

Научно-исследовательский радиофизический институт
Министерства образования Российской Федерации

Препринт № 485

**АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ
С КАЛИБРОВКОЙ ПО ДВУХТЕМПЕРАТУРНОМУ
ЧЕРНОТЕЛЬНОМУ ЭТАЛОНУ.**

Часть 2.

Учет поправок и оценка погрешностей. Результаты

Н. А. Дугин
И. П. Кузнецова
В. А. Разин
Н. Р. Троицкий

Нижний Новгород 2004

Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А. Троицкий Н. Р. Абсолютные измерения плотностей потоков радиоизлучения космических источников с калибровкой по двухтемпературному чернотельному эталону. Часть 2. Учет поправок и оценка погрешностей. Результаты // Препринт № 485. — Нижний Новгород: НИРФИ, 2004. 32 с.

УДК 523.164

В 2002 году в РАО НИРФИ “Старая Пустынь” восстановлен и модернизирован стенд для проведения абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения внеземных источников с калибровкой по излучению “черных” дисков с различной температурой. Одной из основных целей проводимых работ является достижение предельно малых погрешностей измерений и максимальной реализации возможностей разработанного в НИРФИ метода “черных” дисков. В 2003 году проведены первые серии измерений в частотных диапазонах 3 и 10 ГГц.

Работа состоит из трех частей.

В первой части приведено описание стенда для абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения РАО “Старая Пустынь” — параметры аппаратуры, антенной системы, калибровочного эталона и регистрирующих устройств, а также методика работы с двухтемпературным эталоном шумового радиоизлучения.

Во второй части рассмотрены факторы, влияющие на точность измерений интенсивности космических источников в радиоастрономических экспериментах, определены коэффициенты коррекции (поправки) измеряемых данных и процедура расчета общей погрешности измерений. Приведены первые результаты.

В третьей части описана система регистрации, математическое и программное обеспечение записи и обработки данных. Приведены алгоритмы обработки файлов записи сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект №0729-01).

© Научно-исследовательский радиофизический институт

В данной части работы подробно описана методика расчета коэффициентов коррекции (поправок) измеренных величин сигналов от радиоисточников на технические и методические факторы при проведении абсолютных радиоастрономических измерений и приведен расчет общей погрешности измерений при калибровке радиотелескопа по шумовому сигналу двухтемпературного эталона радиоизлучения. Представлены результаты первых серий измерений, проведенных в 2003 году.

1. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОРРЕКЦИИ ПРИ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ВНЕЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Для достижения предельно возможных точностей абсолютных измерений с калибровкой по “черным” дискам необходимо исследовать источники случайных и систематических ошибок как общих для подобных измерений, так и присущих только данному измерительному стенду. Основное соотношение для вычисления плотности потока излучения S_ν исследуемого радиоисточника имеет вид [1]:

$$S_\nu = \frac{2k}{\lambda^2} \frac{\Delta n_{ист}}{\Delta n_d} F_d \{ \bar{T}_r - T_x \} \exp(\gamma_{ист}) K_1 K_c (1 - 0,2r^2)(1 + \delta_N), \quad (1)$$

где $F_d = \int_{\Omega_d} \frac{F}{F_{max}} d\Omega$, $\frac{F}{F_{max}}$ — нормированная диаграмма направленности (ДН) антенны, Ω_d — телесный угол диска, λ — рабочая длина волны, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана, T_x — температура не нагретого диска, \bar{T}_r — средняя температура нагреваемого эталона, $\Delta n_{ист}$ — выходной сигнал от радиоисточника относительно фона (опорной области), Δn_d — разность выходных сигналов при приеме излучения от двух дисков калибровочного эталона, $\gamma_{ист}$ — коэффициент поглощения радиоволн в атмосфере на высоте источника, r^2 — коэффициент отражения радиопоглощающего материала дисков

(коэффициент 0,2 учитывает “дочернение” диска за счет отражения излучения земли [1]), K_1 — коэффициент учета протяженности источника, K_c — коэффициент учета ошибок сопровождения источника, $(1 + \delta_N)$ — коэффициент учета падения усиления антенны из-за перефокусировки в зону Френеля.

Исходя из соотношения (1) следует выделить следующие факторы, влияющие на общую погрешность измерений:

- 1) погрешность измерения величин выходного сигнала радиометра при приеме излучения от радиоисточников и дисков, которая зависит от чувствительности приемной аппаратуры, эффективной площади антенны (от отношения сигнал/шум), стабильности атмосферы, помеховой обстановки и т. д.;
- 2) погрешность определения разности температур двух дисков калибровочного эталона;
- 3) погрешность измерения ширины диаграммы направленности антенны в зоне Френеля, которая используется для расчета параметра F_d ;
- 4) погрешность определения величины поглощения радиоволн в атмосфере, которая зависит от состояния окружающей среды (метеопараметров) и от рабочей частоты;
- 5) погрешность определения средней рабочей длины волны (или частоты), которая определяется амплитудно-частотной характеристикой радиометра (полосой пропускания);
- 6) погрешность учета протяженности источника;
- 7) точность наведения следящих систем радиотелескопа,

а также ряд других поправок, определяемых характеристиками стенда и методикой обработки данных.

В последующих разделах эти факторы будут рассмотрены подробно; при этом принято, что относительная погрешность, определяемая каждым фактором, должна быть минимальной или даются условия, при которых погрешность не должна превышать 1%.

1.1. Погрешность определения средней рабочей частоты

Средняя рабочая частота в каждом диапазоне рассчитывалась по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) радиометра, измеренной с помощью генератора стандартных сигналов. Сигнал генератора подавался на вход приемника, проводилась запись выходного сигнала при изменении частоты генератора в пределах, обеспечивающих спад измеряемого сигнала практически до нуля. Средняя частота определялась как центр тяжести площади АЧХ до уровня 0,1.

Центральные частоты в двух рабочих диапазонах стенда равны: 2829 ± 1 МГц и 8834 ± 3 МГц (длины волн — 10,6 и 3,4 см соответственно). Погрешность определения рабочих частот обусловлена, в основном, погрешностью установки частоты генератора, проверенной по калиброванному частотомеру, и не превышает 0,2%.

1.2. Измерение диаграммы направленности антенны в зоне Френеля

В соотношении (1) параметр F_d можно представить в аналитическом виде, если форму ДН антенны аппроксимировать функцией Гаусса и считать симметричной:

$$F_d = \frac{\pi}{4 \ln 2} (\Delta\theta_{0,5})^2 \left\{ 1 - \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{\Delta\theta_d}{\Delta\theta_{0,5}} \right)^2 \right] \right\}. \quad (2)$$

Здесь $\Delta\theta_d$ — угловой размер диска, $\Delta\theta_{0,5}$ — ширина ДН антенны на уровне половинной мощности в ближней зоне при фокусировке на диск. Погрешность расчета F_d для круговой (симметричной) ДН вместо эллиптической невелика. Анализ зависимости увеличения площади круга со средним диаметром $\pi(a+b)^2/2$ по сравнению с площадью эллипса πab показывает, что при реальной несимметрии ДН $< 1,06$ поправка составит

не более 0,1%, причем со знаком минус, т. е. уменьшает результат в отличие от большинства остальных поправок. Это обстоятельство можно использовать для взаимной компенсации поправок с разным знаком и примерно одинаковой абсолютной величиной, например, рассмотренной выше и коэффициента отражения поглощающего материала r^2 .

