

УДК 520.27

## МЕТОД СИНХРОННОЙ КАЛИБРОВКИ РАТАН-600 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ЕГО СЕКТОРОВ

© 2019 Ю. В. Сотникова<sup>1\*</sup>, Ю. А. Ковалев<sup>2</sup>, А. К. Эркенов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева, Москва 119991, Россия

Поступила в редакцию 27 декабря 2018 года; после доработки 22 сентября 2019 года;  
принята к публикации 22 сентября 2019 года

Предлагается метод «самокалибровки» двух секторов радиотелескопа РАТАН-600 на основе синхронных измерений сильных внегалактических источников, в том числе переменных. Метод дает тонкие поправки к штатной калибровке на каждом из секторов. Он основан на том, что идеальные синхронные независимые измерения одних и тех же объектов должны давать одинаковые результаты. Отличия от единицы результата аппроксимации отношения потоков, синхронно измеренных на двух секторах для подвыборки сильных источников, рассматриваются как систематические погрешности калибровки, используются для расчета поправок, исключающих эти погрешности, и применяются к измерениям всех объектов выборки в данном цикле наблюдений. Метод апробирован на двух секторах РАТАН-600 в меридианных многочастотных измерениях и может применяться и для независимых пар любых близко расположенных антенн. Тогда аналогом сектора РАТАН-600 является отдельный телескоп. Для далеко разнесенных антенн будет вноситься дополнительная погрешность из-за разного влияния атмосферы и высоты объектов при синхронных наблюдениях.

Ключевые слова: *методы: наблюдательные — методы: анализ данных*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Калибровка любого радиотелескопа по спектральной плотности потока излучения является одной из актуальных проблем измерений. Значение спектральной плотности потока исследуемого объекта получается путем перемножения известного из измерений значения его антенной температуры, или амплитуды его сигнала в измеряемых единицах (например, АЦП) на калибровочный коэффициент, отражающий изменение эффективной площади телескопа от высоты. Несмотря на то, что на практике все сложнее из-за необходимости дополнительного учета поправок за атмосферное поглощение, поляризацию и угловые размеры исследуемого источника, обычно больших проблем учет этих поправок не создает. В то же время, измеренные значения плотностей потоков на разных телескопах могут отличаться, в первую очередь, по причине погрешностей калибровки, а не только из-за переменности излучения источника.

Проблема калибровки по потоку существует для большинства радиотелескопов и хорошо известна. За последние 40 лет фактически только 4 публикации посвящены измерениям вторичных стандартов

с максимальной точностью [1–4] в широком диапазоне частот. В отличие от полноповоротных радиотелескопов, которым требуется пара надежных калибровочных источников в рабочем интервале высот, для инструмента меридианного типа РАТАН-600 этого недостаточно. В идеальном случае для РАТАН-600 требуется максимально плотная сетка калибровочных объектов, равномерно покрывающих весь диапазон рабочих высот (от  $-40^\circ$  до  $90^\circ$  по склонению). Поэтому на РАТАН-600 дополнительно к известным вторичным калибровочным объектам, используются и так называемые «ратановские» калибровочные источники (особенно на низких углах), которые могут временами показывать медленную переменность. Для описания непрерывного изменения эффективной площади телескопа с высотой используется аппроксимация ограниченного количества неравноотстоящих точек полиномами второй или, реже, третьей степени. Такой подход может приводить к появлению систематических погрешностей калибровки, оценка и исключение которых должны увеличить точность измерений спектральных плотностей потоков.

В идеальном случае на двух телескопах при одновременных измерениях одних и тех же радиоисточников должны получаться одинаковые значения спектральных плотностей потоков в пределах

\*E-mail: lacerta999@gmail.com

ошибок измерений. В этом случае мы говорим о высокой или достаточной точности измерений. На РАТАН-600 было проведено два наблюдательных цикла, в которых измерялись одни и те же сильные и яркие (далее — сильные) радиоисточники с использованием двух антенных конфигураций (Северный сектор и Южный сектор с Плоским отражателем). Обнаружено систематическое расхождение значений полученных спектральных плотностей потоков на некоторых высотах.

Для решения проблемы повышения точности измерений радиоисточников предлагается метод «самокалибровки» двух антенн (секторов) РАТАН-600 [5–7] на основе синхронных измерений сильных источников, включая переменные.

## 2. ОПИСАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

В основе метода лежит возможность выполнения практически идеально синхронных наблюдений одних и тех же источников, которая может быть сравнительно просто реализована на РАТАН-600 при наблюдениях в направлении на Юг в меридиане с помощью Северного сектора (двухзеркальная конфигурация антенны) и сектора Южного с Плоским отражателем (трехзеркальная конфигурация антенны).

Рассмотрим отношение спектральных плотностей потоков  $A(h_i)$  и  $B(h_i)$  одного и того же источника, измеренных на высоте  $h_i$  одновременно на секторах Северном (обозначим его как сектор  $B$ ) и Южном + Плоском (сектор  $A$ ):  $C(h_i) = A(h_i)/B(h_i)$ . В идеальном случае оно должно быть равно единице. При отсутствии систематических ошибок единице должна быть равна средняя величина таких отношений для всех измеренных источников,  $\langle C(h) \rangle = 1$ , а рассеяние индивидуальных отношений  $C(h_i)$  относительно единицы характеризоваться соответствующей величиной среднеквадратичного отклонения  $\sigma_C$ . Тогда за окончательное значение измеренного потока излучения источника логично принять средневзвешенное значение из этих значений  $A(h_i)$  и  $B(h_i)$ .

