

УДК 52-13; 520.6.07:520.27

ШУМЫ СИСТЕМЫ И ТОЧНОСТЬ ПЕРВИЧНЫХ КАЛИБРАТОРОВ И ШКАЛ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА РАДИОАСТРОН

© 2022 Ю. А. Ковалев^{1*}, А. Н. Ермаков¹, В. И. Васильков¹,
В. А. Согласнов¹, М. М. Лисаков^{2,1}, Ю. Ю. Ковалев^{1,3,2}

¹Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 117997 Россия

²Радиоастрономический институт им. Макса Планка, 53121 Бонн, Германия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700, Россия

Поступила в редакцию 5 мая 2022 года; после доработки 23 мая 2022 года; принята к публикации 23 июня 2022 года

Исследуется физическая причина обнаруженного рассогласования калибровок космического радиотелескопа по первичным калибраторам плотности потока излучения объектов Кассиопея А и Крабовидная туманность. Двадцать внутренних основных и резервных источников шума анализируются как вторичные эталоны космического радиотелескопа, измеряемые относительно первичных в единицах спектральной эквивалентной плотности потока в Ян в трех точных шкалах по данным четырехлетнего мониторинга калибровок космического радиотелескопа в диапазонах длин волн 6.2, 18 и 92 см в 2015–2018 гг. Цели работы: 1) найти и устранить причину этого рассогласования; 2) предложить метод проверки калибраторов и шкал плотности потока на основе анализа спектральной эквивалентной плотности потока; 3) исследовать стабильность спектральной эквивалентной плотности потока излучения собственных шумов космического радиотелескопа. Показано, что выявленное несоответствие калибровок космического радиотелескопа обусловлено неточностью используемых значений плотностей потока излучения первичных калибраторов. Лучше учесть переменность калибраторов позволяют новые калибровочные шкалы, предложенные в 2014 и 2017 гг., Они дают более точные значения спектральной эквивалентной плотности потока, чем полученные по экстраполированным данным в общепринятой шкале 1977 г. Усреднение спектральной эквивалентной плотности потока по калибраторам практически устраняет различия между шкалами. Искусственный эталон (генератор шума) телескопа можно использовать при определенных условиях не только как обычный вторичный калибратор, но и как индикатор взаимного соответствия калибраторов и шкал спектральной плотности потока излучения.

Ключевые слова: *методы: наблюдательные* — *космические аппараты: инструменты* — *радиотелескопы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Калибровка — это известная процедура преобразования единиц измерения из их внутреннего представления для отдельного устройства (включая радиотелескоп) в общепотребимые физические единицы. Калиброванные единицы позволяют сравнивать измерения, сделанные разными приборами. Калибровка радиотелескопа в единицах спектральной плотности потока излучения (в Ян) делает результаты независимыми от телескопа, в том числе от коэффициента усиления и полосы пропускания приемника, размера телескопа и его эффективной площади. Поэтому такая калибровка требуется почти при любой работе радиотеле-

скопа, как для одиночного инструмента (Kuz'min and Salomovich 1966), так и для радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ) (Matveenko et al. 1965).

Проще и удобнее калибровать отклик телескопа относительно сильных калибровочных объектов малых угловых размеров (малых относительно ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны). Однако в диапазонах космического радиотелескопа (КРТ) природа предлагает либо сильные, но протяженные калибраторы, либо квазиточечные (неразрешенные по углу), но слабые.

Радиоастрономическая практика показала, что оптимально использовать в качестве калибраторов две следующие группы объектов. Первая группа

*E-mail: ykovaev@asc.rssi.ru

состоит из четырех сильных протяженных первичных калибраторов, плотности потока которых измерены с минимальными ошибками (Кассиопея А, Крабовидная туманность, Лебедь А и Дева А). Вторую группу образуют 10–20 относительно слабых квазиточечных вторичных калибраторов, плотности потоков которых измерены относительно первичных калибраторов. Подробнее с данной темой можно ознакомиться в работах Conway et al. (1963), Kellermann (1964), Kellermann et al. (1969), которые сначала были общепринятыми, и в более поздних: Baars et al. (1977), Ivanov et al. (2018), Ott et al. (1994), Partridge et al. (2016), Perley and Butler (2013; 2017), Vinyaikin (2007; 2014; 2016).

Плотности потоков излучения источников обеих групп могут изменяться во времени. Поэтому их измерения следует периодически контролировать и корректировать, чтобы можно было экстраполировать изменения плотности потока от момента первоначальных измерений на время их использования. Функцию вторичного калибратора может выполнять и специальный искусственный калибровочный сигнал от внутреннего генератора шума (источника шума, далее — ГШ, noise source, NS). Этот шумовой сигнал подается на вход приемника радиотелескопа. Его амплитуда измеряется относительно первичного или вторичного астрономического калибратора и в дальнейшем используется в качестве эталонного шумового сигнала, который «всегда под рукой» в единицах спектральной эквивалентной плотности потока (Noise Source spectral Equivalent Flux Density, NSEFD, см., например, статью Kovalev et al. (1999)).

Космический радиотелескоп «РадиоАстрон» (далее — КРТ) в полете — параболоид диаметром 10 м — работал с 18 июля 2011 г. по 10 января 2019 г. Он регулярно наблюдал четыре «первичных» калибровочных источника, отмеченных выше, используя в качестве рабочей шкалы спектральной плотности потока шкалу из работы Baars et al. (1977) (далее — шкалу Baars77). Для текущих калибровок КРТ в основном использовались измерения относительно Кассиопеи А (Cas A) и Крабовидной туманности (Crab) или относительно усредненных по ним калибровок в диапазонах длин волн 1.35, 6.2, 18 и 92 см (Kardashev et al. 2013, Kovalev et al. 2020; 2014).

