

УДК 52-17

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

© 2016 Р. Ю. Удовицкий<sup>1\*</sup>, Ю. В. Сотникова<sup>1\*\*</sup>, М. Г. Мингалиев<sup>1,2</sup>,  
П. Г. Цыбулев<sup>1</sup>, Г. В. Жеканис<sup>1</sup>, Н. А. Нижельский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 23 марта 2016 года; принята в печать 13 сентября 2016 года

В работе представлена разработанная на РАТАН-600 и введенная в штатную эксплуатацию автоматизированная система оценки параметров радиоисточников, наблюдаемых на всех имеющихся радиометрах континуума (два приемных комплекса вторичных зеркал №1 и №2 с общим числом радиометров — 30). Система также применяется для мониторинга параметров антенных и приемных систем радиотелескопа РАТАН-600, который проводится с использованием текущих измерений калибровочных радиоисточников.

Ключевые слова: *радиоконтинуум: общее* — *методы: наблюдательные* — *техники: радио-астрономические*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Радиотелескоп РАТАН-600 — крупнейший в мире радиотелескоп с антенной переменного профиля [1, 2]. Особенности его геометрии позволяют за счет поперечных aberrаций при малых потерях сигнала получать радиоспектр источника в течение одного наблюдения (1–2 минуты), что важно при исследованиях переменных источников. Современный уровень приемной аппаратуры обеспечивается сверхмалощумящими усилителями на транзисторах с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) и цифровыми сигнальными процессорами в системе регистрации данных. Наблюдения проводятся одновременно в двух- и трехзеркальной конфигурациях радиотелескопа (на двух независимых секторах антенны, Северном и Южном), перекрывая широкий диапазон склонений исследуемых объектов — от  $+80^\circ$  до  $-40^\circ$ . При этом возможно получать наблюдательный материал для больших списков объектов (до 200 в сутки), оценивать и отбирать наиболее перспективные для исследований. На РАТАН-600 регулярно проводится мониторинг активных ядер галактик (АЯГ). В результате многолетних наблюдений накоплен многочастотный материал, например, [3–10], охватывающий большой список представителей АЯГ на длительных временных масштабах.

На протяжении 40 лет работы радиотелескопа уже создавались программы обработки наблюдательных данных континуума для упрощения процедуры оценок плотностей потоков. Во всех из них используются общепринятые методы обработки цифрового сигнала с разной степенью автоматизации и проработки пользовательского интерфейса. Среди них можно выделить:

- алгоритм потоковой многочастотной обработки, разработанный Бурсовым Н.Н. [11], в котором используются модули штатного пакета FADPS [12] в среде Linux; применяется для данных широкополосных радиометров континуума вторичного зеркала №1, частично автоматизирован (до этапа получения антенных температур);
- пакет YURZUF для автоматизированного режима обработки мгновенных спектров радиоизлучения дискретных объектов [13], включающий в себя весь набор основных программ и командных файлов, необходимых для обработки сигнала: от расчета используемых параметров телескопа до формирования таблицы с окончательными результатами в виде спектров и плотностей потоков;
- полуавтоматический алгоритм потоковой обработки, созданный группой сотрудников ГАИШ МГУ для обработки обзоров радиоисточников на РАТАН-600 (Горшков А. Г., Конникова В. К.).

Актуальность решаемой нами задачи определяется прежде всего большим объемом данных,

\*E-mail: nemiroff@sao.ru

\*\*E-mail: sjv@sao.ru

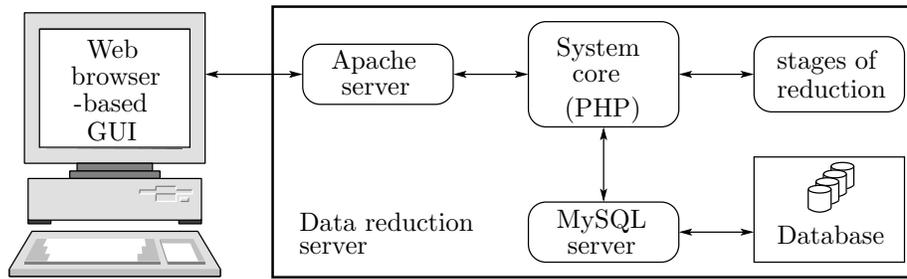


Рис. 1. Структура программного обеспечения системы наблюдательных данных РАТАН-600.

который требуется обработать для получения спектров исследуемых объектов. Так, при исследованиях АЯГ непрерывно используются два рабочих приемных комплекса вторичных зеркал №1 и №2 (девять радиометров). При среднем количестве наблюдений, равном 150 в сутки, суммарное число записей в месяц составляет 40.5 тысяч. Ручная обработка такого объема данных не представляется возможной. Кроме того, необходимо оперативно (ежедневно) получать информацию о спектральном поведении большого числа радиосточников для быстрой оценки их параметров и текущего состояния систем радиотелескопа.

В работе описана общая характеристика системы и структура программного обеспечения, алгоритмы получения антенных температур и спектральных плотностей потоков, приведены соотношения для ошибок измерений, представлена реализация контроля параметров антенных и приемных систем.

## 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ

Система представляет собой комплекс программного обеспечения (ПО), объединяющий программные компоненты штатного пакета обработки наблюдений РАТАН-600 в среде Linux — FADPS [12, 14], а также программное обеспечение, разработанное авторами. Алгоритмы обработки данных реализованы на языках С и С++. В системе использована СУБД MySQL для универсальности доступа ко всем данным, как исходным, так и появляющимся в процессе обработки наблюдений, а также для хранения конфигурации системы, информации о калибровочных объектах, характеристик радиотелескопа и радиометров, хранения полученных результатов. Связь системы обработки с СУБД организована с использованием языка PHP. Для взаимодействия с системой пользователю предоставлен разработанный нами веб-интерфейс.

