

Проект «РадиоАстрон». Калибровка космического телескопа в полете в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в 2015–2018 гг.

© Ю. А. Ковалев¹, В. И. Васильков¹, А. Н. Ермаков¹, Е. Н. Виняйкин², М. В. Попов¹, В. А. Согласнов¹, М. Г. Ларионов¹, Н. Я. Николаев¹, Е. Н. Миронова¹, М. С. Бургин¹, Ю. Ю. Ковалев^{1,3,4}, П. А. Войцик¹, М. М. Лисаков^{4,1}, А. М. Кутькин^{5,1}, А. В. Алакоз¹, Н. Н. Шахворостова¹, К. Г. Белоусов¹, А. В. Коваленко⁶

¹АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия

²НИРФИ ННГУ им. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

³МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

⁴Институт радиоастрономии им. Макса Планка, г. Бонн, Германия

⁵Институт радиоастрономии (ASTRON), г. Двингелоо, Нидерланды

⁶ПРАО АКЦ ФИАН, г. Пушино, Россия

Реферат

Представлены результаты мониторинга радиометрических измерений в юстировочных сеансах, выполненных относительно первичных калибраторов по потоку, — остатков Сверхновых Кассиопея-А и Крабовидная туманность. Данные обработаны новой автоматизированной системой, предназначенной для обработки и калибровки параметров космического радиотелескопа по данным юстировочных сеансов. Для каждого диапазона получены эквивалентные спектральные плотности потока излучения системы и калибровочные амплитуды восьми внутренних генераторов шумового сигнала (основные и резервные, Ян) для использования при калибровках наземно-космического интерферометра в каналах левой и правой круговых поляризации. Анализ показывал, что в пределах погрешности измерений все калибровки были стабильны в исследованный 4-летний период, а температуры собственных шумов космического радиотелескопа во всех диапазонах — близки к измеренным в первые два года полета.

Ключевые слова: РадиоАстрон, космический телескоп, основные параметры антенн, калибровка космического радиотелескопа, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, телеметрия, автоматизация обработки данных.

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

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

Для цитирования: Ковалев Ю. А., Васильков В. И., Ермаков А. Н., Виняйкин Е. Н., Попов М. В., Согласнов В. А., Ларионов М. Г., Николаев Н. Я., Миронова Е. Н., Бургин М. С., Ковалев Ю. Ю., Войцик П. А., Лисаков М. М., Кутькин А. М., Алакоз А. В., Шахворостова Н. Н., Белоусов К. Г., Коваленко А. В. Проект «РадиоАстрон». Калибровка космического телескопа в полете в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в 2015–2018 гг. // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 54. С. 32–39.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.54.32-39>

“RadioAstron” Project. Calibration of the Space Radio Telescope in Flight at the Wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm in 2015–2018

Yu. A. Kovalev¹, V. I. Vasil'kov¹, A. N. Ermakov¹, E. N. Vinyajkin², M. V. Popov¹, V. A. Soglasnov¹, M. G. Larionov¹, N. Ya. Nikolaev¹, E. N. Mironova¹, M. S. Burgin¹, Yu. Yu. Kovalev^{1,3,4}, P. A. Voitsik¹, M. M. Lisakov^{4,1}, A. M. Kutkin^{5,1}, A. V. Alakoz¹, N. N. Shakhvorostova¹, K. G. Belousov¹, A. V. Kovalenko⁶

¹Astro Space Center, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Radiophysical Research Institute (NIRFI), Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow

⁴Max Planck Institute for Radio Astronomy, Bonn, Germany

⁵ASTRON, Netherlands Institute for Radio Astronomy, Dwingeloo, The Netherlands

⁶Pushchino Radio Astronomy Observatory, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

Abstract

Goals and objectives. Using a new automated system, the results of processing the radiometric observations have been obtained relative to primary astronomical flux density calibrators (Cassiopea-A and Crab Nebula). The measurements had been done at the wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm in the left and right circular polarizations with the space radio telescope (SRT) in calibration sets in 2015–2018. The goals are 1) to calibrate the SRT's System Equivalent Flux Density (SEFD) and the internal calibration noise sources (Jy) as secondary calibrators for using them in calibrations of the ground-space interferometer “RadioAstron”; 2) to investigate their time stability.

Methods. The automated system converts the initial binary telemetry data from the radiometric outputs of interferometric receivers into a calibrated result for the SRT noise and four noise sources in each polarization channel. The results are calibrated in units of spectral flux density (Jy) and antenna temperature (K) to the time of observation. They are weighted averaged in the time and compared between the results obtained relative to both primary calibrators and with the earlier SEFD measurements for the SRT in flight.

Conclusions.

1. The SEFD and the internal calibration noise signal sources for the SRT were calibrated at the wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm in left and right circular polarization relative to Cassiopeia-A and Crab Nebula. They were independently used for further verification or calibration of the SRT in the operating modes for both a single telescope and for a space element of the ground-space VLBI in 2015–2018.

2. It is shown that the SEFD as measured in 2015–2018 and calibrated relative to Cassiopeia-A is close to the SEFD in the first years of SRT operation — within 11 % for 6.2 and 18 cm and within 17 % for 92 cm wavelengths.

