

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА РАТАН-600 (СЕВЕРНЫЙ СЕКТОР)

*С. Я. Голосова, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев, Г. Н. Калихевич,
Д. В. Корольков, О. И. Крат, М. Н. Наугольная,
Ю. Н. Парийский, Г. А. Пинчук, Н. С. Соболева, А. А. Стоцкий,
О. Н. Шиврис*

Описаны исследования по повышению точности формирования отражающей поверхности главного зеркала РАТАН-600 (Северный сектор). По результатам геодезических и автоколлимационных измерений выявлены и определены наиболее существенные факторы, искажающие поверхность кругового отражателя при установках на конкретные радиоисточники. При проведении контрольных радиоастрономических наблюдений ($\lambda=1.38, 2.08, 3.9, 8.2$ и 13 см; источники: Крабовидная туманность, Луна, ЗС84 и ЗС286) выявленные погрешности учитывались путем введения поправок в положение щитов при их установке на наблюдаемые источники. В результате предпринятых мер качество радиоизображения источников как на высоких, так и на низких углах, значительно улучшилось, ср. кв. ошибка поверхности, оцениваемая по рассеянному фону, снижена до $0.3-0.5$ мм, а эффективная площадь, определенная по Крабовидной туманности, для волн ≥ 2 см впервые оказалась ≥ 1000 м².

The investigations directed on the increasing of the surface accuracy of the main reflector of RATAN-600 (the North sector) are described. The most important influence on deformations of ring reflector surface prepared for radiosources observations were determined from the geodetic and autocollimation adjustments. Obtained correction was introduced in the positions of reflector elements adjusted on the observations at 1.38, 2.08, 3.9, 8.2 and 13 cm wavelengths of radiosources ЗС84, ЗС286, Crab Nebula and Moon. After such correction radioimage quality becomes much better than earlier as for the sources with high elevation so for the low elevation sources. The mean square error of the surface obtained from the scattered background measuring diminishes up to 0.3—0.5 mm. The effective area of the telescope turn out to be ≥ 1000 m² for the wavelength of 2.08 cm.

Введение

С середины 1974 г., когда был запущен первый (Северный) сектор, на радиотелескопе РАТАН-600 ведутся регулярные радиоастрономические наблюдения. Достаточно высокая монтажная точность и подготовленность методов юстировки [1—7] позволили вести наблюдения в первые годы с удовлетворительной эффективностью для волн длиннее 4 см [8, 9]. Для более коротких волн точность антенны была еще недостаточной. С самого начала было ясно, что кроме определения мест нулей установочных шкал для точной установки антенны необходимо введение ряда поправок, учитывающих погрешности кинематики механизмов. Из последующих исследований выяснилось, что наиболее существенными являются поправки: кинематические по углу места, кинематические радиальные и радиальные за разновысотность угломестных осей. Кинематические поправки по углу места и по радиусу были определены и учитывались при расчете установочных таблиц уже в конце 1974—начале 1975 гг., однако заметный выигрыш в эффективности был получен лишь от введения угломестных поправок и вплоть до лета 1979 г. попытки ввода других поправок не были успешными.

Все это время наряду с наблюдениями продолжались работы по исследованию ошибок поверхности и путей их устранения, и к 1979 г. сложилась следующая ситуация:

1. Развились и использовались в регулярной эксплуатации геодезический и радиотехнический (автоколлимационный — АК) методы юстировки и исследования антенны. Геодезия при этом является опорой всего высокоточного ансамбля механизмов в кольце РАТАНа, на ней держится реперная сеть, исследования элементов главного зеркала, поверхности вторичных зеркал и т. д. АК-метод стал основным рабочим методом определения мест нулей по радиусу, азимуту и, совместно с геодезическим, по углу места. АК-методом выполняется также оперативный контроль состояния антенны по качеству фокального пятна [10]. Радиоастрономический метод [6, 11] еще не внедрен в эксплуатацию.

2. Развился метод проверки качества антенны и определения ошибок установки отражающих элементов по величине рассеянного фона при наблюдениях Крабовидной туманности и Луны. Были налажены регулярные наблюдения опорных источников для контроля эффективной площади антенны. По результатам этих наблюдений выходило, что среднеквадратическая (ср. кв.) ошибка поверхности антенны обычно не менее 1 мм, причем доминируют ошибки установки щитов, а не погрешности собственно поверхности элементов.

3. Таким образом, результаты юстировок и наблюдений находились в некотором несогласии между собой: юстировки выполнялись с высокой точностью, а точность поверхности главного зеркала была недостаточной. Одно из возможных объяснений этого парадокса — влияние погрешностей, проявляющихся при перемещении щитов по трем координатам. Это предположение не противоречит результатам наблюдений Солнца, выполненным по данным радиоастрономической юстировки [11], когда антенна юстируется в положении, практически совпадающем с установкой на источник, и результатам сравнения мест нулей, определенных АК и радиоастрономическими методами [12].

При таких обстоятельствах один из путей повышения точности отражающей поверхности главного зеркала на разных углах места — выявление и оценка величины и характера всех возможных источников искажения поверхности и наиболее полный учет их при установке антенны. С этой целью была предпринята работа, результаты которой приводятся ниже и в которой удалось показать возможность достижения высокой точности поверхности. Исследования проводились на Северном секторе РАТАН-600, было использовано 175 отражающих элементов, что соответствует длине апертуры 350 м.