В процессе обработки наблюдатель задает входной массив данных, а также контролирует все

последующие этапы обработки: оценку качества наблюдательного материала, оценки параметров калибровочных радиосточников, получение калибровочных характеристик радиотелескопа и оценки параметров исследуемых объектов. Реализована возможность активно вмешиваться в ход обработки на любом этапе при возникновении проблем, связанных, например, с качеством данных или изменившимися параметрами радиотелескопа. Конечный результат в виде спектров, кривых блеска и значений плотностей потоков может сохраняться в нескольких текстовых и графических форматах, а также экспортироваться и автоматически загружаться в интерактивный каталог VLcat [15]. Анализ и обработка наблюдательного сета длительностью в один месяц до получения окончательных результатов занимает около 20 минут.

## 3. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ

Структура ПО системы обработки схематично показана на рис. 1. Для реализации была выбрана архитектура «клиент–сервер». При этом вся обработка инициируется пользователем на клиентской стороне через веб-интерфейс и выполняется на стороне сервера. Таким образом, специализированное ПО для клиентского компьютера полностью отсутствует (необходим только веб-браузер). Такая архитектура позволяет реализовать централизованное сопровождение ПО на сервере. В случае необходимости в роли и клиента, и сервера может выступать один и тот же компьютер.

Основным ядром сервера системы («System core» на рис. 1) является набор PHP-модулей, которые активируются пользователем через веб-интерфейс и выполняют все задачи, связанные с процедурой обработки: запуск внешних программ обработки сигналов, взаимодействие с пользователем через Apache-сервер (визуализация процесса обработки и представления результатов), взаимодействие с базой данных системы через MySQL-сервер.

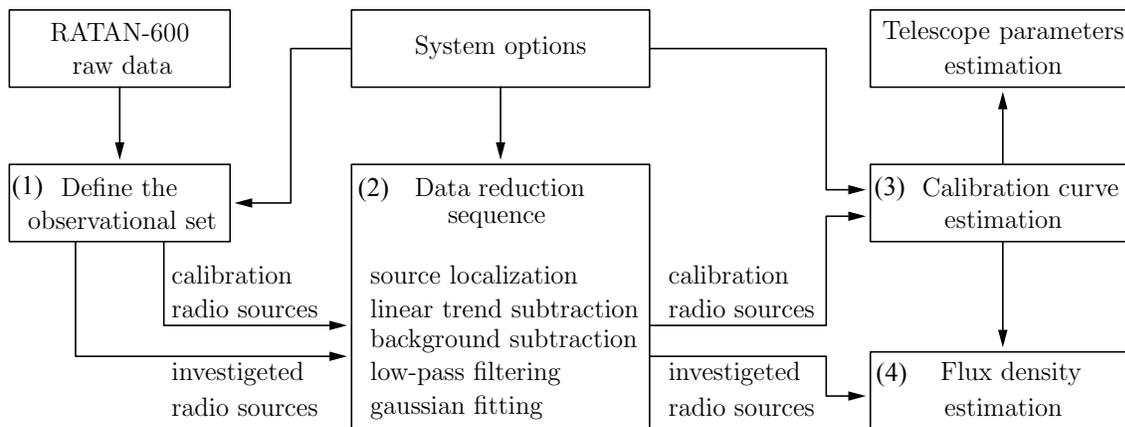


Рис. 2. Структурная схема системы обработки.

Встроенная в систему база данных содержит следующие таблицы:

- «Входной набор данных» — список радиоисточников, подлежащих обработке в текущем сеансе; хранит всю информацию, полученную из FITS-заголовков входных файлов; ключевым полем таблицы являются уникальные имена источников, определяемые координатами и датой наблюдений;
- «Известные радиоисточники» — физические параметры радиоастрономических объектов базы данных системы: координаты, альтернативное имя, красное смещение, тип объекта и другая информация из литературы; система идентифицирует объекты «входного набора данных» с объектами этой таблицы по координатам с окном  $30 \times 30$  секунд по прямому восхождению и склонению;
- «Параметры калибровочных объектов»;
- «Параметры антенны и радиометров»;
- «Служебные константы,» используемые при реализации алгоритмов обработки: значения рабочих окон записей, окон вычитания линейного и нелинейного фона и др.

Собственно обработка наблюдательных данных производится ядром системы в блоке «Stages of reduction» (рис. 1). Все этапы обработки более подробно описаны в последующих разделах.

## 4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЭТАПОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

### 4.1. Определение входного набора данных

Структурная схема этапов обработки наблюдений показана на рис. 2. Номера (1)–(4) на рисунке соответствуют последовательности стандартной процедуры автоматической обработки. Пер-

вым этапом подготовки к обработке является создание входного набора данных — списка объектов на заданном интервале дат и времени (этап «Define the data set» на рис. 2) с учетом конфигурации антенны (заданный сектор радиотелескопа и номер вторичного зеркала). Кроме того, при создании этого массива, как правило, учитывается имя автора наблюдательной программы, а также требуемый частотный диапазон наблюдений.

При автоматизации процесса обработки наблюдений первый этап является самым трудоемким, поскольку одна из задач системы — обработка любых данных цифрового архива РАТАН-600, накопленного за более чем 30 лет наблюдений. На таком длительном интервале времени архив не является однородным, и требуется учитывать так называемые «исторические данные»:

- развитие регистрационного (архивного) формата данных: добавление новых необходимых параметров в информационных заголовках архивных файлов;
- несколько этапов модернизации систем регистрации данных, которые отражают изменения как в идеологии регистрации, так и в архитектуре самих радиометров континуума;
- различия в координатно-временной привязке наблюдений.

Поэтому первый этап включает в себя не только формирование заданного списка объектов, но и предварительную подготовку наблюдательного материала к обработке, в результате которой формируется однородный по параметрам и структуре массив. Остановимся подробнее на перечисленных выше факторах.