Переменность Cas A и Crab, обнаруженная в работе Perley and Butler (2017), потребовала дополнительного анализа и корректировки калибровок КРТ — от основной шкалы Baars77 (Baars et al. 1977), которая широко использовалась более 40 лет, к двум новым шкалам: PB17 (Perley and Butler 2017) и V14 (Vinyaikin 2007; 2014). Накопившиеся за 40 лет изменения обусловлены

разницей между современными и экстраполированными значениями плотностей потока при вековой переменности излучения этих объектов — расширяющихся остатков сверхновых.

Мы используем приведенный ниже анализ как для коррекций калибровки КРТ относительно генераторов шума, так и для оценки относительной точности астрономических калибраторов и шкал спектральной плотности потока излучения — прежней шкалы Baars77 и двух новых шкал. В статье представлены средние четырехлетние результаты мониторинга NSEFD: $F_{NS}(\text{Crab})$ и $F_{NS}(\text{Cas A})$ относительно Crab и Cas A в диапазоне длин волн 6.2, 18 и 92 см. Результаты анализируются в трех шкалах плотности потока — Baars77, PB17 и V14 — для 20 бортовых ГШ.

По данным КРТ показано, что анализ измеренных по калибраторам значений NSEFD — $F_{NS}(\text{Crab})$ и $F_{NS}(\text{Cas A})$ — и их отношения $VR_{cal} = F_{NS}(\text{Crab})/F_{NS}(\text{Cas A})$ содержит важную дополнительную информацию об относительной точности плотностей потоков самих калибраторов. ГШ можно использовать как индикатор для проверки качества относительной «привязки» различных астрономических калибраторов и шкал друг к другу по потоку. Другими словами, ГШ позволяют выполнять относительную поверку калибраторов и шкал спектральной плотности потока радиоизлучения, то есть поверять Crab относительно Cas A в шкалах Baars77, PB17 и V14 в данном случае.

Значительные систематические отклонения тестовых значений VR_{cal} от $1.00 \pm (1-2)\sigma$, где σ — случайная ошибка относительно 1.00, указывают на несоответствие (возможную неточность) оценок плотностей потоков F_{cal} для калибраторов в этой шкале (как следует из нашего анализа VR_{cal} для шкалы Baars77 ниже). Близость VR_{cal} к этим значениям (как найдено для шкал PB17 и V14) является показателем взаимного согласия F_{cal} для калибраторов и значений F_{NS} для ГШ в этих двух шкалах.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И КАЛИБРОВКИ

Все наблюдения калибровочных объектов проводились в радиометрическом режиме КРТ как отдельного телескопа с использованием сканирования источника в двух взаимно перпендикулярных направлениях или аналогичного сканирования области вокруг источника. Каждый приемный канал с левой или правой круговой поляризацией (каналы 1 или 2) имел на выходе радиометрический блок с квадратичным детектором. В начале и в конце каждого сеанса калибровки в каждом канале формировались последовательные импульсы от

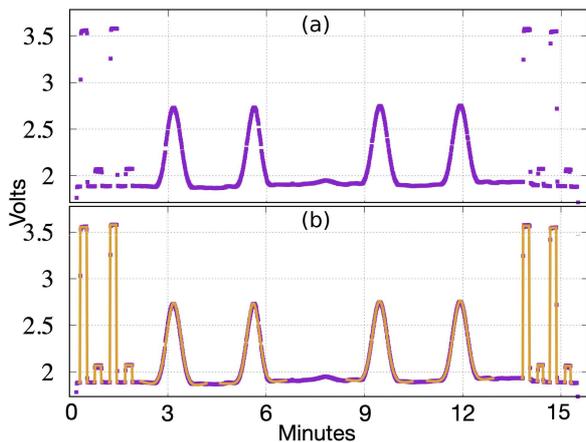


Рис. 1. (a) — пример записи на длине волны 18 см (канал 2) наблюдения Кассиопеи А 29 ноября 2018 г. с КРТ в полете как одиночной антенны, которая сканирует источник в двух взаимно перпендикулярных направлениях (туда и обратно). (b) — та же запись с наложенными на нее модельными откликами на источник (четыре отклика) и на четыре ГШ (четыре импульса с двумя высокими и двумя низкими амплитудами с H12-, L12-, H22-, L22-кодами в начале и конце записи).

Таблица 1. Спектральные плотности потока F_{cal} (Ян) для Кассиопеи А (Cas A) и Крабовидной туманности (Crab) в шкалах Baars77 (B77 в таблице), PB17 и V14; отношения потоков $K^{(2)}$ и $K^{(1)}$ в уравнении (4) в шкалах V14 и PB17 к потокам в шкале Baars77 соответственно

Шкала	Cas A	Crab	Cas A	Crab	Cas A	Crab
$K^{(i)}$	6.2 см		18 см		92 см	
V14	670	630	1488	815	5209	1211
PB17	639	574	1548	795	5325	1134
B77	587	651	1241	895	3877	1259
$K^{(2)}$	1.1414	0.9677	1.1990	0.9106	1.3436	0.9619
$K^{(1)}$	1.0886	0.8817	1.2474	0.8883	1.3735	0.9007