1. Формирование поверхности АПП

Как известно, поверхность антенны переменного профиля (АПП) формируется путем радиальных и угловых перемещений отражающих элементов (щитов) [13]. Приращения радиальных и угловых координат рассчитываются от начального положения, при котором щиты располагаются касательно к поверхности кругового цилиндра. При этом предполагается, что щиты уже выставлены в проектный горизонт и имеют качественную отражающую поверхность. Юстировка поверхности отдельных щитов [14] и установка их в проектный горизонт выполняются на стадии монтажных работ и представляют собой в общем разовые операции, повторение которых связано со значительными трудностями. Фиксация начального положения и контроль перемещений отражающих элементов производится по шкалам отсчетно-установочных устройств (ОУУ) [15], а выставление щитов на «исходную окружность», т. е. в начальное положение, или определение мест нулей (МН) шкал ОУУ составляет процедуру стандартной юстировки АПП, которая может производиться гео-

дезическим, радиотехническим (автоколлимационным) или радиоастрономическим методами. В отличие от выставления щитов в проектный горизонт определение МО производится достаточно часто, например с 1974 по 1979 г. на Северном секторе РАТАН-600 было выполнено одиннадцать автоколлимационных юстировок.

Таким образом, точность поверхности АПП прежде всего зависит от величины ошибок в положении щитов по радиусу, азимуту, углу места относительно проектного горизонта и изготовления поверхности отдельных щитов. Расчет допустимых значений этих ошибок выполняется по следующей схеме. В качестве максимально допустимой ошибки поверхности принимается величина 0.1λ [13], где λ — минимальная рабочая длина волны. По этому значению при определенных предположениях о законе распределения, уровне вероятности и т. п. определяется суммарная допустимая ср. кв. ошибка поверхности ($\sigma_{S, \psi}$) и по ней — допустимые ср. кв. значения составляющих. Применительно к радиотелескопу РАТАН-600 для $\lambda=8$ мм эти значения составляют десятые доли мм и доли минуты (табл. 1).

При таких значениях суммарная ср. кв. ошибка поверхности будет равна $\sigma_{S, \psi}=0.32$ мм.

Если предположить безукоризненную работу механизмов перемещения отражающих элементов, то за допустимые ср. кв. ошибки (m) определения МО можно принять величины σ из табл. 1:

$$\sigma_{R, \alpha, \beta} = m_{R, \alpha, \beta}.$$

На практике приходится иметь дело с реальными механизмами, обладающими люфтами, эксцентриситетами и т. п., поэтому точность определения МО должна быть выше требований, предъявляемых к положению щитов. В настоящее время все применяющиеся методы определения МО обеспечивают точность $m_{R, \alpha, \beta} < \sigma_{R, \alpha, \beta} / \sqrt{2}$, что позволяет в некоторой степени компенсировать погрешности обработки вводимого задания, проявляющиеся при юстировке и установке антенны на конкретный радиисточник (табл. 2).

ТАБЛИЦА 1

Ср. кв. ошибка	Значение
Радиальная σ_R , мм	0.20
Азимутальная σ_α	50"
Угломестная σ_β	20"
Относительно проектного горизонта σ_H	0.20
Изготовления поверхности щитов (σ_S), мм	0.14

ТАБЛИЦА 2

Координата	Ср. кв. ошибки определения МО методами		
	геодезическим	АК	радиоастрономическим *
Радиус, мм	≥ 0.11	< 0.06	0.28
Азимут	14"	$< 20''$	20-30"
Угол места	14"	$< 15''$	30"

* Значения из [11].

Однако усилия, направленные на достижение этих точностей, могут оказаться напрасными, если основные оси отражающих элементов установлены с ошибками, превышающими допустимые значения, и при изготовлении механизмов щитов нарушены допуски. В этом случае при радиальных и угловых перемещениях щитов с целью установки антенны на конкретный радиисточник возникают искажения отражающей поверхности, никак не связанные с точностью определения МО. Для того чтобы перечисленные дефекты оказывали на качество поверхности АПП пренебрежимо малое влияние, их ср. кв. значения не должны превосходить величин, приведенных в табл. 3.

Кроме того, предъявляются достаточно жесткие требования к точности силовых винтов, а также к точности изготовления, сборки и монтажа отдельных деталей щитов.

ТАБЛИЦА 3

Погрешность	Допустимые ср. кв. значения	Влияние на качество поверхности
Ошибка в положении щитов на дуге окружности по азимуту	± 3 мм	± 0.04 мм по R
Привязка поверхности к угломерной оси	± 0.14 мм	± 0.04 мм по R при $\beta = 45^\circ$
Наклон угломерной оси к горизонту	$\pm 17''$	$\pm 12''$ по α при $\beta = 45^\circ$
Разворот угломерной оси	± 0.7	$\pm 12''$ по α при $\beta = 45^\circ$
Ориентирование направляющего рельса	± 0.5	± 0.013 мм по R
Неплоскостность рельсов балки опорной	0.045 мм *	
Эллиптичность и эксцентриситет роликов каретки	0.033 мм *	
Горизонтирование рельсов балки опорной	0.016 мм *	
	$\pm 3''$	

* Значения допусков.