Размер диска определяется по данным геодезических измерений: расстояние до диска от точки пересечения осей вращения антенны равно $101,3 \pm 0,1$ метра, диаметр внешней апертуры термокамеры диска — 56 см; отсюда угловой диаметр диска $\Delta\theta_d = 19',05$ с погрешностью $\sim 0,5\%$.

Измерение ДН можно провести непосредственно по диску, однако, при этом возможны ошибки из-за небольшого отношения сигнал/шум и необходимости учета уширения ДН из-за больших в сравнении с ДН угловых размеров диска. Поэтому измерение ДН по азимуту и высоте проводится по сигналу генератора стандартных сигналов на средней рабочей частоте радиометра, излучающий зонд устанавливается в непосредственной близости к диску.

Относительная погрешность вычисления F_d равна

$$\delta(F_d) = \sqrt{2(\delta\theta_{0,5})^2 + (\delta \exp(x))^2}. \quad (3)$$

Погрешностью второго члена можно пренебречь и погрешность F_d определится удвоенной погрешностью измерения ДН.

Отсюда, для достижения общей относительной погрешности F_d менее 1% погрешность измерения ДН должна быть меньше 0,5%. На длине волны 10,6 см абсолютная погрешность измерения ДН, равной 61 угл. мин., должна быть не хуже 0,3 угл. мин., на 3,4 см — не хуже 0,1 угл. мин. Основным препятствием для достижения такой точности становятся следящие и приводные системы радиотелескопа и влияние переотражений излучаемого сигнала от конструкций вышки.

Как показала практика, при установке зонда, излучающего сигнал генератора, на вышке рядом с диском ДН по азимуту измеряются достаточно точно, ДН по высоте может искажаться конструкциями вышки при опускании главного лепестка ниже излучателя (или центра диска). В наших измерениях это было заметно для ДН на волне 3,4 см. Данное обстоятельство требует проведения контрольных измерений ДН по точечным источникам в дальней зоне и сравнительного анализа результатов. Полуширина ДН по высоте определяется, обычно, по одной половине записи, не искаженной переотражениями излучаемого сигнала.

1.3. Учет поглощения радиоволн в атмосфере

Затухание сигнала от источника при прохождении через атмосферу Земли корректируется в соотношении (1) умножением на $\exp(\gamma_{\text{ист}})$, где $\gamma_{\text{ист}} = \Gamma_0 \csc h$, Γ_0 — полное вертикальное поглощение на данной частоте, h — высота источника над горизонтом.

Относительная погрешность введения этой поправки равна $\Delta\Gamma_0 \csc h$ и составляет, например, 0,2% в зените при изменении величины Γ_0 на 20%. Полное вертикальное поглощение можно с требуемой точностью измерять методом разрезов в процессе проведения наблюдений радиоисточников и контролировать по метеопараметрам, однако, эта процедура достаточно длительна и проводится, как правило, в начале и в конце серии измерений, что может приводить к существенным ошибкам при коррекции данных на поглощение при нестабильной атмосфере.

Для реализации максимума возможностей процедуры съема данных, примененной в созданной системе регистрации, разрабатывается алгоритм расчета величины поглощения и коррекции измеренных данных на основе учета всей записанной во время сеанса информации. Суть расчета коэффициентов коррекции данных на изменение поглощения заключается в следующем.

Для проведения измерений применяется модуляционный радиометр, в котором модулятор последовательно подключается к согласованной нагрузке с температурой примерно 37°C и к внешнему входу (антенному тракту). Введение сигнала подшумливания (компенсации) не предусмотрено, поэтому при наведении антенны в небо на выходе радиометра присутствует сильный разностный сигнал, на фоне которого измеряются сигналы от источников. Уровень выходного сигнала меняется при любых изменениях положения антенны, что фиксируется при записи в память ЭВМ. При проведении серии измерений никакие изменения в положения регулировок радиометра не вносятся, и в памяти ЭВМ накапливается полная информация о реакции антенны на производимые действия. В частности, при изменении угла места антенны изменяется уровень фона, который в свою очередь зависит от величины поглощения в атмосфере. Изменение поглощения при наблюдении радиоисточников в ряде случаев заметно в одном 20–30 минутном цикле, если, например, проходит облачный фронт. Тогда коррекция на изменение поглощения вводится для каждого замера источника. Подробно этот алгоритм введения коррекции на поглощение будет описан в отдельной работе. Здесь заметим, что подобная процедура учета вариаций поглощения во время измерений позволит существенно расширить временные рамки прецизионных наблюдений на коротких волнах в средних широтах, где число безоблачных дней сравнительно невелико.

1.4. Учет протяженности радиоисточника

При больших относительно ДН антенны угловых размерах источника происходит уменьшение выходного сигнала из-за того, что часть излучения принимается на спаде главного лепестка ДН, форма которого обычно аппроксимируется функцией Гаусса. Расчет коэффициента K_1 , учитывающего это уменьшение, в работах, выполненных в радиоастрономической обсерватории (РАО) “Старая Пустынь”, проводится по следующим соотношениям [1]:

а) для гауссовой формы распределения излучения по источнику

$$K_1^{-1} = \sqrt{1 + \frac{\theta_{\text{ист}}^2}{\Delta\theta_{0,5}^2}} \sqrt{1 + \frac{\phi_{\text{ист}}^2}{\Delta\phi_{0,5}^2}};$$

б) для равномерного распределения

$$\begin{aligned} K_1 = & 1 - 0,173 \left(\frac{\theta_{\text{ист}}^2}{\Delta\theta_{0,5}^2} + \frac{\phi_{\text{ист}}^2}{\Delta\phi_{0,5}^2} \right) + 0,01 \left[3 \left(\frac{\theta_{\text{ист}}^4}{\Delta\theta_{0,5}^4} \frac{\phi_{\text{ист}}^4}{\Delta\phi_{0,5}^4} \right) + \right. \\ & + 2 \frac{\theta_{\text{ист}}^4}{\Delta\theta_{0,5}^2 \Delta\phi_{0,5}^2} \left. \right] - 0,865 \cdot 10^{-3} \left[5 \left(\frac{\theta_{\text{ист}}^6}{\Delta\theta_{0,5}^6} + \frac{\phi_{\text{ист}}^6}{\Delta\phi_{0,5}^6} \right) + \right. \\ & + 3 \left(\frac{\theta_{\text{ист}}^6}{\Delta\theta_{0,5}^4 \Delta\phi_{0,5}^2} + \frac{\phi_{\text{ист}}^6}{\Delta\phi_{0,5}^2 \Delta\theta_{0,5}^4} \right) \left. \right]; \quad (4) \end{aligned}$$

здесь: $\Delta\theta_{0,5}$ и $\Delta\phi_{0,5}$ — размер диаграммы направленности в разных (ортогональных) плоскостях, $\theta_{\text{ист}}$, $\phi_{\text{ист}}$ — размер источника в разных плоскостях (на уровне 0,5 для гауссовой формы распределения интенсивности по источнику).

