

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА КОМПЛЕКСЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОМЕТРОВ СПЛОШНОГО СПЕКТРА РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

*К. Д. Алиакберов, М. Г. Мингалиев, М. Н. Наугольная,
С. А. Трушкин, Л. М. Шарипова, С. Н. Юсупова*

Приводится список 11 наиболее употребительных опорных источников, их принимаемые плотности потоков. По наблюдениям этих источников определяются эффективные площади радиотелескопа. Экспериментальные графики зависимости $A_{эф}$ от высоты приводятся для Северного сектора и системы Южный сектор с перископом. Приводятся оценки измерения плотностей потоков радионисточников при многочастотных наблюдениях.

The list of 11 more-common calibrating sources and their flux-densities at the cm wavelengths are given. These sources are used for the effective area measurements. The experimental diagrams of the A_{ef} of the North sector and the South sector with periscope antennas are given. The estimates of errors in the flux-density measurements were made.

Особенности геометрии радиотелескопа РАТАН-600 [1—4] позволяют при малых потерях сигнала за счет поперечных aberrаций измерить плотности потоков радионисточника в течение одного наблюдения. Это резко сокращает время построения радиоспектра источника, что в особенности важно для исследования быстропеременных источников [5], например, таких как SS 433. В зоне малых aberrаций с размерами около 1 м сосредоточены 6 входных трактов радиометров от $\lambda=1.38$ до $\lambda=31.3$ см. Несмотря на относительно малый вклад на низких и средних высотах, поперечные aberrации приходится учитывать. Из-за того что в системах АПП с изменением высоты источника меняется и фокусное расстояние, меняется и эффективная площадь и aberrационное ослабление сигнала [4, 6]. Поскольку трудно поставить опорный источник по указанным параметрам в такие же условия, что и исследуемый, удобнее оказалось получать эффективные площади $A_{эф}$ антенны, а коэффициенты ослабления за счет выноса рупора из фокуса измерять заранее по сильным источникам. В настоящее время влияние aberrаций рассчитывается на ЭВМ [6—8]. По величинам $A_{эф}$ производится контроль за состоянием антенны. Многочастотные наблюдения дают преимущества при подавлении атмосферных помех [9]. В данной работе авторы дают некоторые рекомендации к процедуре получения радиоспектров источников посредством «привязки» радиотелескопа по опорным объектам.

Опорные источники. На антеннах малого углового разрешения с помощью абсолютных измерений плотности потока составлена абсолютная шкала радиопотоков, в основе которой лежит мощный радионисточник CasA, расширяющий остаток сверхновой [10]. Точность абсолютной шкалы около 2%. Для удобства наблюдений на телескопах с высоким разрешением существует группа вторичных стандартов неперемещаемых и достаточно сильных радионисточников малого углового размера. Точность определения $A_{эф}$ по ним около 5%. С целью обеспечения надежности «привязки» и экономии наблюдательного времени, выделяемого для опорных источников, отбор производился по двум критериям. Во-первых, чтобы по возможности во всем диапазоне от $\lambda=1.38$ до $\lambda=31.3$ см опорный источник был сильным. Во-вторых, чтобы угловые размеры были меньше или сравнимы с размерами диаграммы направленности на самой короткой волне. В табл. 1 и 2 приведен список 11 таких объектов, их координаты, ото-

ждествления, размеры, принимаемые плотности потока и, наконец, параметры линейной поляризации. Эти данные получены интерполированием измерений, собранных в работах [10—13]. В табл. 1 даны ошибки ΔS_y определения соответствующих плотностей потоков S_y . Ниже мы покажем, что для радиометров, которые чувствительны к одному состоянию поляризации, необходимо учитывать состояние поляризации опорного источника. Источник ЗС 309.1 медленно

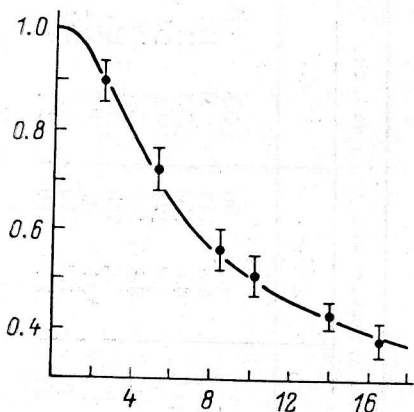


Рис. 1. Падение амплитуды сигнала при поперечном выносе рупора из фокуса на высоте $H=52^\circ$ (Северный сектор).