#### 4.1.1. Форматы данных радиометров континуума

В начале 90-х годов основным выходным форматом систем регистрации данных комплексов радио-

метров континуума стал RFLEX-формат, по своей структуре близкий к FITS-формату. Аббревиатура RFLEX означает RATAN-FLEX, где FLEX (FLexible EXchange) — формат гибкого обмена данными [14]. RFLEX является «многочастотным» (или многоканальным) форматом, когда в одном файле хранятся данные, полученные на разных радиометрах (всех или некоторых) конкретного радиометрического комплекса. Наблюдательные записи предыдущих лет (80-х и начала 90-х годов), хранимые в т.н. R-формате, были преобразованы в RFLEX-формат В. К. Кононовым. RFLEX-формат разрабатывался для хранения и передачи данных, но не предназначался для их обработки.

В процессе обработки сигналов, полученных от всех радиометров, требуется последовательная работа с одномерными временными рядами, которые соответствуют сигналам с выходов детекторов каждого радиометра. Для обработки данных был введен так называемый F-формат [16], который является подмножеством FITS-формата данных и представляет собой одномерный массив (временной ряд), соответствующий одному наблюдению на одной длине волны одним радиометром (в отличие от «многочастотного» RFLEX-формата данных). В системе FADPS существует программа перекодировки из RFLEX-формата в F-формат данных (программа fl2f). Параметрически текущая версия F-формата полностью согласована с соответствующей версией RFLEX-формата.

#### 4.1.2. Изменения в регистрации данных и в радиометрах

Изменения в схемах построения радиометров привели к изменению систем регистрации, в результате чего архивный RFLEX-формат с 2010 г. хранит сигналы радиометров в измененной форме, отличной от более ранних способов представления. Если ранее одному выходу радиометра (одному детектору) соответствовал один одномерный временной ряд, то сейчас одному детектору соответствует два одномерных временных ряда (сигнала). Каждый из этих двух сигналов соответствует одному из полупериодов модуляции радиометра, условно названных сигналами «а» (antenna) и «е» (equivalent), как описано в работе [17]. Для построения окончательного сигнала радиометра требуется выполнить его синтез, который заключается в получении либо разностного сигнала  $a - e$  (если радиометр модуляционный), либо сигнала  $(a + e)/2$  (если это «радиометр полной мощности»). Информация об архитектуре радиометра хранится в RFLEX-подзаголовке соответствующего сигнала.

#### 4.1.3. Время и координаты

Эфемериды наблюдаемых радиоисточников исторически рассчитывались разными авторами наблюдательных программ на различные астрономические эпохи. Для работы в единой системе координат нами принято решение автоматически привести все данные к одной эпохе (нами выбрана эпоха J2000) путем пересчета координат источника штатной программой пакета FADPS.

#### 4.1.4. Подготовка исходных данных к обработке

Исходя из перечисленных выше факторов, связанных с первым этапом обработки, автоматизированные нами выбор и подготовка данных к обработке выглядят следующим образом:

- выборка данных из цифрового архива радиометров континуума RATAN-600 согласно списку критериев: интервал дат—времени, автор наблюдательной программы, конфигурация антенны и приемных комплексов;
- приведение всех данных к последней версии RFLEX-формата с заполнением всех (насколько это возможно) новых полей в информационных заголовках RFLEX-файлов;
- распаковка многочастотных архивных данных: получение из каждого RFLEX-файла, содержащего  $N$  одномерных сигналов,  $N$  файлов F-формата, каждый из которых содержит один одномерный сигнал;
- синтез выходных сигналов радиометров согласно архитектуре последних;
- пересчет координат и привязка временной шкалы на эпоху J2000 для всех объектов.

В результате создания исходного набора данных в базе данных системы автоматически заполняются таблицы, где каждая строка содержит все параметры из заголовков F-файлов (описывает полностью наблюдение на данной длине волны данным радиометром), а также имена директорий на диске компьютера, где физически хранятся исходные данные и будут храниться промежуточные и окончательные результаты обработки. Также на этом этапе подготовки к обработке в базе данных системы заполняются таблицы, относящиеся к наблюдаемым радиоисточникам, и автоматически производится идентификация радиоисточников по координатам с таблицей «Известные радиоисточники» (см. выше). Кроме того, формируется список калибровочных радиоисточников, которые наблюдались в программе. На этом этапе есть возможность ручной коррекции списка исследуемых объектов. Массив готов к следующему этапу автоматизированной обработки.

#### 4.2. Измерение параметров радиисточников

Исходный набор данных содержит два логических подмножества: калибровочные радиисточники и исследуемые объекты. Задача дальнейшей обработки сводится к получению одних и тех же параметров для этих двух подмножеств объектов: амплитуды и полуширины гауссова отклика неподвижного радиотелескопа на прохождение радиисточника через диаграмму направленности (ДН). Массивы этих двух подмножеств поочередно направляются на одну и ту же автоматическую процедуру оценки указанных параметров, показанную на рис. 2 в виде блока «Data reduction sequence.» На этом этапе производится ряд стандартных для РАТАН-600 процедур обработки наблюдений: выделение участка записи, содержащего радиисточник (далее работа производится только с ним), вычитание на выбранном участке линейного тренда, а также фоновой кривой более высокого порядка (больше 2).