2. Геодезические измерения

Результаты геодезических исследований, проводившихся в разное время, показали, что погрешности установки осей отражающих элементов в проектное положение бывают довольно значительными и, кроме того, часто изменяются в зависимости от радиального положения щитов, т. е. они «кинематичны» (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4

Погрешность	Значение	Примечание
Разворот угломерных осей (ср. кв.)	± 0.8	Измерение на 25 щитах
Положение угломерных осей по высоте (ср. кв.)	± 1.03 мм	То же
Наклон их к горизонту (ср. кв.)	± 1.9	»
Среднее изменение азимутального положения щитов при их радиальном движении	$\pm 40''$	»
Среднее изменение положения щитов по углу места при их радиальном движении	$\pm 20''$	»
Изменение высотного положения щитов при радиальном движении (ср. кв.)	До ± 0.25 мм	Измерения ЦНИГАН на трех щитах
Изменение наклона угломерной оси при радиальном движении щита (ср. кв.)	До ± 0.28 мм	То же
Привязка поверхности к угломерным осям (ср. кв.)	± 0.45	Измерения на 175 щитах Северного сектора
Кинематические ошибки:	± 2.1	Для щитов Северного сектора, при $\beta \approx 14^\circ$, растут с увеличением β
угломерные * (ср. кв.)	До 1.7 мм	Измерения на 25 щитах **)
радиальные *	на 960 мм	
азимутальные	$\ll \sigma_0$	Для щитов Северного сектора, на данном этапе не учитываются ввиду их малости

* Компенсируются путем введения кинематических угломерных и радиальных поправок.

** Определение радиальных кинематических поправок АК методом описано в п. 3.

Если сравнить эти данные с цифрами из табл. 1 и 3, то окажется, что удовлетворительным является только положение угломерных осей в плане. Поэтому при проведении описываемого эксперимента прежде всего было

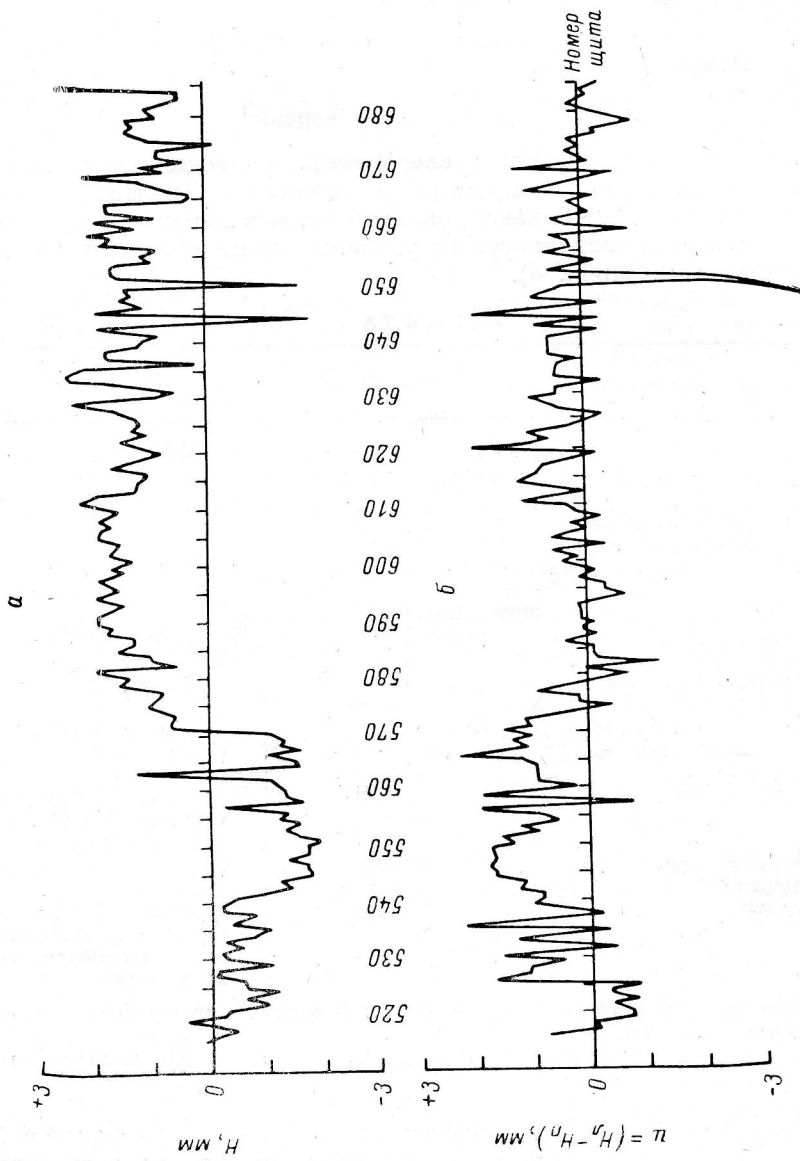


Рис. 1. Результаты нивелирования угловых осей щитов, выставленных по радиусу на эллипс Крабовидной туманности.

а — график условных отметок осей (в мм), $\sigma_H = 1.21$ мм; б — график наклонов осей (в мм), $\bar{n} = +0.37$ мм, $\sigma_n = 0.77$ мм.

обращено внимание на выявление и учет больших по абсолютной величине погрешностей, к которым были отнесены ошибки в положении щитов по высоте, наклоны угломестных осей и изменения $MO_{\alpha, \beta}$ в зависимости от радиального положения щитов.

