

Проект «РадиоАстрон». Калибровка космического телескопа в полете — автоматизация обработки измерений

© А. Н. Ермаков, Ю. А. Ковалев

АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия

Реферат

Представлены первые результаты новой разработки, модернизации и внедрения автоматизированной системы массовой обработки телеметрической информации с калибровочными данными от космического радиотелескопа в полете в 2011–2019 гг. по наблюдениям радиоисточников в режиме одиночного телескопа в юстировочных сеансах — по радиометрическому выходу, после квадратичного детектирования.

Система состоит из трех ключевых программ, обрабатывающих отклики трех видов сигналов в каждом поляризационном канале каждого диапазона. Это отклики на: 1) сканирование источника, 2) включение-выключение четырех внутренних калибровочных генератора шумового сигнала и 3) собственные шумы системы. При наблюдениях первичных калибровочных источников эти данные поступают на штатную телеметрию космического аппарата от радиометрических выходов бортовых интерферометрических приемников в диапазонах 6.2, 18 и 92 см, в каналах левой и правой круговых поляризациях. Результаты позволяют контролировать состояние космического радиотелескопа и его калибровку по потоку в режимах одиночного телескопа и наземно-космического интерферометра. Они могут также быть использованы в проекте «Миллиметрон» и в других будущих космических проектах.

Ключевые слова: РадиоАстрон, космический телескоп, основные параметры антенн, калибровка космического радиотелескопа, КРТ, РСДБ, телеметрия, автоматизация обработки данных.

Контакты для связи: Юрий Андреевич Ковалев (ykovalev@asc.rssi.ru).

Статья поступила в редакцию 24.08.2020, принята к публикации 08.09.2020, опубликована 30.10.2020.

Для цитирования: Ермаков А. Н., Ковалев Ю. А. Проект «РадиоАстрон». Калибровка космического телескопа в полете — автоматизация обработки измерений // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 54. С. 21–26.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.54.21-26>

RadioAstron Project. Calibration of the Space Radio Telescope in Flight — Automation of Data Processing

A. N. Ermakov, Yu. A. Kovalev

Astro Space Center, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

Goals and objectives. Our present study is intended to automate the processing of calibration measurements in special observation sets by developing the new and updating the old software. We are attempting to develop the most complete automation of the data reduction and to use the results for the analysis of antenna parameters and calibration of Space Radio Telescope (SRT).

Methods. The source data are binary files created by the standard telemetry system of the Spektr-R spacecraft with the RadioAstron Observatory on Board, based on the results of observations for astronomical calibrators in the mode of operation of the SRT as a single telescope. Automation is achieved by mass sequential processing of these files using the three key Programs. Program 1 converts input telemetry data into output text table, in which physical telemetry parameters are distributed in columns, and telemetry frames (time) are distributed in rows. Output data at wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm (in the channels of the left and right circular polarizations) are made into a common table in form of a single output file. The data come to the input of Program 2, where using the standard regression and statistics methods (including the Singular Value Decomposition and the weighted averaging methods) the amplitudes in the voltage of the calibration source, the intrinsic noise of the SRT and four internal calibration noise signal sources per each polarization channel of the each wavelength band are obtained. These voltages for each polarization channel are written to text output lines in volts (one channel — one line). The strings are sent to the input of Program 3, where they are calibrated in a standard way and converted from the text strings with the measured voltages in volts to final text strings with units of spectral flux density (Jy) and with units of antenna temperatures (in K, through a known antenna gain).

Conclusions.

1. In addition to the previous interactive processing tools, a new system CALIBR-SRT for automated reduction of radiometric data from interferometric receivers of the telescope has been developed. It was implemented in the current planned processing of observations under the RadioAstron project aimed at in-flight calibrating the SRT to the spectral flux density.

2. The system is designed to process the radiometric data obtained in special sets of measurements of primary calibration astronomical objects in 2011–2018 at the wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm for channels of right and left circular polarizations.

3. The results obtained using the System were favourably compared to those of the previous Express processing tools in interactive mode.

4. Automation of mass measurements is achieved by the coordinated processing of a large amount of data using each of the three key programs. This approach can be also applied as a basis for data processing at the wavelength of 1.35 cm also.

5. Using the CALIBR-SRT system, the results of calibration have been obtained for SRT in flight in 2015–2018 at wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm, relative to astronomical primary calibrators Cassiopeia-A and Crab Nebula in the spectral flux density scale [4] (it is presented to be published).