Как упоминалось выше, отклик радиотелескопа на прохождение компактного радиисточника через неподвижную ДН является гауссовым, поэтому следующий шаг автоматической обработки — это аппроксимация зашумленной кривой прохождения радиисточника гауссианой методом наименьших квадратов. Однако исходные записи содержат белую шумовую компоненту в диапазоне частот  $0 - F_{\max}$ . Для систем регистрации радиометров континуума РАТАН-600 [17] частота  $F_{\max}$  примерно равна 9 Гц. В то же время Фурье-спектр гауссова отклика на прохождение источника через неподвижную ДН локализован в диапазоне  $0 - 1.5$  Гц (ширина этого спектра обратно пропорциональна длине волны). При обработке необходимо устранить избыточный шум для максимизации отношения сигнал/шум, что достигается путем применения фильтра нижних частот (ФНЧ). В нашей системе обработки в качестве такого ФНЧ применен разработанный нами цифровой фильтр с бесконечной импульсной характеристикой на основе фильтра Баттерворта с нулевой фазовой характеристикой [17]. Удобство применения данного фильтра состоит в том, что его входными параметрами являются частота среза и порядок. При таком подходе требуемые параметры фильтра синтезируются «на лету», в начале его работы. Это позволяет менять частоту среза фильтра, поскольку она должна быть согласована с максимальной частотой в спектре радиисточника при наблюдении на заданной высоте и на данной длине волны. Порядок фильтра выбран нами равным 8, что обеспечивает достаточную крутизну характеристики. Свойство нулевой фазовой характеристики ФНЧ обеспечивается путем двукратной фильтрации сигнала фильтром вдвое меньшего порядка, причем перед

вторым шагом фильтрации производится «обращение времени» массива данных. Нулевая фазовая характеристика ФНЧ приводит к тому, что отклик от радиисточника в результате фильтрации не искажается и не смещается по оси времени.

После НЧ-фильтрации производится аппроксимация отклика на источник гауссианой. В результате для всех объектов получены искомые оценки параметров: амплитуды (антенной температуры  $T_{a,\nu}$  на частоте  $\nu$ ) и полуширины гауссова отклика на данной длине волны  $\phi_{ix,\nu}$  (здесь «i» означает *investigated source*, а индекс  $x$  говорит о том, что сечение источника диаграммой направленности производится вдоль горизонтальной координаты  $x$ ). Все полученные на данном этапе обработки оценки параметров источников заносятся в базу данных системы для использования их на следующем этапе обработки — калибровке измерений по спектральной плотности потока.

Программное обеспечение, разработанное авторами для данного этапа обработки, автоматизирует процесс вызова необходимых методов и подготовки входных данных для них, а также хранение всех промежуточных и выходных результатов. Кроме того, если пользователю требуется визуально контролировать процесс обработки, графический интерфейс отображает всю необходимую информацию: таблицы с оценками параметров радиисточников, исходные и обработанные сигналы радиисточников.

Все методы в блоке «Data reduction sequence,» за исключением НЧ-фильтрации, реализованы в системе FADPS и протестированы наблюдателями РАТАН-600 в течение более 15 лет. Разработанный нами НЧ-фильтр уже более пяти лет применяется также в составе ПО-систем регистрации данных РАТАН-600 [17].

#### 4.3. Оценки спектральных плотностей потоков. Ошибки измерений

Дальнейший этап — калибровка амплитуды исследуемых объектов по плотности потока излучения на основании полученных оценок для калибровочных радиисточников. Стандартная процедура оценки спектральной плотности потока описана подробно в работах [3, 9, 18, 19]. Список калибровочных объектов, значения плотностей потоков, поправки на линейную поляризацию и угловой размер хранятся в базе данных системы (см. таблицу 1). Здесь: первая колонка — имя источника, (2) — имя по координатам RA и DEC (эпоха 2000.0), колонки (3)–(10) — принятые значения плотностей потоков на соответствующих частотах. В работе используется абсолютная шкала потоков [20–22], ее ошибки составляют

Характеристики калибровочных объектов

Источник	Имя (RA, DEC)	Частота, ГГц							
		21.7	11.2	8.2	7.7	4.8	2.3	1.3	1.1
3C 48	013741 + 330940	1.21	2.43	3.32	3.57	5.62	10.77	17.13	22.33
J 0237 – 23	024008 – 230916	1.00	1.18	1.55	1.64	2.66	4.74	5.78	6.41
4C +76.03	041045 + 765645	1.28	1.79	2.17	2.26	2.97	4.32	5.83	6.36
3C 138	052109 + 163822	1.07	1.93	2.45	2.62	3.75	6.15	8.59	10.23
3C 147	054236 + 495106	1.81	3.60	4.91	5.21	8.06	15.08	22.85	28.96
3C 161	062709 – 055311	1.25	2.79	3.94	4.21	6.79	12.97	19.88	24.10
J 1154 – 35	115421 – 350529	0.85	1.49	1.91	2.01	2.93	4.59	6.32	7.76
3C 286	133108 + 303033	2.61	4.23	5.32	5.52	7.52	11.50	15.56	17.20
3C 286 new	133108 + 303033	2.56	4.15	5.18	5.41	7.51	11.58	15.37	16.70
4C +12.50	134733 + 121739	1.12	1.76	2.04	2.12	2.95	4.13	5.26	6.02
3C 295 new	141120 + 521209	0.99	2.39	3.51	3.78	6.51	14.29	23.90	27.18
3C 309.1	145907 + 714020	1.01	1.78	2.29	2.41	3.47	5.85	8.49	9.41
NGC 7027	210701 + 421410	5.71	6.10	5.95	5.93	5.05	3.00	1.15	0.81

10% на 21.7 ГГц и 3–5% на остальных частотах РАТАН-600. Данные о линейной поляризации взяты из работы [23].

Для РАТАН-600 эффективная площадь  $A_{\text{eff},\nu}(h)$  (на частоте  $\nu$ ) зависит от высоты наблюдаемого источника [24]. Наблюдаемая спектральная плотность потока  $S_{\nu,\text{vis}}$  определяется из известного соотношения [25]:

$$S_{\nu,\text{vis}} = \frac{2kT_{a,\nu}}{A_{\text{eff},\nu}(h)} = g_{\nu}(h) T_{a,\nu},$$

где

$$g_{\nu}(h) = \frac{2k}{A_{\text{eff},\nu}(h)}.$$

Здесь  $T_{a,\nu}$  — антенная температура,  $k$  — постоянная Больцмана,  $g_{\nu}(h)$  — коэффициент, отражающий изменение эффективной площади антенны с высотой  $h$ . Функция  $g_{\nu}(h)$  (мы называем ее «калибровочной кривой») строится для набора высот, определяемых высотами используемых калибровочных источников и аппроксимируется полиномом второй степени (назовем эту функцию  $\tilde{g}_{\nu}(h)$ ) для всех возможных высот наблюдения (см. рис. 3).

