

Особенности калибровки космического радиотелескопа «РадиоАстрон» и радиотелескопа РАТАН-600

© Ю. А. Ковалев¹, Ю. В. Сотникова², А. К. Эркенов²,
А. В. Попков³, Л. Н. Вольвач⁴, В. И. Васильков¹,
М. М. Лисаков¹, Т. А. Семенова², П. Г. Цыбулев²

¹АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия

²САО РАН, пос. Нижний Архыз, Россия

³МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

⁴ФГБУН «КрАО РАН», пгт Научный, Россия

В статье изложены общие и специфические вопросы калибровки измерений по потоку, пути их решения применительно к радиотелескопу РАТАН-600 и космическому телескопу «РадиоАстрон» (КРТ). Проанализированы достоинства и недостатки известных методов калибровки по уровню собственных шумов системы (SEFD) и по калибровочному генератору шума.

Доказано, что для повышения точности калибровок при калибровке по SEFD целесообразно учитывать переменность температурного вклада шумов от элементов антенно-фидерного тракта с потерями, а при калибровке по генератору шума — одновременно использовать несколько независимых генераторов шума для усреднения их остаточной нестабильности. Предложена новая методика самокалибровки синхронных наблюдений на РАТАН-600. С применением данной методики впервые реализована возможность поиска и компенсации систематических ошибок калибровочной кривой при измерении спектральных плотностей потока излучения радиоисточников.

Ключевые слова: калибровка измерений, SEFD, генератор шума, космический радиотелескоп, РАТАН-600, «РадиоАстрон», параметры антенны, РСДБ.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.47.38-42>

Введение

Исторически для калибровки по потоку было принято использовать генератор шумового сигнала, или генератор шума (ГШ), при измерениях на одиночных радиотелескопах, и уровень собственных шумов системы (SEFD) — при измерениях с помощью радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Однако со временем требования к точности амплитудной калибровки в РСДБ повысились, и радиометрические тракты с ГШ были также включены в приемники для интерферометрических наблюдений. Бортовой комплекс научной аппаратуры космического радиотелескопа, являющегося космическим элементом наземно-космического интерферометра в проекте «РадиоАстрон»:

работает в четырех диапазонах длин волн, от 1.35 до 92 см, имеет по два независимых радиометрических входных канала в каждом диапазоне (для левой и правой круговой поляризации) и использует по 2 независимых ГШ в каждом из этих каналов [1–2]. При этом каждый ГШ выдает сигналы на оба канала параллельно, т. е. в каждом канале имеется по 4 калибровочных уровня. Наличие нескольких калибровочных ГШ позволяет одновременно решить проблему резервирования ГШ в условиях длительного космического полета. Радиометрический комплекс РАТАН–600 САО РАН, обеспечивающий наземную поддержку работ с КРТ мгновенными широкодиапазонными спектрами от 1.4 до 31 (24) см, традиционно использует по одному ГШ в каждом рабочем диапазоне.

Процедура калибровки

Общая методика

До использования в качестве калибровочных SEFD (F_{sys} , Ян) и ГШ (F_{ns} , Ян) измеряются относительно известной спектральной плотности потока излучения калибровочного источника (F_{cal} , Ян). Эти три спектральных плотности потока F_i обычным образом связаны с соответствующей эквивалентной шумовой температурой T_i (приведенной к точечному источнику [3]) и с эффективной площадью A_{eff} антенны: $F_i = 2kT_i/A_{eff}$. Здесь k - постоянная Больцмана, а нижним индексом $i = 1, 2, 3$ обозначены ГШ, SEFD и калибратор соответственно. Отсюда из отношений F_i , равных отношениям их откликов A, B, C по выходу радиометрических каналов, легко получаем $F_{ns} = F_{cal} \cdot A, F_{sys} = F_{cal} \cdot B, F_{sys} = F_{ns} \cdot C$, где A, B и C — напрямую измеряемые величины. Для калибровки исследуемых объектов при их частых измерениях обычно используют F_{sys} или F_{ns} , периодически контролируя их с помощью новых измерений относительно одного или нескольких калибраторов. Эта известная методика отличается от других тем, что для своего использования нигде не требует ни знания T_i , ни знания A_{eff} при измерении спектральных плотностей потоков излучения исследуемых объектов. Однако, если задача требует измерения A_{eff} антенны, то знать значение величины T_i , конечно, необходимо.