3. The systematic differences between the calibrated values relative to Cassiopeia-A and to Crab Nebula were found at all wavelengths. Further analysis of the reasons for these differences is required.

The “RadioAstron” project is led by the Astro Space Center of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences and the Lavochkin Scientific and Production Association under a contract with the State Space Corporation ROSCOSMOS, in collaboration with partner organizations in Russia and other countries.

Keywords: RadioAstron, space telescope, main antenna parameters, SRT calibration, VLBI, telemetry, data auto reduction.

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

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

For citation: Kovalev Yu. A., Vasil'kov V. I., Ermakov A. N., Vinyajkin E. N., Popov M. V., Soglasnov V. A., Larionov M. G., Nikolaev N. Ya., Mironova E. N., Burgin M. S., Kovalev Yu. Yu., Voitsik P. A., Lisakov M. M., Kutkin A. M., Alakoz A. V., Shakhvorostova N. N., Belousov K. G., Kovalenko A. V. “RadioAstron” project. Calibration of the space radio telescope in flight at wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm in 2015–2018 // Transactions of IAA RAS. 2020. Iss. 54. P. 32–39.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.54.32-39>

Введение

Космический радиотелескоп (КРТ) проекта «РадиоАстрон» успешно работал на орбите с июля 2011 г. по январь 2019 г. в двух основных режимах работы: как одиночный телескоп и как космический орбитальный элемент наземно-космического радиоинтерферометра.

Для калибровки КРТ в режиме работы одиночного телескопа можно использовать и измерения эквивалентной спектральной плотности потока шумового излучения системы КРТ (System Equivalent Flux Density, SEFD, Ян) *относительно первичных астрономических калибраторов*, и эквивалентную спектральную плотность излучения генератора шума (ГШ, Ян), *измеренную по тем же калибраторам* [1–3]. При калибровке КРТ как элемента наземно-космического РСДБ практически единственным надежным «вторичным» внутренним калибратором оказывается только ГШ, относительно которого можно откалибровать или проконтролировать калибровку собственных шумов КРТ как элемента космического РСДБ в любой момент эксперимента. В этом случае собственные шумы КРТ при РСДБ-измерениях внегалактических объектов могут быть иными, чем при измерении в направлении на первичные калибровочные объекты (обычно расположенные вблизи плоскости Галактики и имеющие дополнительный вклад от галактического фона).

Начиная с первых юстировочных и РСДБ-измерений, за основной внутренний калибровочный ГШ в каждом поляризованном канале выбирался обычно один-два ГШ с «привязкой» его по потоку к Кассиопее-А. В данной работе мы представляем результаты массовой калибровки как собственных шумов КРТ в режиме одиночного телескопа, так и всех внутренних ГШ (основных и резервных), которые тоже могут быть использованы при калибровке КРТ в режиме интерферометра. Все измерения выполнены относительно первичных астрономических калибраторов Кассиопеи-А и Крабовидной туманности в юстировочных (калибровочных) сеансах. Это позволит как проверить и уточнить ранее выполненные калибровки, так и предоставит новые, более широкие возможности калибровки КРТ для продолжающихся работ.

Описание проекта «РадиоАстрон», а также первые результаты калибровки и измерений основных антенных параметров КРТ и их использования представлены в работах [1–2]. С основными публикациями по проекту «РадиоАстрон» можно ознакомиться на сайте АКЦ ФИАН [3].

Измерение, обработка и результаты

Для массовой работы с калибровочными данными авторы отобрали из архива АКЦ ФИАН все измерения Кассиопеи-А и Крабовидной туманности, выполненные в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в каналах левой и правой круговых поляризаций в течение 4 заключительных лет работы КРТ —