При построении калибровочных кривых видимый поток  $S_{\nu,\text{vis}}$  от калибровочного радиоисточника пересчитывается к истинному радиопотоку  $S_{\nu}$  согласно формуле:

$$S_{\nu} = g_1 g_2 S_{\nu,\text{vis}},$$

где коэффициент  $g_1$  учитывает угловые размеры, а коэффициент  $g_2$  — поляризацию калибровочных источников.

Значения коэффициента  $g_1$  взяты нами из работы [26]. Исключение составляет планетарная туманность NGC 7027, для которой считается [18], что ее изображение есть равномерный диск с диаметром  $D = 8''$ . Коэффициент для учета размеров источника определяется по формуле:

$$g_1 = \sqrt{\frac{x^2}{1 - \exp(-x^2)}}, x = \frac{D}{1.2\phi_{Fx}},$$

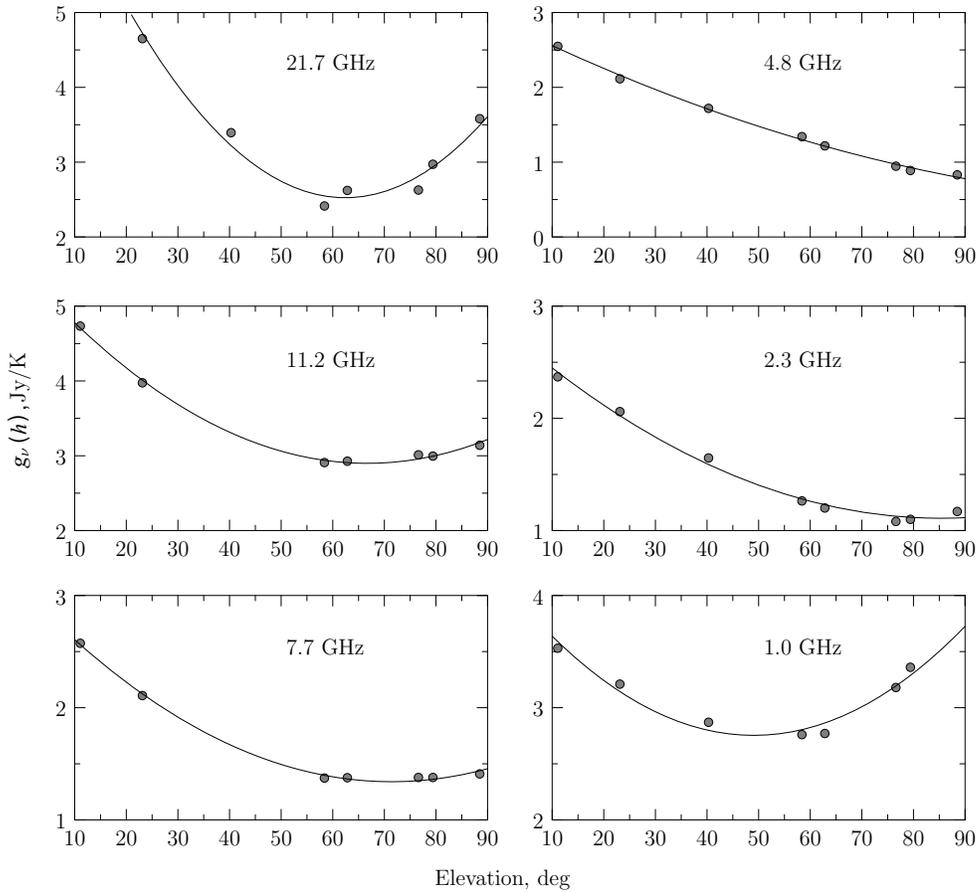
где  $\phi_{Fx}$  — горизонтальный угловой размер ДН.

Учет поляризации калибровочного источника производится согласно известной формуле [25]:

$$g_2 = \left[ \frac{1-p}{2} + p \cos^2 \left( \frac{\psi}{2} \right) \right].$$

Здесь  $\psi$  — угол между плоскостью поляризации источника и антенны на сфере Пуанкаре. Величина  $g_2$  является коэффициентом связи волны от источника с антенной. Для источников, поляризованных только линейно,  $\psi = 2(\lambda_a - \lambda_i)$ , где  $\lambda_a$  и  $\lambda_i$  — позиционные углы поляризации источника и антенны.

В настоящее время на вторичном зеркале №1 на длина волн 1.38, 2.7 и 3.7 см анализаторы линейной поляризации стоят на прием вертикальной поляризации (вектор  $\vec{E}$  вертикален). Аналогично для трехчастотного комплекса «Эридан»



**Рис. 3.** Калибровочные зависимости  $g_\nu(h)$  (точки) и  $\tilde{g}_\nu(h)$  (линии) для Северного сектора РАТАН-600, полученные для частот 1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц в одном из наблюдательных циклов. Зависимости отражают учет изменения эффективной площади антенны  $A_{\text{эфф},\nu}$  и атмосферного поглощения на коротких волнах от высоты радиисточника при фактических абберациях из-за поперечного смещения первичных облучателей от электрической оси телескопа.

(вторичное зеркало №2). Для учета поляризации калибровочных источников угол  $\psi$  рассчитывается исходя из того, что позиционные углы анализаторов радиометров  $\lambda_a$  для Северного сектора и Южного сектора с Перископом составляют  $90^\circ$ .