Присутствие систематических ошибок калибровки на тех или иных интервалах высот сдвинет это отношение в сторону значений, отличных от единицы. Количественным отражением таких систематических погрешностей может служить кривая аппроксимации зависимости величины  $C(h)$  от высоты  $h$ . Если найти способ учета ошибки для  $A$  и  $B$  по отдельности (для исключения из измерений в дальнейшем), то скорректированные таким образом значения потоков, измеренные в конфигурациях  $A$  («Юг+Плоский сектор») и  $B$

(«Северный сектор»), после коррекции их за выделенные систематические отклонения, точно так же могут быть усреднены по средневзвешенной методике. Можно ожидать, что такая процедура должна приводить к повышению надежности и точности результатов измерений спектральных плотностей потоков радиоизлучения исследуемых объектов.

Переведем сказанное в конкретный количественный алгоритм. Пусть синхронно на некоторой частоте на высотах  $h$  от  $0^\circ-5^\circ$  до  $90^\circ-95^\circ$  выполнены измерения радиоизлучения  $N > 100$  объектов на секторах  $A$  и  $B$  РАТАН-600<sup>1</sup>. Пусть стандартной методикой эти измерения обработаны (для РАТАН-600 — стандартным методом [8, 9]), откалиброваны и для каждого  $i$ -ого объекта получены соответствующие два значения его спектральной плотности потока излучения  $A(h_i)$  и  $B(h_i)$ . Ранее они рассматривались бы как окончательные результаты измерений. В данном методе их совместный анализ предлагается продолжить следующим образом:

1. Для каждого источника составляются отношения  $C(h_i) = A(h_i)/B(h_i)$ . Если они случайны, то для достаточно большой выборки объектов их среднее значение будет близко к единице.

2. Чтобы выделить систематические погрешности, из выборки  $N$  формируется подвыборка  $N_1 < N$  наиболее сильных объектов с потоками  $F_\nu > 1$  Ян, т.е. подвыборку  $C_1(h_i)$ .

3. Строится зависимость  $C_1(h_i)$  от  $h_i$  по подвыборке  $N_1$  и аппроксимируется полиномом  $P_1(h)$  достаточно высокой степени, чтобы иметь более точную характеристику поведения полинома на отдельных участках рабочего интервала высот.

4. Предположим, что отличие значений этого полинома от единицы отражает суммарный вклад систематической погрешности калибровок на секторах  $A$  и  $B$ . Тогда деление отношений потоков  $C_1(h_i)$  на значение полинома на высотах  $h_i$  «приведет» среднее значение по подвыборке к единице, статистически исключив эту погрешность. Предполагая далее, что вклад каждого сектора в систематическую погрешность отношения потоков одинаков и равен  $k_s(i)$ , получим следующий «рецепт» коррекции потоков  $A_{\text{corr}}$  и  $B_{\text{corr}}$  на секторах  $A$  и  $B$  для исключения этой систематической погрешности:

$$A_{\text{corr}}(h_i) = A(h_i)/k_s, \quad (1)$$

$$B_{\text{corr}}(h_i) = B(h_i) k_s, \quad (2)$$

$$\frac{A_{\text{corr}}(h_i)}{B_{\text{corr}}(h_i)} = [A(h_i)/B(h_i)]/k_s^2 \quad (3)$$

<sup>1</sup> Данный алгоритм легко переносится почти на любые две другие антенны, лучше — на близко расположенные

5. Оценивается поправка  $k_s$ . Усреднив (аппроксимацией по среднему квадрату) предыдущее равенство и отнеся его к подвыборке сильных источников, получим:

$$\langle \frac{A_{\text{corr}}(h_i)}{B_{\text{corr}}(h_i)} \rangle = \langle [A(h_i)/B(h_i)] \rangle / k_s^2, \quad (4)$$

где символы « $\langle \rangle$ » обозначают аппроксимацию по высотам. Заменяя значение в левой части этого равенства единицей, а числитель в скобках в правой части — уравнением аппроксимации  $P_1(h_i)$ , получаем

$$k_s \equiv k_s(h_i) = \sqrt{P_1(h_i)}. \quad (5)$$

Это выражение оценено по подвыборке сильных источников, но применимо ко всей выборке, так как характеризует систематическую погрешность калибровки.

6. При необходимости, после завершения тонкой подстройки калибровки за счет исключения ее систематической погрешности (внесенной неполной штатной калибровки), можно выполнить средневзвешенное усреднение  $F_{\text{fin}}(h_i)$  двух результатов  $A_{\text{corr}}(h_i)$  и  $B_{\text{corr}}(h_i)$  для каждого измеренного источника по стандартной методике [10]:

$$F_{\text{fin}}(h_i) = \frac{A_{\text{corr}}(h_i)p_A + B_{\text{corr}}(h_i)p_B}{p_A + p_B}, \quad (6)$$

где  $p_A = 1.0$ ,  $p_B = (\sigma_A/\sigma_B)^2$ , а  $\sigma_A$  и  $\sigma_B$  — среднеквадратичные отклонения  $A$  и  $B$  соответственно.

### 3. АПРОБАЦИЯ МЕТОДА: ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Измерения для апробации метода проводились в меридиане на РАТАН-600 с 1 по 7 декабря 2017 года параллельно на секторах Северный и Южный с Плоским отражателем. Были отобраны 145 объектов из двух списков: РСДБ-обзора проекта РадиоАстрон и наземной поддержки проекта на РАТАН-600.