Определение мест нулей перед наблюдениями произведено по стандартной методике, но с некоторыми изменениями, направленными на выявление кинематичности MO . Первый прием юстировки был выполнен при обычном расположении щитов — на средней окружности. При выполнении второго приема щиты были выставлены по радиусу в положение, необходимое для наблюдения радиоисточника с высотой над горизонтом $\sim 68^\circ$, т. е. на эллипсе. В этом положении были определены азимутальные и угломестные MO . Разности значений MO , определенных на окружности и эллипсе, характеризуются ср. кв. ошибками $\sigma_{\Delta MO_\alpha} = 54''$, $\sigma_{\Delta MO_\beta} = 34''$.

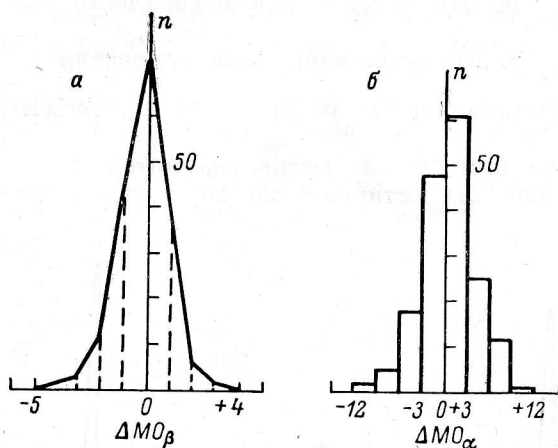


Рис. 2. Распределение разностей мест нулей, определенных на средней окружности и на эллипсе (для $h \approx 68^\circ$) в делениях точной шкалы ОУУ.

а — разности угломестных MO , не показаны значения ΔMO_β , равные -9.5 и $+6.5$ делений; б — разности азимутальных MO , не показаны значения ΔMO_α , равные $+26$ и $+44$ делениям.

Если эти разности целиком объяснить кинематичностью MO , то вклад их в искажение поверхности будет составлять $\sigma_s(\alpha) = 0.151$ мм; $\sigma_s(\beta) = 0.238$ мм. Распределение разностей показано на рис. 1.

Следующий фактор, вносящий искажение в отражающую поверхность, — ошибки в положении угломестных осей по высоте и их наклоны к горизонту. С целью исключения влияния кинематичности определение высотного положения осей (или щитов) также было выполнено на эллипсе подлежащего наблюдению радиоисточника. Результаты высокоточного нивелирования показаны на рис. 2: щиты располагаются относительно среднего горизонта со ср. кв. отклонением $\sigma_H = 1.21$ мм, угломестные оси имеют средний наклон $\bar{u} = +0.37$ мм со ср. кв. отклонением $\sigma_u = 0.77$ мм, точность измерений характеризуется ср. кв. ошибками $m_H \leq \pm 0.11$ мм, $m_u \leq \pm 0.22$ мм.

Обнаруженные значения разновысотности и наклонов угломестных осей при выставлении антенны на источник с высотой над горизонтом $h \approx 68^\circ$ внесут погрешности в отражающую поверхность со ср. кв. отклонениями $\sigma_s^1(H) = \sigma_H \sin \beta = 0.678$ мм, $\sigma_s(u) = \frac{\sigma_u}{2\sqrt{3}} \sin \beta = 0.151$ мм, где $\beta \approx h/2$ — угол наклона щита.

Таким образом, фактическая ср. кв. ошибка поверхности кругового отражателя, выставленного на Крабовидную туманность, будет равна

$$\sigma_{\text{фак}} = \sqrt{\Sigma \sigma_{MO}^2 + \Sigma \sigma_i^2 + \sigma_s^2(H) + \sigma_s^2(u)} = 0.825 \text{ мм}$$

(под $\Sigma \sigma_{\text{МО}}^2$ подразумеваются ошибки определения МО, отработки вводимого задания и влияние кинематичности, а под $\Sigma \sigma_i^2$ — влияние дополнительных факторов, обнаруженных в процессе исследований, и ошибки поверхности отдельных щитов). Полученное значение ошибки можно снизить, т. е. улучшить качество поверхности, если компенсировать влияние кинематичности МО_{α,β}, разности высотности и наклонов угломестных осей щитов путем введения соответствующих поправок в положение щитов при выставлении антенны. В этом случае будем иметь

$$\sigma_{S, \Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{фак.}}^2 - \Sigma [\sigma_S^2(\delta) - m_S^2(\delta)]} = 0.413 \text{ мм},$$

где $\sigma_S(\delta)$ и $m_S(\delta)$ — стандарт введенных поправок и ср. кв. ошибка их определения, редуцированные на нормаль к отражающей поверхности. Таким образом, учет выявленных погрешностей по расчетам должен вдвое улучшить качество отражающей поверхности Северного сектора РАТАН-600.

