

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 120, № 2, 30–35 (2024)

УДК 520.8

## Методика обработки обзора неба на склонении Крабовидной туманности на РАТАН-600

*Н.Н. Бурсов, А.А. Кудряшова*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия  
*nmb@sao.ru*

Поступила в редакцию 15 ноября 2023 г.

**Аннотация.** В работе описан метод обработки обзора неба, проводимого в азимуте  $270^\circ$  с использованием стационарной антенны западного сектора РАТАН-600 на склонении пульсара в Крабовидной туманности. Наблюдения проводились в 2018–2019 гг. на комплексе из трех четырехканальных радиометров на центральной частоте наблюдений 4.7 ГГц. Были рассмотрены и учтены особенности прохождения источников под параллактическим углом через диаграмму направленности антенны при расположении входных рупоров радиометров вдоль фокальной линии вторичного зеркала. Обработка проведена для выборки из 205 источников с  $S/N > 50$  ( $S_{4.7} > 15$  мЯн). Для обнаруженных и отождествленных источников выборки рассчитаны эфемериды на эпоху наблюдений в зависимости от их выноса относительно центра диаграмм направленности телескопа в каждом приемном рупоре радиометров. В процессе накопления данных проводилась коррекция измеренного положения источников, а также учитывалось влияние температуры окружающей среды на усиление радиометров в течение года наблюдений. Предложенный метод позволяет в среднем с точностью до 1–2 секунд времени определять положение обнаруженных источников и с точностью до 5–10 % определять плотности потоков.

**Ключевые слова:** радиотелескоп, наблюдения, анализ данных, методы обработки данных

## 1 Введение

Обзоры неба являются традиционным методом наблюдений в радиоастрономии. В обзорах обнаруживаются объекты, по которым в дальнейшем проводятся комплексные исследования. Первый поисковый радиообзор в СССР был проведен в Крымской астрофизической обсерватории на радиотелескопе РТ-22 в 1969 г. на короткой волне 3 см и с ожидаемым порогом обнаружения источников более 1 Ян. В его подготовке, а также в создании комплекса аппаратурно-программных средств участвовали ГАИШ МГУ и МГПИ им. Ленина (Вольвач, Ларионов, 2008). Первый глубокий обзор на радиотелескопе РАТАН-600 на склонении источника SS 433 был проведен в 1981 г. на волне 7.6 см с рекордной чувствительностью по плотности потока  $S_{3.9} < 7.5$  мЯн (Pariiski et al., 1991). С 2017 года проводятся круглосуточные обзоры неба на разных склонениях на западном секторе РАТАН-600 с помощью комплекса трех-четырёх четырехканальных радиометров на центральной частоте 4.7 ГГц (Bursov et al., 2022).

РАТАН-600 является пассажным телескопом, в наблюдениях на котором измеряется антенная температура неба в зависимости от звездного времени при прохождении участка неба через неподвижную диаграмму направленности (ДН) телескопа за счет вращения Земли вокруг своей оси. Наблюдения проводятся в направлении на восток, где источники являются восходящими. Важной особенностью при этом является прохождение источников каждого обзора через ДН под разными углами относительно ее центрального сечения. Это влияет на форму и размер сечения ДН при ее свертке с проходящим источником. Параллактический угол  $q$ , под которым источник проходит через ДН, определяется по формуле

$$\sin q = \cos \varphi \cdot \sin Az / \cos \delta, \quad (1)$$

где азимут  $Az = 270^\circ$ ,  $\varphi = 43^\circ 49' 53''$  – географическая широта РАТАН-600 и  $\delta = 22^\circ 00' 52''$  – склонение обзора. Тогда

$$q = \arcsin(-\cos 43^\circ.83 / \cos 22^\circ.0) = -48^\circ.3(48^\circ 19' 47''). \quad (2)$$