На Северном секторе использовалась двухзеркальная конфигурация с подвижным вторичным зеркалом, установленным на аппаратурной кабине номер 1 с многочастотным комплексом радиометров на длинах волн 1.38, 2.7, 3.9, 6.2, 13 и 24 см. Перед наблюдением каждого источника кабина с зеркалом перемещалась по рельсам и устанавливалась в новое положение фокуса антенны.

На Южном секторе с Плоским отражателем использовалась трехзеркальная система с неподвижным зеркалом, установленным на аппаратурной кабине номер 2 с комплексом радиометров на длины волн 1.38, 2.7 и 6.2 см.

**Таблица 1.** Коэффициенты  $a, b, c, d$  и  $e$  полиномиальных аппроксимаций отношений спектральных плотностей потоков излучения объектов, измеренных на двух секторах на трех частотах в 2017 г., показанных на рис. 2, 3 и 4, в зависимости от высоты источников.

Частота, ГГц	$a$	$b$	$c$	$d,$ $e-5$	$e,$ $e-8$
21.7	0.235	0.061	-0.001	1.059	-2.786
11.2	0.817	0.007	0.0004	-1.265	8.348
4.8	-1.547	-0.053	0.002	-2.750	14.090

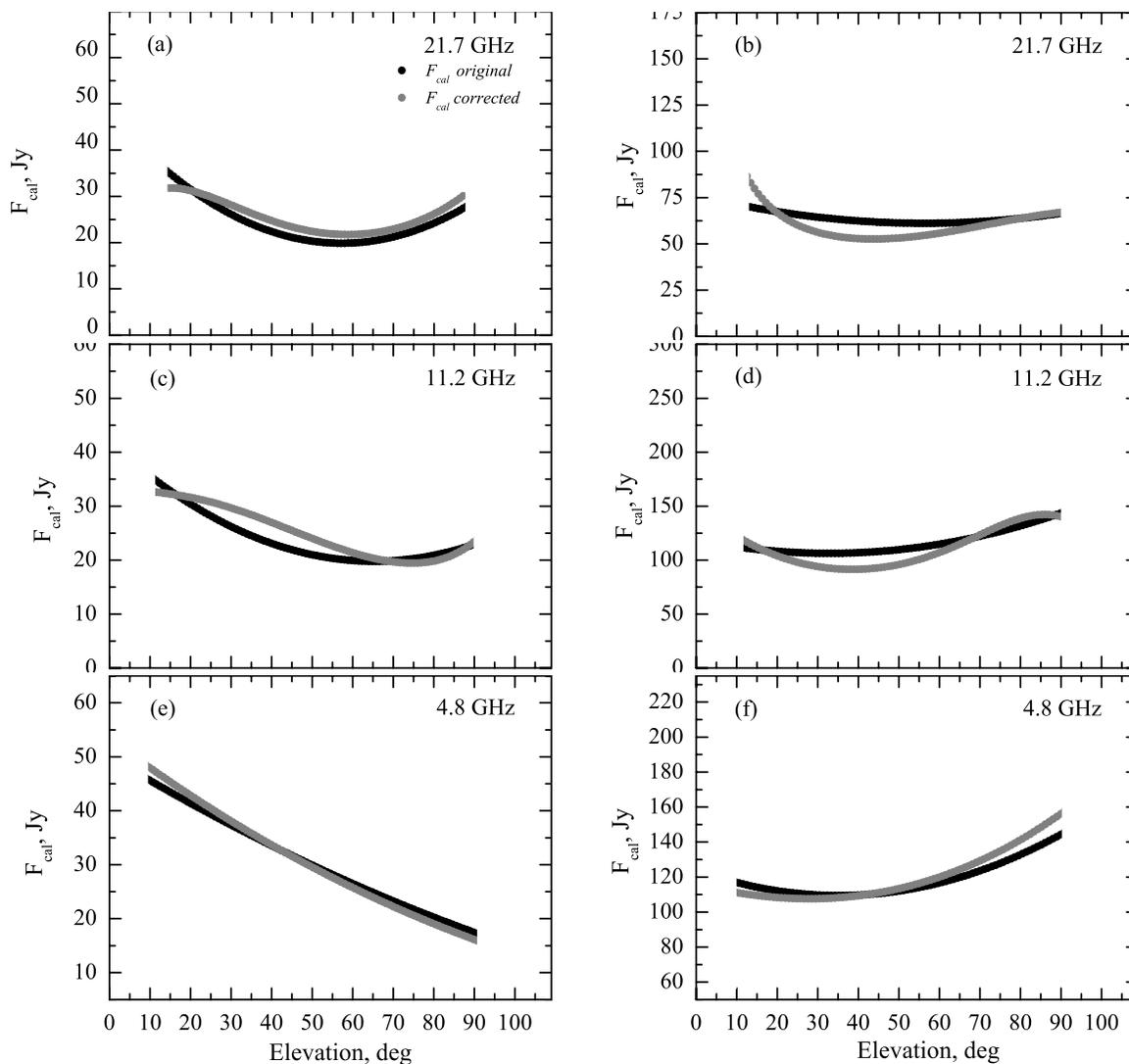
Наблюдения проводились при неподвижных Южном секторе и кабине 2, а наведение на источник выполнялось Плоским отражателем. В обоих случаях источники проходили через многочастотные диаграммы направленности секторов благодаря суточному вращению Земли. Каждый цикл измерений на всех длинах волн занимал несколько минут, включая два интервала по 30 секунд с импульсами от внутреннего шумового генератора в начале и конце цикла.