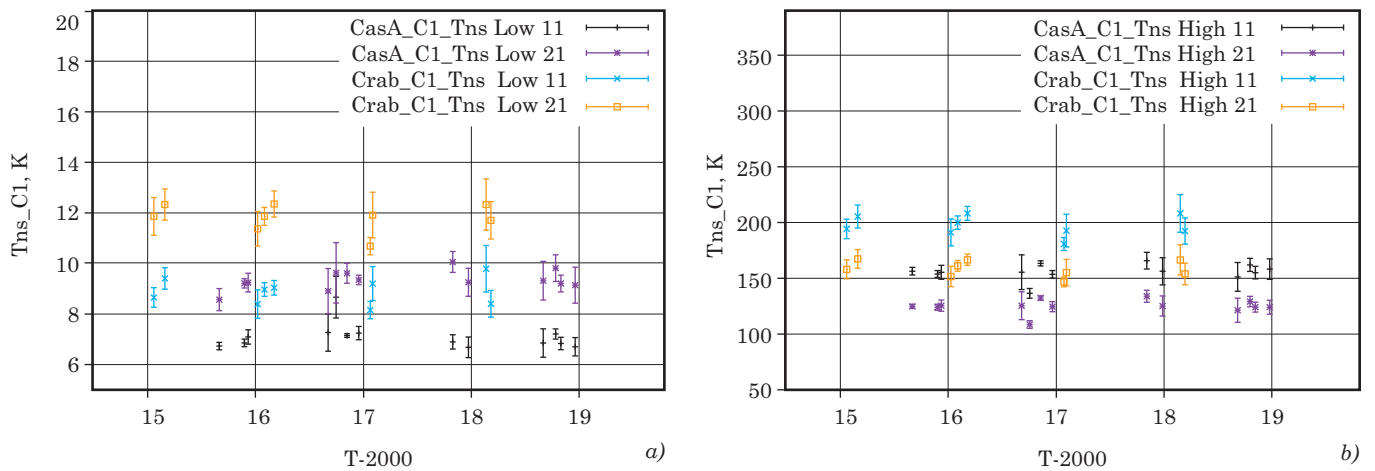


Рис. 1. Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи-А и Краба в 2015–2018 гг. в диапазоне 6.2 см в поляризационном канале 1 (код канала C1): *a* — Low (ГШ с низкими уровнями шума), *b* — High (ГШ с высокими уровнями шума). Цифровые коды каналов: первая цифра после показателя Low / High обозначает номер канала (1 или 2), в котором расположен данный ГШ, вторая — номер канала (1 или 2), куда по кабелю подается сигнал от этого ГШ. Каждый ГШ обслуживает оба канала

с 2015 г. по 2018 г. Спектральные плотности потока излучения этих источников как первичных астрономических калибраторов взяты по-прежнему из работы [4] с учетом нового анализа [5]. Используется новая система КАЛИБР-КРТ (CALIBR-SRT) автоматизированной обработки телеметрических калибровочных данных, полученных с радиометрических выходов интерферометрических приемников в юстировочных сеансах. Ключевое отличие ее от других систем экспресс-обработки в [1–2] — автоматизация этапов модельной аппроксимации и калибровки откликов КРТ на источник и ГШ по радиометрическим каналам. Использование известного метода сингулярного анализа SVD позволило оптимизировать отбор коэффициентов регрессии при обработке откликов.

Обработанные результаты суммированы на рис. 1–8 и в табл. 1–3. Они представляют собой данные мониторинга во времени для значений амплитуд внутренних калибровочных генераторов шумового сигнала (по четыре ГШ в каждом поляризационном канале каждого диапазона) и собственных шумов системы КРТ. Результаты откалиброваны в единицах эквивалентной спектральной плотности потока излучения (Ян). Для удобства и наглядности на всех рисунках и в таблицах эти данные представлены в эквивалентной антенной температуре, приведенной ко входу телескопа (К). «Пересчет» из плотности потока в температуры выполнен с помощью известных значений «усиления» антенны («antenna gain», К/Ян) — как и прежде в [1, 2] исходя из предположения, что

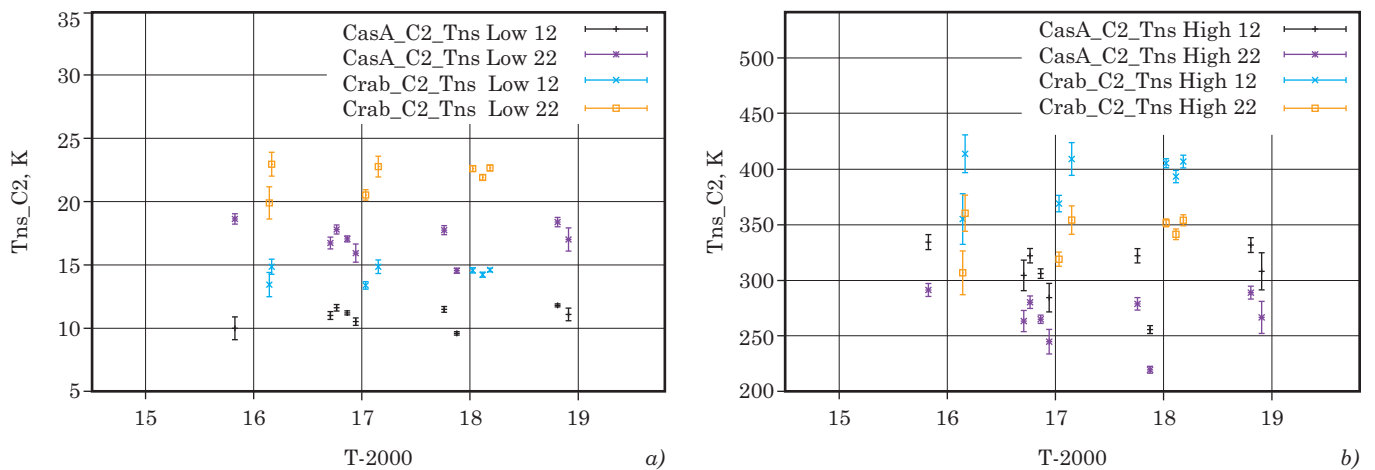


Рис. 2. Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи-А и Краба в 2015–2018 гг. в диапазоне 6.2 см, в поляризационном канале 2 (код канала C2): *a* — Low (ГШ с низкими уровнями шума), *b* — High (ГШ с высокими уровнями шума)