В случае когда сами исследуемые источники не являются точечными, вводится поправка на «конечность» размеров источника, которая принимает значения больше 1 (угловые размеры источника больше размеров ДН телескопа  $\phi_i \gg \phi_F$ ). Для источника с гауссовым распределением радиояркости и при аппроксимации гауссианой такая поправка  $K$  определяется соотношением:

$$K = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\phi_{ix}}{\phi_{Fx}}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{\phi_{iy}}{\phi_{Fy}}\right)^2\right]},$$

где  $\phi_{ix}$  и  $\phi_{iy}$  — горизонтальный и вертикальный угловые размеры источника,  $\phi_{Fx}$  и  $\phi_{Fy}$  — горизонтальный и вертикальный угловые размеры диаграммы, которые можно определить по известным точечным источникам. Значение коэффициента  $K$

для измерений на РАТАН-600 зависит только от соотношения  $\phi_{ix}/\phi_{Fx}$ , так как вторым множителем под знаком корня можно пренебречь ( $\phi_{iy}/\phi_{Fy} \ll 1$ ) из-за большого вертикального углового размера ДН РАТАН-600 в режиме наблюдений с одним сектором главного зеркала радиотелескопа ( $\phi_{Fx} \gg \phi_{Fy}$ ).

Полученные калибровочные кривые для выбранной конфигурации радиотелескопа и для всех длин волн применяются при пересчете антенных температур в плотности потоков для всех исследуемых объектов данного наблюдательного сета (на этапе «Flux density estimation, final results,» рис. 2) согласно формуле:

$$S_{\nu,i} = K \tilde{g}_\nu(h) T_{a,\nu,i},$$

где индекс «i» относится к параметрам исследуемого объекта.

Суммарная погрешность измерений учитывает погрешность определения антенной температуры в результате аппроксимации кривой прохождения гауссианой, ошибку оценки калибровочной кривой,

ошибку определения антенной температуры по эталонному источнику шумовой мощности в радиометре. Общая относительная среднеквадратичная ошибка спектральной плотности потока определяется из соотношения:

$$\frac{\sigma_t}{S_\nu} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_c}{g_\nu(h)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{T_{a,\nu}}\right)^2},$$

где  $\sigma_t$  — значение абсолютной погрешности спектральной плотности потока  $S_\nu$ ,  $\sigma_c$  — стандартная ошибка калибровочной кривой, составляющая 2–15% на разных углах в зависимости от длины волны,  $\sigma_m$  — стандартная ошибка измерения антенной температуры  $T_{a,\nu}$ ,  $g_\nu(h)$  — функция зависимости калибровочного коэффициента от высоты установки антенны на частоте  $\nu$ . Величина  $\sigma_m$  является оценкой среднеквадратичного отклонения случайных флуктуаций антенной температуры радиостанции в течение наблюдательного сета. Итоговая относительная среднеквадратичная ошибка измерения спектральной плотности потока исследуемых объектов 5–20% на 11.2, 7.7 и 4.8 ГГц и 10–25% на 1.1, 2.3 и 21.7 ГГц.

В случае использования алгоритмов векторного осреднения многих записей радиостанции (модули *aver* или *ravr* [12]) для повышения отношения сигнал/шум ошибка уменьшается в корень квадратный из числа осредняемых записей.

#### 4.4. Оценка параметров антенной и приемных систем

Система обработки предоставляет информацию о параметрах антенной системы, таких как полуширина главного лепестка ДН ( $\phi_{Fx}$ , см. формулу для коэффициента  $K$  в предыдущем разделе), изменение эффективной площади  $A_{\text{eff},\nu}$  со временем и параметры радиометрического комплекса (блок «Telescope parameters estimation» на рис. 2). Для измерений параметров антенной системы используются наблюдения двенадцати стандартных точечных калибровочных объектов. Ежедневные измерения калибровочных объектов позволяют своевременно обнаруживать отклонение экспериментальных значений указанных величин от расчетных на каждой высоте (рис. 4 для величины  $\phi_{Fx}$ ).

Теоретическая кривая полуширин получена с использованием набора расчетных диаграмм направленности методом, описанным в работе [27].

Также система обработки графически представляет нормированные значения сигнала калибровки и среднего уровня сигнала для каждого из радиометров полной мощности (рис. 5), что позволяет оперативно реагировать на возможные неисправности в радиометрах.

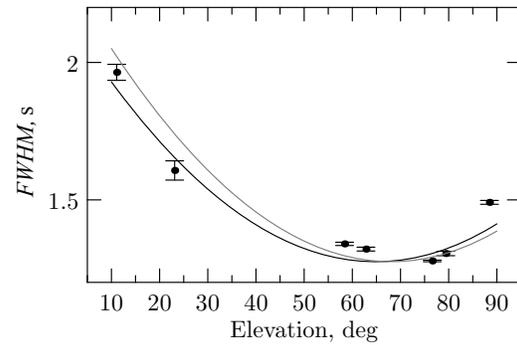


Рис. 4. Зависимость полуширины точечных калибровочных источников на частоте 11.2 ГГц (апрель 2015 г.) от высоты установки антенны (черная линия) в сравнении с теоретической кривой (серая линия), полученной с помощью набора расчетных диаграмм направленности [27] РАТАН-600.

Каждая точка на графиках рис. 5 соответствует одному из двух измерений значений  $V_{\text{sys}}$  и  $V_{\text{calib}}$  (рис. 6).