Keywords: RadioAstron, space telescope, main antenna parameters, SRT calibration, VLBI, telemetry, data processing automation.

Contacts: Yuriy A. Kovalev (ykovalev@asc.rssi.ru).

Received 24 August, 2020, accepted 8 September, 2020, published 30 October, 2020.

For citation: Ermakov A. N., Kovalev Yu. A., RadioAstron project. Calibration of the space radio telescope in flight — automation of data processing // Transactions of IAA RAS. 2020. Iss. 54. P. 21–26.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.54.21-26>

Введение

Как известно, космический радиотелескоп (КРТ) в полете работал 7.5 лет в двух основных режимах: как элемент наземно-космического радиоинтерферометра и как одиночный телескоп. Мониторинг его калибровки и антенных параметров обеспечивался, в основном, измерениями в режиме одиночного телескопа в юстировочных (калибровочных) сеансах наблюдений [1]. В результате от КРТ в АКЦ ФИАН поступил большой объем данных в процессе радиометрических наблюдений в режиме одиночного телескопа. Экспресс-обработка полученных данных обеспечивала также оперативное решение основных текущих вопросов управления и сопровождения проекта. Полная обработка таких массовых измерений достаточно трудоемка и требует высокого уровня автоматизации. Однако не все этапы этой работы автоматизированы в полной мере и далеко не весь полученный материал обработан. Ввиду особой важности вопросов, связанных с мониторингом антенных параметров и калибровки телескопа, была поставлена и решена новая задача — по автоматизации обработки калибровочных измерений с помощью разработки нового и модернизации прежнего программного обеспечения экспресс-обработки бортовых радиометрических данных. Цель: максимально полная автоматизация процесса обработки и применения ее результатов для анализа поведения антенных параметров и калибровки телескопа за все время полета КРТ.

Ниже описаны первые полученные положительные результаты разработки, отладки и внедрения новой системы КАЛИБР-КРТ. В начале обработки эта система использует программу АСОВИСТ [1] для первичного преобразования телеметрических данных из бинарной формы в текстовую (в табличном виде). На последующих этапах применяются две новые ключевые программы,

обеспечивающие массовую обработку антенных измерений и калибровку КРТ на трех длинах волн в двух круговых поляризациях.

Функции трех ключевых программ системы калибровки КАЛИБР-КРТ

Программа 1. Обработка телеметрических данных

Программа написана ранее на языке C в операционной системе LINUX с использованием известных свободно распространяемых программных пакетов GNU PLOT и LINUX. Она обрабатывает бинарные файлы с информацией в 512 телеметрических каналах в форматах, соответствующих 7 из 16 Программ Формирования Кадров, которые созданы штатной бортовой телеметрической системой космического аппарата «Спектр-Р» (ТМС КРТ). Разработанная программа состоит из двух относительно самостоятельных программных блоков, объединенных командным файлом.

Первый программный блок производит первичную обработку данных из телеметрического tmi-файла заданной бинарной структуры. Файл содержит последовательные кадры с телеметрируемыми параметрами КРТ (ТМ-параметрами), записанными ТМС КРТ. Результат обработки бинарного файла — табличные данные в 5 файлах текстового формата — 5 больших таблиц из 130 столбцов. Каждая строка таблицы — один кадр. Каждый столбец — один телеметрируемый параметр с научного прибора (или некоторая функция от нескольких телеметрируемых параметров, в т. ч. преобразованная от единиц аналого-цифрового преобразователя к физическим единицам).

Выходные таблицы содержат значения предварительно обработанных ТМ-параметров по каждому из двух включенных комплектов научных приборов, входящих в Бортовой Комплекс Науч-

ной Аппаратуры — БКНА (в т. ч. комплектов приборов для поляризационных каналов) [1]:

1) комплектов астрономических приемников диапазонов 6.2, 18 и 92 см и Блока Импульсной Калибровки — в файле «out_6_92cm» (это основной файл для Программы 2);

2) комплектов приемника 1.35 см {ТМ-параметры в формате «Информационно-цифрового массива (ИЦМ)» — в файле «out_1.35cm»;

3) блока водородного стандарта частоты БВСЧ (ТМ-параметры в формате ИЦМ) — в файле «out_H_maz»;

4) трех блоков научной аппаратуры — Рубидиевого стандарта частоты (БРСЧ), Формирователя гетеродинных и тактовых частот (БФГТЧ), а также Формирователя гетеродинных сверхвысоких частот (БФГСВЧ) — в файле «out_NA3»;

5) пяти других блоков научной аппаратуры (Управления и Анализа Состояний в Приборном контейнере БУАС_П, аналогичный блок в Фокальном контейнере БУАС-Ф, Селектор СВЧ, Форматор П_КРТ_Пр и блок Высоко-Информативного Радио Канала ВИРК) — в файле «out_NA5».