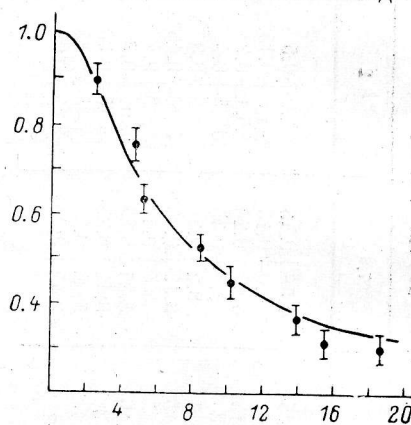


Рис. 2. Падение амплитуды сигнала при поперечном выносе рупора из фокуса на высоте $H=40^\circ$ (Северный сектор).

уменьшается по плотности потока, как следует из работ [11, 14]. Мы для него принимаем следующие формулы уменьшения потоков, Ян:

$$S_y(2.3 \text{ ГГц}) = 6.47 [1 - 0.021 (t - 1970.0)];$$

$$S_y(6.7 \text{ ГГц}) = 3.23 [1 - 0.021 (t - 1970.0)];$$

$$S_y(10.7 \text{ ГГц}) = 2.48 [1 - 0.024 (t - 1970.0)].$$

Для планетарной туманности NGC 7027 мы считаем, что ее изображение представляет собой равномерный диск с диаметром $D=8''$. В этом случае коэффициент исправления за размер источника, равный отношению телесных углов источника и главного лепестка диаграммы направленности, определяется формулой

$$k_0 = \sqrt{\frac{x^2}{1 - \exp(-x^2)}}, \quad x = \frac{D}{1.2\theta_a},$$

где θ_a — полуширина горизонтального сечения диаграммы направленности. Ясно, что этот коэффициент существен для волн $\lambda \leq 3.9$ см. Источник 2128+04 зарекомендовал себя как неперемещенный в наблюдениях по программе «Холод», когда в течение 4 месяцев он не менялся по плотности потока в пределах ошибок измерений. Относительное изменение этого источника за 1980—1981 гг. не превышает 2% на волне $\lambda=8.2$ см. Источник 1151-34 используется для определения эффективности антенны на малых высотах. Измерения его плотности потока [15, 13] показывают хорошую сходимость, что дает основание считать 1151-34 неперемещенным источником. Все остальные источники часто используются в качестве калибровочных на многих радиотелескопах.

Учет аббераций. В настоящее время весь расчет коэффициентов исправления за абберации k_{ab} производится с помощью ЭВМ по специальным программам. В дальнейшем предполагается полностью восстанавливать изображение источника по подобным программам. На рис. 1, 2 показано, что расчет хорошо согласуется с экспериментом. Различие обусловлено неточным учетом постоянной времени и шумами радиометра. Экспериментальные точки сняты по источникам ЗС 161 и ЗС 120 на волне $\lambda=3.9$ см. Входными параметрами фортрановских программ являются высота источника, вынос рупора, длина волны, макси-

мальный угол раскрытия первичного зеркала и диаграмма направленности входного рупора радиометра. В программе учитываются поляризационные характеристики радиотелескопа [8, 6].

