния от оси ДН [12], сводится к выделению их на записях прохождения неба посредством гаусс-анализа. При этом используется информация о координатах источников (α, δ) из NVSS- или FIRST-каталогов. Приведение отклика источника, удаленного на расстояние $dH = \Delta\delta$ от оси диаграммы к ее центральному сечению (или центральному сечению обзора), осуществляется путем пересчета амплитуды сигнала от него на записи прохождения с учетом вертикальной ДН (Рис. 2) и сжатия его по временной оси в соответствии с зависимостью $HPBW(dH)$ (Рис. 3).

Для точечных источников, чьи угловые размеры много меньше полуширины ДН, амплитуда сигнала источника, приведенная к центральному сечению, равна:

$$S_0 = S/F_v(dH),$$

где S — амплитуда сигнала от источника на записи, $\Delta\delta = \delta_{ps} - \delta_0$, δ_{ps} — склонение источника, δ_0 — склонение центрального сечения обзора, совпадающее с центральным горизонтальным сечением диаграммы направленности.

Для протяженных источников в формулу надо вводить поправочный коэффициент, который учитывает соотношение между угловыми размерами источников и полушириной ДН [13].

Этот метод дает выигрыш по чувствительности (отношению сигнал/шум) в $(HPBW/HPBW_0^g)^{1/2}$ раз ($HPBW_0^g$ — полуширины ДН в центральном горизонтальном сечении) и позволяет исследовать достаточно сильные источники на расстояниях, в десятки раз превышающих полуширину ДН по уровню половинной мощности.

На Рис. 5 показаны примеры источников, удаленных от центрального сечения, на реальных записях RZF-обзора (а) и эти же источники, восстановленные к центральному сечению обзора (б).

При обработке данных RZF-обзора вышеописанная процедура использовалась для выделения (отождествления) внеосевых источников, оценки их плотностей потоков, а также для последующей чистки реальных записей от сигналов таких источников. За счет увеличения отношения сигнал/шум данная методика позволяет выделять и восстанавливать источники, удаленные от оси ДН на расстояния, на порядок превышающие полуширину ДН по склонению. На волне $\lambda 7.6$ см эта полуширина составляет $4'$. С помощью программного пакета, написанного на командной оболочке Shell, обработка осуществляется в автоматическом режиме.

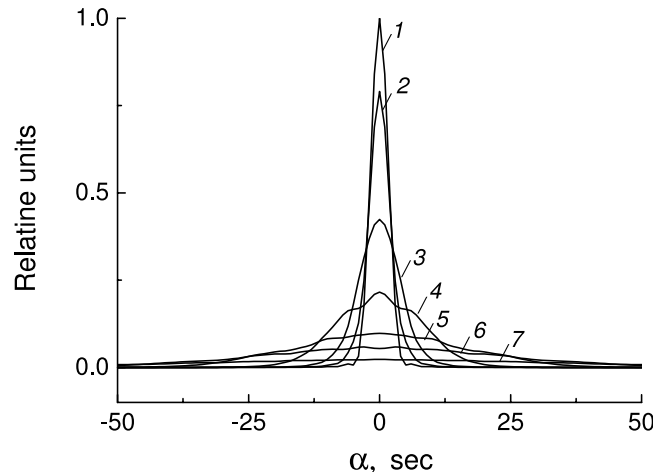


Рис. 4. Горизонтальные сечения расчетной ДН на волне 7.6 см ($H = 88^\circ$). Расстояния сечений от центрального горизонтального сечения по углу места составляют: $dH = 0'$ (кривая 1), $dH = 1'$ (2), $dH = 2'$ (3), $dH = 4'$ (4), $dH = 8'$ (5), $dH = 12'$ (6), $dH = 20'$ (7).

Очевидно, что, чем ярче источник, тем с более далекого расстояния по склонению регистрируется сигнал от него и тем протяженнее форма отклика источника на кривой прохождения. Суперпозиция сигналов от удаленных источников вносит значительный вклад в шумовую компоненту на записях (шум насыщения). Применение данной методики дает возможность не только расширить поле зрения телескопа, но и существенно увеличить его чувствительность (проницающую силу).

Вышеизложенная процедура позволяет более корректно использовать статистические методы анализа слабых радиисточников, попадающих в поле зрения суточных обзоров РАТАН-600, а также может быть использована при обработке обзоров, проводимых с применением решеток в фокусе радиотелескопа.

Отметим, что использование фокальных решеток при наблюдениях в азимутах существенно расширяет поле зрения РАТАН-600. Если при наблюдениях в меридиане вблизи Зенита с фокальной матрицей состоящей из N элементов в $N^{1/2}$ раз увеличивается проницающая сила телескопа, то при наблюдениях с такой же матрицей на Западном и Восточном секторах РАТАН-600 в N раз увеличивается его суточное поле зрения. Матрица, установленная в 2007 г. на облучателе No. V [14, 15] и состоящая из 32 элементов (волноводов) при наблюдениях на Западном секторе на высоких углах места охватывает на порядок больший диапазон склонений, чем предусматривает даже режим Юг+Плоский.

Использование матрицы в фокусе РАТАН-600 весьма эффективное радиотехническое средство

для расширения его поля зрения, требующее, однако, серьезных финансовых вложений. Методика же, предложенная выше, менее затратна, однако для существенного увеличения поля зрения требует тщательных исследований ДН до уровней (-20) дБ и ниже. Она позволяет оценивать параметры достаточно сильных радиисточников в областях неба, размеры которых в несколько раз превышают размеры главного луча ДН и при наблюдениях с параболическими зеркалами, и с антеннами апертурного синтеза, состоящими из параболических зеркал [16].