четырёх внутренних шумовых генераторов: с высокой и низкой амплитудами сигнала (рис. 1). Код «Hmp» ГШ (где $m = 1, 2; n = 1, 2$) в таблицах 2–6 означает, что это сигнал высокого уровня («High»), поступающий на приёмный канал с номером n от ГШ, расположенного в канале с номером m , а «Lmp» — аналогичный сигнал, но от ГШ с низким уровнем («Low»). В результате каждое наблюдение астрономического калибратора в каждом из четырёх двухканальных приемников позволяло откалибровать до восьми основных или резервных ГШ. Примеры типичных наблюдений калибровочных объектов и ГШ на длинах волн 1.35, 6.2, 18 и 92 см можно найти в работах Ermakov and Kovalev

(2020), Kardashev et al. (2013). Откалиброванные в таких сеансах ГШ впоследствии использовались в космических РСДБ-сеансах в качестве вторичных эталонов, относительно которых калибровались собственные шумы КРТ на разных длинах волн.

Обработка первичных данных проводилась стандартно, аналогично обработке наземных наблюдений — с использованием известных методов наименьших квадратов, разложения по сингулярным числам (Singular Value Decomposition, SVD) и взвешенного усреднения (Ermakov and Kovalev 2020, Forsythe et al. 1977, Kardashev et al. 2013, Kovalev et al. 2020; 2014). Далее отклик ГШ U_{NS} , измеренный в Вольтах после квадратичного детектирования, калибровался в единицах спектральной эквивалентной плотности потока $F_{\text{NS}}^{(0)}$ (в Ян) по шкале Baars77 с использованием обычных соотношений из работ Kardashev et al. (2013), Kovalev et al. (2014; 1999):

$$F_{\text{NS}} = 2kT_{\text{NS}}/A_{\text{eff}} \equiv T_{\text{NS}} G_A, \quad (1)$$

$$F_{\text{NS}}^{(0)} = F_{\text{cal}}^{(0)} U_{\text{NS}}/(U_{\text{cal}} g) \equiv F_{\text{cal}}^{(0)} C_{\text{cal}}, \quad (2)$$

$$F_{\text{NS}}^{(i)} = F_{\text{NS}}^{(0)} K^{(i)}, \quad (3)$$

$$K^{(i)} = F_{\text{cal}}^{(i)}/F_{\text{cal}}^{(0)}. \quad (4)$$

Здесь индекс $i = 0, 1, 2$ применяется для шкал Baars77, PB17 и V14 соответственно; T_{NS} — антенная температура ГШ, A_{eff} — эффективная площадь антенны, k — постоянная Больцмана, G_A — коэффициент «усиления» антенны; $F_{\text{cal}}^{(i)}$ — плотности потока в Ян (таблица 1) Crab или Cas A, U_{cal} и U_{NS} — отклики КРТ на калибратор и на ГШ соответственно, измеренные в Вольтах; $C_{\text{cal}} \equiv U_{\text{NS}}/(U_{\text{cal}} g)$ не меняется при замене шкалы. Поправка $g \geq 1$ при наличии частичного углового разрешения калибратора: $g = 1.03$ на длине волны 6.2 см и $g = 1.00$ в диапазоне длин волн 18 и 92 см для Cas A и Crab.

Обозначим эквивалентную плотность потока излучения (System spectral Equivalent Flux Density, SEFD) шумов системы КРТ как F_{sys} и положим $g = 1$. Тогда соотношения (1)–(3), при замене в них всех индексов «NS» на «sys», будут справедливы и для F_{sys} .

Удобнее пересчитать единицы из NSEFD F_{NS} (в Ян) в T_{NS} (в К). Используем коэффициенты усиления антенны КРТ G_A , на длинах волн 6.2, 18 и 92 см равные 78.86, 67.32 и 92.00 Ян K^{-1} соответственно (Kovalev et al. 2014). Из выражений (1)–(4) также следует способ пересчета значений для калибровок $F_{\text{NS}}^{(i)}$ из исходной «базовой» шкалы Baars77 (при $i = 0$)

Таблица 2. Средняя антенная температура T_{NS} (К) для каждого из 20 генераторов шума (ГШ, NS), полученная по данным четырехлетних мониторинговых измерений с КРТ на длинах волн 6.2, 18 и 92 см в 2015–2018 гг. ГШ калиброваны относительно Cas A и Crab в стандартной первичной шкале Baars77 спектральной плотности потока. После символа «/» приведены случайные ошибки, выраженные в процентах (Kovalev et al. 2020)

B77	Cas A	Crab	Cas A	Crab	Cas A	Crab
NS	6.2 см		18 см		92 см	
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
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
H21	126/2	158/2	33.8/1	46.3/1	–	–
L21	9.31/1	11.6/2	3.62/1	4.96/1	–	–
H22	257/4	346/2	34.3/1	47.2/1	–	–
L22	16.6/3	22.2/1	3.74/1	5.16/1	–	–

Таблица 3. Средняя антенная температура ГШ (NS) T_{NS} (К), как в таблице 2, но пересчитанная из шкалы Baars77 в шкалу PB17