В работе [2] приводится следующее соотношение для учета протяженности источника:

$$K = \begin{cases} 1 + x^2 & \text{для гауссового распределения } T_{\text{ист}} \\ \frac{x^2}{1 - \exp(-x^2)} & \text{для равномерного распределения,} \end{cases} \quad (4a)$$

где $x = \theta_{\text{ист}}/\Delta\theta_{0,5}$. Для гауссового распределения соотношения совпадают, для равномерного распределения яркостной температуры по диску источника величины K , вычисленные по обеим формулам для Кассиопеи А, различаются на 0,7%. Сравнение необходимо для правильной интерпретации результатов различных групп исследователей.

Пространственная структура излучения трех основных радиоисточников известна по результатам измерений радиокарт на системах апертурного синтеза:

Кассиопея А — угловые размеры $4,0 \times 4,0$ угл. мин., распределение — равномерное;

Телец А — угловые размеры $3,3 \times 4,0$ угл. мин., распределение — гауссовое (по данным наблюдений Тельца А методом лунных покрытий, см., напр., [9], его угловые размеры составляют $2,6 \times 3,7$ угл. мин.; коэффициент K_1 уменьшается на 1,5%);

Лебедь А — двойной источник с разнесением компонент 106 угл. сек. Соотношение интенсивностей восточной и западной компонент — 1/0,8.

В табл.1 приведены поправочные коэффициенты K_1 для стэнда РАО для двух длин волн.

Таблица 1

источник	Телец А	Кассиопея А	Лебедь А
	K_1	K_1	K_1
$\lambda = 3,4$ см	1,033 ($\pm 0,2\%$)	1,013 ($\pm 0,2\%$)	1,006 ($\pm 0,3\%$)
$\lambda = 10,6$ см	1,0035 ($\pm 0,02\%$)	1,0014 ($\pm 0,05\%$)	—

1.5. Учет поляризации излучения радиоисточников

Если излучение источника имеет заметную степень линейной поляризации, необходимо вводить поправку на различие позиционных углов плоскостей поляризации облучателя антенны и принимаемого излучения. Это достигается умножением измеренной величины потока на коррекционный множитель, определяемый при вертикальной поляризации облучателя выражением:

$$\text{crg}(p, \chi_{eq}, q) := \frac{1}{1 - p + 2p \cos(\chi_{eq} - q)^2}, \quad (5)$$

где p — степень поляризации излучения источника, χ_{eq} — позиционный угол плоскости поляризации в экваториальной системе

координат, q — экваториальный параллактический угол. У наиболее мощных радиоисточников наибольшей степенью поляризации в сантиметровом диапазоне обладает остаток сверхновой Телец А, компоненты радиоисточника Лебедь А также поляризованы, причем неодинаково.

На рис. 1а, б приведены сводные результаты измерения поляризации источника Телец А в диапазоне длин волн $2 \div 22$ см, выполненных разными авторами в разное время. Зависимость степени поляризации от длины волны аппроксимирована функцией $p(\lambda) = P/\lambda^\alpha$. Пунктирная кривая на рис. 1а — результат аппроксимации во всем диапазоне волн $2 \div 22$ см, $P = 0,145$, $\alpha \approx 0,647$. Сплошные кривые — результаты аппроксимации в поддиапазонах $2 \div 6$ см ($P = 0,125$, $\alpha \approx 0,513$) и $9 \div 22$ см ($P = 0,315$, $\alpha \approx 0,975$). Зависимость позиционного угла плоскости поляризации от длины волны (рис. 1б) следует закону $\chi \propto \lambda^2$. Эти данные использовались для коррекции результатов наших измерений на двух рабочих частотах: на волне 3,4 см: $p = 6,7\%$, $\chi_{eq} = 144^\circ$; на волне 10,6 см: $p = 3,15\%$, $\chi_{eq} = 131^\circ$.

Из рис. 1а видно, что волновая зависимость степени поляризации хорошо описывается степенным законом $p \propto \lambda^{-\alpha}$. Сплошные кривые представляют аппроксимации для коротковолновой ($\lambda < 9$ см) части, $\alpha \approx -0,51$ и длинноволновой ($\lambda > 9$ см), $\alpha \approx -0,98$.

Степени поляризации излучения и позиционные углы в диапазоне длин волн $0,9 \div 6$ см для 2-х компонент радиоисточника Лебедь А приведены на рис. 2а, б (символы \blacklozenge относятся к восточной компоненте, \blacksquare — к западной).

Из рис. 2а видно, что ни для одной из компонент не представляется возможным аппроксимировать $p(\lambda)$ степенной, или какой-либо другой функцией, поэтому степени поляризации на волне $\lambda = 3,4$ см определялись линейной интерполяцией. Зависимость позиционных углов плоскости поляризации от длины волны (рис. 2б) следует закону $\chi \propto \lambda^2$. В итоге были приняты следующие величины параметров поляризации излучения ком-

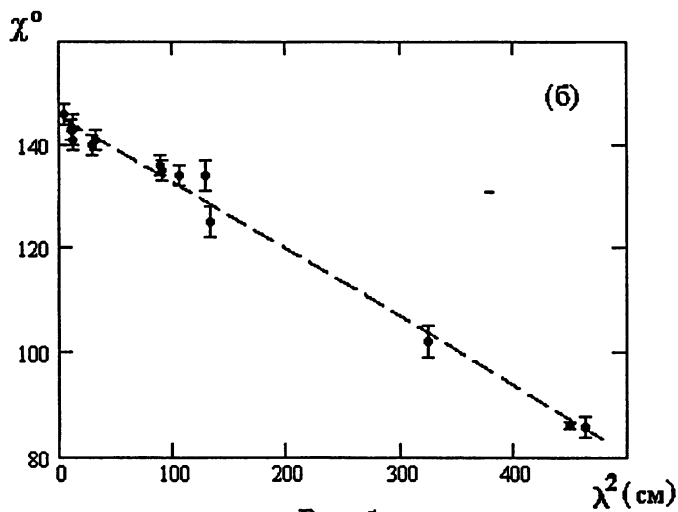
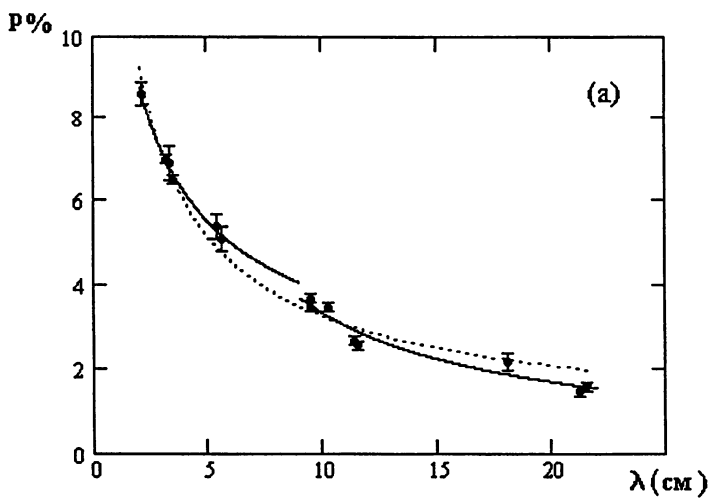