Регистрация измерений осуществлялась штатной системой, построенной на основе оборудования *ER-DAS* (Embedded Radiometric Data Acquisition System) [11]. Обработка проводилась с помощью программных средств, разработанных в АКЦ ФИАН [8] и в САО РАН [9]. Для контроля и исключения влияния систематических ошибок обработки на результат использовались обе программы обработки данных независимо. Подробно процедура калибровки измерений описана в работах [8, 9]. Примеры результатов обработки спектральных измерений на РАТАН-600 этими средствами можно найти в публикациях [12, 13]. После завершения такой обработки и калибровки для данной выборки объектов применялась тестируемая методика, описанная выше.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Калибровочные зависимости для обоих секторов, полученные штатным способом, до применения данной методики, представлены на рис. 1 (черным). Здесь по оси  $X$  — высота установки антенны  $h$  (можно использовать фокусное расстояние [9]); по оси  $Y$  — калибровочный коэффициент перевода амплитуды источников в единицы спектральной плотности потока в Янских на заданной высоте в методиках калибровки измерений [8, 9].

В таблице 1 приведены полиномиальные аппроксимации отношений спектральных плотностей потоков в зависимости от высоты источников, полученные на трех частотах. Корень квадратный из



**Рис. 1.** Калибровочные зависимости для Северного сектора (слева) и Южного сектора с Плоским отражателем (справа) на трех частотах, полученные штатным способом (черным) и с учетом рассчитанных поправок (серым). Здесь  $F_{\text{cal}} = 2kT_{\text{ns}}/A_{\text{eff}}$  [8],  $F_{\text{cal}}/T_{\text{ns}} = 2k/A_{\text{eff}} = g_{\nu}$  из [9], где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_{\text{ns}}$  — антенная температура шумового генератора,  $A_{\text{eff}}$  — эффективная площадь антенны, зависящая от высоты  $h$ .

этих зависимостей есть поправка  $k_s(h)$  к штатным калибровочным кривым (показаны черным цветом на рис. 1). На эту поправку нужно умножить калибровочную кривую для Северного сектора (т.е. для сектора с измерениями, стоящими в знаменателе отношения потоков) и разделить на нее калибровочную кривую для сектора «Юг+Плоский» (для сектора с измерениями в числителе).

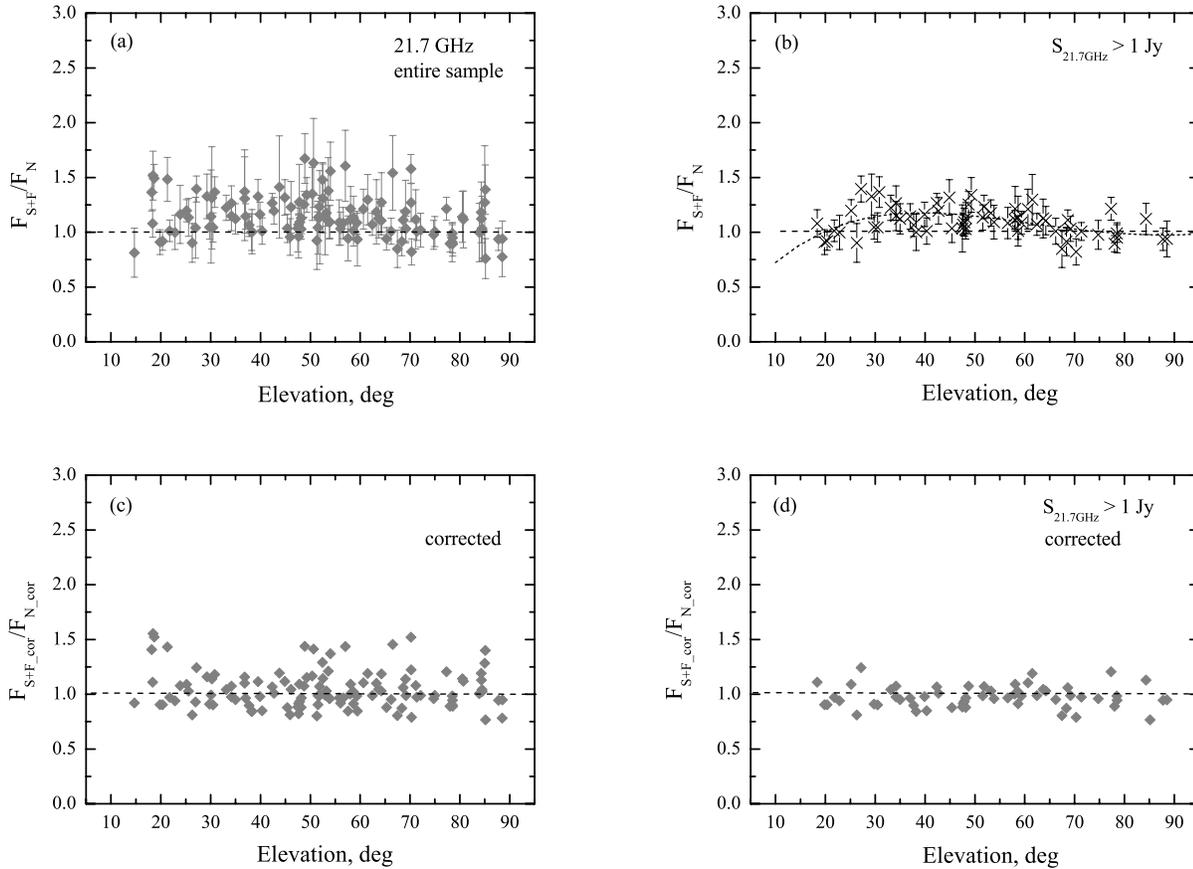
Результирующие калибровки для обоих секторов, полученные после применения методики «самокалибровки», показаны на рис. 1 серым цветом, как результат исключения обнаруженных систематических погрешностей.