4. ПРОНИЦАЮЩАЯ СИЛА РАДИОТЕЛЕСКОПА И МНАТ-ФИЛЬТРАЦИЯ

Проницающая сила радиотелескопа определяется минимальной спектральной плотностью потока, который может быть зарегистрирован от космических объектов. Одним из путей повышения проницающей силы и достижения высокой чувствительности радиотелескопа является эффективное отделение дискретных радиисточников от фоновых излучений различной природы. К таким мешающим фоновым излучениям относятся прежде всего флуктуации излучения атмосферы Земли, а также шум плохо разрешаемых дискретных источников, проходящих через горизонтальные сечения ДН выше и ниже от ее центрального сечения по углу места.

Существенного снижения влияния атмосферных флуктуаций можно достичь путем приема сигналов одновременно из двух смежных направлений и регистрации разности этих сигналов. Для этих

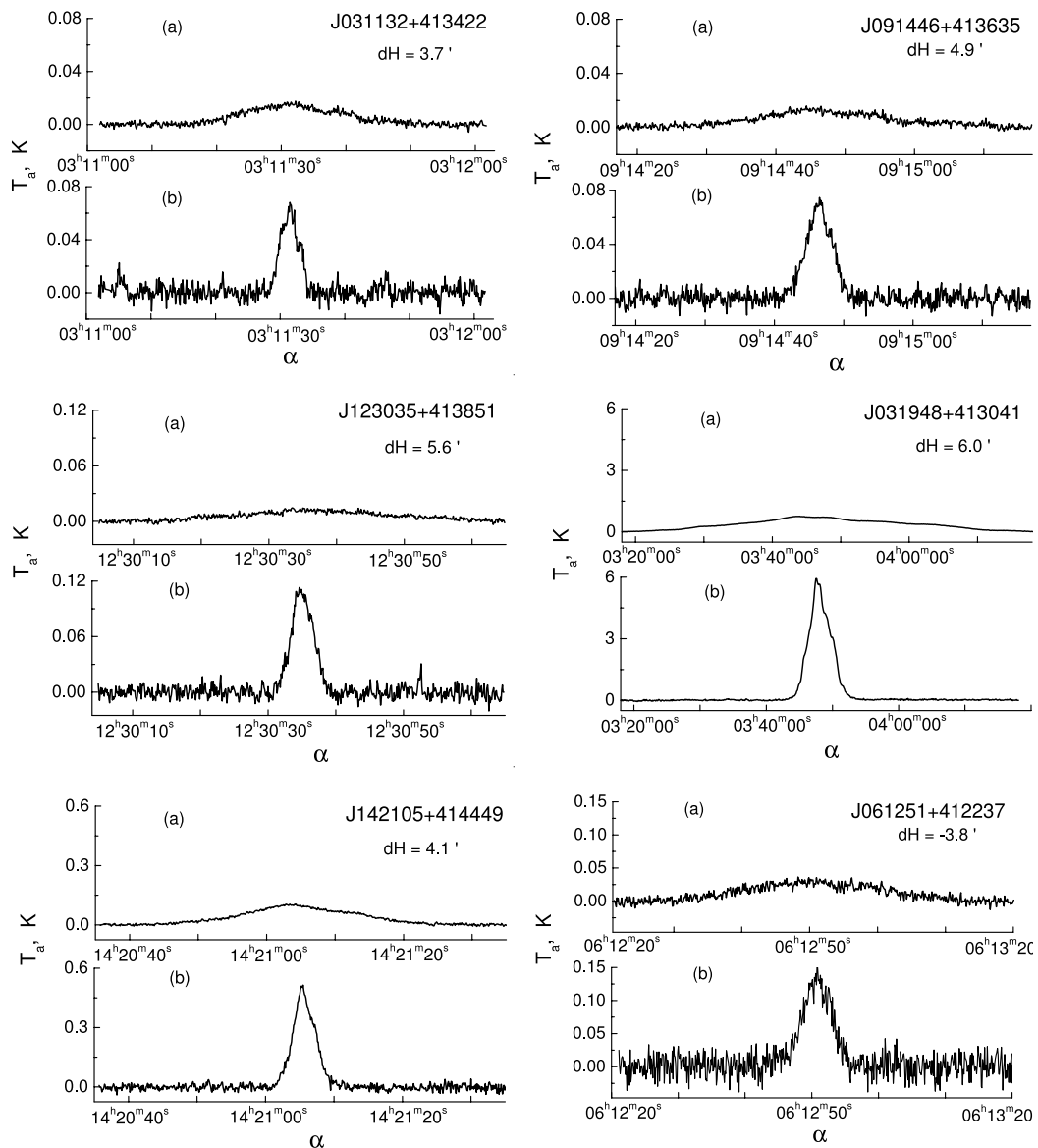


Рис. 5. Примеры удаленных от центрального сечения источников на реальных записях RZF-обзора (a) и эти же источники, восстановленные к центральному сечению обзора (b).

целей широко используется метод близкого двух-лучевого сканирования. На РАТАН-600 этот метод применяется как при наблюдениях вблизи горизонта, так и на высоких углах места. Метод хорошо подходит для выделения точечных источников, чьи размеры не превышают углового расстояния между разнесенными лучами.