Рис. 1

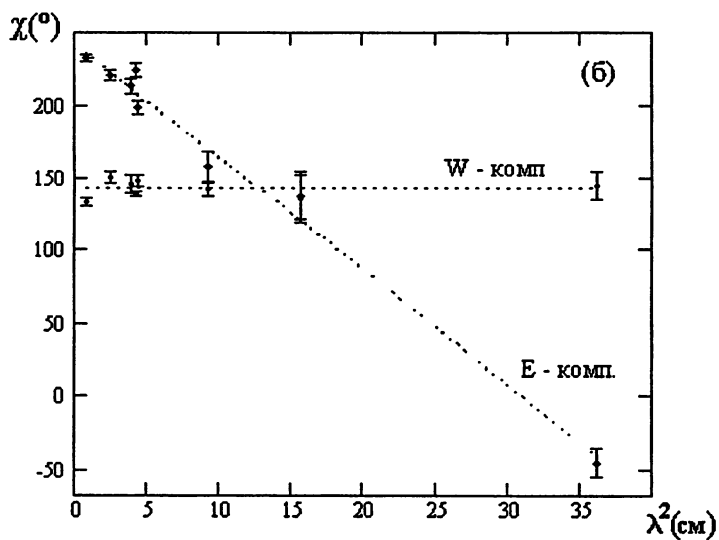
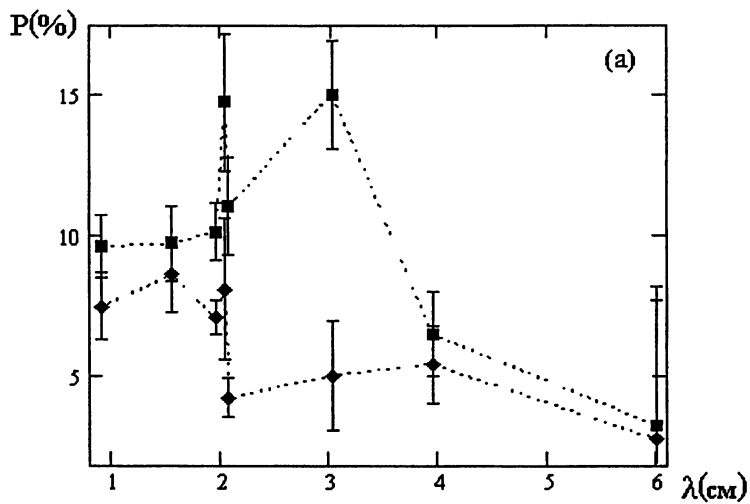


Рис. 2

понент Лебеда А на волне 3,4 см: $P_E = 5,16\%$, $\chi_E = 151,7^\circ$; $P_W = 11,5\%$, $\chi_W = 142,4^\circ$.

При отношении плотностей потоков компонент $S_W/S_E = 0,8$ [2] это дает для интегрального излучения Лебеда А на волне $\lambda = 3,4$ см: $P_\Sigma = 7,9\%$, $\chi_\Sigma = 146^\circ$.

Поляризационные характеристики интегрального излучения Лебеда А на волне $\lambda = 10,6$ см были взяты из работы [2]: $P_\Sigma = 0,3\%$, $\chi_\Sigma = 170^\circ$. Эти величины использовались для коррекции результатов измерений.

Радиоизлучение Кассиопеи А слабо поляризовано — менее 1% на волнах длиннее 8 см и около 1,5% с позиционным углом $\chi = 40^\circ$ на волне 3,4 см.

1.6. Учет падения усиления антенны из-за перефокусировки в зону Френеля

Учет уменьшения принимаемого сигнала при фокусировке на диск, расположенный в зоне Френеля антенны, является достаточно сложной проблемой. Теоретические расчеты распределения электромагнитного поля в районе фокуса параболоида, приведенные в работе [3], не учитывают влияния облучателя и могут дать только оценочную величину спада усиления из-за перефокусировки. Использование нескольких мест расположения эталона относительно антенны дает возможность экспериментального определения спада усиления $(1 + \delta_N)$ при перефокусировке антенны в ближнюю зону. Практически подобный эксперимент провести сложно, но в нашем случае условия РАО "Старая Пустынь" позволяют располагать эталон на расстояниях 100 и 400 м от антенны. При работе на нескольких частотах можно получить точную экспериментальную зависимость $(1 + \delta_N)$ от величины сокращения дальней зоны N и применять её для прецизионной калибровки антенн при различных условиях расположения двухтемпературного эталона. Эти работы планируются.

В настоящее время величина поправки на сокращение дальней зоны при расчете плотностей потоков в частотном диапазоне 10 ГГц принималась равной 1,5% с относительной погрешностью 0,5%, в диапазоне 3 ГГц — 1% с погрешностью 0,3%.

1.7. Влияние неточности наведения антенны

Как правило, поправка на неточность наведения антенны на источник рассчитывается по паспортным характеристикам приводных систем радиотелескопа. Паспортная погрешность приводных систем радиотелескопа РТ-7 дается как $\pm 5'$. Экспериментально установлено, что это максимальная величина ошибки наведения. Среднеквадратичное значение ошибки установки антенны в заданную точку в серии наблюдений при определении величины разъюстировки по Солнцу составило примерно $2',5$ по одной координате (азимуту) и, следовательно, общее значение для двух координат несколько больше. Потери сигнала при данной ошибке сопровождения: в диапазоне 10 см должны составлять $\sim 0,5\%$, в диапазоне 3 см — $\sim 3\%$. По опыту работы на этой антенне следует считать эту величину поправки оценочной, поскольку процедура подобных измерений не соответствует реальному процессу в серии наблюдений за источником.

В работе [4] уже в начале подобных радиоастрономических измерений проводились специальные исследования для определения и учета ошибок наведения антенны на источник. Следуя работе [5], будем считать, что основными составляющими суммарной ошибки наведения являются: систематические динамические ошибки, обусловленные динамическим запаздыванием из-за ограниченной полосы пропускания силового привода, случайные динамические ошибки, обусловленные силами трения в механизмах наведения, ошибки, обусловленные внутренними тепловыми шумами в приемных устройствах антенны и особенностями используемого метода автосопровождения, в том числе ошибки оператора. Для более точного расчета влияния этих факторов были исследованы возможности определения неточно-

сти сопровождения по данным радиоастрономических наблюдений.

Положения, на которых основаны данные исследования, заключаются в следующем. При сопровождении антенной источника в течение длительного интервала времени (не менее 100 с) из-за качания главного лепестка ДН относительно центра источника, обусловленного неидеальной работой приводных систем, дисперсия результирующего сигнала должна быть больше дисперсии сигнала при наблюдении опорной области. Кроме этого, распределение измеренных точек относительно среднего значения должно быть несимметричным. Как показала практика, при непрерывном слежении за источником по величинам дисперсии сигналов от источника и фона сложно сделать точные выводы о характере движения антенны, т.е. после установки в заданную точку антенна далее сопровождает источник с какой-то начальной систематической ошибкой. В этом случае необходимо оценивать дисперсию серии наведений на источник, считая, что начальная ошибка установки в точку и определяет неточность сопровождения.