PB17	Cas A	Crab	Cas A	Crab	Cas A	Crab
NS	6.2 см		18 см		92 см	
H11	170/2	173/2	41.5/1	40.6/1	58.9/1	56.9/1
L11	7.67/1	7.79/2	4.41/1	4.33/1	5.88/1	5.98/4
H12	324/4	351/2	42.0/1	41.4/1	68.6/1	65.2/1
L12	12.0/3	12.7/1	4.58/1	4.52/1	7.33/2	6.98/1
H21	137/2	139/2	42.1/1	41.1/1	–	–
L21	10.1/1	10.2/2	4.51/1	4.41/1	–	–
H22	280/4	305/2	42.8/1	41.9/1	–	–
L22	18.1/3	19.6/1	4.66/1	4.58/1	–	–

к другим анализируемым шкалам (при $i = 1, 2$) (см. формулы (3)–(4) и таблицы 2, 3 и 4).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты обработки наблюдений в диапазоне длин волн 6.2, 18 и 92 см в течение четырех лет мониторинга и калибровки шума системы КРТ и всех ГШ, измеренных относительно Cas A и Crab в шкале Baars77, приведены в работах Ермаков

Таблица 4. Средняя антенная температура ГШ (NS) T_{NS} (К), как в таблице 2, но пересчитанная из шкалы Baars77 в шкалу V14

V14	Cas A	Crab	Cas A	Crab	Cas A	Crab
NS	6.2 см		18 см		92 см	
H11	178/2	190/2	39.9/1	41.6/1	57.7/1	60.8/1
L11	8.03/1	8.54/2	4.24/1	4.43/1	5.75/1	6.40/4
H12	340/4	385/2	40.4/1	42.4/1	67.1/1	69.7/1
L12	12.6/3	13.9/1	4.40/1	4.63/1	7.18/2	7.46/1
H21	144/2	152/2	40.5/1	42.2/1	–	–
L21	10.6/1	11.2/2	4.34/1	4.52/1	–	–
H22	293/4	335/2	41.1/1	43.0/1	–	–
L22	18.9/3	21.5/1	4.48/1	4.70/1	–	–

et al. (2021), Kovalev et al. (2020). Спектральные плотности потоков $F_{cal}^{(i)}$ в формуле (2) для Cas A и Crab в трех шкалах и их отношения $K^{(i)}$ в выражениях (3) и (4) приведены в таблице 1 для эпохи 2015.5. Основные результаты калибровки для 20 ГШ, усредненные за эти четыре года, суммированы в таблице 2 для шкалы Baars77 ($i = 0$).

Погрешности в таблице 2 — это случайные ошибки T_{NS} без учета ошибок измерения плотности потока первичных калибраторов в шкале Baars77. Таким образом, таблицы 1 и 2 содержат исходные результаты калибровок ГШ для дальнейшего анализа. Результаты пересчета данных из таблицы 2 через $K^{(1)}$ и $K^{(2)}$ показаны в таблице 3 (для шкалы PB17) и в таблице 4 (для шкалы V14) в том же формате, что и в таблице 2 для базовой шкалы Baars77. Из таблиц 3 и 4 следует, что на каждой длине волны значения T_{NS} , измеренные по Cas A и Crab, лучше согласуются, чем в таблице 2.

В таблице 5 представлены коэффициенты поверки калибраторов $VR_{cal}^{(i)}$:

$$VR_{cal}^{(i)} = T_{NS}^{(i)}(\text{Crab}) / T_{NS}^{(i)}(\text{Cas A}), \quad (5)$$

где $T_{NS}^{(i)}(\text{Crab})$ и $T_{NS}^{(i)}(\text{Cas A})$ представляют собой температуры $T_{NS}^{(i)}$, измеренные относительно Crab и Cas A по данным таблиц 2, 3 и 4 в шкалах Baars77 ($i = 0$), PB17 ($i = 1$) и V14 ($i = 2$). Случайные ошибки оценивались по закону распространения средней ошибки. Доминирующие систематические ошибки могут быть оценены как $S = VR_{cal}^{(i)} - 1.00$.

Таблица 6 содержит средние арифметические значения $T_{NS}^{(i)}$ антенных температур ГШ, усред-

Таблица 5. Проверка точности калибраторов Cas A и Crab для оценки взаимной согласованности их «табличных» плотностей потока F_{cal} при использовании всех ГШ (NS) в качестве индикаторов точности на длинах волн 6.2, 18 и 92 см в шкалах Baars77, PB17 и V14. Случайные ошибки σ показаны в процентах после символа «/». Отклонения VR_{cal} от 1.00 дают односторонние систематические погрешности

VR_{cal}	$VR_{\text{cal}} = T_{\text{NS}}(\text{Crab})/T_{\text{NS}}(\text{Cas A})$								
	6.2 см			18 см			92 см		
Длина волны									
Код ГШ	Baars77	PB17	V14	Baars77	PB17	V14	Baars77	PB17	V14
H11	1.26/3	1.02/3	1.08/3	1.37/1	0.98/1	1.05/1	1.47/1	0.96/1	1.06/1
L11	1.25/2	1.01/2	1.07/2	1.38/1	0.98/1	1.06/1	1.55/4	1.02/4	1.12/4
H12	1.34/4	1.09/4	1.15/4	1.38/1	0.98/1	1.06/1	1.45/1	0.95/1	1.05/1
L12	1.31/3	1.06/3	1.12/3	1.38/1	0.98/1	1.06/1	1.45/2	0.95/2	1.05/2
H21	1.25/3	1.01/3	1.07/3	1.37/1	0.98/1	1.05/1	—	—	—
L21	1.25/2	1.01/2	1.07/2	1.37/1	0.98/1	1.05/1	—	—	—
H22	1.35/4	1.09/4	1.16/4	1.38/1	0.98/1	1.06/1	—	—	—
L22	1.34/3	1.09/3	1.15/3	1.38/1	0.98/1	1.06/1	—	—	—