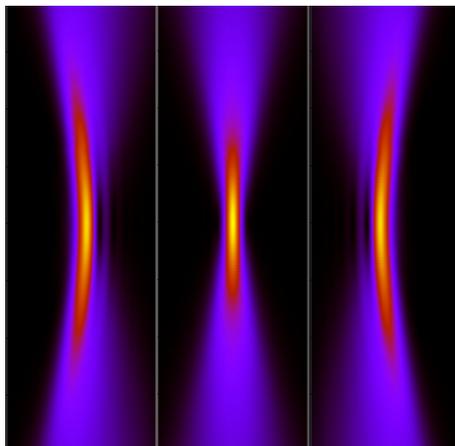
ДН РАТАН-600, несмотря на свою сложность и зависимость от высоты обзора, хорошо изучена, в том числе и для западного сектора (Majorova et al., 2023). Знание формы ДН позволяет осуществлять более точную обработку данных с разделением внеосевых источников, проходящих через входные рупора радиометров с разными сечениями ДН.

Система обработки данных на РАТАН-600 претерпела значительную эволюцию, начиная с использования бумажных носителей на самописцах и заканчивая методами построения гибкой системы обработки данных для РАТАН-600 в операционной системе Unix при помощи штатного пакета обработки FADPS (Verkhodanov et al., 2005). Этот пакет удовлетворяет всем требованиям по обработке одномерных данных, проходящих через центр ДН. Методика обработки данных источников, проходящих вне оси диаграммы направленности радиотелескопа, была изложена в работе Bursov (2003). Однако обработка данных, связанных с угловым прохождением источников через ДН при использовании неподвижной антенны, требует комплексного подхода, который описан в данной работе. Также создана методика и разработано соответствующее программное обеспечение с включением модулей пакета FADPS.

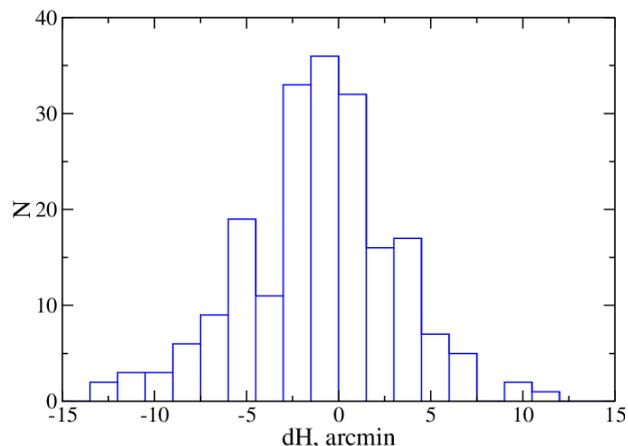
Таким образом, целью данной работы является создание методики обработки обзора при неподвижной антенне в одном из азимутов для источников, проходящих через ДН под параллактическим углом к горизонту, а также разработка соответствующего программного обеспечения.

## 2 Антенна и радиометрический комплекс

Наблюдения на западном секторе (азимут  $270^\circ$ ) РАТАН-600 при неподвижно стоящей антенне проводятся с 2017 г. В течение каждого года наблюдений неподвижная антенна направлена на заданную высоту в каждом отдельном обзоре. Данная работа основана на обзоре, проведенном на склонении пульсара в Крабовидной туманности ( $\delta = +22^\circ$ ,  $H_0 = 32^\circ 48' 47''$ ). Источники проходят через ДН с



**Рис. 1.** Расчетные ДН для трех входных рупоров радиометров с абберациями из-за поперечных выносов ( $\pm 3'$ ) на склонении Крабовидной туманности ( $\delta = +22^\circ$ )



**Рис. 2.** Гистограмма распределения выноса источников относительно центра ДН (по  $dH$ )

выносом  $dH$  относительно центра, где  $dH = H_0 - H_{src}$ . При этом, чем больше угловое расстояние источника от центра, тем больше его размер по уровню половинной мощности и меньше уровень сигнала при сохраняющемся интеграле (произведение амплитуды на полуширину), как видно на расчетных изображениях ДН (рис. 1) для каждого входного рупора радиометра – луча. Изображения построены с учетом рассчитанных аббераций вынесенных рупоров. При расчете ДН были учтены

особенности антенной системы радиотелескопа в этом режиме работы: использование вторичного зеркала увеличенных размеров, асимметричное облучение главного зеркала, а также расположение первичных облучателей (рупоров) вдоль фокальной линии вторичного зеркала (Коржавин, 1977; Majorova, 2002). Распределение источников по  $dH$  приведено на рис. 2, где видно падение числа источников с выносом. Это связано с падением чувствительности вертикальной ДН по амплитуде сигнала.