3. Автоколлимационные измерения

Целью автоколлимационных измерений в настоящем цикле исследований было:

- определение мест нулей (юстировка антенны);
- контроль качества юстировок по форме и мощности АК фокального пятна;

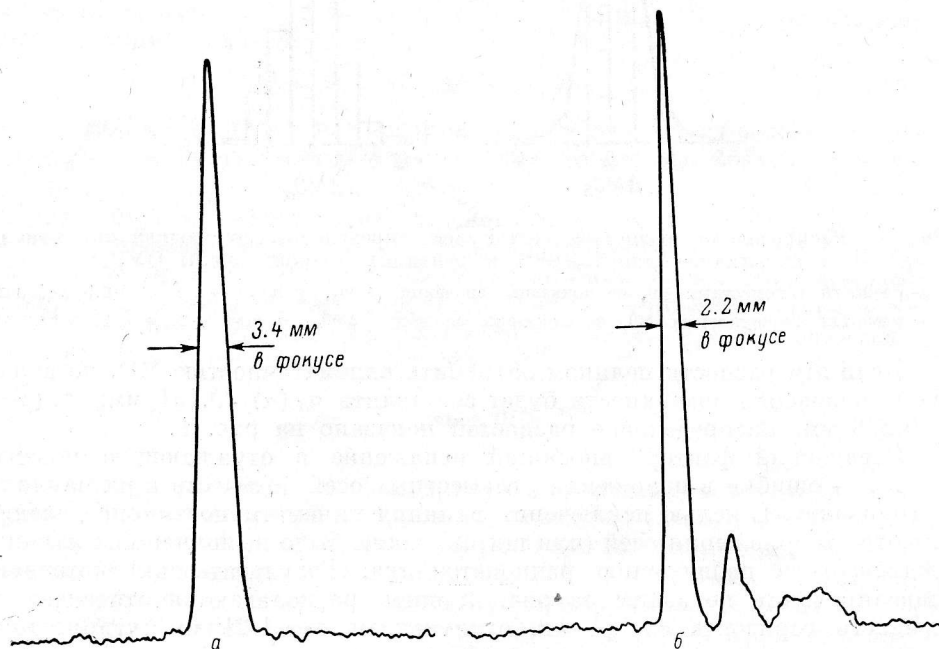


Рис. 3. Поперечное сечение автоколлимационного фокального пятна после АК-юстировки в ноябре 1979 г.

а — сечение на волне 8 мм; б — сечение на волне 4 мм,

— определение радиальных кинематических поправок и проверка эффективности их ввода;

— измерение рассеянного фона и ошибок установки щитов по радиусу. Определение мест нулей проводилось на волне 3 см с помощью штатного автоколлимационного устройства, установленного на радиотелескопе, по стандартной методике. Контроль качества юстировок осуществлялся с помощью штатных автоколлимационных устройств на волнах 8 и 4 мм.

ТАБЛИЦА 5

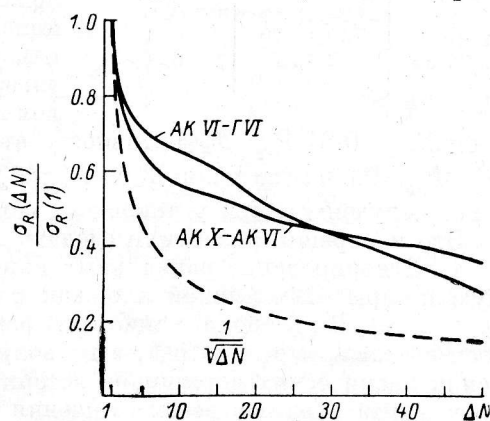
Интервал времени между юстировками	Ср. кв. разности		
	R, мм	α	β
Июль—ноябрь	0.48	52"	61"
Ноябрь—январь	0.22	37	41

Были проведены три автоколлимационные юстировки — в июле, в ноябре 1979 г. и в январе 1980 г. Для облегчения сравнения результатов автоколлимационных и геодезических юстировок облучатель перед июльской и ноябрьской автоколлимационными юстировками размещался в максимуме фокального пятна, полученного от антенны со щитами, установленными по радиусу на геодезические места нулей (по азимуту и углу места — автоколлимационные нули). Качество юстировок оказалось достаточно высоким, о чем свидетельствует хорошая форма фокальных пятен на волне 8 мм и удовлетворительные пятна на волне 4 мм (рис. 3).

Сходимость мест нулей, полученных из геодезической и автоколлимационной юстировок, в июле 1979 г. также хорошая. Их разность характеризуется следующими ср. кв. отклонениями: $\sigma_R = 0.35$ мм, $\sigma_\alpha = 55''$, $\sigma_\beta = 63''$.

Величина σ_R является наименьшей из полученных до сих пор при сравнении АК- и геодезиче-

Рис. 4. Изменение ср. кв. значения разностей радиальных МО Северного сектора ($N=175$ щитов), полученных по результатам геодезической (июль 1979 г., Г VI) и АК (июль, ноябрь 1979 г., АК VI, АК X) юстировок в зависимости от ширины окна ΔN при скользящем усреднении.



ских юстировок и, так же как σ_α и σ_β , мало отличается от ср. кв. разностей, получаемых при сравнении двух независимых АК-юстировок. В табл. 5 приведены значения ср. кв. разностей МО из различных АК-юстировок, выполненных во время описываемого эксперимента.

Точность самих АК-юстировок существенно выше. Так, проведенные ранее специальные исследования [10], показали, что разность радиальных МО, полученных при независимых АК-юстировках, следующих друг за другом через короткие промежутки времени (10 мин), имела ср. кв. величину $\sigma_R = 0.085$ мм.

Показательным также является результат скользящего усреднения по группе в ΔN щитов разностей радиальных МО, полученных при геодезической и АК-юстировках (июль 1979 г.) и при двух АК-юстировках (июль и ноябрь 1979 г.). В обоих случаях оказалось, что ср. кв. величина сглаженных разностей $\sigma(\Delta N)$ имеет одинаковый характер зависимости от ΔN и убывает заметно медленнее, чем $1/\sqrt{\Delta N}$ (рис. 4). Это указывает на наличие в разностной функции крупномасштабных деталей, которые не могут быть следствием случайных ошибок измерений.