Итоговый результат применения метода суммируется в таблице 2: представлены погрешности до

и после процедуры коррекций за систематические отклонения.

Отношения спектральных плотностей потоков, синхронно измеренных на обоих секторах на частотах 21.7, 11.2 и 4.8 ГГц в зависимости от высоты, даны на рис. 2, 3 и 4 соответственно, — для всей выборки и для подвыборки сильных источников (больше 1 Ян), до и после коррекции (см. шаги 1–4 в разделе описания метода). На рис. 5, 6 и 7 показаны статистические оценки по результатам коррекции потоков на этих частотах.

Данные на рис. 2–4 и рис. 5–7 наглядно отображают существенное улучшение симметрии распределения результатов измерений относительно единицы: до и после ввода коррекций. Это указывает на эффективность исключения система-



**Рис. 2.** Реализация метода и результаты его применения для частоты 21.7 ГГц (длина волны 1.38 см): отношения спектральных плотностей потоков излучения источников, синхронно измеренных на Южном с Плоским отражателем и на Северном секторах ( $F_{S+F}$  и  $F_N$  соответственно), в зависимости от высоты  $h$  по всей выборке (a) и для контрольной выборки  $N_1 < N$  с аппроксимацией полиномом четвертого порядка, описывающим статистику отклонения отношений потоков (b); отношение скорректированных потоков для всей выборки (c) и для контрольной выборки (d) в зависимости от высоты. Здесь  $F_{S+F}$  эквивалентно  $A(h_i)$ , а  $F_N - B(h_i)$  из (1) и (2).

тических погрешностей из исходных наблюдений тестируемым методом. Результаты таблицы 2 дают количественную характеристику отклонений от идеальности (когда  $A/B = 1$ ) до и после использования метода: с 13 до 3 процентов на длине волны 1.4 см, с 6 до 1 процента на 2.7 см и с 5 до 3 процентов на 6.2 см. Эффект корректировки потоков максимально выражен на частоте 11.2 ГГц. На частоте 4.8 ГГц систематическая погрешность калибровки, а значит и поправки, минимальны. На частоте 21.7 ГГц, где индивидуальные погрешности измерений потоков достигают 10% и более, эффект корректировки калибровки часто лежит внутри погрешности измерений.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о положительных результатах тестирования метода и целесообразности его дальнейшего применения и развития.

Представляет определенный интерес анализ

**Таблица 2.** Количественные показатели отношений плотностей потоков  $C = A/B$  излучения источников до и после использования метода самокалибровки.

Частота, ГГц	$C(\sigma_C)$	
	до	после
21.7	1.13 (0.19)	1.03 (0.15)
11.2	1.06 (0.11)	0.99 (0.06)
4.8	0.95 (0.09)	0.97 (0.08)

причин особенностей, наблюдаемых в зависимости систематической погрешности от высоты на рис. 2, 3 и 4 для сильных источников (панели (b)). Так, кривые на длинах волн 1.38 и 2.7 см (частоты 21.7 и 11.2 ГГц) подобны друг другу, но заметно отличаются от кривой для длины