Вследствие этого, при площади обзора с яркими источниками:  $360^\circ \cdot \cos(22^\circ) \cdot 0.45^\circ \approx 150^\circ$ , их плотность составляет  $205/24h < 10$  источников на час или  $205/150^\circ \sim 1$  источник на кв. градус, что незначительно для эффекта путаницы. Тем не менее случаи блендирования источников имели место, и такие не рассматривались.

Для проведения наблюдений в континууме на РАТАН-600 использовалась новая система сбора данных и управления – ER-DAS. Это измерительная система, предназначенная для оцифровки и обработки сигналов радиометров и передачи результата по сетям Ethernet. Система ER-DAS обладает низким уровнем собственных шумов и отсутствием шума вида  $1/f$ . Тип радиометра – радиометр полной мощности с широкой полосой приема и с низким коэффициентом шума усилителя. На масштабах времени до 100 секунд чувствительность такого радиометра остается выше, чем у модуляционного (Tsybulev et al., 2018).

**Таблица 1.** Параметры радиометров приемно-измерительного комплекса пятого типа

$\lambda$ , см	$f_0$ , ГГц	$\Delta f$ , ГГц	$T$ , мк/с	$T_n$ МШУ, К	$T_a$ , К	$T_s$ , К	Тип радиометра	Примечание
6.4	4.7	0.6 (0.15 × 4)	3.5	24–32	22	60	ПМ	3 радиометра, 12 каналов

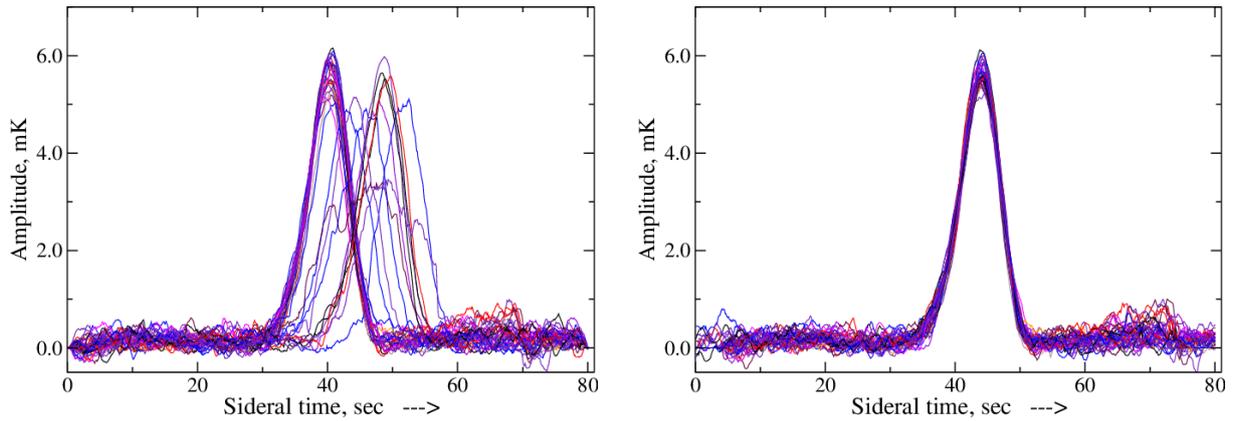
В таблице 1 представлены основные характеристики радиометров, на которых проводятся наблюдения. При этом используются следующие обозначения:  $\lambda$  – длина волны наблюдений,  $f_0$  – центральная частота наблюдений,  $\Delta f$  – полоса принимаемых частот,  $\Delta T$  – чувствительность при постоянной времени 1 секунда,  $T_n$  МШУ – шумовая температура малошумящего усилителя,  $T_a$  – шумовая температура антенны на средних углах,  $T_s$  – шумовая температура системы радиотелескоп – радиометр, ПМ – радиометр полной мощности.