Соотношение для расчета амплитуды выходного сигнала, нормированной к единице, в предположении гауссовой формы главного лепестка ДН записывается в виде

$$A_i = \frac{1}{\pi r^2} \int_{-r}^r \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{(\theta_{ci} + \theta_{ю} + x)^2 + y^2}{\Delta\theta_{0,5}^2} \right) \right] \times \\ \times f(x, y) dx dy + A_{ш}, \quad (6)$$

где θ_c — ошибка наведения антенны на центр источника, $\Delta\theta_{0,5}$ — ширина ДН антенны на уровне половинной мощности, $\theta_{ю}$ — величина разъюстировки антенны, r — радиус источника, $f(x, y)$ — распределение интенсивности по источнику, $A_{ш}$ — уровень шумового сигнала относительно нормированного к единице полезного сигнала. Предполагается, что ошибки наведения антенны θ_c распределены по нормальному закону, шумовой сигнал также гауссовый с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{ш}$.

На рис. 3 показаны зависимости изменения среднего значения сигнала, его дисперсии и гистограмма (полигон) распределения измеряемых значений относительно среднего от величины ошибки сопровождения (нормированной к ДН) в серии из 100 замеров без шумов и разъюстировки. Видно, что дисперсия сильно растёт при увеличении ошибки сопровождения, а распределение при малых θ_c резко несимметрично и близко к импульсному. Несимметрия гистограммы ясно выражена и при достаточно больших ошибках сопровождения. После оценки величины θ_c по увеличению дисперсии и форме распределения можно рассчитать поправку на уменьшение сигнала по графику изменения среднего значения амплитуды сигнала.

При введении разъюстировки эти особенности выделены так же хорошо (рис. 4), хотя источник излучения находится на более крутом участке ДН.

При введении шума, наоборот, большая часть отмеченных особенностей нивелируется, что показано на рис. 5. При малых отношениях сигнал/шум метод становится не эффективным. То же самое происходит при уширении источника (рис. 6). То есть, для проведения результативных экспериментов по измерению погрешности сопровождения антенны необходимо выбирать наиболее мощный источник с малыми относительно ДН размерами. Если источник широкий, то следует сопровождать его с разъюстировкой, равной половине ширины ДН на уровне 0,5, т.е. следить за источником наиболее крутым склоном ДН для увеличения “чувствительности” метода.

Для реальных отношений сигнал/шум для стенда РАО “Старая Пустынь” НИРФИ при приеме сигналов даже от наиболее мощных радиоисточников Кассиопея А, Телец А и Лебедь А выделить особенности в сигнале, обусловленных наведением антенны, оказалось сложно. Самый мощный внеземной источник радиоизлучения — Солнце — имеет слишком большие угловые размеры в сравнении с ДН в обоих рабочих диапазонах. Тем не менее можно провести измерения θ_c по Солнцу, если ввести при сопровождении разъюстировку $15'-30'$.