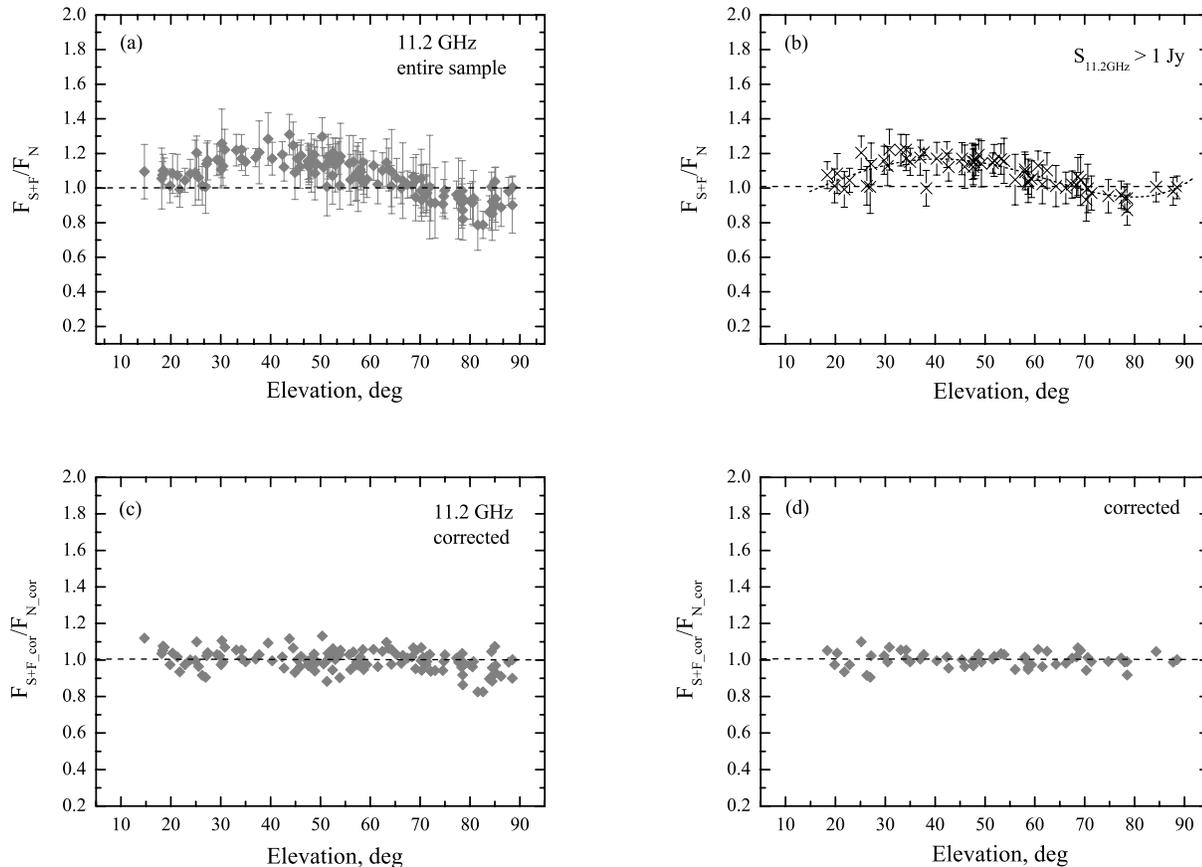


Рис. 3. То же, что на рис.2, но для частоты 11.2 ГГц (длина волны 2.7 см).

волны 6.25 см (частота 4.8 ГГц). Предварительно можно предположить, что к таким эффектам могла бы привести комбинация нескольких причин: 1) небольшие отклонения рельсовых путей от прямой в направлении Север–Юг на Северном секторе, 2) поперечный вынос рупора на 6.25 см из фокуса на вторичном зеркале номер 1, частично компенсирующий такую кривизну рельсов, 3) отсутствие достаточного количества калибровочных объектов в диапазоне высот от 20 до 60 градусов, которые могли бы благодаря детальной калибровке учесть и устранить эти искажения.

Можно ожидать, что к аналогичному эффекту будет приводить отличие реальной траектории перемещений центра подвижного вторичного зеркала от идеальной осевой прямой (или от проектной кривой) в больших двухзеркальных параболических антеннах при наблюдениях на разных высотах. Было бы полезно проверить эти предположения дальнейшими измерениями и оценить их количественно антенным расчетом.

## 5. ВЫВОДЫ

1. В работе предложен и апробирован новый метод самокалибровки двух секторов РАТАН-600 как процедура обнаружения и исключения или существенного уменьшения систематических погрешностей измерений с помощью синхронных наблюдений на этих секторах большого количества компактных исследуемых объектов.
2. Получены положительные результаты применения метода к секторам Северному и Южному с Плоским отражателем по измерениям спектральных плотностей потоков излучения 145 РСДБ объектов обзора проекта РадиоАстрон и объектов наземной поддержки проекта на РАТАН-600 с 1 по 7 декабря 2017 года на длинах волн 1.4, 2.7 и 6.2 см в рабочем диапазоне высот от 15 до 90 градусов. Предложены для дальнейшей проверки и использования при калибровках численные значения корректировочных коэффициентов на этих длинах волн.
3. Метод применим для взаимной калибровки также любых двух близко расположенных радиотелескопов. Использование в настоящей работе