Калибровка SEFD и ГШ на КРТ

При использовании КРТ как космического плеча интерферометра в научных сеансах обычно применялась калибровка РСДБ-данных с помощью SEFD, а SEFD в индивидуальных РСДБ-сеансах измерялась относительно ГШ в радиометрических каналах приемника, соответствующих каналам с левой или правой поляризацией. В свою очередь, амплитуда ГШ калибровалась по потоку относительно астрономических калибровочных объектов в специальных калибровочных сеансах в режиме работы КРТ как одиночной антенны. Предполагалось, что SEFD может быть переменной, в отличие от ГШ. Была обнаружена заметная переменность SEFD с периодом, близким к орбитальному периоду — ~10 суток. Модельный анализ шумов системы, аналогичный анализу в [1–2], показал, что причиной измеренной переменности SEFD является штатная переменность физических температур на элементах антен-

но-фидерного тракта, включающих многочастотный блок соосных антенных облучателей и блок разделителей поляризации в каждом диапазоне. Система обеспечения теплового режима [4] поддерживала заданный режим, при необходимости переключая его на новое значение равновесной температуры в разных участках орбиты. Кроме того, в РСДБ-сеансах был обнаружен также монотонный дрейф значений SEFD, усредненных по орбите, который оказался «кажущимся», так как был вызван дрейфом мощности калибровочного ГШ, со скоростью около 5 % в год в диапазоне 1.35 см. После учета этого дрейфа остаточная случайная нестабильность ГШ оставалась в допустимых пределах +/- 5–10 % и не требовала дополнительных коррекций. Нестабильность SEFD в калибровочных сеансах наблюдений, полученная в прямых измерениях относительно первичных калибраторов Кассиопея-А и Крабовидная туманность, составила 3–5 % за 7 лет в зависимости от диапазона.

Калибровка ГШ на РАТАН-600

Многочастотные измерения и калибровка данных на РАТАН-600 обычно выполняются в меридиане с помощью ГШ. Особенности обусловлены конструкцией РАТАН-600: в меридиане калибраторы и другие источники могут измеряться лишь на фиксированных высотах — в кульминации — из-за наблюдений через неподвижную антенну, благодаря суточному вращению Земли. Поэтому охватить детальным объективным контролем «ход» калибровочной кривой от горизонта до зенита (аппроксимацией зависимости F_{ns} от высоты) между дискретными высотами измерения калибраторов до сих пор возможности не было.

«Самокалибровка» секторов РАТАН-600 по синхронным наблюдениям

В данной работе предложена и апробирована новая методика «взаимной самокалибровки» секторов РАТАН-600 по синхронным наблюдениям большого количества квазиточечных объектов, включая переменные источники и вторичные калибраторы, во всем интервале доступных склонений. Представлены первые положительные результаты тестирования этой методики в период 1–7 декабря 2017 г. на длине волны 2.7 см на секторах Северном и Южном с Плоским отражателем. Синхронно на двух секторах наблюдались в меридиане 10 калибраторов и около 100 активных ядер галактик (в качестве опорных, с потоками больше 1 Ян) из списка объектов РСДБ-обзора проекта «РадиоАстрон» в диапазоне склонений от -40 до $+49^\circ$. Впервые выполнена тонкая подстройка калибровки во всем рабочем диапазоне высот $6-95^\circ$, взаимно согласованная для секторов антенны и независимая от переменности опорных объектов. Корректность подстройки калибровки может контролироваться измерениями на полноповоротной антенне РТ-22 КраО РАН в Симеизе.