В работе [17] была продемонстрирована возможность использования этого метода для выделения протяженных объектов. Полученные изображения восстанавливались путем свертки карты источника со специальной функцией, представляющей собой последовательность δ -функций — аналог интегрирования карты неба методом "step-by-step". Еще более эффективен с точки зрения

очистки атмосферных флуктуаций метод трехлучевого сканирования, предложенный в [17].

Кроме атмосферы, существенное влияние на величину проникающей силы радиотелескопа оказывает шум дискретных фоновых источников. Дискретные радиоисточники, доступные по флуктуационной чувствительности, превращаются в нерегулярный шум насыщения, если их поверхностная плотность (количество источников на стерадиан) значительно больше, чем число диаграмм на стерадиан. При наблюдениях на РАТАН-600 это происходит на волнах длиннее 4 см.

Для очистки записей от фоновых источников наиболее эффективным оказался метод фильтра-

ции данных путем свертки их с функцией, напоминающей мексиканскую шляпу — метод Mexican Hat (МНАТ). В работе [18] этот метод называется методом построения второй разности и используется для подавления низкочастотных флуктуаций и выделения на одномерных сканах обзора “Холод” источников, проходящих вблизи его центрального сечения.

В современных монографиях этот метод описан как один из вариантов вэйвлет-анализа [19]. Он широко используется в радиотехнике, связи, обработке изображений. В астрофизике МНАТ-фильтрация использовалась в работах [20, 21] для обнаружения негауссовости данных WMAP.

Широко используемые вэйвлет-функции, такие как WAVE-вэйвлет, МНАТ, вэйвлет Морле, являются производными от функции Гаусса. Так, МНАТ-функция является второй производной от функции Гаусса и имеет вид:

$$\psi(x) = 2/(3^{1/2}\pi^{1/4})(1 - x^2) \exp(-x^2/2).$$

Применение МНАТ-фильтрации особенно эффективно при обработке околосенитных обзоров неба, в частности, глубокого RZF-обзора. При наблюдениях на углах места, близких к 90° , полуширины откликов отдельных источников сильно зависят от степени удаленности их от центрального сечения обзора (Рис. 4). Варьируя размеры МНАТ-фильтра можно достаточно эффективно проводить выделение и селекцию источников по $\Delta\delta$.

Последующее приведение сигналов от источников к центральному сечению обзора позволяет существенно увеличивать чувствительность обзора и его глубину. Однако наибольший эффект достигается при выделении источников в центральном сечении обзора.

На Рис. 6 (а) и 7 (а) показаны реальные усредненные 20-минутные сканы неба RZF-обзора (кривые 1) и модельные сканы, полученные в результате свертки ДН РАТАН-600 с NVSS-изображениями в полосе $\Delta\delta = \delta_0 \pm 37.5'$ (кривые 2) и в полосе $\Delta\delta = \delta_0 \pm 2'$ (кривые 3), δ_0 — склонение центрального сечения обзора. Реальные и модельные сканы нормированы к уровню сигнала от источника 3С84 и сдвинуты относительно друг друга по оси ординат.

Кривые 2 являются моделью реальных записей неба и содержат отклики от всех источников, попадающих в телесный угол ДН вплоть до уровня 0.5% от максимума главного луча. Кривые 3 демонстрируют, как выглядел бы одномерный скан неба, если бы в него попали только источники, проходящие вблизи центрального сечения обзора, а именно, источники, чьи склонения

не превышают $\Delta\delta = \pm 2'$ — полуширины главного луча в центральном вертикальном сечении ДН на волне 7.6 см.

На Рис. 6 (b) и 7 (b) приведены результаты свертки реального и модельных сканов с МНАТ-фильтром, имеющим размеры полуширины главного луча в центральном горизонтальном сечении диаграммы направленности. Кривые 1 демонстрируют результаты свертки реальных сканов, кривые 2 — результаты свертки модельных сканов в полной полосе обзора, кривые 3 — результаты свертки модельных сканов в центральной полосе $\Delta\delta = \pm 2'$. Как видно из рисунков, свертка сканов с МНАТ-фильтром размерами $HPBW_0 = 45''$ хорошо фильтрует шум от далеких источников. Применение МНАТ-фильтрации к реальным и модельным сканам дает практически одинаковый результат: шум насыщения падает больше чем на порядок.

Конечно, столь большой выигрыш не реализуется на малых углах места в режиме работы с одним сектором и на всех высотах при наблюдениях в режиме Юг+Плоский.

Об эффективности чистки от источников, проходящих вне центральной полосы обзора неба, свидетельствует степень близости кривых 2 и 3 на Рис. 6 (b) и 7 (b), а также количественные оценки остаточного шума на этих кривых. Для модельной кривой, полученной во всей полосе обзора среднеквадратичная ошибка остаточного шума составила $\sigma = (5.8 \pm 0.5) \times 10^{-5}$, для модельной кривой, полученной в центральной полосе — $\sigma = (5.9 \pm 0.5) \times 10^{-5}$. Значения σ приводятся в относительных единицах, как и кривые на Рис. 6 и 7, которые нормировались к антенному отклику от объекта 3С84 в центральном сечении обзора.

Как видно, шум насыщения, остающийся на модельных записях после процедуры МНАТ-фильтрации в пределах 10% оказывается практически одинаковым для обеих моделей разреза неба, что свидетельствует об эффективности применения МНАТ-фильтра.