Второй программный блок — средства многоканальной автоматической визуализации текстовых табличных данных — фактически представляет собой «Электронный эмулятор самописца», для визуального экспресс-контроля параметров. Табличные результаты обработки телеметрии от первого блока комплекса программ здесь подаются на вход второго блока (если программно эта возможность не отключена), и после их новой обработки с использованием известных программных продуктов (LATEX и GNUPLOT), подключаемых автоматически, на выходе создается файл многостраничной графики, отображающий поведение соответствующих параметров научных приборов во времени. В описываемой ниже системе этот блок отключен, и радиометрические данные из файла «out_6_92cm» поступают на вход Программы 2.

Программа 2. Обработка радиометрических данных

Задача новой Программы 2 — взять нужные данные из соответствующих столбцов текстовой таблицы в файле «out_6_92cm» и обработать их. Обработываются все амплитуды (уровни) следующих сигналов: 1) собственных шумов системы, 2) радиометрических откликов на источник при сканировании его диаграммой направленности КРТ и 3) откликов четырех калибровочных генераторов шумового сигнала (ГШ). Отклики ГШ (основных и резервных ГШ, с высоким и низким уровнями мощности, из каждого поляризационного канала в данный канал) формируются в начале и конце каждого сеанса измерений. Сканирование в двух взаимно-ортогональных направлениях вы-

полняется в двух режимах: 1) площадки с источником в центре и 2) источника («крестом»). Из каждого поляризационного канала отбираются соответствующие радиометрические отклики и рассчитываются значения величин для собственных шумов системы, амплитуд четырех ГШ и источника, а также их погрешности (В). Результаты представляются в виде текстовой строки для их дальнейшего использования в Программе 3.

Работу Программы 2 можно подразделить на 3 этапа.

1. Выделение и загрузка необходимых телеметрических данных из таблицы, сформированной Программой 1. В этой таблице содержатся данные по двум поляризационным каналам для каждого из трех рабочих диапазонов длин волн — 6.2, 18 и 92 см — но обычно за большее время, чем «чистой» интервал времени сеанса. Поэтому на данном этапе запись «обрезается» по интервалу времени сеанса с двух сторон (см. рис. 1).

2. «Чистка» данных от коротких импульсных помех в некоторых цифровых каналах. Помехи могут наблюдаться из-за известной особенности работы телеметрической системы [1]. Устранение помех выполняется по результатам сравнения с данными в соответствующих аналоговых каналах (в них помех нет, но измерения менее точные). Примеры результатов «чистки» для всех диапазонов см. рис. 2а, 3а, 4а.

3. Измерение откликов на источник, ГШ и собственные шумы системы посредством модельной аппроксимации (в Вольтах, после квадратичного детектирования), см. рис. 2–4. В конце записи на рис. 1–4 те же ГШ, что и в начале, но иногда в другой последовательности: «ГШ-высокий-11»,

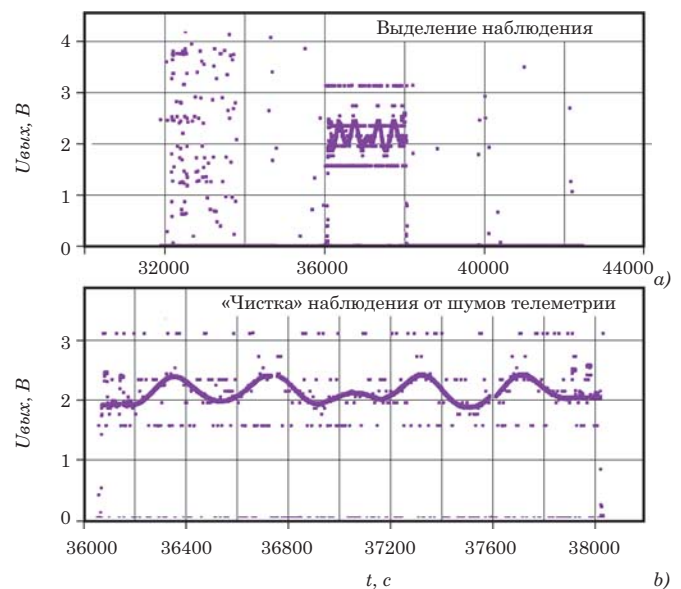


Рис. 1. а) Этап 1 и б) этап 2 на примере диапазона 92 см: выделение и начало «чистки» записи измерений