### 3 Методика обработки данных

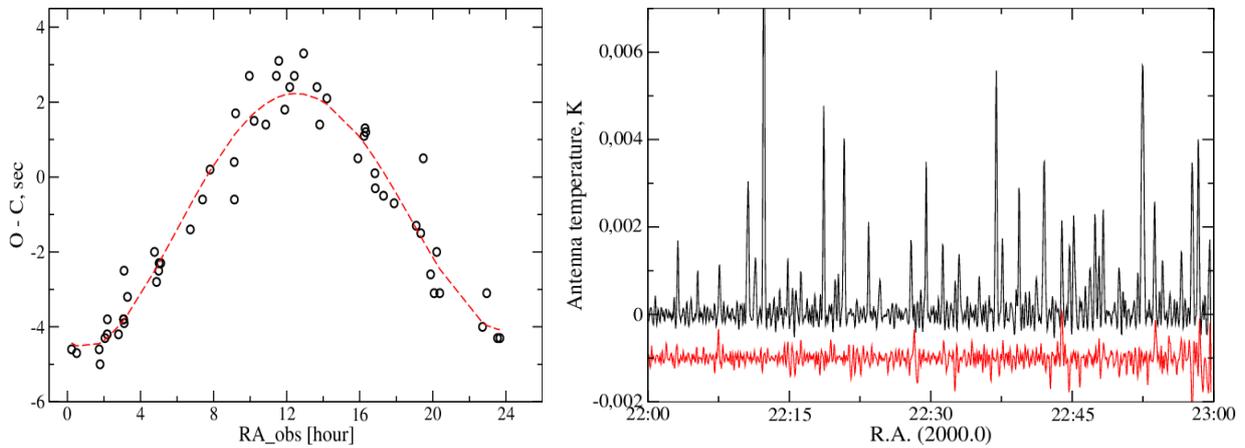
На первом этапе обработки записи, испорченные атмосферой или сбоями аппаратуры, фильтровались по дисперсии. Остальные записи в каналах радиометров усреднялись по коэффициентам связи между ними. Затем проводилось усреднение записей по каждому часу наблюдений робастным способом с использованием оценки Ходжеса – Лемана (Hodges Jr., Lehmann, 1963). Обнаружение и отождествление ярких объектов с  $S/N > 50$  на усредненных записях проводилось по координатам источников, указанных в опорном каталоге NVSS, который входит в базу астрофизических каталогов CATS (Verkhodanov et al., 1997). Положение источников вычислялось по программам эфемеридного обеспечения РАТАН-600 (KorzHAVIN et al., 2012). Смещение источников по О – С (О – наблюдаемое положение источников, С – эфемериды) относительно неподвижной антенны из-за прецессии земной оси в зависимости от прямого восхождения показано на левой части рис. 4.

Точная привязка с последующей коррекцией записей проводилась на основе выборки источников. Использовались наиболее яркие источники для синхронизации по времени и источники со стабильным излучением для коррекции амплитуды. Коррекция амплитуды источников в отсутствие калибровочных сигналов радиометров проводилась по кривым блеска Крабовидной туманности. Определение характеристик источников – видимого положения, амплитуды и полуширины, определяющей их размер, – проводилось с использованием метода гаусс-анализа. Для этого алгоритма обработки было разработано программное обеспечение, включающее модули штатного пакета обработки FADPS.