Таким образом, если нас интересуют только источники в центральном сечении RZF-обзора, на уровне полуширины главного лепестка ДН по склонению ($\Delta\delta = \pm 2'$), процедурой свертки с МНАТ-фильтром, оптимизированным под размер точечных источников, проходящих через ось диаграммы, можно реализовать предельно глубокую чистку одномерных сканов от фоновых источников. Это снижает шум на реальной записи на волне 7.6 см до долей мЯн.

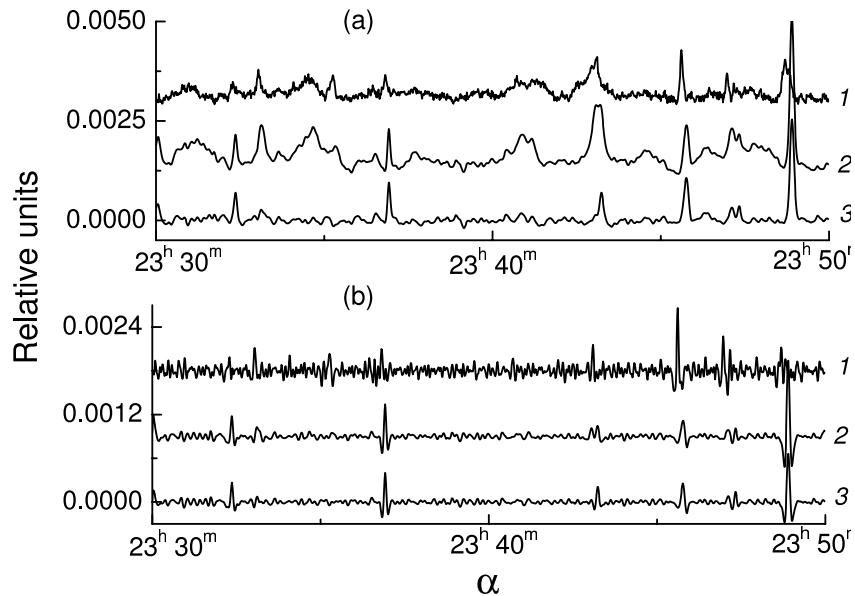


Рис. 6. (a) — Реальный усредненный 20-минутный скан неба RZF-обзора (кривая 1) и модельные сканы, полученные в результате свертки ДН РАТАН-600 с NVSS-изображениями в полосе $\Delta\delta = \pm 37.5'$ (кривая 2) и в полосе $\Delta\delta = \pm 2'$ (кривая 3). (b) — Результаты свертки реального и модельных сканов с МНАТ-фильтром, имеющим размеры $45''$: кривая 1 — результат свертки реального скана, кривая 2 — результат свертки модельного скана в полной полосе обзора, кривая 3 — результат свертки модельного скана в центральной полосе $\Delta\delta = \pm 2'$. Реальные и модельные сканы нормированы к уровню сигнала от источника 3С84 и сдвинуты относительно друг друга по оси ординат.

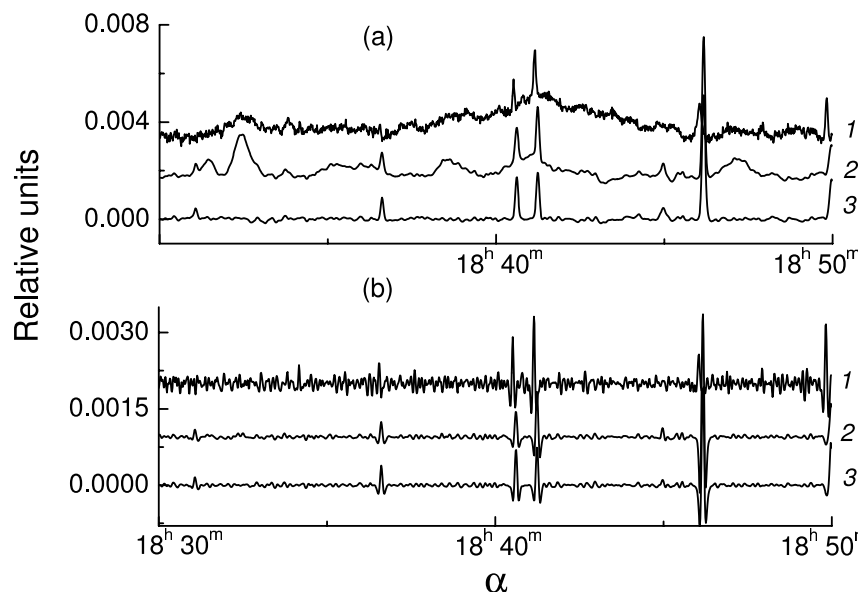


Рис. 7. То же, что и на Рис. 6, но для другого отрезка записи.

Удаление на записях “точечных” источников, выделенных с помощью МНАТ-фильтрации, упрощает исследование известных объектов с аномальными спектрами, а также позволяет изучать более протяженные фоны, в частности, на масштабах,

интересных с точки зрения космологии. В настоящей работе эти фоны не моделируются и не рассматриваются.

Практическая ценность полученного результата состоит в простоте чистки одномерных сканов с

глубиной, близкой к возможностям чистки двумерных карт стандартными алгоритмами типа CLEAN и MEM [22].

Дальнейшее снижение шума насыщения основано на методах статистического анализа средних параметров радиоисточников. Путем усреднения кривых прохождения большого числа радиоисточников с известными координатами можно оценивать средние параметры однородной популяции космических объектов. Шум фоновых источников в этом случае оказывается независимым и усредняется как корень из числа усредняемых объектов. Методы статистического анализа средних параметров радиоисточников (за рубежом это направление получило название Stack imaging) позволили почти на два порядка уменьшить шум насыщения радиотелескопа в режиме околозенитного обзора неба и реализовать предельную чувствительность РАТАН-600.