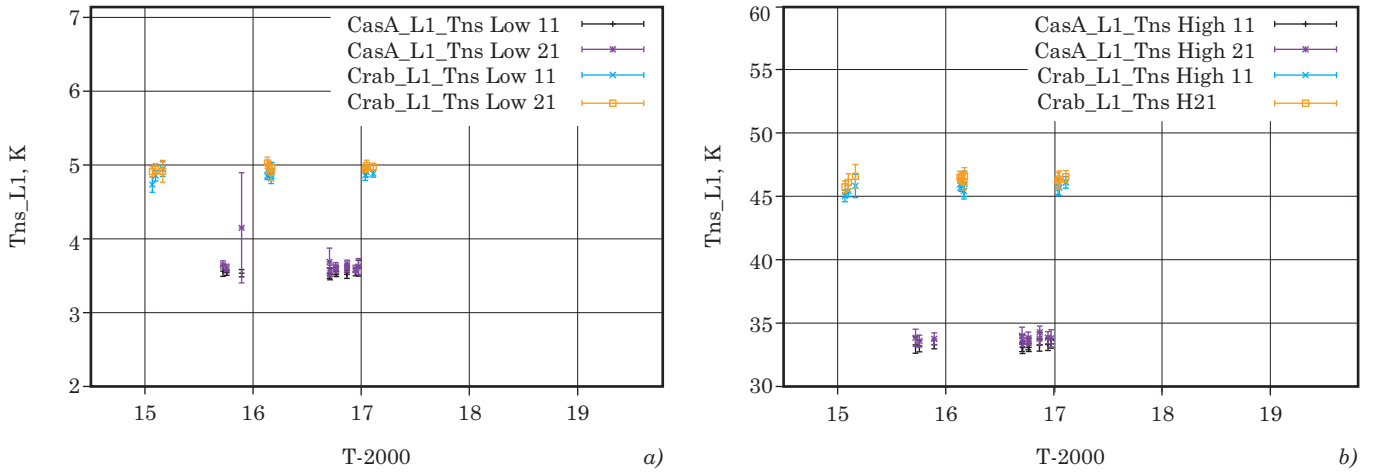


Рис. 3. Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи-А и Краба в 2015–2018 гг. в диапазоне 18 см, в поляризационном канале 1 (код канала L1): *a)* Low — ГШ с низкими уровнями шума, *b)* High — ГШ с высокими уровнями шума

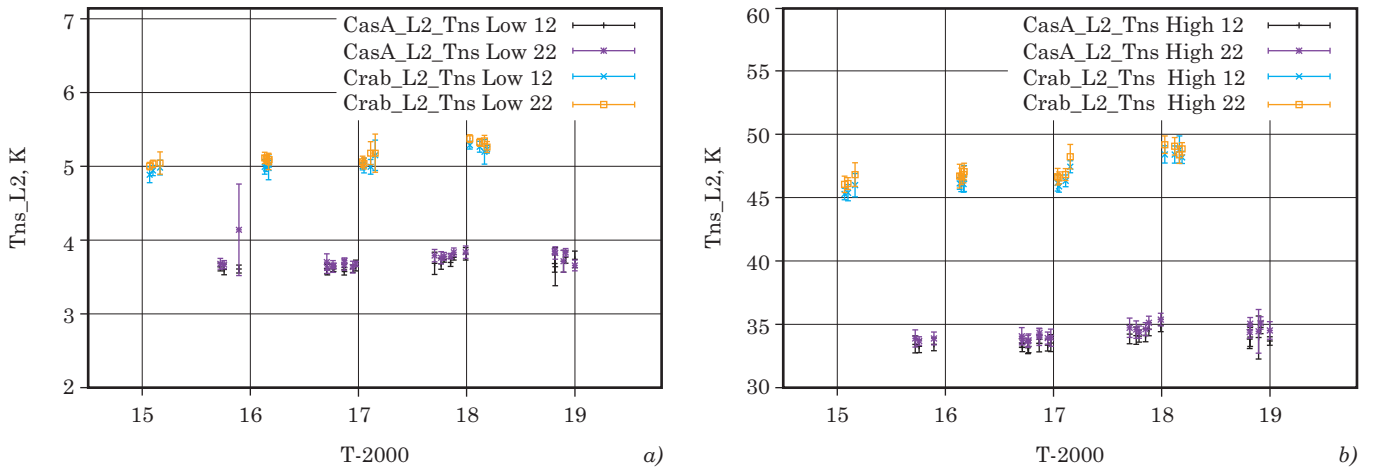


Рис. 4. Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи-А и Краба в 2015–2018 гг. в диапазоне 18 см, в поляризационном канале 2 (код канала L2): *a)* Low — ГШ с низкими уровнями шума, *b)* High — ГШ с высокими уровнями шума