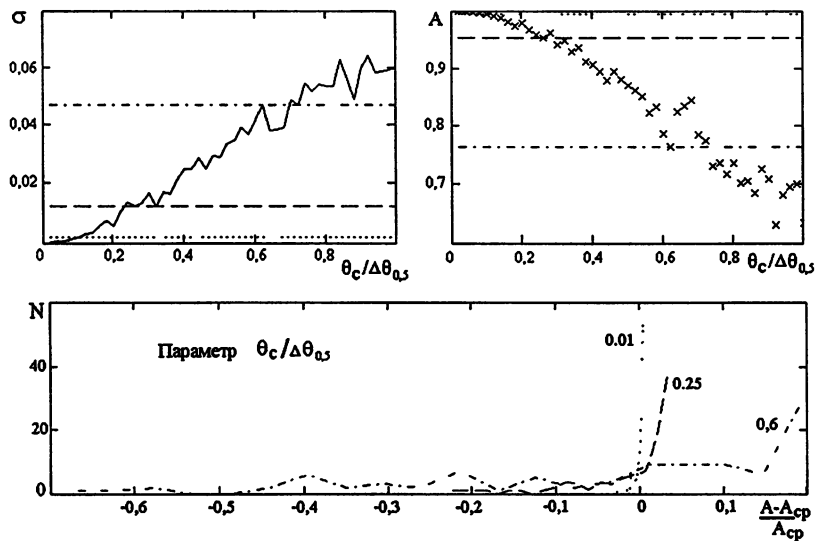


Рис. 3

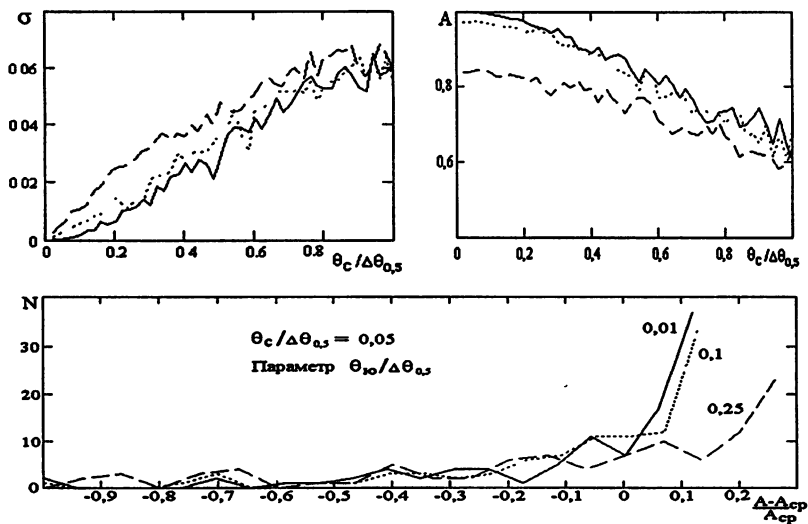


Рис. 4

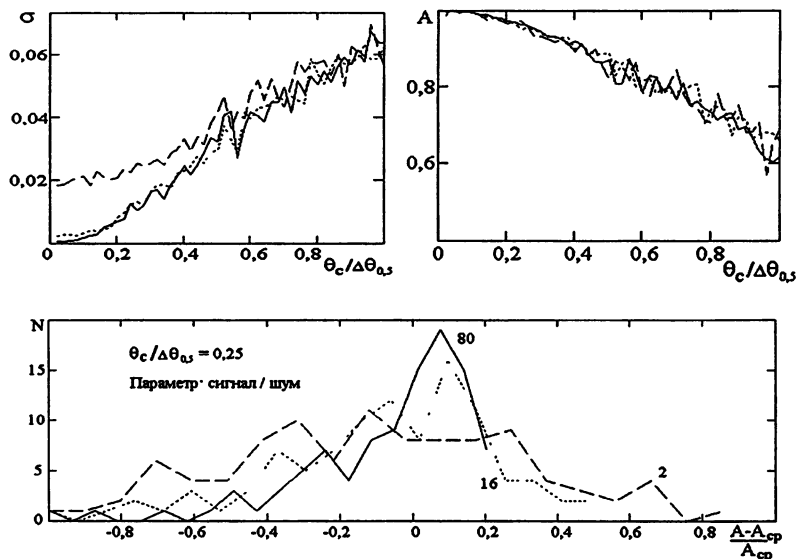


Рис. 5

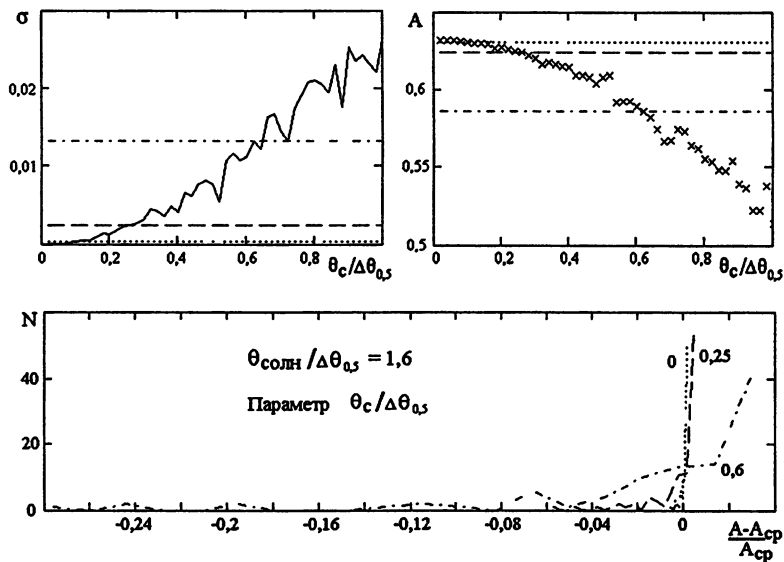


Рис. 6

Для оценки неточности сопровождения антенны РТ-7 были проведены измерения по Солнцу с введением поправки к координате по азимуту $15'$ на волне $3,4$ см и $30'$ на волне $10,6$ см. Методика измерений точно соответствовала методике измерения сигналов от дискретных источников с отведением антенны в обе стороны и тем же временем сопровождения. На рис. 7а и 8а показаны фрагменты записей сигналов на двух частотах. Сразу заметно резкое возрастание вариаций сигнала на волне $3,4$ см относительно измерений на волне $10,6$ см, по которому уже можно сделать выводы о качестве работы приводных систем. Данные обработки (гистограммы) приведены на рис. 7б, 8б вместе с расчетами для $\theta_c = (0,7 \div 1)'$. Величина ненавещения определяется по дисперсии, которая является наиболее точным критерием, а также по ширине гистограммы, которая тоже достаточно точно характеризует величину θ_c . Надежность результатов несколько снижена небольшим числом измерений (25–30). По величине дисперсии и характеру распределения измеренных значений относительно среднего получено, что среднеквадратичную величину ошибки сопровождения антенны РТ-7 по азимуту в серии измерений на двух частотах можно принять равной $0',8$ с погрешностью $0',2$. Ошибку сопровождения с учетом второй координаты оцениваем как $1',0$ с погрешностью около $0',3$.

Таблица 2

источник	Телец А	Кассиопея А	Лебедь А
	K_c	K_c	K_c
$\lambda = 3,4$ см	1,007 ($\pm 0,35\%$)	1,003 ($\pm 0,15\%$)	1,011 ($\pm 0,55\%$)
$\lambda = 10,6$ см	1,003 ($\pm 0,015\%$)	1,002 ($\pm 0,1\%$)	1,005 ($\pm 0,25\%$)

Поправки на неточность сопровождения для точечного источника будут равны: около 1% с погрешностью 0,2% на волне $3,4$ см и менее $0,5\% \pm 0,2\%$ на волне $10,6$ см. Величины коэффициентов K_c для исследуемых источников приведены в табл. 2;

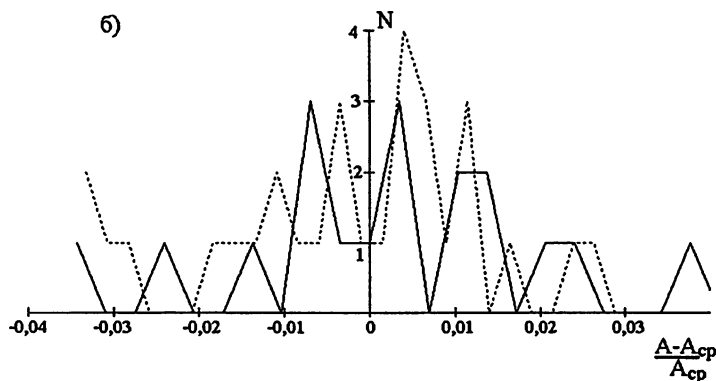
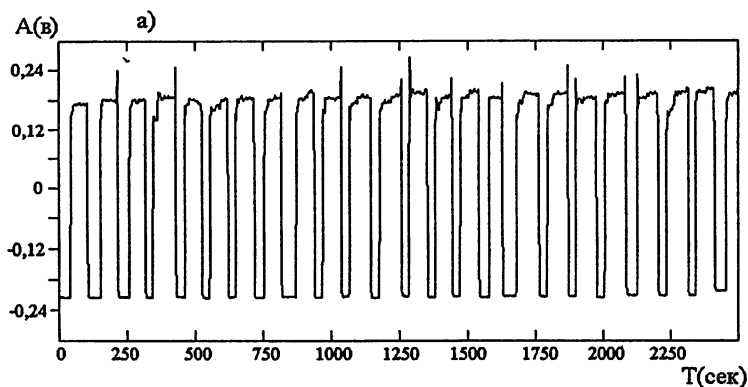


Рис. 7

а) Фрагмент записи сигнала от Солнца на волне 10,6 см с поправкой к координате по азимуту $30'$, высота Солнца 23° .

б) Гистограммы (полигоны) распределений амплитуд относительно средней:

пунктир — по экспериментальным данным, $N = 31$, величина дисперсии 0,0031;

сплошная линия — расчет для $\Delta\theta_{0,5} = 64',5$, $\theta_{\text{ю}} = 24',2$, $\theta_c = 0',7$, $N = 31$, величина дисперсии 0,0030.