Таблица 6. Антенные температуры $T_{12\text{NS}}$ генераторов шумового сигнала (ГШ, NS), усредненные между T_{NS} по Crab и T_{NS} по Cas A с учетом данных из таблиц 2, 3 и 4 в шкалах Baars77, PB17 и V14 соответственно, и оценка полных систематических и случайных ошибок σ_{12} в процентах после символа «/»

$T_{12\text{NS}}$	$T_{12\text{NS}} = (T_{\text{NS}}(\text{Crab}) + T_{\text{NS}}(\text{Cas A}))/2, \text{ K}$								
	6.2 см			18 см			92 см		
Длина волны									
Код ГШ	Baars77	PB17	V14	Baars77	PB17	V14	Baars77	PB17	V14
H11	176/11	172/1	184/3	39.5/16	41.1/1	40.8/2	53.1/19	57.9/2	59.3/3
L11	7.94/11	7.73/1	8.29/3	4.21/16	4.37/1	4.33/2	5.47/22	5.93/1	6.08/5
H12	348/14	338/4	363/6	40.2/16	41.7/1	41.4/2	61.2/18	66.9/3	68.4/2
L12	12.7/13	12.4/3	13.3/5	4.38/16	4.55/1	4.52/3	6.55/18	7.16/2	7.32/2
H21	142/11	138/1	148/3	40.1/16	41.6/1	41.4/2	—	—	—
L21	10.5/11	10.2/1	10.9/3	4.29/16	4.46/1	4.43/2	—	—	—
H22	302/15	293/4	314/7	40.8/16	42.4/1	42.1/2	—	—	—
L22	19.4/14	18.9/4	20.2/6	4.45/16	4.62/1	4.59/2	—	—	—

ненные по двум калибраторам в i -шкале:

$$T_{12\text{NS}}^{(i)} = [T_{\text{NS}}^{(i)}(\text{Crab}) + T_{\text{NS}}^{(i)}(\text{Cas A})]/2.$$

Их погрешности могут включать как систематические, так и случайные ошибки:

$$\sigma_{12}^{(i)} = |T_{\text{NS}}^{(i)}(\text{Crab}) - T_{\text{NS}}^{(i)}(\text{Cas A})|/2.$$

Таблица 7 суммирует данные о шумовых температурах T_{sys} системы КРТ, измеренных относи-

тельно Cas A и Crab. Данные показаны для каналов 1 и 2 на каждой длине волны в строках с кодами «B77-1» и «B77-2» соответственно. Эти T_{sys} усреднены за четыре года по шкале Baars77 (Kovalev et al. 2020). Строка с кодом «B77-R» дает отношение $R = T_{\text{sys}}(\text{Crab})/T_{\text{sys}}(\text{Cas A})$ по шкале B77: в колонке «Cas A» для канала 1 (по данным строки «B77-1») и в колонке «Crab» для канала 2 (по данным строки «B77-2»). То же самое приведено в следующих строках для шкал PB17 и V14.

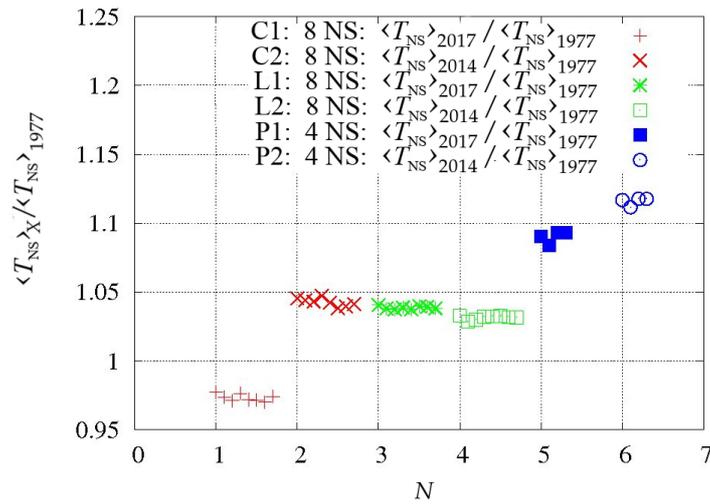


Рис. 2. Проверка точности шкал PB17 ($X = 2017$) и V14 ($X = 2014$) относительно шкалы Vaars77 по отношению $VR_{scale}^{(i,0)} = T12_{NS}^{(i)} / T12_{NS}^{(0)}$ для каналов 1 и 2 на длинах волн 6.2 см (C1: $1 \leq N < 2$ и C2: $2 \leq N < 3$), 18 см (L1: $3 \leq N < 4$ и L2: $4 \leq N < 5$) и 92 см (P1: $5 \leq N < 6$ и P2: $6 \leq N < 7$). Антенные температуры $\langle T_{NS} \rangle \equiv T12_{NS}$ взяты из таблицы 6.