«ГШ-низкий-11» (ГШ из канала 1 в канале 1), «ГШ-высокий-21», «ГШ-низкий-21» (ГШ из канала 2 в канале 1). За ними видна реакция системы на команду выключения питания приемника (отклик вниз). Это делается в начале или/и в конце записи сеанса для измерения «аппаратурного нуля». В середине записи на длинных волнах видна реакция системы на изменение фона Галактики при перестановке КРТ на другое направление сканирования источника. Уровни собственных шумов и ГШ аппроксимируются линейной или квадратичной функциями. Отклики на источник — гауссианой. Коэффициенты аппроксимации рассчитываются по методике SVD (Singular Value Decomposition) [2]. Средние значения и их погрешности — по методике Агеяна [3] — как средневзвешенные величины. Финальная строка результатов (В) с кодом источника и канала, датой наблюдения и искомыми значениями с их погрешностями (для четырех амплитуд основных и резервных ГШ, отклика на источник и собственные шумы системы) записываются в выходной файл в текстовом формате по каждому поляризованному каналу каждого диапазона (подробнее формат строк см. ниже).

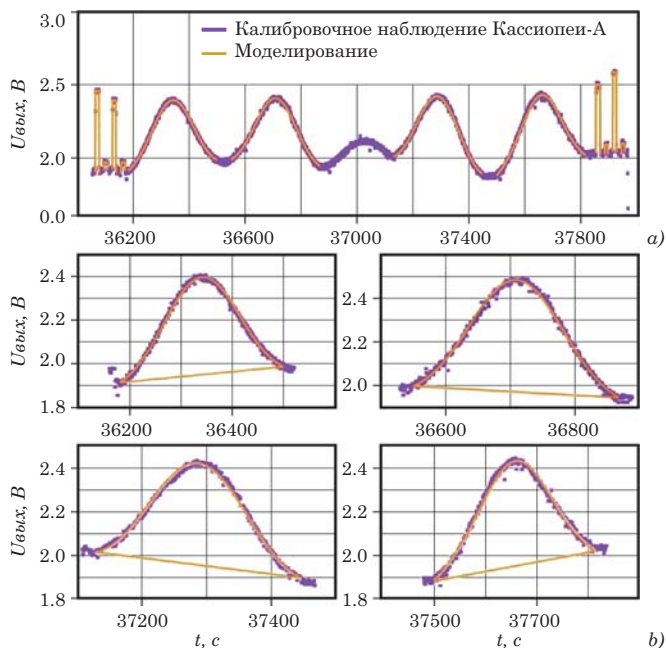


Рис. 2. Этап 3 — обработка записи после «чистки», диапазон — 92 см, канал 1, левая круговая поляризация: а) наблюдение и моделирование для типового сеанса, состоящего из четырех импульсов основных и резервных ГШ в начале и в конце записи и серии откликов на источник между ними; в центре записи — изменение уровня фона Галактики при смене оси сканирования; б) моделирование и измерение величины каждого отклика с фоном по отдельности при сканировании «крестом» («влево-вправо» и «вверх-вниз»)