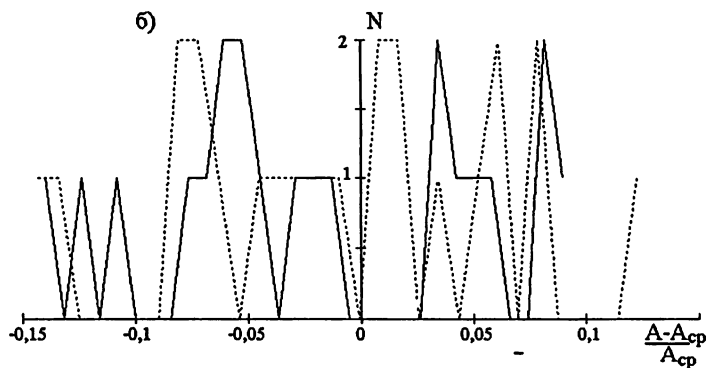
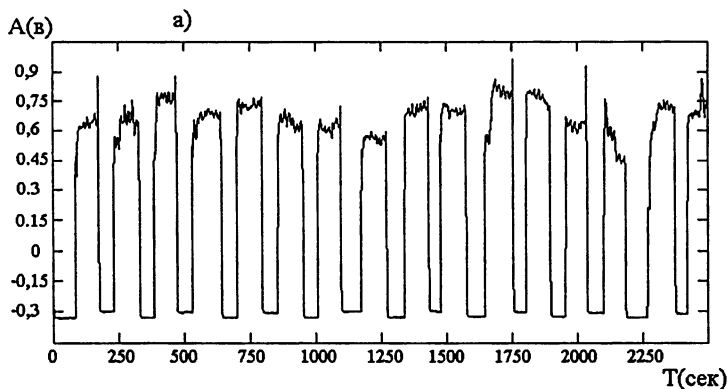


Рис. 8

а) Фрагмент записи сигнала от Солнца на волне 3,4 см с поправкой к координате по азимуту $15'$, высота Солнца 28° .

б) Гистограммы (полигоны) распределений амплитуд относительно средней:

пунктир — по экспериментальным данным, $N = 24$, величина дисперсии 0,015;

сплошная линия — расчет для $\Delta\theta_{0,5} = 21',2$, $\theta_{\infty} = 14',8$, $\theta_c = 1'$, $N = 24$, величина дисперсии 0,016.

расчет сделан для величины разъюстировки антенны равной $1'$, которая реально складывается из ошибок оператора, неточности ввода поправки на рефракцию и погрешности установки облучателя.

1.8. Погрешность измерения сигналов от источников

Сигнал от радиоисточника измеряется относительно среднего сигнала от опорных областей при отведении ДН по азимуту на $(2 \div 3)\Delta\theta_{0,5}/\cos h$ в обе стороны от источника. Измерения, как правило, проводятся циклами по 7–15 замеров “источник – опорная область”, в течение одних-двух суток в серии наблюдений накапливается 50–80 замеров от трех-четырех источников. После коррекции всех измеренных данных на поглощение в атмосфере и поляризацию источника (если она есть) расчет результирующей величины $\Delta n_{\text{ист}}$ проводится по стандартным соотношениям:

$$a = \bar{a} \pm \Delta a,$$

где \bar{a} — среднее значение из n измерений, Δa — погрешность результата,

относительная погрешность результата серии измерений

$$\varepsilon = (\Delta a/\bar{a})100\%, \quad \Delta a = t_{\alpha}(n) \Delta S_{\alpha},$$

$$\Delta S_{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}$$

— средняя квадратичная погрешность серии измерений, $t_{\alpha}(n)$ — коэффициент Стьюдента для заданной надежности α и числа проведенных измерений.

В наших расчетах принято: $\alpha = 0,9$, в этом случае для $n = (50 \div 80)$ среднее значение $t_{\alpha}(n) = 1,67$.

Обычно, при стабильной атмосфере для данного числа замеров ΔS_α лежит в пределах, дающих относительную погрешность (0,3–0,9)%. При учете коэффициента Стьюдента относительная погрешность определения $\Delta n_{\text{ист}}$ составляет примерно (0,5–1,5)% для трех основных радиоисточников.

Погрешность калибровок $\Delta T_d / \Delta n_d$ вычисляется как ΔS_α при $n = (4 \div 8)$, поскольку в процессе каждой калибровки проводится запись 3 ÷ 5 значений сигналов от “холодного” и “горячего” дисков и фоновое излучения за ними (расчет разности температур дисков $\bar{\Delta} T_d$ подробно рассмотрен в Части 1 данной работы). На обеих рабочих частотах достигнута погрешность калибровок менее 1%.

2. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДИОИСТОЧНИКА

Общая относительная погрешность результата абсолютных измерений плотности потока радиоисточника по соотношению (1) определяется как

$$\delta S = \sqrt{\sum (\beta_i \delta u_i)^2}, \quad (7)$$

где δu_i — относительные погрешности сомножителей в (1), β_i — степень соответствующего сомножителя.

В табл. 3 представлены измеряемые величины, погрешности измерений, вводимые в расчетах поправки и их погрешности для стенда РАО на двух рабочих частотах; если в графе две строки, то в первой даются значения параметров для волны 3,4 см, во второй — для 10,6 см.

Сумма квадратов относительных погрешностей в (7) всех параметров без случайных погрешностей $\Delta n_{\text{ист}}$ и Δn_d для измерений на волне 3,4 см равна примерно 1,2, т.е. общая погрешность заведомо более 1%. На волне 10,6 см эта величина не превышает 0,3 и, значит, возможно достижение общей погрешности менее 1% при достаточно большом числе замеров сигнала

Таблица 3

Параметр	Измеряемая величина	Погрешность измерений %	Величина поправки %	Погрешность поправки %
Длина волны λ (см)	3,394 10,597	0,2 0,2		
Ширина ДН в ближней зоне $\Delta\theta_{0,5}$ (угл. мин.)	20,22 61,7	0,7 0,2		
Разность температур дисков $\Delta T_D(K)$	$\bar{\Delta} T_D$	Входит в Δn_D		
Разность выходных сигналов от дисков Δn_D (мВ)	$\bar{\Delta} n_D$	$\Delta S_\alpha(n)$		
Выходной сигнал от источника $\Delta n_{ист}$ (мВ)	$\bar{\Delta} n_{ист}$	$t_\alpha(n) \Delta S_\alpha(n)$		
Протяженность источника K_1			табл. 1	табл. 1
Поглощение в атмосфере			$\exp(\gamma_{ист.})$	$\Delta \Gamma_0 \text{ csc } h$
Неточность сопровождения K_c			табл. 2 1	табл. 2 0,2
Неточность фокусировки				0,05 -
Поляризация излучения			п.1.5	п.1.5
Коэффициент отражения РПМ				0,005 0,01
Падение усиления из-за сокращения дальней зоны $(1 + \delta_N)$			1,5 1,0	0,5 0,3

от источников. Наибольший вклад в погрешность всех поправок дают неточность сопровождения источника приводными системами антенны, измерения ДН по генератору на вышке и учет сокращения дальней зоны. Величина погрешности из-за сокращения дальней зоны может быть существенно уменьшена после проведения соответствующих экспериментов (см. п.1.5), погрешность учета ошибок сопровождения также можно уменьшить после проведения серии специальных измерений по методике п.1.2. Точность измерения ДН по генератору может быть повышена большим выносом излучателя от вышки на длинном кронштейне; необходимость подобной операции будет определена после нескольких серий измерений.

Очевидно, что погрешность относительных измерений плотностей потоков радиоисточников для одного измерительного стенда существенно ниже, поскольку определяется только случайными погрешностями измерений. При сравнении результатов ряда относительных измерений на одном стенде с неизменными параметрами реально достижение погрешности менее 1%.