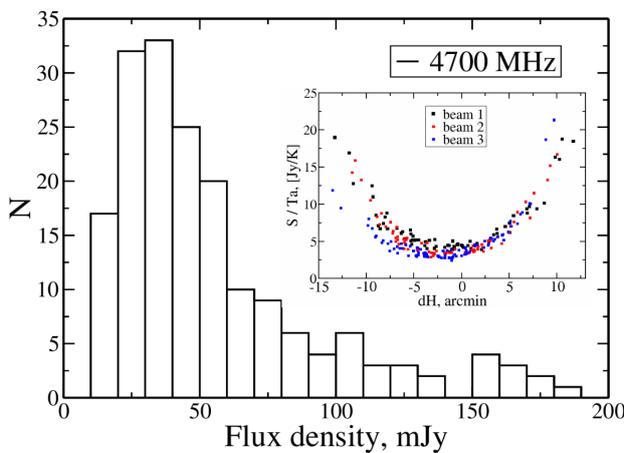
На рис. 3 представлен источник NVSS 175915+215933. На левой части рисунка изображены очищенные от помех записи, полученные в течение года наблюдений; на правой части – данные после коррекции по эфемеридам, точной привязки по времени и амплитуде, а также после учета температурного изменения усиления радиометров.



**Рис. 3.** Источник NVSS 175915+215933: слева – исходные данные, очищенные от помех, полученные в течение года наблюдений (усредненные значения за каждые 10 дней). Справа – данные после коррекции по эфемеридам, синхронизации по времени и амплитуде, а также с учетом изменения усиления радиометров



**Рис. 4.** Усреднение записей: слева – смещение положения источников вследствие прецессии в зависимости от часового угла; справа – пример накопления сигнала для полусуммы (черным) и полуразности (красным) записей для R.A. = 22 h



**Рис. 5.** Гистограмма распределения плотности потока для 205 ярких источников обзора на 4.7 ГГц; на внутреннем рисунке – калибровочные кривые по плотности потока

При накоплении данных проводилось почасовое разбиение записей на две равные по качеству группы. Полусумма – среднее двух групп для каждого часа – содержит шум и сигнал. В полуразности только шум и незначительный шум остаточной разности источников (рис. 4, справа). Для расчета дисперсии уровня шумового сигнала можно записать

$$\sigma^2 = \sigma_{(I+II)/2}^2 - \sigma_{(I-II)/2}^2. \quad (3)$$

Таким образом, на усредненных часовых записях оцениваются сигналы источников относительно записей, содержащих только шум.

Определение плотности потоков осуществляется с помощью выборки наиболее ярких источников обзора ( $S_{4.7} > 15$  мЯн) с крутыми спектрами и постоянным излучением. Значения плотности потока определяются из аппроксимации радиоспектров на частоте 4.7 ГГц. По

ним строились калибровочные кривые: отношение плотности потока каждого источника на частоте обзора ( $S_{4.7}$ ) к его антенной температуре  $T_a$  в зависимости от выноса источника от центра ДН каждого луча,  $S_{4.7}/T_a \sim f(\Delta H)$ . На рис. 5 показана гистограмма распределения спектральной плотности потока 205 источников на 4.7 ГГц, обнаруженных в обзоре. На внутреннем рисунке представлены калибровочные кривые по плотности потока для трех радиометров.

## 4 Заключение

Для обзоров неба на западном секторе РАТАН-600, проводящихся с 2017 г. по настоящее время при неподвижной антенне и в азимуте, создана методика обработки данных и сопутствующее программное обеспечение. Методика была разработана в результате обработки 205 наиболее ярких ( $S/N > 50$ ) источников обзора на склонении пульсара в Крабовидной туманности ( $\text{Dec} = 22^\circ$ ), в азимуте  $270^\circ$  на частоте наблюдений 4.7 ГГц. В методике учтены абберационные искажения диаграммы направленности антенны, коррекция записей за изменение усиления радиометров в зависимости от окружающей температуры и изменения положения источников вследствие прецессии и нутации. Предлагаемый способ обработки позволяет определять положение обнаруженных источников с точностью до 1–2 секунд времени и определять плотности потоков с точностью 5–10 %.

На основе разработанной методики сделана оценка источников обзора по плотности потока, проведены исследования радиоспектров, а также изменение потока излучения со временем.