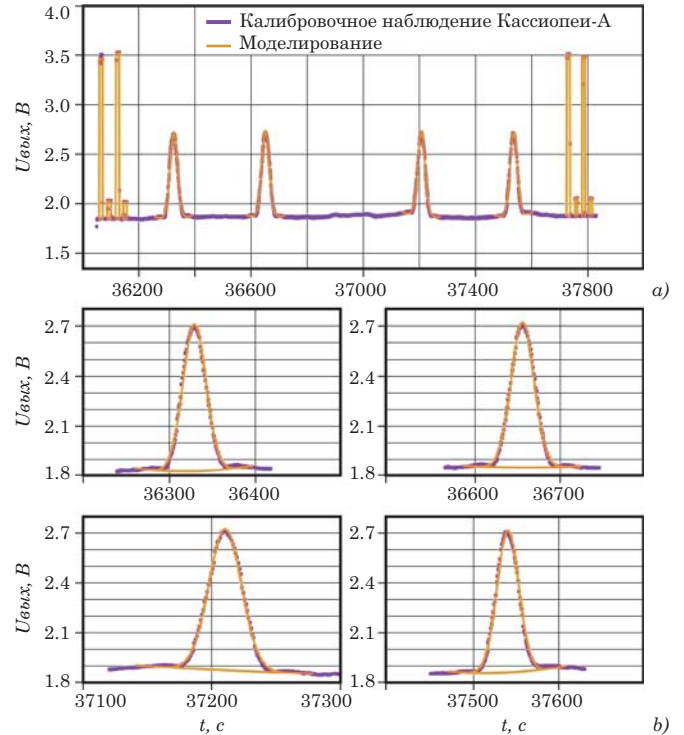


Рис. 3. Серия из 4 напряжений откликов основных и резервных калибровочных ГШ и источника (левая круговая поляризация), диапазон — 18 см, канал 1

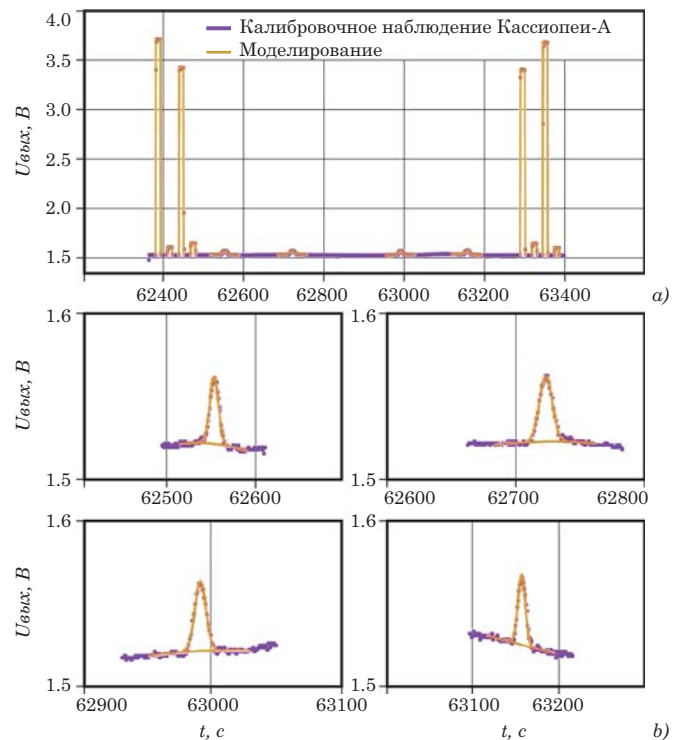


Рис. 4. Серия и 4 напряжений откликов основных и резервных калибровочных ГШ и источника (левая круговая поляризация), диапазон — 6.2 см, канал 1

Программа 3. Калибровка и анализ антенных параметров

Новая Программа 3 написана на языке С в операционной системе LINUX. Содержит набор таблиц с «паспортными» значениями величин для калибровочных источников, необходимых для дальнейшей обработки и расчета калибровки [4–7]. На ее вход поступает выходной файл Программы 2 в виде текстовых строк с результатами обработки измерений (В). На выходе к этим же строкам в выходном файле добавляются аналогичные строки того же формата и структуры, но с откалиброванными значениями предыдущих измерений уровней ГШ и шумов системы — в единицах потока (Ян) и антенной температуры (К). Методика обработки и калибровки стандартна и известна [8–9].

Расположение физических величин во всех строках файла унифицировано для удобства дальнейшего отображения и анализа результатов в графическом виде с помощью известной графической утилиты GNUPLOT (вся строка физических величин имеет одинаковую калибровку, заданную кодом в первом столбце, поэтому при отборе строк с одинаковой калибровкой (В, Ян или К) фиксированный номер столбца соответствует одной и той же физической величине, но измеренной в разное время).