Учет поляризации опорных источников. Отклик системы антенна+радиометр на поляризованный источник с плотностью потока S_v и степенью поляризации p дается формулой [16]

$$kT_a = \left[(1-p)/2 + p \cos^2 \left(\frac{\widehat{MM}_a}{2} \right) \right] A_{\text{эф}} S_v = F A_{\text{эф}} S_v, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана. Величина F вводится для обозначения квадратных скобок и представляет собой коэффициент связи волны от источника с антенной. \widehat{MM}_a — угол между состоянием поляризации источника и антенны на сфере Пуанкаре. Для источников, поляризованных только линейно,

$$\widehat{MM} = 2(\chi_a - \chi_n),$$

т. е. удвоенной разности позиционных углов поляризации источника и антенны. В более общем случае наблюдений в азимуте в формуле для коэффициента F

ТАБЛИЦА 3

Сектор	$\lambda, \text{ см}$									
	1.38		2.08		3.9		7.6	8.2		31.3
	W	E	W	E	I	I	I	II	I	
Северный, χ_a	0	0	135	90	0	45	90	135	90	0
Юг+II, χ_a	0	0	45	90	0	135	90	45	90	0

ТАБЛИЦА 4

Параметр	$\lambda, \text{ см}$					
	1.38	2.08	3.9	7.6	8.2	31.3
$T_r, \text{ м}$	3.9+0.2	1.16+0.03	0.92+0.03	0.190+0.006	0.48+0.02	4.7+0.3
a_v	0.2	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
b_v	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03

добавляется позиционный угол χ_a оси прямых восхождений, выводимый на печать в программе расчета эфемерид источников:

$$F = (1-p)/2 + p \cos^2(\chi_a - \chi_n - \chi_a).$$

Из формулы видно, что величина, обратная F , может существенно отличаться от 2. В табл. 3 приведены позиционные углы анализаторов радиометров χ_a , град., для Северного сектора и Южного сектора с перископом. Для радиометров $\lambda=1.38, 2.08, 3.9$ см даны χ_a для каждого из двух трактов, используемых для диаграммной модуляции с целью подавления атмосферных помех.

Определение эффективных площадей. Из формулы (1) получаем

$$A_{\text{эф}} = \frac{kT_a k_\tau}{F S_v k_{a\delta}} k_0,$$

где k_τ — коэффициент, учитывающий влияние постоянной времени выходного НЧ-фильтра радиометра. На рис. 3, 4 приведены экспериментальные графики зависимости $A_{\text{эф}}$ от высоты на разных длинах волн, измеренных в одном цикле наблюдений в конце 1981 — начале 1982 г. Каждая точка на графиках — результат усреднения 3—4 наблюдений. В ошибки не входят погрешности измерения температуры калибровочного сигнала от генераторов шума. Эти ошибки входят

одинаковым образом в измерения антенной температуры опорного и исследуемого источника. Значения $T_{г.ш}$ приведены в табл. 4. Падение $A_{эф}$ на низких высотах происходит за счет сокращения апертуры и за счет поглощения в атмосфере. На высоких углах апертура увеличивается для Северного сектора и слабо уменьшается для Южного сектора с перископом. Разница в $A_{эф}$ на $\lambda=7.6$ и 8.2 см, по-видимому, обусловлена ошибками абсолютных определений $T_{г.ш}$, которые на этих волнах не превышают 5%. Обычно $A_{эф}$ определяется после каждой юстировки на коротких волнах и потом контролируется по отдельным опорным источникам в текущих программах наблюдений.

Ошибки измерения плотностей потоков. Для единичного наблюдения среднеквадратичная ошибка измерений определяется формулой

$$\Delta S_y^2 = \Delta S_{ш}^2 + (a_y^2 + b_y^2) S_y^2, \quad (2)$$

Рис. 3. Зависимость $A_{эф}$ от высоты источника на разных волнах для Северного сектора.

Измерения сделаны в декабре 1981 г.