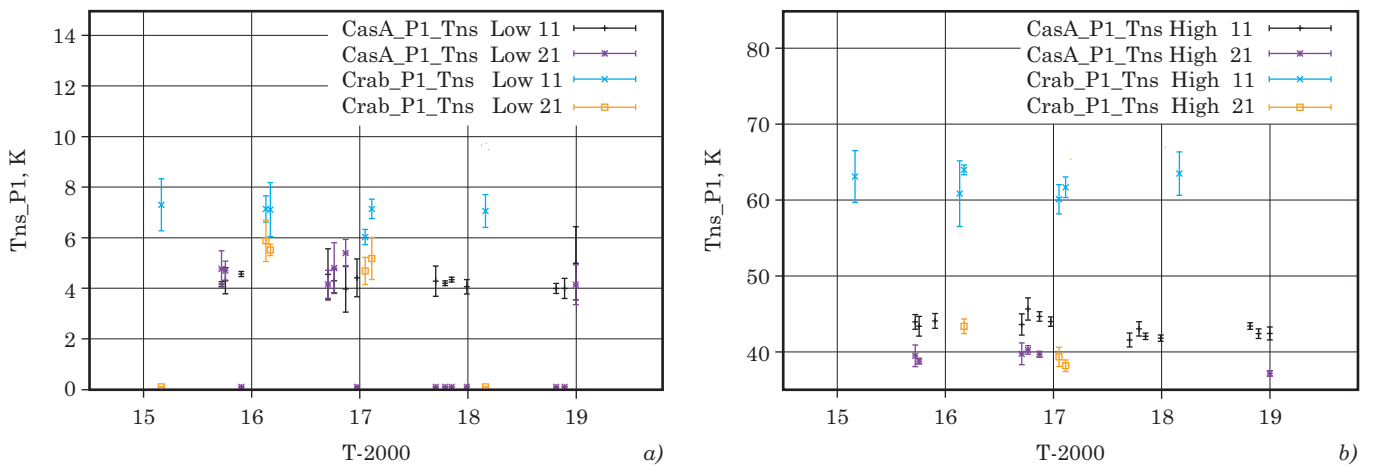


Рис. 5. Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи-А и Краба в 2015–2018 гг. в диапазоне 92 см, в поляризационном канале 1 (код канала P1): *a)* Low — ГШ с низкими уровнями шума, *b)* High — ГШ с высокими уровнями шума

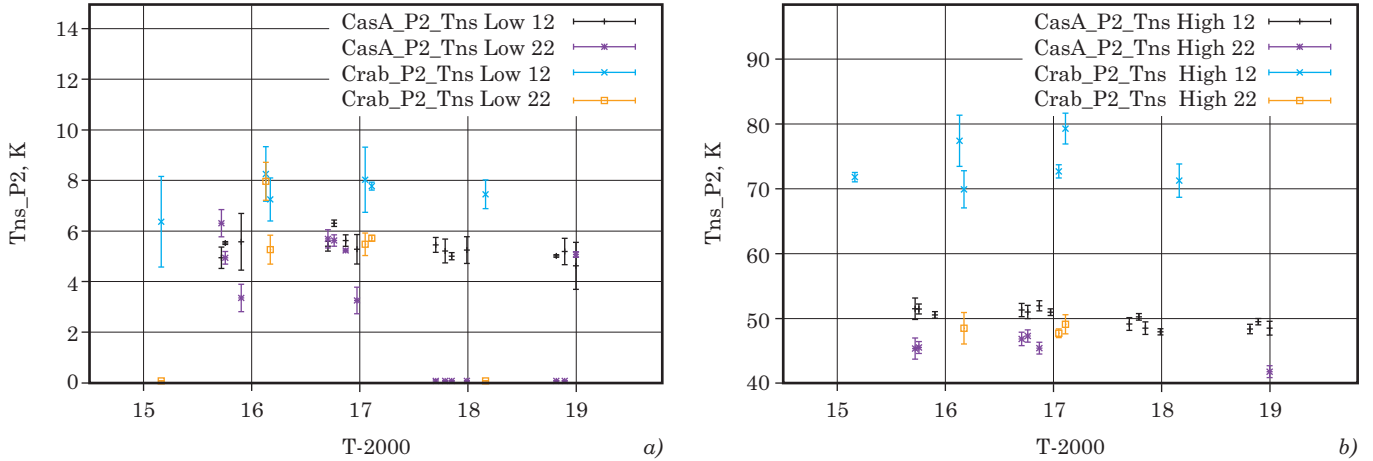


Рис. 6. Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи-А и Краба в 2015–2018 гг. в диапазоне 92 см, в поляризационном канале 2 (код канала P2): *a* — Low (ГШ с низкими уровнями шума) и *b* — High (ГШ с высокими уровнями шума)

они фиксированы и равны следующим значениям: 78.86, 67.32 и 92.00 Ян/К для диапазонов 6.2, 18 и 92 см, соответственно, см. п. 6 в табл. 2 в [2].

Для обратного перехода — от антенных температур, приведенных на рисунках и в таблицах, к эффективной спектральной плотности потока (Ян) — достаточно умножить эти значения «усиления» антенны на соответствующие значения антенных температур.

Обсуждение

На рис. 1–6 для каждого канала C1, C2, L1, L2, P1, P2 в диапазонах 6.2 (C), 18 (L) и 92 (P) см (в поляризационных каналах 1 и 2) соответственно даны значения всех ГШ в антенных температурах (К). В табл. 1 приведены их усредненные значения.