Выходной файл состоит из последовательности строк фиксированного формата. Каждая строка относится к одному диапазону, поляризации каналу и дате измерения и содержит:

- 1) кодовое имя калибратора;
- 2) коды диапазона (С/Л/К) и поляризации канала (1 или 2);
- 3) дату наблюдения;
- 4) результаты обработки (в В — входные строки для контроля, Ян или К, средние значения) для:

- а) откликов и их погрешностей на включение четырех внутренних калибровочных генераторов шумового сигнала;
- б) уровня собственных шумов КРТ (средний и погрешность);
- в) отклика на источник (средний и погрешность);
- г) контрольных «паспортных» значений величин, использованных программой для данного калибратора (значение спектральной плотности потока излучения, поправка к измеренному потоку при частичном угловом разрешении и антенная температура).

Обсуждение

Обсудим работу комплекса обрабатывающих программ подробнее. Калибровка всех четырех

ГШ $F_{ns}^{(i)}$ (Ян) для отдельной круговой поляризации каждого диапазона вычисляется по формуле:

$$F_{ns}^{(i)} = F_{kal} \frac{U_{ns}^{(i)}}{U_{kal} * g}, 1 \leq i \leq 4. \quad (1)$$

Необходимо найти напряжения генератора в числителе — $U_{ns}^{(i)}$ и напряжение калибратора в знаменателе — U_{kal} (В), при условии что «паспортное» значение спектральной плотности потока излучения калибратора F_{kal} и поправка g за угловые размеры [8] калибратора известны. Таким образом, решение задачи для ГШ заключается в выделении значений амплитуд (U_{ns} и U_{kal}) из численных данных для трех диапазонов: 6, 18 и 92 см. Источник (калибратор) представляет из себя всплеск в виде гауссовой функции. Калибровка уровня собственных шумов F_{sys} определяется по аналогичной формуле:

$$F_{sys} (SEFD) = F_{kal} \frac{U_{sys}}{U_{kal} * g}. \quad (2)$$

Аналогично (1), чтобы решить уравнение, нужно найти неизвестные напряжения системы — U_{sys} и калибратора — U_{kal} . Задача решается с помощью модельной аппроксимации экспериментальных данных. Это классическая задача регрессионного анализа, суть которого сводится к операциям:

- 1) выбор полинома (математическая функция);
- 2) оценка коэффициентов полинома таким образом, чтобы модельная кривая максимально точно описывала экспериментальные данные.

Критерием качества приближения является метод наименьших квадратов, который минимизирует сумму

$$S = \sum_{i=1}^n (y_{mi} - y_{ei})^2.$$

Здесь y_{mi} — значение модели в точке i ($n > i > 1$), а y_{ei} — значение эксперимента в точке i на интервале ($n > i > 1$). Выбор полинома осуществляется аналитическим путем. Необходим такой полином, который наилучшим образом повторит экспериментальные данные. Так как калибратор представляет из себя гауссову функцию, то за модель фона (т. е. напряжения U_{sys} шума системы) берем полином второй степени и вместе с гауссовой моделью источника получаем общую функцию $Y_{sys}(x)$ вида:

$$Y_{sys}(x) = A + Bx + Cx^2 + De \frac{(x-x_0)^2}{a}.$$

Неизвестные в уравнении — это A, B, C, D, a . Их нужно найти. Заранее известно, что коэффициент будет лежать в диапазоне от n до m . Значения n, m определяются эмпирически. Для разных

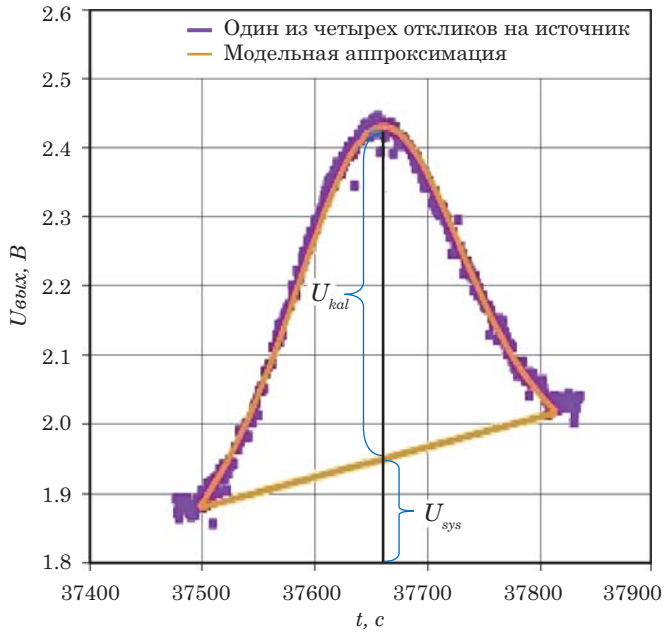


Рис. 5. Пример модельной аппроксимации одного из четырех откликов на источник на длине волны 92 см; оценка значений U_{kal} и U_{sys}