Все это, по-видимому, свидетельствует о том, что полученные в результате сравнения МО разности характеризуют не столько точность самих

юстировок и различие методов, сколько ухудшение качества поверхности антенны за время между юстировками.

Определение радиальных кинематических поправок проводилось путем сравнения радиальных мест нулей, полученных при специальных юстировках антенны, установленной последовательно на трех окружностях: малой (номинальный радиус 287 520 мм), средней (288 000 мм) и большой (288 420 мм). Среднеквадратичная величина найденных поправок для малой окружности (т. е. при смещении щитов по радиусу на -480 мм) $\sigma_{\text{мал}} = 0.89$ мм, а для большой (смещение $+420$ мм) — $\sigma_{\text{бол}} = 0.86$ мм. Коэффициент корреляции между поправками для большой и малой окружности 0.83. Проверка эффективности ввода радиальных кинематических поправок была выполнена на волнах 2.08 см и 8 мм следующим образом. Сначала была измерена мощность автоколлимационного сигнала ($P_{\text{ср}}$), полученного от антенны, установленной на среднюю

ТАБЛИЦА 6

Длина волны	Дата измерений	σ , мм
8 мм	21.11.79	0.26
	28.11.79	0.32
	29.11.79	0.27
4 мм	30.11.79	0.29
	2.12.79	0.30

окружность. Затем все щиты по шкалам ОУУ смещались на -480 мм, т. е. выставлялись на малую окружность без учета погрешностей радиальных винтов, и снова измерялась мощность автоколлимационного сигнала ($P_{\text{мал}}$). Наконец, в радиальное положение щитов вводились измеренные кинематические поправки и опять измерялась мощность отраженного сигнала ($P'_{\text{мал}}$). Оказалось, что на волне 8 мм $P_{\text{мал}} = 0.31 P_{\text{ср}}$, а на волне 2 см $P_{\text{мал}} = 0.84 P_{\text{ср}}$. Эффективность ввода поправок на волне 8 мм была $P'_{\text{мал}}/P_{\text{ср}} = 0.89$, а на волне 2 см $P'_{\text{мал}}/P_{\text{ср}} = 0.985$. Аналогичные результаты были получены и при утановке щитов на большую окружность.

Эти измерения позволили сделать следующие выводы.

1. Игнорирование радиальных кинематических поправок дает ощутимую потерю эффективной площади радиотелескопа на коротких волнах ($\lambda < 2$ см). В автоколлимационном режиме эта потеря площади на волне 2 см составляет около 15%, а на волне 8 мм — около 70%. При наблюдении космических источников потери площади меньше, так как ошибки шага винта входят с весом смещения щита от средней окружности и их влияние уменьшается с увеличением наклона щитов.

2. Радиальные кинематические поправки достаточно эффективно могут быть измерены автоколлимационным методом. Ввод таких поправок обеспечивает восстановление площади антенны на волне 2 см с точностью 1.5–2%, а на волне 8 мм — с точностью $\sim 10\%$.

Измерения рассеянного фона и ошибок установки щитов на окружность производились по записям распределения энергии в сечении автоколлимационного фокального пятна, полученным при перемещении каретки с облучателями из одного крайнего положения в другое. По записям определялась площадь диаграммы главного лепестка ($S_{\text{гл}}$) и фона ($S_{\text{ф}}$). Ср. кв. ошибка установки щитов вычислялась по формуле

$$\sigma = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\ln \left(1 + \frac{S_{\text{ф}}}{S_{\text{гл}}} \right)}.$$

Проверка принятой методики была проведена при оценке состояния антенны через три месяца после юстировки (измерения на волне 2.08 см). Из измерений было получено $\sigma_s = 0.80 \pm 0.05$ мм. После этого в положение щитов были введены случайные ошибки с нормальным законом распределения и $\sigma_R = 1.50$ мм и снова выполнены измерения, из которых определено $\sigma'_s = 1.67 \pm 0.05$ мм. Следовательно, ср. кв. величина введенных погрешностей равна

$$\sigma'_R = \sqrt{(\sigma'_S)^2 - \sigma_S^2} = 1.49 \pm 0.07 \text{ мм.}$$

Совпадение величин σ_R и σ'_R говорит о правомерности принятой методики.

Измерения, выполненные через три часа после юстировки 21.11.79 и в последующие дни, дали следующие результаты, отраженные в табл. 6.

Приведенные значения ошибок являются наименьшими за все время эксплуатации радиотелескопа. Интересно, что они практически совпадают с расчетной величиной допустимой ср. кв. ошибки, приведенной в § 1.

4. Оценка точности главного зеркала из радиоастрономических наблюдений

Геодезические и радиотехнические методы измерений ошибок в положении отражающих элементов позволяют учесть их при выставлении антенны на конкретный радиоисточник путем введения поправок. Тем самым ошибка поверхности главного зеркала должна быть сведена к минимуму. Эффективность этих мер может быть оценена из радиоастрономических наблюдений по измерению энергии, рассеянной остаточными и неустраненными ошибками.