При этом в указанные погрешности в этой таблице не включены погрешности шкалы потоков, которые согласно [4, 5] примерно равны 5–10 % (по Кассиопее-А), в зависимости от диапазона частот. Аналогично на рис. 7–8 приведены результаты мониторинга собственных шумов системы КРТ (в которые автоматически входят также шумы от Галактики у калибраторов и фона неба).

Следует подчеркнуть, что измеренными для калибровок по потоку являются значения величин в спектральных плотностях потока излучения (Ян), то есть SEFD для шумов системы. Именно они нужны для астрономической калибровки КРТ в юстировочных сеансах и сеансах РСДБ (подробнее см. раздел 5.1 в [1]). Их полная погрешность

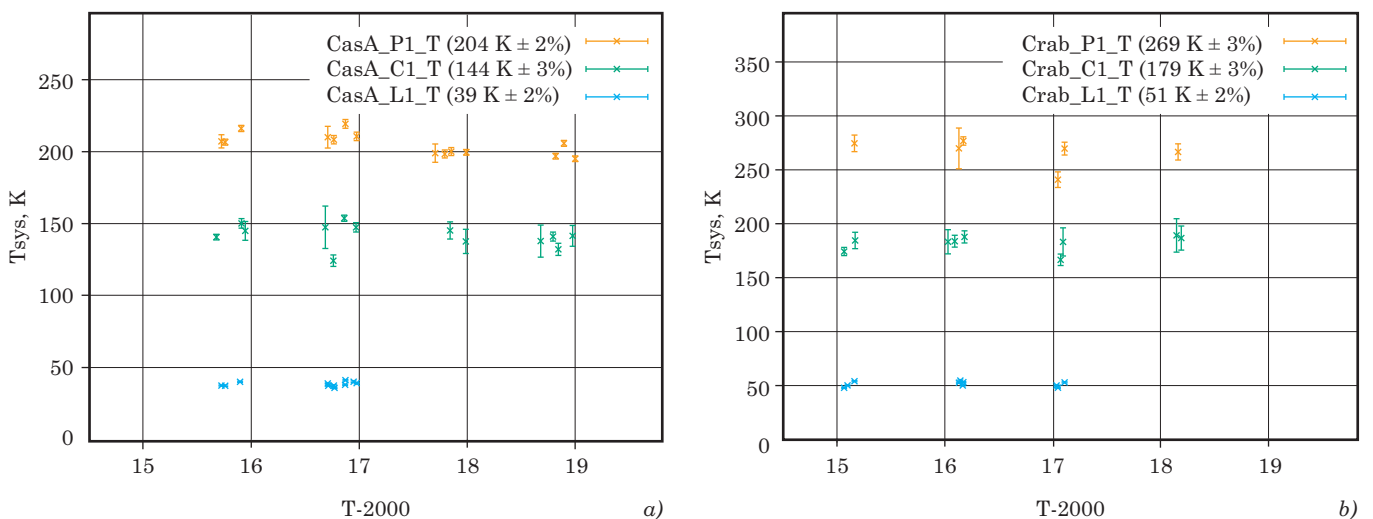


Рис. 7. Эквивалентная шумовая температура системы КРТ в диапазонах 6.2 (C1), 18 (L1) и 92 (P1) см в канале 1 (левой круговой поляризации), измеренная относительно первичных астрономических калибраторов по потоку *a*) Кассиопеи-А и *b*) Крабовидной туманности в 2015–2018 гг. В скобках приведены средние значения этих температур. Шумы Галактики не исключены. Данные в канале L1 с марта 2017 г. отсутствуют — канал вышел из строя из-за предполагаемого влияния космических лучей на электрические параметры малошумящего усилителя, вынесенного в открытый космос (подробнее см. текст статьи)