где $\Delta S_{ш}$ — ошибка, вносимая шумами приемника; $a_y S_y$ — ошибка, вносимая погрешностью калибровки по плотности потока S_y или погрешностью опре-

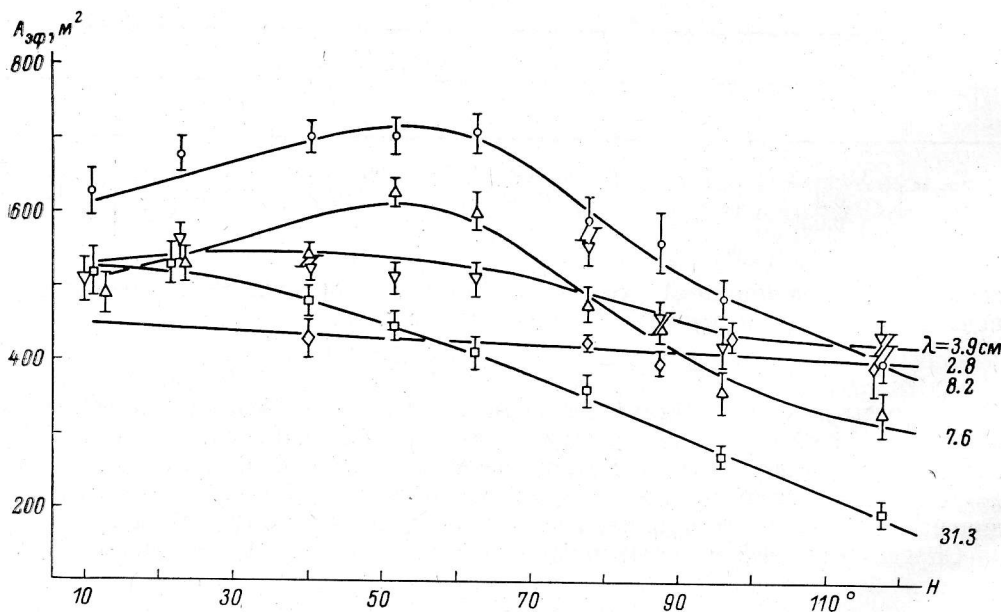
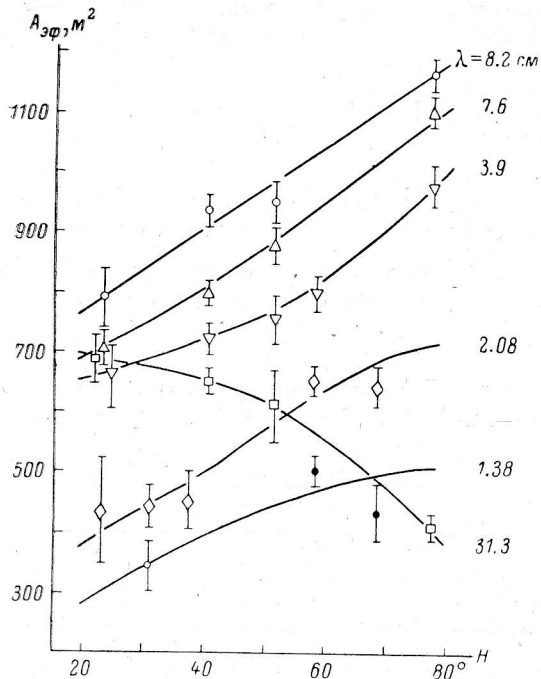


Рис. 4. Зависимость $A_{эф}$ от высоты источника на разных волнах для Южного сектора с перископом.

Измерения сделаны в январе 1982 г.

деления $A_{эф}$ без учета ошибки шкалы потоков; $b_y S_y$ — ошибка, вносимая инструментальными нестабильностями главного и вторичного зеркал телескопа. Величина $\Delta S_{ш}$ уменьшается по мере улучшения чувствительности радиометров или за счет увеличения времени накопления в одном наблюдении (режим «сколь-

жения»). Ошибка b, S , может быть равна практически нулю в обзорных наблюдениях, как, например, в программе «Холод». Относительная ошибка a , меняется в довольно широких пределах в зависимости от числа и мощности опорных источников, использованных в данном диапазоне склонений, числа их наблюдений. Для программ обзоров можно понизить a , до значений, приводимых в табл. 4. Для проверки правомерности использования формул выборочного среднего, дисперсии и правила переноса ошибок мы проверили гипотезу о нормальности распределения ошибок. Использовались 118 наблюдений источника 2128+04 на λ 3.9 см. По критерию χ^2 [17] при уровне значимости $\alpha=0.05$ нет оснований сомневаться в указанном распределении ошибок. По длительным циклам наблюдений опорных источников можно определить величины относительных ошибок a , и b .