В работах [23, 24] приведены предварительные оценки средних спектральных индексов источников из NVSS и FIRST-каталогов, полученные путем усреднения десятков тысяч записей объектов, попадающих в поле зрения RZF-обзора. Чем слабее источники, тем многочисленней их популяция и тем большее отношение сигнал/шум по сравнению с откликом одиночного источника можно реализовать. Знание диаграммы направленности на больших расстояниях от оси радиотелескопа и применение методики, изложенной в предыдущем параграфе с использованием зависимостей $F_\nu(dH)$ и $HPBW(dH)$, позволяет уточнить эти оценки и получить более надежные результаты статистических исследований во всем поле зрения РАТАН-600.

5. ПРОНИЦАЮЩАЯ СИЛА РАДИОТЕЛЕСКОПА И МОДЕЛИРОВАНИЕ RZF-ОБЗОРА

Уточнение структуры дифракционного рассеяния радиотелескопа в пределах диаграммы одного отражающего элемента главного зеркала позволяет моделировать обзоры, проводимые на РАТАН-600, сглаживая изображения неба, полученные в известных обзорах дециметрового диапазона, с нашей диаграммой направленности и экстраполируя спектры источников (или фоновых излучений) на сантиметровый диапазон длин волн. Это упрощает селекцию объектов по свойствам, отличным от средних.

Высокая корреляция между дециметровым и сантиметровым изображениями неба дает возможность очищать карты сантиметрового диапазона, полученные на РАТАН-600, от источников, наблюдаемых в дециметровом диапазоне. Это существенно повышает проникающую силу радиотелескопа, оставляя только популяции источников, видимые в

сантиметровом диапазоне, а также объекты с аномальными или меняющимися во времени спектрами. Моделирование помогает как при изучении фоновых излучений, так и при выделении многочисленных слабых космических источников на фоне шумов, тем самым снижая эффект “путаницы”.

Для моделирования использовались данные NVSS-обзора (NRAO VLA Sky Survey) [25, 26], полученные на частоте 1.4 ГГц и результаты расчета диаграммы направленности РАТАН-600 [6]. Моделирование RZF-обзора в его центральном сечении ($\delta_0 = 41^\circ 30' 42''$) на волне 7.6 см осуществлялось с помощью двух независимых методик.

В первом методе [27] использовались данные NVSS-каталога, из которого брались основные параметры источников, во втором — площадки NVSS-изображений [28]. При моделировании по данным NVSS-каталога рассчитывались отдельные сечения ДН, через которые проходили источники с заданными склонениями. При этом делалось допущение, что все источники точечные.

Кривые прохождения были рассчитаны для большинства источников NVSS-каталога, чьи склонения попадают в полосу $\Delta\delta = 41^\circ 30' 42'' \pm 30'$. Каждая из рассчитанных кривых прохождения источника умножалась на величину плотности потока этого источника на волне 7.6 см и сдвигалась по времени в соответствии с его прямым восхождением α . Далее все кривые прохождения складывались.

Пример полученного таким образом модельного одномерного скана прохождения неба через неподвижную ДН РАТАН-600 на склонении RZF-обзора на $\lambda 7.6$ см показан на Рис. 8 (кривая 1). Протяженность скана по времени ограничена на рисунке 20 минутами.

Во втором методе для моделирования использовались карты неба NVSS-обзора (NVSS-изображения) [28], которые сворачивались с расчетной двумерной диаграммой направленности РАТАН-600. Расчет как отдельных сечений ДН, так и двумерной ее матрицы проводился в таких диапазонах по склонению, чтобы максимальные значения ДН в наиболее удаленных сечениях составляли доли процента от величины максимума главного лепестка.

Центр площадок NVSS-изображений проходил через центральное сечение RZF-обзора. Размер площадок изображений по склонению составлял 1.25° и 1° (размер ДН в вертикальной плоскости на $\lambda 7.6$ см), по прямому восхождению — 20^m и 5^m .

Для пересчета плотностей потоков источников с $\lambda 21$ см на $\lambda 7.6$ см в первой модели использовались плотности потоков источников, приведенные в NVSS-каталоге и их спектральные индексы. Для