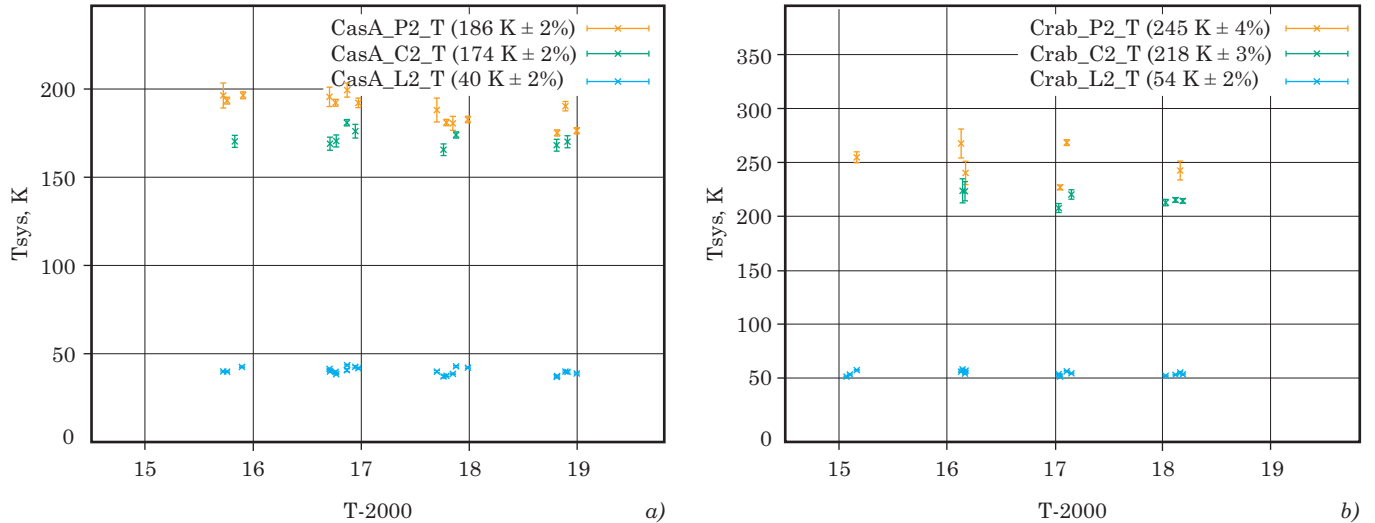


Рис. 8. Эквивалентная шумовая температура системы КРТ в диапазонах 6.2 (C2), 18 (L2) и 92 (P2) см в канале 2 (правой круговой поляризации), измеренная относительно первичных астрономических калибраторов по потоку: а) Кассиопеи-А и б) Крабовидной туманности в 2015–2018 гг. В скобках приведены средние значения этих температур. Шумы Галактики не исключены

измерения определяется погрешностями измерений и первичной калибровочной шкалы по Кассиопее-А — около 10 % [4, 5], в отличие от погрешности для шкалы антенных температур — около 13–15 %, как и в [1, 2].

Анализ рис. 1–6 и табл. 1 показывает, что с погрешностью измерений в несколько процентов все исследованные калибровочные ГШ были стабильны в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в течение четырех лет с 2015 г. по 2018 г. Из рис. 7–8 следует, что в это же время с погрешностью в несколько процентов были стабильны и собственные шумы системы КРТ в этих диапазонах. Сравнение собственных шумов системы КРТ, измеренных отно-

сительно первичного калибратора Кассиопеи-А, в 2015–2018 гг. на рис. 7а и 8а и в первые годы измерений в 2011–2013 гг. (табл. 1, п. 1.1 в [2]) показывает, что они практически совпадают: в пределах 11 % — в диапазонах 6.2 и 92 см, и в пределах 17 % — в диапазоне 18 см.

Отсутствие измерений в канале 1 диапазона 18 см (рис. 3 и 7) связано с выходом из строя этого канала с марта 2017 г. Предполагаемая причина — влияние космических лучей на электрические параметры блока малошумящих усилителей, вынесенных в открытый космос из фокального контейнера (размещение приборов КРТ подробнее описано в [1]). Эффект известен по аналогичным

Таблица 1

Средняя антенная температура восьми ГШ, калиброванная в К по Кассиопее-А и Крабу и погрешность в процентах в диапазонах 6.2, 18 и 92 см за 2015–2018 гг. по данным рис. 1–6

	<i>Cas-A</i> 6.2 см	<i>Crab</i> 6.2 см	<i>Cas-A</i> 18 см	<i>Crab</i> 18 см	<i>Cas-A</i> 92 см	<i>Crab</i> 92 см
тип ГШ	Т _{ГШ} , К/%	Т _{ГШ} , К/%	Т _{ГШ} , К/%	Т _{ГШ} , К/%	Т _{ГШ} , К/%	Т _{ГШ} , К/%
H11	156 / 2	196 / 2	33.3 / 1	45.7 / 1	42.9 / 1	63.2 / 1
L11	7.04 / 1	8.83 / 2	3.54 / 1	4.87 / 1	4.28 / 1	6.65 / 4
H21	126 / 2	158 / 2	33.8 / 1	46.3 / 1	38.8 / 2	40.1 / 4
L21	9.31 / 1	11.6 / 2	3.62 / 1	4.96 / 1	4.69 / 4	5.40 / 3
H12	298 / 4	398 / 2	33.7 / 1	46.6 / 1	49.9 / 1	72.5 / 1
L12	11.0 / 3	14.4 / 1	3.67 / 1	5.09 / 1	5.34 / 2	7.76 / 1
H22	257 / 4	346 / 2	34.3 / 1	47.2 / 1	45.3 / 2	48.0 / 1
L22	16.6 / 3	22.2 / 1	3.74 / 1	5.16 / 1	5.22 / 2	5.75 / 3

Таблица 2

Отношение антенных температур ГШ, измеренных по Крабовидной туманности к тем же величинам, измеренным по Кассиопее-А (по данным табл. 1)

код ГШ	<i>Crab / Cas-A</i> 6.2 см	<i>Crab / Cas-A</i> 18 см	<i>Crab / Cas-A</i> 92 см
	$T_{\text{ГШ}} / T_{\text{ГШ}}$	$T_{\text{ГШ}} / T_{\text{ГШ}}$	$T_{\text{ГШ}} / T_{\text{ГШ}}$
H11	1.26	1.37	1.47
L11	1.25	1.38	1.55
H21	1.25	1.37	1.03
L21	1.25	1.37	1.15
H12	1.34	1.38	1.45
L12	1.31	1.38	1.45
H22	1.35	1.38	1.06
L22	1.40	1.38	1.10

событиям при полетах спутников Земли. Данное предположение подтверждается также тем, что в дальнейшем было зафиксировано самопроизвольное временное восстановление прежней работоспособности этого канала в нескольких юстировочных сеансах в течение полутора лет.