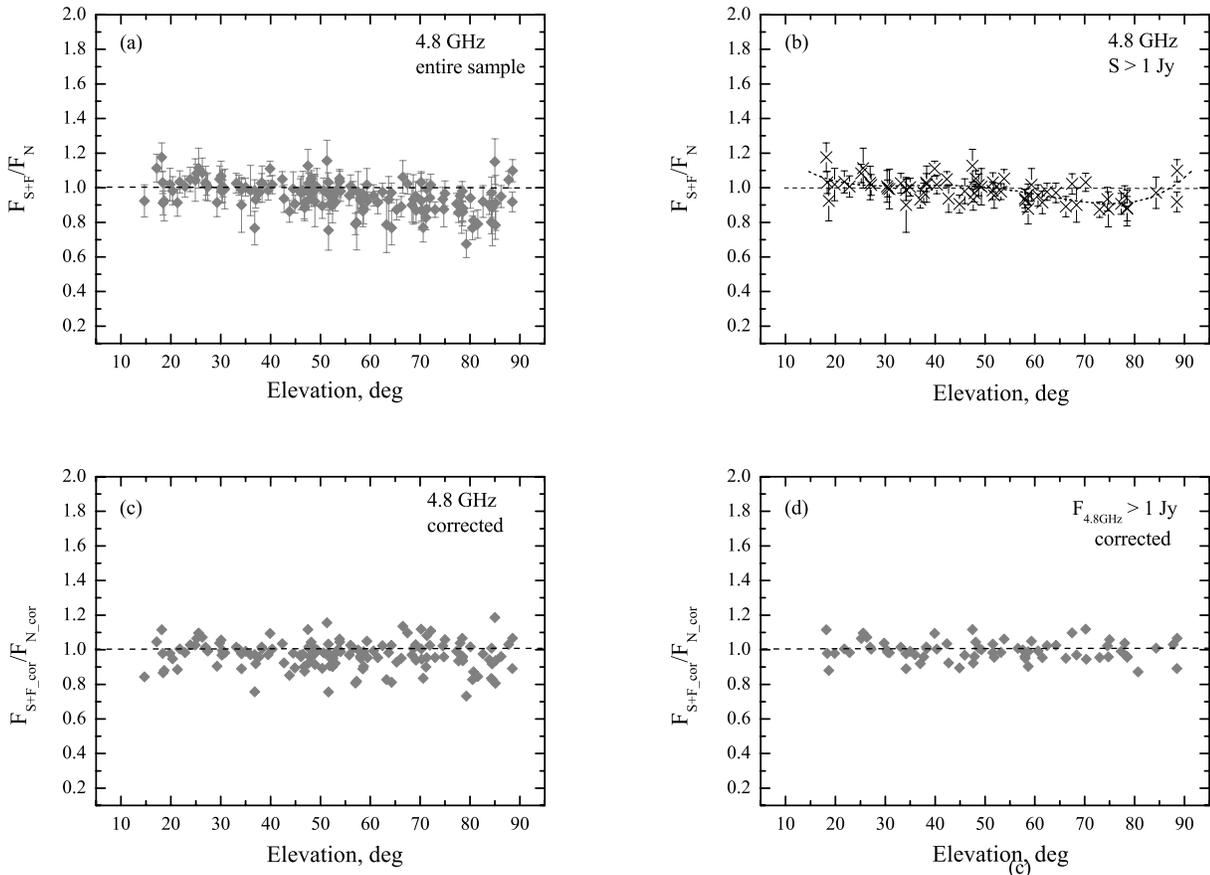


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для частоты 4.8 ГГц (длина волны 6.2 см).

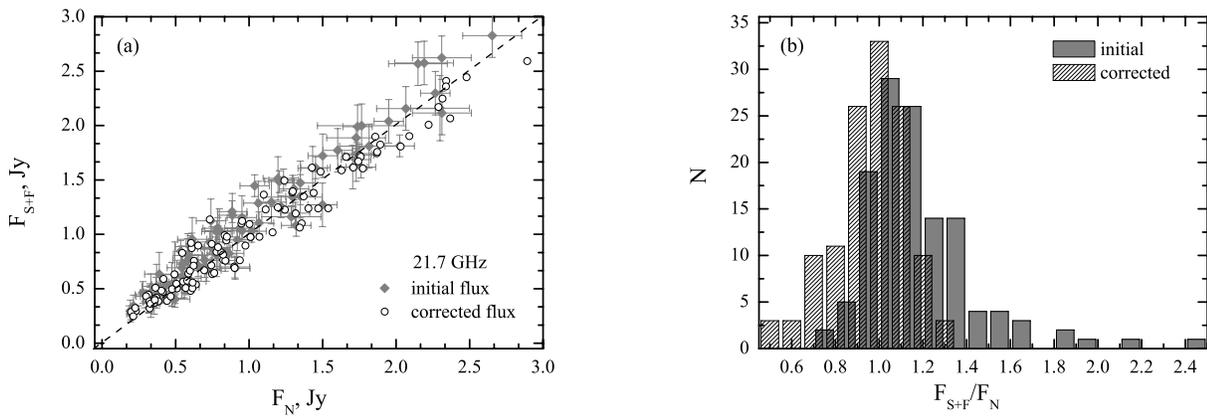


Рис. 5. Результаты коррекции потоков для частоты 21.7 ГГц: (а) зависимость между спектральными плотностями потоков одних и тех же источников, измеренных на Северном секторе  $F_N$  и на Южном с Плоским отражателем  $F_{S+F}$ , до коррекции (серые ромбы) и после нее (белые кружки); (б) распределение отношений потоков до коррекции (сплошным серым) и после нее (заштрихованным).

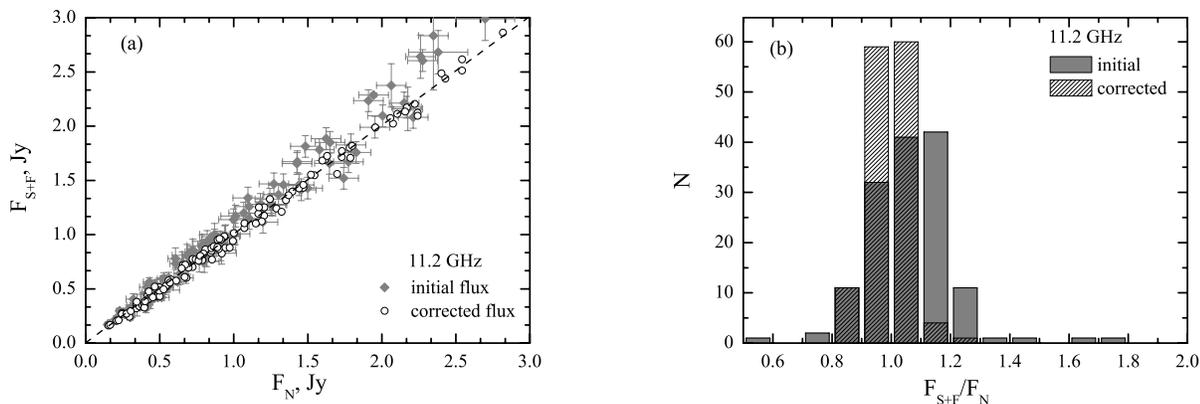


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но для частоты 11.2 ГГц.

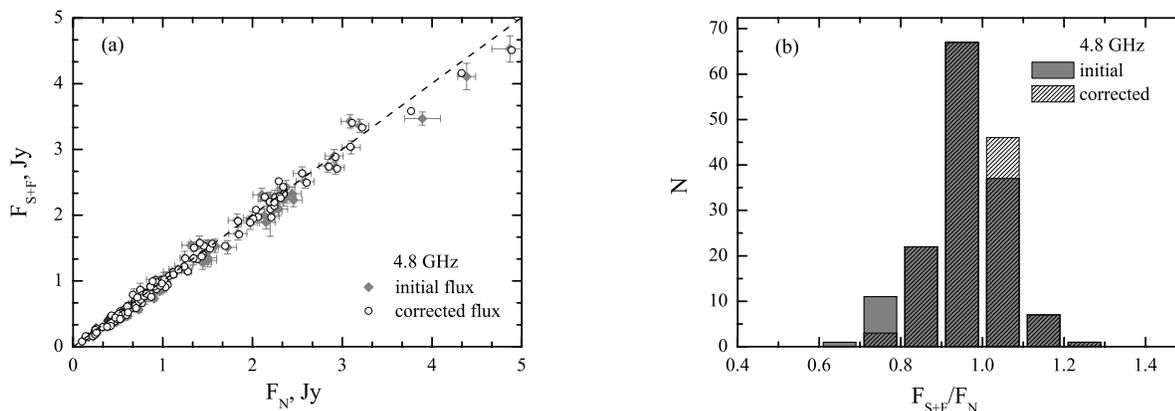


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, но для частоты 4.8 ГГц.