Таблица 7. Шумовые температуры T_{sys} для каналов 1 и 2, усредненные по четырехлетним мониторинговым измерениям с КРТ в 2015–2018 гг. на длинах волн 6.2, 18 и 92 см. T_{sys} в трех первых строках калиброваны по Cas A и Crab в стандартной первичной шкале Vaars77. T_{sys} в трех вторых и трех третьих строках пересчитаны к шкалам PB17 и V14 через данные в строках «B77-1», «B77-2» и в таблице 1. Погрешности в процентах указаны через символ «/»

T_{sys} , К	Cas A	Crab	Cas A	Crab	Cas A	Crab
Шкала	6.2 см		18 см		92 см	
B77-1	144/3	179/3	39/2	51/2	204/2	269/3
B77-2	174/2	218/3	40/2	54/2	186/2	245/4
B77-R	1.24/4	1.25/4	1.31/3	1.35/3	1.32/3	1.32/5
PB17-1	157/3	159/3	48.6/2	45.3/2	280/2	242/3
PB17-2	189/2	194/3	49.9/2	48.0/2	255/2	221/4
PB17-R	1.01/4	1.03/4	0.93/3	0.96/3	0.86/3	0.87/5
V14-1	164/3	173/3	46.8/2	46.4/2	274/2	259/3
V14-2	199/2	211/3	48.0/2	49.2/2	250/2	236/4
V14-R	1.05/4	1.06/4	0.99/3	1.03/3	0.95/3	0.94/5

Рисунок 2 отображает коэффициенты $VR_{scale}^{(i,0)}$ для проверки шкал. Для каждой шкалы используются усредненные по Crab и Cas A антенные температуры ГШ. Анализируются отношения этих средних температур $T12_{NS}^{(i)}$ ГШ в шкалах PB17

и V14 к средним температурам $T12_{NS}^{(0)}$ в шкале Vaars77 по данным таблицы 6:

$$VR_{scale}^{(i,0)} = T12_{NS}^{(i)} / T12_{NS}^{(0)}. \quad (6)$$

Способ оценки ошибок для формулы (6) аналогичен тому, как это сделано для выражения (5).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Значимые отличия T_{NS} по Crab от T_{NS} по Cas A обнаруживаются в таблице 2 по шкале Vaars77, тогда как, согласно уравнению (1), эти T_{NS} должны быть практически одинаковыми в пределах случайных ошибок. Этот эффект может указывать на наличие систематических ошибок в выражении (2) и в таблице 1 в строке с кодом «B77» из-за неточности значений плотности потока F_{cal} калибраторов или их переменности. Существенно иная картина наблюдается при переходе от шкалы Vaars77 к шкалам PB17 и V14 в таблицах 3 и 4. F_{cal} для Cas A и Crab в таблице 1 скорректированы за их «другую» переменность благодаря новым измерениям этих калибраторов относительно Лебеда А в шкалах PB17 и V14. В отличие от таблицы 2, эти новые значения T_{NS} относительно Cas A и Crab в таблицах 3 и 4 становятся близкими друг к другу для одного и того же кода ГШ и длины волны.

Итак, значения F_{NS} , измеренные относительно калибраторов по формулам (2)–(4), должны совпадать друг с другом и с теоретическим значением выражения (1) в пределах ошибок измерений. Этот вывод следует из уравнений (1)–(2), если антенная температура $T_{NS} = P_{NS} / 2kB = const$, мощность ГШ $P_{NS} = const$ и полоса частот приемника $B = const$. Постоянство F_{NS} также влечет

постоянство T_{NS} и A_{eff} . Но условие $F_{\text{NS}} = \text{const}$ нарушается, если используются калибраторы с неточной оценкой F_{cal} в выражении (2), например, вследствие переменности F_{cal} или непостоянства T_{NS} генератора шума и/или A_{eff} антенны.

Это видно также из следующих рассуждений. Обозначим нижними индексами 1 и 2 значения, полученные относительно Cas A и Crab соответственно. Тогда, как и в уравнении (5), теоретическое значение T_R и измеренные $M_R^{(i)}$ -отношения их F_{NS} следуют из соотношений (1) и (2)–(4) соответственно:

$$\frac{F_{\text{NS}}(\text{Crab})}{F_{\text{NS}}(\text{Cas A})} \equiv \left(\frac{F_{\text{NS},2}}{F_{\text{NS},1}} \right)_{\text{th}} = \frac{T_{\text{NS},2}}{T_{\text{NS},1}} \times \frac{A_{\text{eff},1}}{A_{\text{eff},2}} \equiv T_R, \quad (7)$$

$$\left(\frac{F_{\text{NS},2}^{(i)}}{F_{\text{NS},1}^{(i)}} \right)_m = \frac{F_{\text{cal},2}^{(i)}}{F_{\text{cal},1}^{(i)}} \times \frac{C_{\text{cal},2}}{C_{\text{cal},1}} \equiv M_R^{(i)}. \quad (8)$$

$T_R = 1$ для КРТ. В таком случае соотношение (8) тоже должно быть следующим: $M_R^{(i)} = 1$. Однако это будет иметь место, если только некоторые значения $F_{\text{cal},2}^{(i)}$ и $F_{\text{cal},1}^{(i)}$ абсолютно точны. Иначе они не будут соответствовать амплитуде отклика ($U_{\text{cal}} g$) в формулах (2)–(4).