Заметим, что для корректного сравнения результатов различных групп исследователей необходимо приложение табл. 3 к публикуемым данным.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОСТАТКОВ СВЕРХНОВЫХ КАССИОПЕЯ А И ТЕЛЕЦ А НА ВОЛНАХ 10,6 И 3,4 СМ

В течении 2003 года на радиотелескопе РТ-7 проведены три серии измерений, целью которых являлось определение соответствия характеристик радиометра РМ-3-10 требованиям Технического Задания, определение точностей наведения антенны, работоспособности нагреваемого эталона излучения в различных сезонных условиях и отладка математического и программного обеспечения измерений. В мае и октябре 2003 года проведены

измерения радиоисточников на частоте 2829 МГц ($\lambda = 10,6$ см), в июле и октябре — на частоте 8834 МГц ($\lambda = 3,4$ см).

При измерениях в мае температура окружающего воздуха менялась в пределах от 18 до 30° С, что не позволило получить разность температур дисков более 30°; это обстоятельство несколько снизило точность калибровки.

Получены следующие величины плотностей потоков радиоизлучения остатков сверхновых ($\lambda = 10,6$ см):

Кассиопея А — $1059,0 \pm 9,3$ Ян;

Телец А — $698,1 \pm 17,2$ Ян.

Плотность потока наиболее стабильного радиоисточника Лебедь А составила $666,6 \pm 12,5$ Ян.

Отношения плотностей потоков радиоизлучения Кассиопея А/Лебедь А и Телец А/Лебедь А равны соответственно 1,59 и 1,047 с погрешностью около 2,1%.

Измерения на 3,4 см проходили при сильной облачности и в сложной помеховой обстановке, что также снизило точность результатов. Получены следующие величины плотностей потоков радиоизлучения остатков сверхновых:

Кассиопея А — $416,4 \pm 8,6$ Ян;

Телец А — $471,2 \pm 8,4$ Ян.

Плотность потока стабильного радиоисточника Лебедь А составила 163,0 Ян с погрешностью 3,1% ($\pm 5,1$ Ян).

Отношения плотностей потоков радиоизлучения Кассиопея А/Лебедь А и Телец А/Лебедь А на волне 3,4 см равны соответственно 2,55 и 2,89 с погрешностью около 3%.

Исходя из полученных данных спектральные индексы исследуемых радиоисточников получились равными ($S_\nu \sim \lambda^{-\alpha}$):

для Лебеда А $\alpha_{\text{Cyg}} = 1,24 \pm 0,03$;

для Кассиопеи А $\alpha_{\text{Cas}} = 0,82 \pm 0,02$;

для Тельца А $\alpha_{\text{Tau}} = 0,34 \pm 0,01$.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными работ, проведенных в РАО “Старая Пустынь” [6–8], по результатам которых спектральные индексы равны

для Лебеда А $\alpha_{\text{Cyg}} = 1,28 \pm 0,06$ в диапазоне длин волн 2–9 см,

$\alpha_{\text{Cyg}} = 1,10 \pm 0,1$ в диапазоне длин волн 10–30 см;

для Кассиопеи А $\alpha_{\text{Cas}} = 0,82 \pm 0,03$;

для Тельца А $\alpha_{\text{Tau}} = 0,32 \pm 0,03$.

Данные, приводимые в работах [9–11], и частные сообщения авторов этих работ об их результатах абсолютных измерений в 2000–2002 годах также близки к полученным нами результатам. Все эти работы проведены с калибровкой антенн по излучению “черных” дисков, расположенных как в дальней, так и в ближней зонах антенн.

Сравнение с данными [2] показывает существенное различие в полученных спектральных индексах и потоках трех источников, что требует тщательного анализа всех работ, посвященных измерениям плотностей потоков космических источников и абсолютным методам калибровки радиотелескопов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. — М.: Сов. радио, 1976.
2. Baars J. W. M. Feasibility of in-orbit testing of inflatable antennas with celestial sources // ESA STM-243, Max Plank Inst. For Radioastronomy, Bonn, June 1990.
3. Дугин Н. А., Дмитренко Д. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19, № 7. С. 1031.
4. Плечков В. М., Разин В. А. // Труды пятого совещания по вопросам космогонии, 9–12 марта 1955. — М.: АН СССР, 1956. С. 430–435.
5. Белянский П. В., Сергеев Б. Г. Управление наземными антеннами и радиотелескопами. — М: Сов. радио, 1980.
6. Цейтлин Н. М., Дмитренко Д. А., Дмитренко Л. В., Миллер Е. А., Снегирева В. В., Титов Г. К. Результаты абсолютных измерений интенсивности Кассиопеи А, Лебедя А, Тельца А и Девы А на волнах 30–100 см и их спектры в диапазоне 3–100 см, полученные с помощью “черного” диска, расположенного в зоне Френеля // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19, № 8. С. 1106.
7. Дмитренко Л. В., Снегирева В. В., Турчин В. И., Цейтлин Н. М., Воронков Л. А., Дмитренко Д. А., Кузнецова Н. А., Холодилов Н. Н. Абсолютные измерения потоков Кассиопеи А, Лебедя А, Тельца А, Девы А на семи волнах в диапазоне 1,8–4,2 см // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24, № 1. С. 14.
8. Цейтлин Н. М., Дмитренко Л. В., Снегирева В. В. О переменности излучения Тельца А // Изв. вузов. Радиофизика. 1980, Т. 23, № 8. С. 996.

9. Иванов В. П., Станкевич К. С., Столяров С. П. Вековые и нестационарные изменения в радиоспектре Крабовидной туманности // *Астрономический журнал*. 1994. Т. 71, №5. С. 737–747.
10. Станкевич К. С., Иванов В. П., Столяров С. П. 50 лет наблюдений дискретного источника Кассиопея А // *Письма в Астрономический журнал*. 1999. Т. 25, №8. С. 581–590.
11. Иванов В. П., Шарова О. И. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2002. Т. 45. №2. С. 101.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчет коэффициентов коррекции при абсолютных измерениях плотностей потоков радиоизлучения внеземных источников	3
1.1. Погрешность определения средней рабочей частоты	5
1.2. Измерение диаграммы направленности антенны в зоне Френеля	5
1.3. Учет поглощения радиоволн в атмосфере	7
1.4. Учет протяженности радиоисточника	8
1.5. Учет поляризации излучения радиоисточников	10
1.6. Учет падения усиления антенны из-за перефокусировки в зону Френеля	14
1.7. Влияние неточности наведения антенны	15
1.8. Погрешность измерения сигналов от источников	23
2. Анализ погрешности определения плотности потока радиоисточника	24
3. Результаты абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения остатков сверхновых Кассиопея А и Телец А на волнах 10,6 и 3,4 см	26
Литература	29

Дугин Николай Александрович
Кузнецова Ирина Павловна
Разин Владимир Андреевич
Троицкий Никита Романович

Абсолютные измерения плотностей потоков радиоизлучения
космических источников с калибровкой по двухтемпературному
чернотельному эталону.

Часть 2.

Учет поправок и оценка погрешностей. Результаты

Подписано в печать 01.03.04 г. Формат 60 × 84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 2,0 усл. п. л.
Тираж 50. Заказ 5535.

Отпечатано в НИРФИ
Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25