антенн с разными поверхностями и разным изменением эффективной площади с высотой является оптимальным. Калибровочные зависимости для таких антенн не являются идентичными, а обнаруженная систематика отображает особенности поведения  $A_{\text{eff}}$  для каждой из них, например, разные высоты достижения максимальной  $A_{\text{eff}}$ .

4. Метод не исправляет промахи измерений (грубые ошибки). Пример промаха можно увидеть на рис. 3b вблизи высоты  $40^\circ$ . В этом случае точка  $A(h_i)/B(h_i)$  лежит в противоположной стороне от полинома аппроксимации относительно линии  $Y = 1$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и протестирован новый метод самокалибровки РАТАН-600 по синхронным наблюдениям сильных радиоисточников на двух его секторах. Метод показал свою эффективность и является первым приближением решения задачи кор-

рекции систематических погрешностей измерений спектральных плотностей потоков.

Его отличительными особенностями являются:

- 1) использование двух секторов РАТАН-600 (или близко расположенных антенн) и большого количества исследуемых объектов, включая переменные;
- 2) проведение на этих секторах (антеннах) синхронных измерений каждого объекта в меридиане;
- 3) расчет поправок к стандартным калибровочным зависимостям РАТАН-600 согласно предложенной методике.

Если полученные поправки самокалибровки вызваны систематическими погрешностями установки антенны, неучтенными первичной стандартной калибровкой, то можно ожидать их повторяемость. Если же причина в неточности получения

стандартных калибровочных зависимостей из-за недостаточного количества первичных калибровочных данных, то эти поправки могут меняться от цикла к циклу.

Преимуществом метода является независимость его результатов от переменности объектов, атмосферных и погодных условий, возможность использования большого количества источников как опорных в дополнение к ограниченному количеству стандартных калибровочных объектов, а также возможность простого периодического контроля систематики погрешности калибровки в штатных текущих наблюдениях.

Несмотря на то, что эффект от корректировки потоков предложенным методом в данном цикле измерений получился не слишком большим, впервые появляется возможность количественно оценивать корректность калибровки РАТАН-600 на основе собственных наблюдений, без постановки сложных координированных наблюдений с другими телескопами.

Использование представленного метода может оказаться полезным для быстрого эффективного контроля результатов работ по лазерным геодезическим измерениям, улучшению кинематики антенных элементов [14] и повышению надежности и точности антенных и спектральных измерений на РАТАН-600.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на научном оборудовании радиотелескопа РАТАН-600 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук при поддержке Министерства

науки и высшего образования Российской Федерации. Авторы выражают благодарность научному и техническому коллективу САО РАН, обеспечивающему круглосуточное функционирование РАТАН-600.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
2. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
3. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **204**, 19 (2013).
4. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **230**, 7 (2017).
5. S. E. Khaikin, N. L. Kaidanovskii, I. N. Pariiskii, and N. A. Esepkina, *Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoy Observatorii v Pulkove* **188**, 3 (1972).
6. D. V. Korolkov and I. N. Pariiskii, *Sky Telesc.* **57**, 324 (1979).
7. Y. N. Parijskij, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **35**, 7 (1993).
8. Y. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Y. A. Kovalev, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **139**, 545 (1999).
9. R. Y. Udovitskiy, Y. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 496 (2016).
10. T. A. Agekyan, *Osnovy teorii oshibok dlya astronomov i fizikov* (Nauka, Moscow, 1972) [in Russian].
11. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 109 (2011).
12. Y. A. Kovalev, Y. Y. Kovalev, and N. A. Nizhelsky, *Publ. Astron. Soc. Japan* **52**, 1027 (2000).
13. M. Mingaliev, Y. Sotnikova, T. Mufakharov, et al., *Astronomische Nachrichten* **338**, 700 (2017).
14. V. I. Zharov and Y. V. Sotnikova, *Astrophysical Bulletin* **72**, 480 (2017).

## The Synchronous Calibration Method for the RATAN-600 using Its Two Sectors

Yu. V. Sotnikova, Yu. A. Kovalev, and A. K. Erkenov

A method of “self-calibration” of two sectors of the RATAN-600 radio telescope based on synchronous measurements of strong extragalactic sources, including variable ones, is proposed. The method gives refined corrections to the standard calibration of each of the telescope’s sector. It is based on the fact that ideal synchronous independent measurements of the same object should give the same results. Differences from the unity of the result of approximating the flux ratio synchronously measured at two sectors for a subsample of strong sources are considered as systematic calibration errors and used to calculate corrections that exclude these errors, and are applied to measurements of all sample objects in this observation cycle. The method was tested with RATAN-600 two sectors in meridian multi-frequency measurements and can be used for independent pairs of any closely spaced antennas. In this case, the analog of RATAN-600 sector is a separate telescope. For far-spaced antennas, an additional error will be introduced due to different effects of the atmosphere and altitude of objects during synchronous observations.

Keywords: *methods: observational—methods: data analysis*