Чем ближе отношение VR_{cal} антенных температур ГШ к $1.00 \pm (1-2)\sigma^{(i)}$ в столбцах таблицы 5, тем более точной является калибровка ГШ и КРТ и тем лучше согласованы в данной шкале оценки потоков F_{cal} этих калибраторов. Анализ отклонений результатов для VR_{cal} в таблице 5 от $1.00 \pm (1-2)\sigma^{(i)}$ показывает, что систематические ошибки коэффициента поверки уравнения (5) по шкале V14 обычно больше, чем по шкале RB17, но значительно меньше, чем по шкале Baars77. Тем не менее различия между шкалой Baars77 и шкалами RB17 и V14 практически исчезают, если использовать усредненные калибровки ГШ по Crab и Cas A. Это видно по данным таблицы 6 или на рис. 2. Отклонение $VR_{\text{scale}}^{(i,0)}$ от 1.00 на рис. 2 характеризует неточность шкал.

Шумы системы КРТ после усреднения по Cas A и Crab для каналов 1 и 2 в таблице 7 по шкале Baars77 согласуются с шумами системы, полученными в 2011–2013 гг. по калибраторам (см. таблицу 1 в работе Kovalev et al. (2014)): различие в 22% для канала 1 на длине волны 6.2 см и менее 5% для любых каналов в диапазоне длин волн 18 и 92 см. Шумы Галактики на длине волны 92 см близки к 120 К (Kovalev et al. 2014) и не исключены из таблицы 7.

Если T_{NS} и A_{eff} в выражении (1) постоянны, то F_{NS} также постоянна, и этот метод «работает».

В противном случае он не работает или требует коррекций. Для КРТ оба условия (постоянства T_{NS} и A_{eff}) выполняются с хорошей точностью, что подтверждают следующие факты:

- 1) пересчет F_{cal} в таблице 1 по новым шкалам дает положительный эффект;
- 2) T_{NS} в таблицах 2, 3 и 4 имеют небольшие погрешности при одинаковых условиях измерений для обоих калибраторов;
- 3) не видно причин для заметных систематических изменений T_{NS} или G_A между направлениями на Cas A и Crab, если принять во внимание отсутствие гравитационных деформаций антенны, термостабилизацию блоков ГШ КРТ (Tulin et al. 2014) и наличие остаточных напряжений лепестков антенны в механизме раскрытия зеркала (Kovalev et al. 2014), добавляющих зеркалу жесткости.

Поэтому проверка калибраторов плотности потока с помощью сравнения F_{NS} ГШ, калиброванных по ним, выполняется на КРТ достаточно просто. Для многих наземных телескопов это может быть не так, по крайней мере, для эффективной площади A_{eff} больших телескопов (из-за ее зависимости от высоты). Тогда применить к ним подобный подход будет сложнее. Однако, если известна закономерность изменения A_{eff} , то реализовать проверку калибраторов этим методом тоже можно.

5. ВЫВОДЫ

1. Шумы системы КРТ (SEFD) стабильны с 2011–2013 гг. по 2015–2018 гг. В эти периоды их средние значения различались на 22% на длине волны 6.2 см и менее 5% в диапазонах длин волн 18 и 92 см.

2. Обычно ГШ используется только для калибровок приемника или телескопа. Показано, что калибровки ГШ по астрономическим калибраторам содержат дополнительную информацию — о взаимной точности (согласованности) спектральных плотностей потока излучения калибраторов. ГШ радиотелескопа имеет спектральную эквивалентную плотность потока излучения $F_{\text{NS}} = 2kT_{\text{NS}}/A_{\text{eff}}$ (в Ян). Величина F_{NS} постоянна при условиях, которые определяются телескопом (эффективной площадью A_{eff} , мощностью ГШ через его температуру T_{NS}) и не зависит от калибратора.

3. Предложенный метод рассматривает ГШ не только как внутренний эталон калибровки радиотелескопа, но и как показатель относительной точности (взаимного несоответствия) «табличных»

плотностей потоков для астрономических калибраторов. Метод апробирован на примерах Крабовидной туманности и Кассиопеи А на длинах волн 6.2, 18 и 92 см по данным четырехлетнего мониторинга калибровок КРТ.

4. Результаты калибровки для 20 ГШ по Cas A и Crab проанализированы в трех точных астрономических шкалах спектральной плотности потока: 1) в стандартной шкале относительно Cas A (шкала Baars77) и 2) по двум новым шкалам, скорректированным и построенным относительно Лебеда А — в шкалах RB17 и V14.

5. Максимальные относительные полные погрешности поверки Cas A и Crab по трем шкалам, включающие в себя систематическую и случайную составляющие, оцениваются в 2015–2018 гг. по таблице 5 как:

- 1) 4.5, 1 и 2.5% по шкале RB17;
- 2) 8, 3 и 6% по шкале V14;
- 3) 18, 19 и 28% по шкале Baars77 — на длинах волн 6.2, 18 и 92 см соответственно.

Шкалы RB17 и V14 достаточно точные, а результаты стабильны во времени.

6. Калибровки КРТ относительно Cas A и Crab потребовали пересчета калибровок со шкалы Baars77 на шкалы RB17 и V14 для устранения систематических ошибок, вызванных долговременной «вековой» переменностью излучения этих калибраторов (см. таблицы 1–5 и рис. 2). Однако разница между результатами по этим шкалам в 2015–2018 гг. практически исчезает, если калибровки ГШ дополнительно усреднить между калибраторами Crab и Cas A. Эту разницу можно оценить по рис. 2 как 3–4% на длинах волн 6.2 и 18 см и 9–13% на длине волны 92 см.