Рассмотрим нижнюю кривую, представленную на рис. 5. При постоянном калибровочном сигнале и переменном усилении в радиометре напряжение на выходе радиометра полной мощности можно записать в форме:

$$V_{\text{sys}}(t) = k T_{\text{sys}} B \gamma G(t),$$

где полное усиление  $G(t)$  меняется со временем. Здесь  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_{\text{sys}}$  — температура системы «радиотелескоп + радиометр»,  $B$  — СВЧ-полоса радиометра,  $\gamma$  — вольт-ваттная характеристика квадратичного детектора. При включении постоянного калибровочного сигнала  $V_{\text{calib}}$  напряжение на выходе радиометра получает добавку, равную:

$$V_{\text{calib}}(t) = k T_{\text{calib}} B \gamma G(t).$$

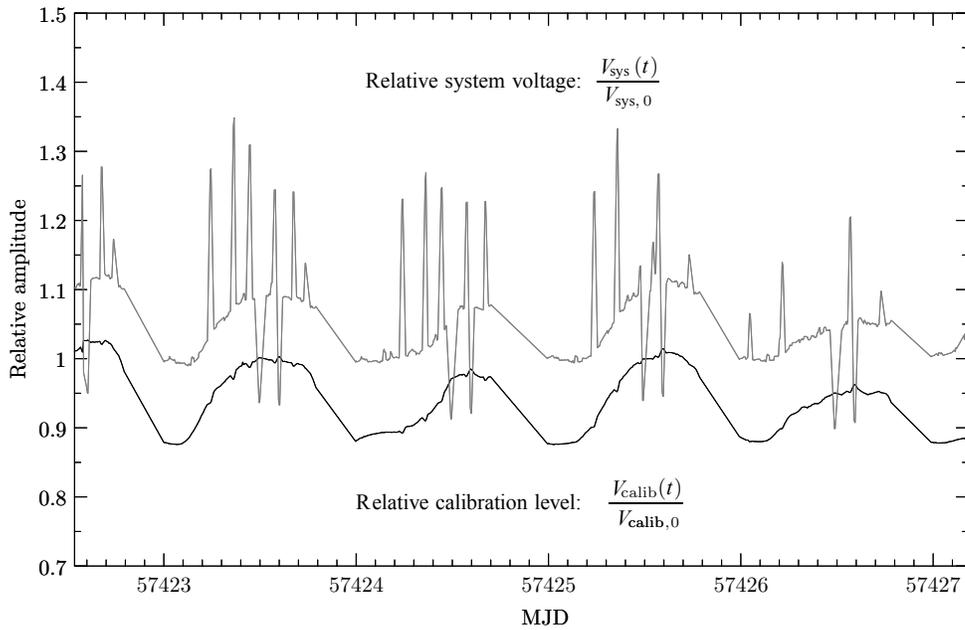
Эта величина напряжения измеряется во время процедуры калибровки радиометра. Если зафиксировать в произвольный момент времени  $t = t_0$  значение  $V_{\text{calib}}(t)$  (назовем его  $V_{\text{calib},0}$ ) — это напряжение будет соответствовать какому-то конкретному усилению, назовем его  $G_0$ . Тогда для любого другого момента времени можно записать:

$$V_{\text{calib}}(t) = k T_{\text{calib}} B \gamma G_0 g(t) = V_{\text{calib},0} g(t),$$

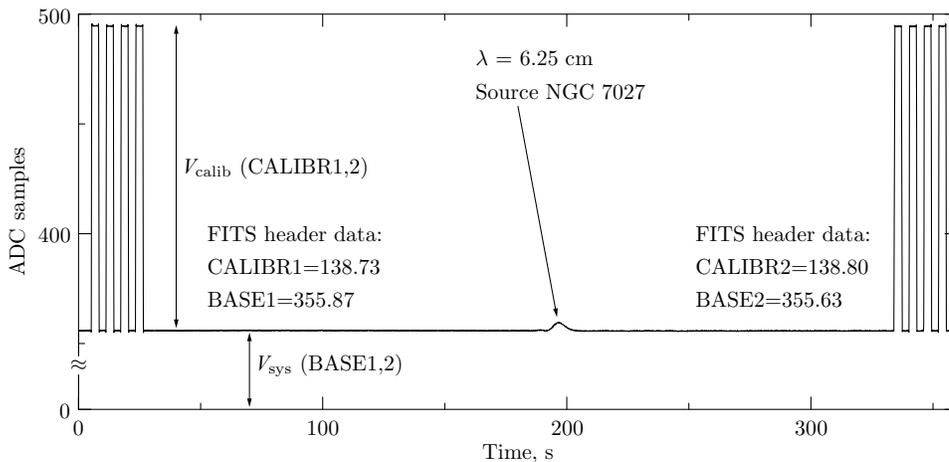
где  $g(t)$  — переменная часть усиления. Нижняя кривая на рис. 5 представляет величину

$$\frac{V_{\text{calib}}(t)}{V_{\text{calib},0}} = g(t),$$

то есть демонстрирует относительные изменения усиления со временем (относительно усиления  $G_0$ ). Кривые на рис. 5 приведены для одного из



**Рис. 5.** Графики относительного уровня сигнала радиометра полной мощности (верхняя кривая) и относительного уровня калибровочного сигнала (нижняя кривая), построенные для выбранного наблюдательного сета. Пики на верхней кривой соответствуют большому отклонению величины  $\Delta T_{\text{sys}}(t)$ , от величины  $\Delta T_{\text{sys},0}(t)$ , вызванному наблюдениями на разных высотах над горизонтом.



**Рис. 6.** Запись, соответствующая единичному наблюдению на одном из радиометров. В начале и в конце наблюдения включается калибровочный сигнал. Длительность записи соответствует времени, требуемому для того, чтобы радиосточник зарегистрировали все радиометры, последовательно расположенные на фокальной линии вторичного зеркала.

неохлаждаемых и нетермостатированных радиометров полной мощности. Усиление в радиометре является функцией температуры окружающей среды (синусоидальные суточные колебания на графике относительного калибровочного сигнала, нижняя кривая на рис. 5). Гладкое поведение этой кривой говорит об отсутствии неисправностей в системе калибровки радиометра.