Заключение. Мы рассмотрели процедуру определения плотностей потоков точечных радиоисточников по опорным объектам. Если источники имеют размеры много меньше вертикальной диаграммы радиотелескопа, то можно использовать приближение ножевой диаграммы и не определять амплитуды $T_a^{оп}$, а использовать интегральные характеристики $\int T_a d^{оп} \Omega$ и также определять плотности потоков радиоисточников малого углового размера. Следует также подчеркнуть, что экспериментальные графики, приведенные в этой работе, не носят абсолютного характера, так как работы по усовершенствованию телескопа продолжаются [18]. Так, пока еще не исследована достаточно полно работа телескопа с автоматической установкой элементов на источник.

Авторы глубоко признательны А. Н. Коржавину, Г. Б. Гельфрейху за возможность использования расчетных программ аббераций, а также Ю. Н. Парийскому за ценные замечания.

Литература

1. Радиотелескоп РАТАН-600 / С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, Н. А. Еспкина — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 3—11.
2. Радиотелескоп РАТАН-600: ввод в действие и исследование первой очереди / Ю. Н. Парийский, О. Н. Шиврис, Д. В. Корольков и др. — Радиофизика, 1976, 19, с. 1581—158.
3. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. Методы радиоастрономического использования. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 13—39.
4. Стоцкий А. А. Абберации главного зеркала АПП и сканирование диаграммы направленности путем смещения облучателя. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 63—76.
5. Спектры некоторых переменных радиоисточников по наблюдениям на РАТАН-600 / М. Г. Мингалиев, С. А. Пустильник, С. А. Трушкин и др. — Астрофизика, 1978, 14, с. 91—97.
6. Коржавин А. Н. Диаграммы направленности АПП для реальных режимов работы. — Астрфиз. исслед. (Изв. САО), 1977, 9, с. 71—88.
7. Гельфрейх Г. Б. Об одном алгоритме расчета диаграммы направленности антенны типа РАТАН-600 с учетом аббераций и поляризационных эффектов. — Астрфиз. исслед. (Изв. САО), 1977, 9, с. 89—98.
8. Гельфрейх Г. Б. Реализация алгоритма расчета диаграммы направленности АПП. — В кн.: XI Всесоюзная радиоастрономическая конференция по аппаратуре, антеннам и методам, 26—31 октября 1978 г. Тезисы докл. Ереван, 1978, с. 171—172.
9. Кайдановский М. Н. Чистка записей протяженных радиоисточников от атмосферных помех при многоволновом приеме. — Астрфиз. исслед. (Изв. САО), 1981, 13, с. 103—105.
10. The absolute spectrum of Cas A. A accuratr flux density scale and a set of secondary calibrators / J. N. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, A. Witzel — Astron. and Astrophys., 1977, 61, p. 99—106.
11. Klein M. I., Stelzried C. T. Calibration radio sources for radio astronomy: precision flux-density measurements at 2295 MHz. — Astronom. J., 1976, 81, p. 1078—1083.
12. Табара Н., Иноуэ М. A catalogue of linear polarization of radio sources. — Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1980, 39, p. 379—393.
13. Perley R. A. The positions of 400 compact radio sources. — Astronom. J., 1982, 87, p. 860—880.
14. Andrew B. H. A ten-year study of extragalactic variable sources at centimeter wavelengths. — Astronom. J., 1978, 83, p. 683—899.
15. A catalogue of radio sources / H. Kuhr, U. Nauber, I. I. K. Pauliny-Toth, A. Witzel — M. P. I. für R. Preprint, 1979, № 55.
16. Краус Д. Радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1973.
17. Броштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.: Наука, 1980.
18. Исследование точности отражающей поверхности главного зеркала РАТАН-600 (Северный сектор) / С. Я. Голосова, Н. А. Еспкина, Ю. К. Зверев и др. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1982, 15, с. 132—150.

Поступила в редакцию 1 ноября 1982 г.