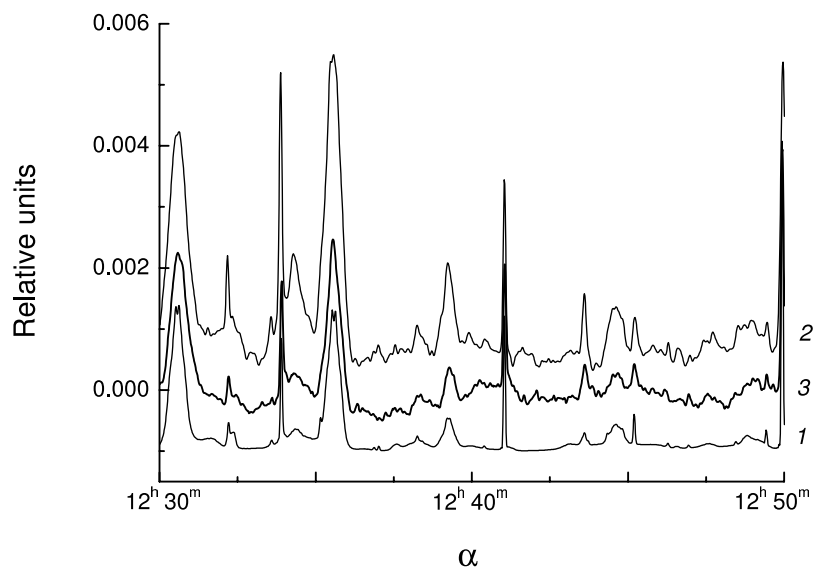


Рис. 8. Нормированные 20-минутные модельные сканы неба, полученные по данным NVSS-каталога (кривая 1), с помощью NVSS-изображений $1.25^\circ \times 4^\circ$ (кривая 2) и соответствующие им усредненные реальные записи RZF-обзора на волне 7.6 см (кривая 3). Все сканы нормированы к уровню сигнала от источника 3C84. Кривые представлены со сдвигом по оси ординат.

источников, чьи спектральные индексы неизвестны, брался спектральный индекс, соответствующий нормальному нетепловому спектру ($\gamma = -0.8$).

При моделировании с помощью NVSS-изображений пересчет плотностей потоков осуществлялся для всего модельного скана в целом с использованием спектрального индекса $\gamma = -0.78 \pm 0.02$. Величина последнего подбиралась таким образом, чтобы среднеквадратичная ошибка отклонений реальной и модельной записи, исправленной за спектральный индекс, была минимальна.

20-минутный модельный скан неба, полученный с использованием NVSS-изображений размерами $1.25^\circ \times 4^\circ$ показан на Рис. 8 (кривая 2). Там же приведена усредненная реальная 20-минутная запись RZF-обзора на $\lambda 7.6$ см (кривая 3). Все сканы нормированы к уровню сигнала от источника 3C84. Кривые сдвинуты друг относительно друга по оси ординат для лучшего просмотра.

Из сравнения кривых, приведенных на Рис. 8, видно, что обе модели хорошо согласуются с наблюдательными данными. Коэффициент корреляции модельных сканов и реальных записей составил 0.9.

Мелкомасштабная структура модельных сканов, полученных с использованием NVSS-карт неба, ближе к реальным записям RZF-обзора, поскольку кроме шумов приемника VLA, свернутых с ДН РАТАН-600, эти сканы содержат источники, сигналы от которых находятся на уровне

обнаружения и близки к шумам NVSS-обзора. Такие источники могли и не войти в NVSS-каталог.

На Рис. 9 приведен пример нормированного 5-минутного модельного скана, полученного путем свертки NVSS-изображения размерами $1^\circ \times 1^\circ$ с ДН (кривая 1), и соответствующая ему нормированная 5-минутная реальная запись (кривая 2). Коэффициент корреляции реальной 20-часовой записи RZF-обзора и 20-часового модельного скана, сшитого из таких 5-минутных сканов, составил 0.95.

Полученные модельные сканы использовались при выделении и отождествлении источников околозенитного обзора и составления RZF-каталога [10]. Особую ценность модельные кривые представляют для чистки записей RZF-обзора с целью увеличения разрешающей силы радиотелескопа.

Процедура чистки реальных записей с помощью модельных сканов подробно описана в работе [28]. Вычитание модельного скана, скорректированного за спектральный индекс, из реальной усредненной записи RZF-обзора существенно снижает среднеквадратичную ошибку шума на записи. Последующее вычитание фона, полученного с окном сглаживания 30^s , и удаление остаточных сигналов от источников, чьи спектральные индексы отличаются от среднего спектрального индекса, снижают величину остаточного шума до $\sigma = 1.1 \pm 0.2$ мЯн. Эта величина на порядок меньше шума от фоновых источников на исходной записи RZF-обзора ($\sigma = 19 \pm 3$ мЯн).

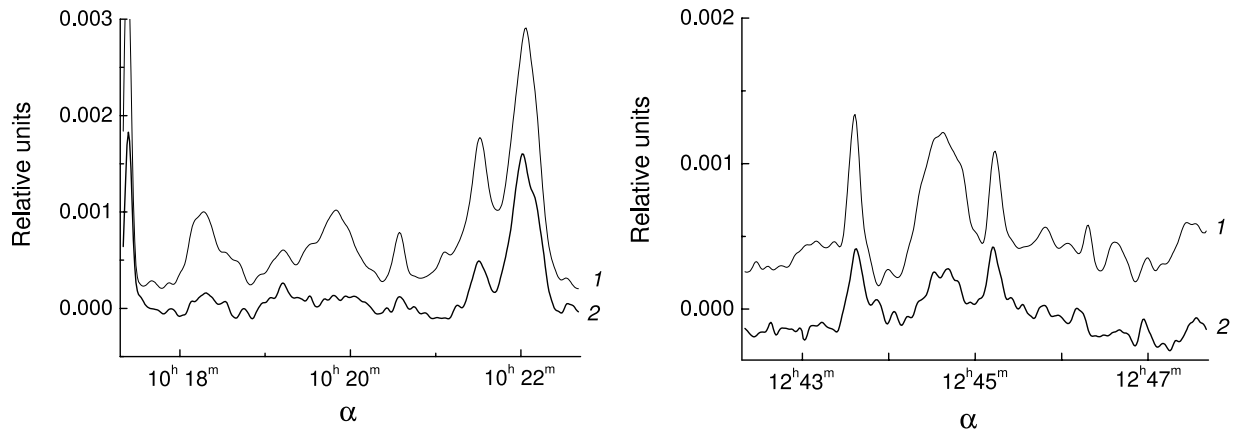


Рис. 9. Нормированные 5-минутные модельные сканы неба, полученные с помощью NVSS-изображений $1^\circ \times 1^\circ$ (кривые 1) и соответствующие им усредненные реальные записи RZF-обзора на волне 7.6 см (кривые 2). Все сканы нормированы к уровню сигнала от источника 3С84. Кривые представлены со сдвигом по оси ординат.