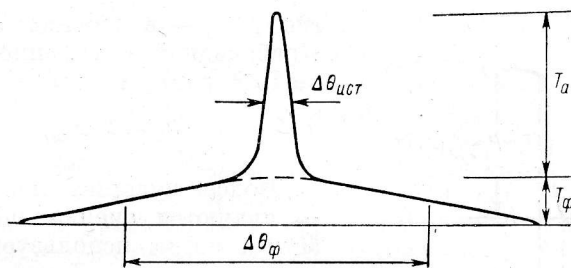


Рис. 5. К определению величин P_a и P_ϕ по записи прохождения неточечного источника через диаграмму направленности антенны.

P_a и P_ϕ — энергия в главном лепестке и в рассеянном фоне, T_a и T_ϕ — максимальные значения антенной температуры главного лепестка и фона.

Как показано в [16], для целей определения ошибки поверхности главного зеркала трудно использовать точечные источники, так как низкий уровень рассеянного фона требует для измерений очень высокой чувствительности аппаратуры. Однако ввиду большой протяженности фона (для ошибок установки элементов его протяженность определяется диаграммой направленности элемента, т. е. λ/a , где a — ширина щита) для оценки точности поверхности можно использовать такие источники, как Солнце ($\sim 32'$), Луна ($\sim 32'$), Крабовидная туманность.

Для вычисления ошибок необходимо измерить энергию, рассеиваемую зеркалом в фон, относительно энергии в главном максимуме диаграммы антенны. Известно [17], что если энергия, принятая идеальной антенной без ошибок, равна P_0 , то энергия в главном максимуме при наличии фазовых ошибок равна

$$P_a = P_0 e^{-\delta^2}. \quad (1)$$

В случае рассмотрения ошибок установки элементов кругового отражателя РАТАН-600 по радиальной координате со ср. кв. значением σ_R показатель степени δ в (1) определяется соотношением

$$\delta = 4\pi \frac{\sigma_R}{\lambda} \cos^2 \frac{h}{2}. \quad (2)$$

Так как полная энергия равна сумме энергий в главном лепестке и в рассеянном фоне ($P_0 = P_a + P_\phi$), то, используя (1) и (2), можно написать:

$$\sigma^2 = \ln \frac{P_0}{P_a} = \ln \left(\frac{P_a + P_\phi}{P_a} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_R}{\lambda} = \frac{1}{4\pi \cos^2 \frac{\theta}{2}} \sqrt{\ln \left(1 + \frac{P_\phi}{P_a} \right)}.$$

В случае неточечного источника, например Крабовидной туманности, величины P_a и P_ϕ могут быть определены из записи прохождения источника через диаграмму антенны (рис. 5) путем вычисления интегралов под записью источника и фона. Здесь следует заметить, что форма и размер вертикальных диаграмм главного лепестка и фона определяются одной и той же огибающей — диаграммой щита в вертикальной плоскости (λ/b , где b — высота щита), а так как в (3) основной величиной является отношение P_ϕ/P_a , то можно ограничиться одномерным рассмотрением. С достаточной точностью* можно считать

$$P_a \sim T_a \Delta\theta_{\text{ист}},$$

где $\Delta\theta_{\text{ист}}$ — в данном случае размер Крабовидной туманности ($3.5 \approx \approx 10^{-3}$ рад), и

$$P_\phi \sim T_\phi \Delta\theta_{\text{ист}} \approx T_\phi \frac{\lambda}{a}.$$

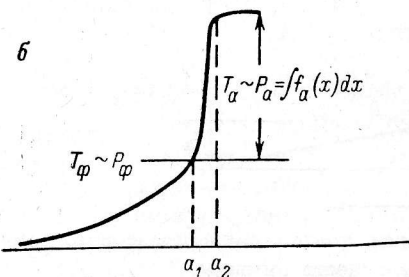
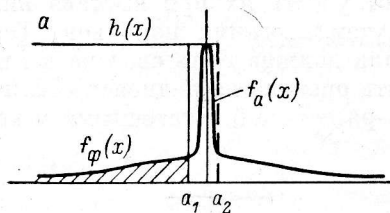


Рис. 6. Покрытие фона и главного лепестка диаграммы направленности антенны полубесконечным равномерно ярким экраном.

$a - P_\phi \sim 2T_\phi$; $b - P_a \sim T_a$.

к задаче «покрытия» фона и главного лепестка полубесконечным равномерно ярким экраном или к свертке диаграммы $f(x)$ со ступенчатой функцией $h(x)$. При этом энергия, принимаемая «покрытой» частью диаграммы, равна

$$P(a) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) x \cdot h(x-a) dx = \int_{-\infty}^a f(x) dx.$$

В тот момент, когда край экрана подходит к главному лепестку (точка a_1 на рис. 6, а), оказывается покрытой половина рассеянного фона, поэтому

$$P_\phi = 2P(a_1).$$

На реальной записи прохождения Луны через диаграмму антенны (Северного сектора РАТАН-600) этот момент подхода края Луны к глав-

* Формула (3) мало чувствительна к ошибкам определения P_ϕ и P_a , в то же время P_ϕ резко реагирует на изменение σ . Таким образом, при оценке σ описанным методом трудно сделать значительные ошибки.