**Благодарности.** Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука и университеты”.

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Авторы выражают благодарность рецензенту, конструктивные замечания которого помогли улучшить содержание статьи.

## Литература

- Вольвач А.Е., Ларионов М.Г., 2008. РТ-22 КраО: от Симеизского поискового обзора неба до выборки источников для полетной программы “РадиоАстрон”. Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.. Т. 104. № 5. С. 78–84. Доступно на: <https://jncrao.ru/index.php/izvcrao/article/view/822>. [Vol'vach A.E., Larionov M.G., 2008. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 104, no. 5, pp. 78–84. (In Russ.)].
- Коржавин А.Н., 1977. Астрофизические исследования (Известия Специальной астрофизической обсерватории). Т. 8. С. 53–70. [Korzhev A., 1977. Astrofizicheskie Issledovaniia (Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii), vol. 8, pp. 53–70. (In Russ.)].
- Bursov N.N., 2003. Deep sky surveys at RATAN-600 (Phd thesis). Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences.
- Bursov N., Trushkin S., Kudryashova A., et al., 2022. In Cherepashchuk A.M., Emelyanov N.V., Fedorova A.A. et al. (Eds), Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies. pp. 354–355, doi:10.51194/VAK2021.2022.1.1.141.
- Hodges Jr. J.L., Lehmann E.L., 1963. *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 34, no. 2, pp. 598–611.
- Korzhev A.N., Lyov V.N., Tokhchukova S.K., Tsekmeister S.D., 2012. *Astrophysical Bulletin*, vol. 67, no. 2, pp. 225–229.
- Majorova E., 2002. *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, vol. 53, pp. 78–94.
- Majorova E.K., Bursov N.N., Trushkin S.A., 2023. *Astrophysical Bulletin*, vol. 78, no. 3, pp. 429–442.
- Pariiski I.N., Bursov N.N., Lipovka N.M., Soboleva N.S., Temirova A.V., 1991. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, vol. 87, pp. 1–32.
- Tsybulev P.G., Nizhelskii N.A., Dugin M.V., et al., 2018. *Astrophysical Bulletin*, vol. 73, no. 4, pp. 494–500.
- Verkhodanov O.V., Trushkin S.A., Chernenkov V.N., 1997. *Baltic Astronomy*, vol. 6, pp. 275–278.
- Verkhodanov O.V., Doroshkevich A.G., Naselsky P.D., et al., 2005. *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*, vol. 58, pp. 40–50.

## Method for processing data obtained in the course of the RATAN-600 sky survey on the declination of the Crab Nebula

*N.N. Bursov, A.A. Kudryashova*

Special Astrophysical Observatory, Nizhnij Arkhyz 369167, Zelenchukskiy region, Karachai-Cherkessian Republic, Russian Federation

*nmb@sao.ru*

**Abstract.** In this paper we present the results of developing the method for processing sky survey data obtained with the static antenna of the RATAN-600 west sector ( $Az = 270^\circ$ ). The sky survey was conducted in 2018–2019 on the declination of the Crab Nebula. For signal registration, a complex of three four-channel radiometers at the central observational frequency of 4.7 GHz is used. The input horns of radiometers are located along the focal line of the secondary mirror. The passage of sources at an angle through the antenna beam pattern is considered and taken into account. For all detected and identified sources, ephemeris are calculated for the observational epoch depending on their distance to the center of the telescope's beam patterns in each receiving horn of the radiometers. During the data accumulation, the measured positions of the sources were corrected and the change in the gain of the radiometers due to ambient temperature was taken into account. The data were corrected, and the peculiarities of the passage of sources on a fixed antenna in azimuth were taken into account. A list of 205 relatively strong sources with  $S/N > 50$  ( $S_{4.7} > 15$  mJy) was obtained. The proposed method allows us to determine the position of the detected sources with an accuracy of 1–2 seconds and to determine flux densities with an accuracy of 5–10%.

**Key words:** radio telescope, observations, data analysis, data processing methods