Оценки сделаны по 20-часовым записям. При оценке шума на реальной записи исключалась плоскость Галактики, начиная с 20-го часа, а также источник 3С84. Таким образом, реальный выигрыш по проникающей силе, которого можно достичь, используя модельные сканы RZF-обзора, составил практически порядок.

На Рис. 10 (а) показан остаточный шум на реальной усредненной записи RZF-обзора после вычитания из нее модельного скана, полученного с помощью NVSS-изображений, исправленного за средний спектральный индекс; на Рис. 10 (b) — остаточный шум после дополнительно вычитания из полученной разности реального и модельного сканов фона масштабом 30^s и на Рис. 10 (c) — остаточный шум после удаления источников, чьи спектральные индексы отличаются от среднего спектрального индекса. На рисунках показаны записи с 10-го по 20-й час.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уточненная теория инструментального дифракционного рассеяния РАТАН-600 [6], подкрепленная прямыми наблюдениями опорных космических объектов [8, 9], позволила более полно реализовать потенциальные возможности РАТАН-600. Это продемонстрировано на примере глубокого обзора неба вблизи местного Зенита (RZF-обзора), проводимого на радиотелескопе по программе РАН “Генетический Код Вселенной” [10].

Учет дифракционного рассеяния на порядок расширяет поле зрения РАТАН-600 на высоких углах места, а также дает возможность с помощью достаточно простых алгоритмов обработки снижать шум от далеких источников, чьи склонения отличаются от склонения проводимого обзора. Эти

алгоритмы могут быть использованы и при обработке обзоров, проводимых с применением решеток в фокусе радиотелескопа.

Освоены и внедрены в практику методы моделирования наблюдений, использующие лучшие каталоги неба, появившиеся в последние годы (NVSS [25], FIRST [29]). Поверхностная плотность радиоисточников в этих каталогах много выше 1 объекта на ДН РАТАН-600, что позволяет прогнозировать шум неразрешенных фоновых радиоисточников и в первом приближении исключать его. Моделирование упрощается тем, что дисперсия спектральных индексов NVSS-объектов невелика. Отметим, что опасения, связанные с шумом от новых популяций фоновых источников в сантиметровом диапазоне оказались завышенными — основной шум в этом диапазоне скорее всего связан с объектами NVSS и FIRST-каталогов.

Использование модельных сканов неба, а также МНАТ-фильтрация при исследовании объектов, проходящих через ось диаграммы, позволили практически на порядок повысить отношение сигнал/шум и, следовательно, проникающую способность радиотелескопа. Использование статистических методов анализа слабых радиоисточников, попадающих в поле зрения RZF-обзора, уменьшает шум насыщения радиотелескопа почти на два порядка.

Моделирование экспериментов на РАТАН-600 — обязательный этап подготовки к наблюдениям. Наблюдатель должен выбрать стратегию обработки данных: борьба за предельное поле зрения, за высокое отношение сигнал/шум в центральном сечении или за снижение шума насыщения в экспериментах по исследованию фоновых излучений Вселенной. Как известно,

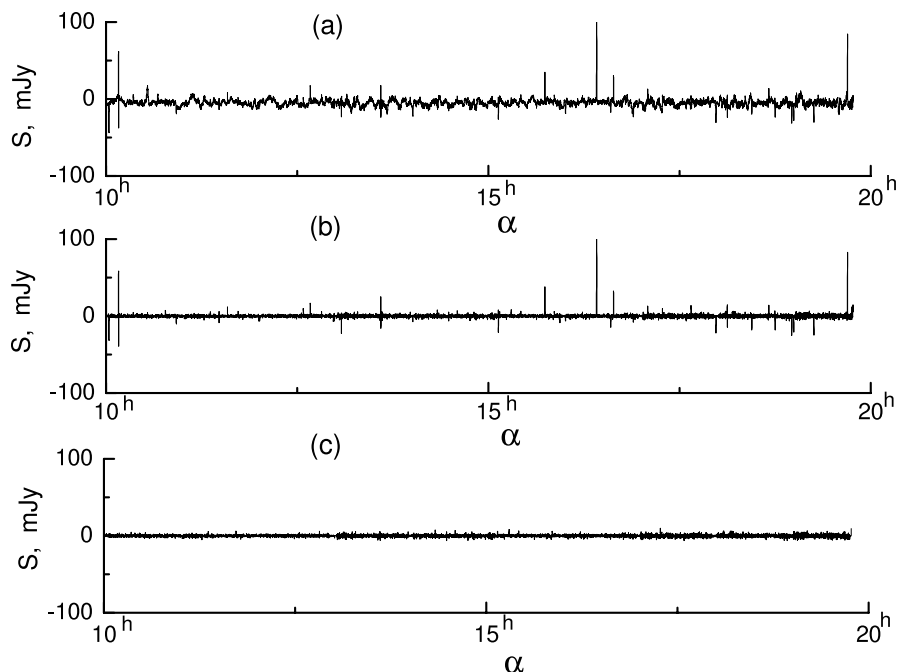


Рис. 10. (a) — Остаточный шум на реальной усредненной записи RZF-обзора после вычитания из нее модельного скана, полученного с помощью NVSS-изображений, исправленного за средний спектральный индекс; (b) — остаточный шум после дополнительного вычитания из полученной разности реального и модельного сканов фона масштабом 30° ; (c) — остаточный шум после удаления источников, чьи спектральные индексы отличаются от среднего спектрального индекса.