Заключение

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Для повышения точности калибровки измерений: при калибровках по SEFD целесообразно учитывать переменный вклад в собственные шумы системы от элементов антенно-фидерного тракта с потерями и перепадами

физической температуры (в соответствии с соотношениями (5.7) в [1] и (2)–(3) в [2]); или/и при калибровках по ГШ — одновременно использовать несколько независимых генераторов шумового сигнала для усреднения их остаточной нестабильности.

2. РАТАН-600 представляет собой телескоп с несколькими независимыми антенными конфигурациями. Благодаря возможности проводить на них наблюдения синхронно, предложена и впервые реализована новая методика поиска и компенсации систематических ошибок калибровочной кривой при измерении спектральных плотностей потоков радиоисточников.

3. Дальнейшее совместное развитие методики самокалибровки синхронных наблюдений и работ по лазерному исследованию кинематики движения антенных элементов [5] может значительно повысить качество и надежность результатов измерений исследуемых объектов на РАТАН-600.

Л и т е р а т у р а

1. Кардашев Н. С., Хартов В. В., Абрамов В. В. и др. «РадиоАстрон» — телескоп размером 300 000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрон. журн. — 2013. — Т. 90, № 3. — С. 179–222.

2. Ковалев Ю. А., Васильков В. И., Попов М. В. и др. Проект «РадиоАстрон». Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011–2013 гг. // Космич. исслед. — 2014. — Т. 52, № 5. — С. 430–439.

3. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973. — 416 с.

4. Тулин Д. В., Виноградов И. С., Шабарчин А. Ф. и др. Система обеспечения теплового режима космического радиотелескопа // Космич. исслед. — 2014. — Т. 52, № 5. — С. 423–427.

5. Zharov V. I., Sotnikova Yu. V. A method of determining the kinematic properties of the primary mirror elements RATAN-600 radio telescope using modern laser measuring systems // Astrophys. Bull. — 2017. — Vol. 72, no. 4. — P. 480–485.

The Features of the SRT and RATAN-600 Calibration

**Yu. A. Kovalev, Yu. V. Sotnikova, A. K. Erkenov,
A. V. Popkov, L. N. Volvach, V. I. Vasilkov,
M. M. Lisakov, T. A. Semenova, P. G. Tsybulev**

The article outlines the general and specific issues of calibration of flow measurements, their solutions for the RATAN-600 radio telescope and the RadioAstron space telescope (SRT). The advantages and disadvantages of the known calibration methods for the System noise Equivalent Flux Density (SEFD= F_{sys} , Jy) and for the calibrated Noise Signal generator (NS, F_{ns} , Jy) are analyzed. It was shown that to improve the accuracy of calibrations when calibrating using SEFD, it is advisable to take into account the variability of the temperature contribution of noise from elements of the antenna-feeder path with losses, and when calibrating using simultaneously several independent NS to average their residual instability.

We propose a new method of “self-calibration” for the RATAN-600 sectors which has been tested according to synchronous observations of a large number of quasi-point radio sources including strong variable objects and the secondary calibrators in the wide declination range. The first positive results of testing this method at wavelengths of 2.2 cm using the North and South sectors simultaneously with a Flat reflector are presented. Observations have been done during 1-7th of December 2017. We observed ten secondary calibrators in the meridian and about 100 active galactic nuclei (like calibrators too, with fluxes greater than 1 Jy) from the RadioAstron survey sample in the declination range from -40 up to $+49$ degrees. Tuning the calibration was performed for the first time: 1) in the whole elevation range of the RATAN-600 from 6 up to 95 degrees, 2) for both antenna sectors, 3) independently on the variability of the source used. The RATAN-600 is a telescope with several antenna configurations. Because of the possibility to conduct observations with them synchronously, we realized the search and compensation of the systematic errors for the calibration curves in flux density measuring.

Keywords: calibration measurements, SEFD, noise signal generator, space radio telescope, RATAN-600, RadioAstron, main antenna parameters, VLBI.