Суточный ход виден и на графике относительного уровня сигнала радиометра полной мощно-

сти (верхняя кривая на рис. 5). Здесь ситуация сложнее. Запишем выражение для измеряемого напряжения на выходе радиометра полной мощности с учетом изменений температуры системы «радиотелескоп + радиометр» ( $\Delta T_{\text{sys}}$ ) и усиления со временем:

$$V_{\text{sys}}(t) = k T_{\text{sys}}(t) B G(t) \gamma.$$

Так же, как и для построения кривой относительного усиления, зафиксируем момент времени  $t_0$ , которому будут соответствовать усиление  $G_0$

и температура системы  $T_{\text{sys},0}$  и выходное напряжение радиометра  $V_{\text{sys},0} = k T_{\text{sys},0} B G_0 \gamma$ . Тогда в любой другой момент времени усиление  $G(t)$  будет равно  $G_0 g(t)$ , а температура системы будет равна  $T_{\text{sys},0} + \Delta T_{\text{sys}}(t)$ . Подставив в формулу для  $V_{\text{sys}}$  (см. первую формулу этого раздела) эти зависимости и разделив полученное выражение на  $V_{\text{sys},0}$ , окончательно получим:

$$\frac{V_{\text{sys}}(t)}{V_{\text{sys},0}} = \left( 1 + \frac{\Delta T_{\text{sys}}(t)}{T_{\text{sys},0}} \right) g(t).$$

Из этого выражения видно, что относительные изменения уровня сигнала радиометра полной мощности отражают произведение  $\Delta T_{\text{sys}}(t) g(t)$ . Вклад каждого из сомножителей в это произведение представляет отдельный интерес для радиометристов и является предметом текущих исследований.

Измерения хода усиления радиометра, представленные на рис. 5, вместе с измерениями физической температуры в приемной кабине вторичного зеркала позволили численно оценить температурную зависимость усиления радиометров. Она примерно равна 1.1% на 1°C в рабочем температурном диапазоне радиометров (10–30°C).

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Представленная система обработки радиоастрономических наблюдений прошла успешную апробацию, результаты опубликованы, например, в [8–10, 15]. Впервые автоматизирована полная процедура обработки наблюдений компактных объектов, включающая:

- расчет калибровочных зависимостей на всех длинах волн;
- измерение спектральных плотностей потоков радиосточников на нескольких частотах одновременно, построение кривых блеска;
- построение радиоспектров источников;
- измерение основных параметров радиотелескопа: изменения эффективной площади  $A_{\text{eff},\nu}$  и ширины главного лепестка ДН антенны  $\phi_{Fx}$ ;
- оценку основных параметров качества радиометров континуума.

Автоматизация процесса обработки наблюдательных данных радиотелескопа РАТАН-600 становится все более актуальной в связи с запланированным увеличением числа радиометров континуума.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Ю. А. Ковалеву за полезные замечания и обсуждение результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт №14.518.11.7054) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект №12-02-31649).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. V. Korolkov and Yu. N. Pariiskii, *Sky Telesc.* **57**, 324 (1979).
2. Y. N. Parijskij, *IEEE Antennas Propagation Mag.* **35**, 7 (1993).
3. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, N. N. Bursov, et al., *Astronomy Reports* **51**, 343 (2007).
4. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, N. S. Kardashev, and M. G. Larionov, *Astronomy Reports* **53**, 487 (2009).
5. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, M. G. Larionov, and A. K. Erkenov, *Astronomy Reports* **55**, 187 (2011).
6. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **536**, A15 (2011).
7. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **536**, A18 (2011).
8. P. Giommi, G. Polenta, A. Lähteenmäki, et al., *Astron. and Astrophys.* **541**, A160 (2012).
9. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, I. Tornainen, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, A25 (2012).
10. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 262 (2013).
11. N. N. Bursov, PhD Thesis (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 2002).
12. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.*, **125**, 46 (1997).
13. Y. A. Kovalev, Doctoral Dissertation in Mathematics and Physics (Physical Inst. RAS, Moscow, 2003).
14. O. V. Verkhodanov, V. K. Kononov, E. K. Majorova, and P. G. Tsybulev, Report No. 233, SAO RAS (Spec. Astrophys. Observ., Nizhnij Arkhyz, 1994).
15. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, R. Y. Udovitskiy, et al., *Astron. and Astrophys.* **572**, A59 (2014).
16. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, O. P. Zhelenkova, et al., Report No. 200, SAO RAS (Spec. Astrophys. Observ., Nizhnij Arkhyz, 1991).
17. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 109 (2011).
18. K. D. Aliakberov, M. G. Mingaliev, M. N. Naugolnaya, et al., *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **19**, 60 (1985).
19. M. G. Mingaliev, V. A. Stolyarov, R. D. Davies, et al., *Astron. and Astrophys.* **370**, 78 (2001).
20. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
21. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
22. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **204**, 19 (2013).
23. H. Tabara and M. Inoue, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **39**, 379 (1980).

24. Y. N. Pariiskii, *Izv. Glavnoj Astron. Obs.* **188**, 149 (1972). *Astron. and Astrophys. Suppl.* **139**, 545 (1999).
25. J. D. Kraus, *Radio Astronomy*, 2nd ed., (Cygnus—Quasar Books, Powell, 1986).
26. Y. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Y. A. Kovalev, et al., *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **9**, 71 (1977).

## Automated System for Reduction of Observational Data on RATAN-600 Radio Telescope

**R. Yu. Udovitskii, Yu. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, P. G. Tsybulev, G. V. Zhekanis, and N. A. Nizhelskii**

We present the automated system for estimating the parameters of radio sources observed on all available continuum radiometers (two receiving complexes of secondary mirrors No. 1 and No. 2 with a total of 30 radiometers) developed at RATAN-600 radio telescope and put into normal operation. The system is also used for the monitoring of the parameters of the antenna and receiving systems of RATAN-600 radio telescope, which is carried out using current measurements of calibration radio sources.

Keywords: *radio continuum: general—methods: observational—techniques: radar astronomy*