На всех рисунках и в таблицах обращают на себя внимание систематические отличия полученных калибровочных значений ГШ и собственных шумов системы, измеренных по Кассиопее-А от значений по Крабовидной туманности — средние значения для этих источников и их отношения представлены в табл. 1–3.

Так, из табл. 2 следует, что температура ГШ, измеренная по Крабовидной туманности, оказывается систематически выше, чем измеренная по Кассиопее-А: примерно на 25 % — для четырех ГШ в канале 1 и на 35 % — для других четырех ГШ в канале 2 диапазона 6.2 см; на 38 % — в диапазоне 18 см; и 3–55 % — в диапазоне 92 см. Близкая картина и по шумам системы КРТ в табл. 3: шумы, измеренные по Крабовидной туманности, выше примерно на 25 % в диапазоне 6.2 см и на 33 % — в диапазонах 18 и 92 см. Причина может быть связана как с разным вкладом фона Галактики вблизи этих калибраторов, так и с погрешностями шкал спектральной плотности потока — используемой прежней [4] и предложенной новой шкалой [5]. Несмотря на то, что эти отличия в некоторых случаях могли бы рассматриваться как допустимые в РСДБ, если брать средние значения, следует рекомендовать по-прежнему использовать калибровки, выполненные относительно Кассиопее-А, в шкале плотности потока [4] для корректного сравнения с результатами первых лет работы КРТ, представленными в [1–3].

Таблица 3

Отношение шумов системы КРТ в двух поляризационных каналах каждого из трех диапазонов 6.2 (С1 и С2), 18 (L1 и L2) и 92 (P1 и P2) см, измеренных по Крабовидной туманности к тем же величинам, измеренным по Кассиопее-А (по данным рис. 7–8)

Код канала	С1 6.2 см	С2 6.2 см	L1 8 см	L2 18 см	P1 92 см	P2 92 см
$T_{\text{sys}} / T_{\text{sys}}$	1.24	1.25	1.31	1.35	1.32	1.32

Примечание по результатам рецензирования. Как показал расчет, выполненный рецензентом на основе данных абсолютных измерений методом «искусственной Лунь» [6], при замене шкалы [4] на искусственную Луню отношения калиброванных величин по Крабовидной туманности и Кассиопее-А на частотах КРТ практически совпадают.

Заключение

Суммируем основные полученные результаты.

1. Относительно первичных астрономических калибраторов по потоку Кассиопее-А и Крабовидная туманность выполнена калибровка эквивалентных собственных шумов системы космического телескопа и большого количества внутренних калибровочных ГШ сигнала в приемных устройствах диапазона длин волн 6.2, 18 и 92 см в каналах левой и правой круговых поляризаций. Каждая из этих величин независимо может использоваться для дальнейшей проверки или калибровки КРТ в режимах работы одиночного телескопа или элемента наземно-космического РСДБ в 2015–2018 гг.

2. Показано, что собственные шумы системы телескопа, измеренные в 2015–2018 гг. и откалиброванные относительно Кассиопее-А, близки по величине к шумам, измеренным в первые годы работы КРТ [1–2]: в пределах 11 % — в диапазонах 6.2 и 18 см и в пределах 17 % — в диапазоне 92 см.

3. Выполнено сравнение всех калибровок, проведенных относительно Кассиопее-А с калибровками по Крабовидной туманности. Обнаружено систематическое отличие одних и тех же калиброванных величин по этим объектам в зависимости от диапазона. Требуется дальнейший анализ причин этих отличий. На данном этапе источник Кассиопее-А предпочтительнее по-прежнему использовать как первичный астрономический калибратор по потоку в шкале [4] для всех калибровок КРТ.

Благодарности

Проект «РадиоАстрон» осуществляется Астрокосмическим центром Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии наук

и Научно-производственным объединением им. С. А. Лавочкина по контракту с Госкорпорацией «РОСКОСМОС» совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах.

Литература

1. *Kardashev N. S., Khartov V. V., Abramov V. V., et al.* «RadioAstron». A Telescope with a size of 3000000 km: main parameters and first observational results // *Astron. Rep.* 2013. Vol. 57. no. 3. P. 153–194.
2. *Kovalev Yu. A., Vasil'kov V. I., Popov M. V., et al.* The RadioAstron project: measurements and analysis of

basic parameters of space telescope in flight in 2011–2013 // *Cosm. Res.* 2014. Vol. 52, no. 5. P. 393–402.

3. Astro Space Center of P. N. Lebedev Physical Institute of RAS. URL: <http://asc-lebedev.ru/index2.php> (accessed 15.08.2020).

4. *Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. 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. P. 99–106.

5. *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.

6. *Ivanov V. P., Ipatov A. V., Rakhimov I. A., et al.* Spectra of standart radio sources at the current epoch // *Astron. Rep.* 2018. Vol. 62. no. 9. P. 574–583.