наблюдений (6, 18, 92 см) числа n , m имеют разные значения. Коэффициенты A , B , C , D определяются подпрограммой SVD (Singular Value Decomposition), написанной на Fortran и взятой из [2]. Программа находит не сразу все отклики источника, а по одному на определенном участке наблюдения. Для этого необходимо задать ширину участка X («окна», равного примерно расстоянию между ближайшими минимумами в записи наблюдения на рис. 2). С шагом в 1 отсчет программа итерируется по наблюдению, на каждом шаге определяя коэффициенты полинома в рамках интервала X .

Как только наилучшие модели для четырех откликов найдены, несложно определить значения U_{kal} и U_{sys} (рис 5).

Заключение

Суммируем основные полученные результаты.

1. Дополнительно к прежним используемым интерактивным средствам разработана и внедрена в текущую плановую обработку наблюдений по проекту «РадиоАстрон» новая система КАЛИБР-КРТ. Она автоматизирует массовую обработку данных от радиометрического выхода интерферометрических приемников для калибровки КРТ в полете.

2. Система предназначена для обработки радиометрических данных, полученных после детектирования, по наблюдениям в юстировочных сеансах в процессе измерений первичных калибровоч-

ных астрономических объектов по потоку в 2011–2018 гг. в диапазонах 6.2, 18 и 92 см, для каналов правой и левой круговых поляризаций.

3. Проведено успешное тестирование системы — сравнением результатов, полученных как с ее помощью, так и с использованием предыдущих интерактивных средств экспресс-обработки.

4. Автоматизация массовых измерений достигнута согласованной обработкой большого количества данных с помощью каждой из трех ключевых программ. Подобный подход может быть положен в основу обработки и диапазона 1.35 см.

5. При использовании новой автоматизированной системы впервые получены массовые результаты калибровки телескопа в диапазонах 6.2, 18 и 92 см по данным четырехлетних измерений КРТ в полете в 2015–2018 гг., относительно астрономических первичных калибраторов Кассиопея-А и Крабовидная туманность. Без изменений система может быть использована для обработки и контроля калибровки с помощью тех же объектов в 2011–2014 гг. С заменой «паспортных» данных объектов в таблицах Программы 3 — для других первичных калибраторов, наблюдавшихся в юстировочных сеансах с КРТ в полете в 2011–2018 гг.

Литература

1. Kardashev N. S., Khartov V. V., Abramov V. V. et al. “RadioAstron” A Telescope with a Size of 3000 000 km: Main parameters and first observational results // *Astron Rep.* 2013. Vol. 57, no. 3. P. 153–194.
2. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 280 с.
3. Агекян Т. А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков. М.: Наука, 1972. 172 с.
4. Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. K. K., Witzel A. The absolute spectrum of CAS A; an accurate flux density scale and a set of secondary calibrators // *Astron. Astrophys.* 1977. Vol. 61, no 1. P. 99–106.
5. Perley R. A., Butler B. J. An accurate flux density scale from 1 to 50 GHz // *Astrophys. J. Suppl.* 2013. Vol. 204, no. 19. 20 p.
6. Perley R. A., Butler B. J. An accurate flux density scale from 50 MHz to 50 GHz // *Astrophys. J. Suppl.* 2017. Vol. 230, no. 7. 18 p.
7. Patridge B., Lorez-Caniego M., Perley R. A., et al. Absolute calibration of the radio astronomy flux density scale at 22 to 43 GHz using Planck // *Astrophys. J.* 2016. Vol. 821, no. 1. id. 61. 13 p.
8. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 416 с.
9. Kovalev Y. Y., Nizhelsky N. A., Kovalev Y. A., et al. Survey of Instantaneous 1–22 GHz Spectra of 550 Compact Extragalactic Objects with Declinations from –30 to +43 Degrees // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1999. Vol. 139, no. 1. P. 545–554.