7. Для эффективного использования предлагаемого метода необходим телескоп с постоянными эффективной площадью и мощностью ГШ, подобными КРТ, или данные о закономерностях их изменений. Аналогичный метод поверки может быть применен к системе из 10–20 вторичных калибраторов плотности потока, которые обычно используются на различных полноповоротных радиотелескопах в шкалах (Ivanov et al. 2018, Ott et al. 1994, Perley and Butler 2013; 2017), если калибраторы измерять на одной высоте. Но требуется информация о зависимости A_{eff} от высоты калибраторов для его применения на РАТАН-600.

БЛАГОДАРНОСТИ

Проект «РадиоАстрон» осуществляет Астрономический центр ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН и НПО им. С. А. Лавочкина по контракту с Федеральным космическим агентством России,

в сотрудничестве с организациями-партнерами в России и других странах. Разработка и осуществление проекта «РадиоАстрон» стали возможны благодаря деятельности академика Николая Семеновича Кардашева. Авторы отмечают значительный вклад Евгения Виняйкина в данную работу. Авторы выражают благодарность Кеннету Келлерманну, Исмаилу Рахимову и Дмитрию Скулачеву за обсуждение вопросов калибровки КРТ, Михаилу Попову и рецензенту статьи за конструктивные отзывы. Благодарим Елену Базанову за вычитку текста.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-12-00241.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
2. R. G. Conway, K. I. Kellermann, and R. J. Long, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **125**, 261 (1963).
3. A. N. Ermakov and Yu. A. Kovalev, *Transactions Inst. Applied Astronomy RAS* **54**, 21 (2020).
4. A. N. Ermakov, Y. A. Kovalev, and V. I. Vasil'kov, in *Proc. XVIII Young Scientists Conf. on Fundamental and Applied Space Researchers, Moscow, Russia, 2021*, Ed. by A. M. Sadovskii, pp. 31–45 (IKI RAS, Moscow, 2021).
5. G. E. Forsythe, M. A. Malcolm, and C. B. Moler, *Computer methods for mathematical computations* (Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1977).
6. V. P. Ivanov, A. V. Ipatov, I. A. Rakhimov, et al., *Astronomy Reports* **62** (9), 574 (2018).
7. N. S. Kardashev, V. V. Khartov, V. V. Abramov, et al., *Astronomy Reports* **57** (3), 153 (2013).
8. K. I. Kellermann, *Astrophys. J.* **140**, 969 (1964).
9. K. I. Kellermann, I. I. K. Pauliny-Toth, and P. J. S. Williams, *Astrophys. J.* **157**, 1 (1969).
10. Y. A. Kovalev, V. I. Vasil'kov, A. N. Ermakov, et al., *Transactions of IAA RAS* **54**, 32 (2020).
11. Y. A. Kovalev, V. I. Vasil'kov, M. V. Popov, et al., *Cosmic Research* **52** (5), 393 (2014).
12. Y. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Y. A. Kovalev, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **139**, 545 (1999).
13. A. D. Kuz'min and A. E. Salomonovich, *Radioastronomical methods of antenna measurements* (New York, Academic Press, 1966).
14. L. I. Matveenko, N. S. Kardashev, and G. B. Sholomitskii, *Radiophysics and Quantum Electronics* **8** (4), 461 (1965).

15. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
16. B. Partridge, M. López-Caniego, R. A. Perley, et al., *Astrophys. J.* **821** (1), id. 61 (2016).
17. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **204** (2), id. 19 (2013).
18. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **230** (1), id. 7 (2017).
19. D. V. Tulin, I. S. Vinogradov, A. F. Shabarchin, et al., *Cosmic Research* **52** (5), 386 (2014).
20. E. N. Vinyaikin, *Astronomy Reports* **51** (7), 570 (2007).
21. E. N. Vinyaikin, *Astronomy Reports* **58** (9), 626 (2014).
22. E. N. Vinyaikin, *Astronomy Reports* **60** (8), 744 (2016).

System Noise and Accuracy of Primary Flux Density Calibrators and Scales on RadioAstron Space Telescope Data

Yu. A. Kovalev¹, A. N. Ermakov¹, V. I. Vasilkov¹, V. A. Soglasnov¹, M. M. Lisakov^{2,1}, and Y. Y. Kovalev^{1,3,2}

¹Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

²Max-Planck-Institute für Radioastronomie, D-53121 Bonn, Germany

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny 141700, Russia

We investigate the physical reason of the found difference in the flux density calibration for the space radio telescope (SRT) on the “primary” calibrators Cassiopeia A and Crab Nebula. Twenty internal Noise Sources (NS or noise generators) of SRT are analyzed as “secondary” standards measured relative to the primary ones in the units of the Noise Source spectral Equivalent Flux Density (NSEFD, in Jy). This is performed within three accurate flux density scales using monitoring data of SRT calibrations at the wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm in 2015–2018. The aims are: 1) to find and eliminate the cause of this discrepancy, 2) to propose a method for verification of flux densities of the calibrators and their scales based on the analysis of NSEFD, 3) to analyse the System spectral Equivalent Flux Density (SEFD) of the SRT. We have found out that the difference is a result of a variability of primary calibrators which is accurately quantified by the new scales proposed in 2014 and 2017. The NSEFDs measured within the new scales turned out to be more accurate than results obtained in the 1977 scale. Averaging these NSEFDs on Crab and Cas A eliminates the difference between the scales. The SRT NS can be used to verify the quality of calibrators. An artificial standard noise source of a radio telescope can be used not only as an ordinary secondary calibrator but also as an indicator of relative accuracy for verifying spectral flux density calibrators and scales under certain conditions.

Keywords: methods: observational—space vehicles: instruments—radio telescopes