этот шум является основным препятствием во всех экспериментах по исследованию анизотропии микроволнового фона, включая центральный эксперимент ближайших лет PLANCK Surveyor Mission 2008 [30].

Уточненная двумерная диаграмма будет использована при анализе пространственно-частотного спектра всех видов фоновых излучений по данным RZF-обзора. Мы надеемся, что проведенные исследования будут полезны всем пользователям РАТАН-600.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-02-486-а, гранта ОФИ 07-02-12 055 и гранта Президента РАН “Научные школы” (“Школа С. Э. Хайкина”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Б. В. Кузнецов и др., Радиотехника и электроника **6**, 1947, (1961).
2. Н. А. Есепкина, Б. А. Васильев, И. А. Водоватов и М. Г. Высоцкий, Астрофиз. исслед. (Изв. САО) **11**, 197, (1979).
3. Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др., Астрофиз. исслед. (Изв. САО) **12**, 106, (1980).
4. Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др., Астрофиз. исслед. (Изв. САО) **15**, 151, (1982).
5. А. Н. Коржавин, Астрофиз. исслед. (Изв. САО) **11**, 170, (1979).
6. Е. К. Майорова, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **53**, 78, (2002)
7. А. В. Темирова, Астрофиз. исслед. (Изв. САО) **17**, 131, (1983).
8. Е. К. Майорова and S. A. Trushkin, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **54**, 89, (2002).
9. Е. К. Майорова and N. N. Bursov, Astrophysical Bulletin **62**, 398 (2007).
10. Н. Н. Бурсов, Ю. Н. Парийский, Е. К. Майорова и др., Астрон. ж. **84**, 227 (2007).
11. J. N. Douglas, F. N. Bash, and F. A. Bazyan, Astronom. Zh. **111**, 1945 (1996).
12. Н. Н. Бурсов, Е. К. Майорова и П. Г. Цыбулев *Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007* (Казань, 2007) с.405.
13. Jacob W. M. Baars, IEEE Trans. on antennas and propagation **ap-21**, №4, 461, (1973).
14. A. B. Berlin et al., Project. Astronomical and Astrophysical Transaction **18**, 559, (2000).
15. А. Б. Берлин, Н. Н. Нижельский и др., Труды ГАИШ, **75**, 14 (2004).
16. R. A. Windhirst, G. M. van Heerde, and P. Katgert, Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **58**, 1, (1984).
17. D. T. Emerson, U. Klein, and C. G. T. Haslam, Astronom. and Astrophys. **76**, 92 (1979).

18. Ю. Н. Парийский и Д. В. Корольков, *Итоги Науки и Техники. Астрофизика и космическая физика.* (ред. Сюняев Р.А. Серия Астрономия, ВИНТИ, Москва, 1986) **31**, 73.
19. С. Малла, *Вэйвлеты в обработке сигналов.* (Мир, Москва, 2005).
20. J. D. McEwen, M. P. Hobson, A. N. Lasenby, and D. J. Mortlock, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **359**, 1583, (2005).
21. Y. Wiaux, J. D. McEwen, and P. Vielva, *Journal of Fourier Anal. Appl.* **13**, 477, (2007).
22. А. В. Чепурнов, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (САО РАН, Нижний Архыз, 1996).
23. Ю. Н. Парийский и Н. Н. Бурсов, Препринт СПбФ САО №127, (1997).
24. Н. Н. Бурсов и М. Л. Хабибуллина, *Международная конференция "Сахаровские осцилляциии"* (15-19 октября 2007 г., САО РАН, Нижний Архыз) с. 15.
25. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astronom. J.* **115**, 1693 (1998) <http://www.cv.nrao.edu/nvss/>
26. Skyview, <http://skyview.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/skvbasic.pl>
27. Н. Н. Бурсов и Е. К. Майорова, *Тезисы докладов Российской конференции памяти А. А. Пустелькорса "Радиотелескопы РТ-2002"* (Пушино, 2002) с. 26.
28. Е. К. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **63**, 56 (2008).
29. R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and M. D. Gregg, *Astrophys. J* **475**, 479 (1997).
30. Planck Collaboration, 2006, The Scientific Programme of Planck, astro-ph/0604069, <http://www.rssd.esa.int/Planck>

THE FIELD OF VIEW AND FLUX SENSITIVITY OF RATAN-600

E. K. Maierova, Yu. N. Pariiskij, N. N. Bursov

The refined data on the diffraction scattering of RATAN-600 allowed the telescope's field-of-view size to be increased substantially at large elevations. A method, which can be used to reconstruct the parameters of the sources passing at angular distances from the beam axis that are several dozen times greater than the half-power width of the beam, is analyzed. The knowledge about wide scattering of RATAN-600 allowed the noise from background radio sources at zenith to be reduced by one order of magnitude and flux sensitivity of the radio telescope to be increased by the same factor without resorting to two-dimensional mapping. Methods for cleaning one-dimensional records of the RZF survey are suggested that use model scans based on the data of the NVSS survey and IAO filtering. The latter proved to be an especially efficient tool for suppressing sky noise and identifying sources in the central section of the survey. The flux sensitivity of RATAN-600 is estimated with new opportunities taken into account.