ному лепестку достаточно надежно определяется по резкому изменению сигнала. Антенная температура T_ϕ в этой точке соответствует энергии $P(a_1)$, и соответственно полная энергия фона

$$P_\phi \sim 2T_\phi.$$

Если бы экран имел прямолинейный край, то момент выхода края экрана из главного лепестка соответствовал бы точке a_2 , а перепад T_a на рис. 6, б соответствовал бы энергии, принимаемой главным лепестком диаграммы антенны, полностью покрытым экраном:

$$P_a \sim T_a.$$

Таким образом, искомое отношение P_ϕ/P_a равно

$$\frac{P_\phi}{P_a} = \frac{2T_\phi}{T_a}.$$

Однако ввиду криволинейности края Луны покрытие ножевой диаграммы (главного лепестка) по вертикали происходит медленно и заканчивается практически лишь при достижении осью диаграммы антенны центра Луны. На рис. 7 приведен вид расчетного «покрытия» диаграммы фона (одномерная свертка диаграммы щита и «Луны») и ножевой диаграммы главного лепестка «дискон Луны». Криволинейность края мало влияет на форму кривой покрытия протяженного фона. На реальных записях наблюдений Луны значение T_ϕ определяется, как показано на рис. 7, а чтобы определить T_a , необходимо (см. рис. 7) продолжить фон под Луной, от которого отсчитывается T_a , либо аппроксимируя его приближенно какой-либо подходящей функцией, либо восстановив по методу из [18].

Итак, среднеквадратичное значение ошибок установки элементов определяется из измерений по наблюдениям Луны по следующей формуле:

$$\frac{\sigma_R^2}{\lambda} = \frac{1}{4\pi \cos^2 \frac{\alpha}{2}} \sqrt{\ln \left(1 + \frac{2T_\phi}{T_a} \right)}. \quad (4)$$

Чтобы проверить, как ошибки влияют на форму и величину рассеянного фона на реальных записях («подложка»), и убедиться в правильности формул (3) и (4), были проведены наблюдения Крабовидной туманности и Луны при специально введенных случайных ошибках установки элементов с $\sigma_R = 1.5$ мм. Расчет ошибки по формулам (3) и (4) очень хорошо соответствовал введенной ошибке. Записи показаны на рис. 8 и 9.

5. Радиоастрономические наблюдения

Главным критерием любых работ, выполняемых с целью повышения эффективности радиотелескопа, являются результаты радиоастрономических наблюдений.

В описываемом эксперименте в качестве контрольных радиоисточников были выбраны Крабовидная туманность (Телец А) и Луна — для оценки точности поверхности главного зеркала, а также ЗС84 и ЗС286 — для определения эффективной площади. Наблюдения проводились на

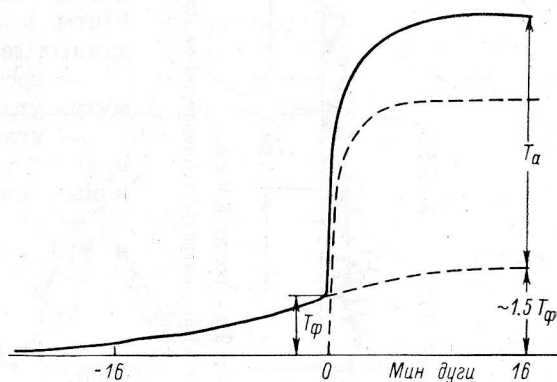


Рис. 7. Расчетное покрытие диаграммы фона и ножевой диаграммы главного лепестка «дискон Луны» (определение величины T_ϕ и T_a).

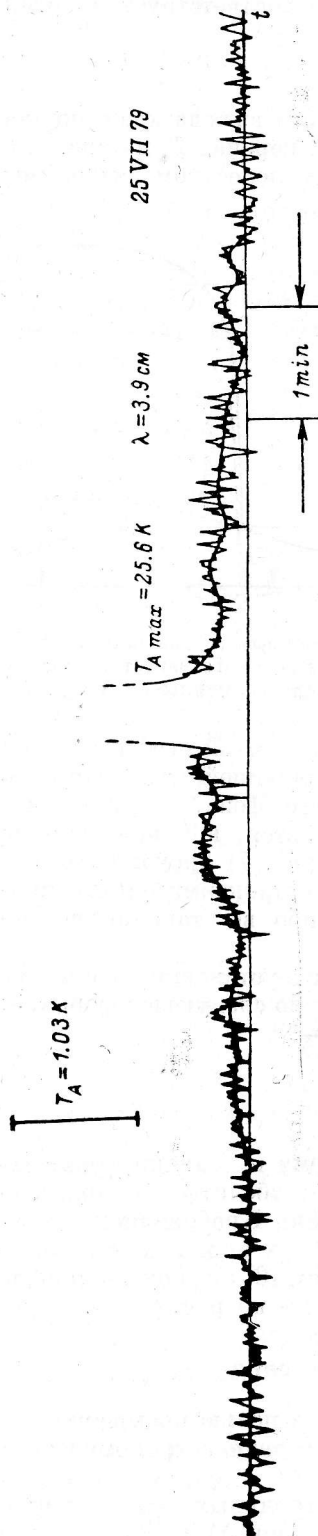


Рис. 8. Наблюдение Крабовидной туманности 25.07.79 на волне 3.9 см. В положении элементов по радиусу введены случайные ошибки с $\sigma = 1.5$ мм. Максимальное значение антенной температуры от Крабовидной туманности ($T_A \text{ max}$) составляет 25.6 К.

неполном северном секторе радиотелескопа РАТАН-600 (175 щитов вместо 225) с использованием высокочувствительных радиометров на волнах 1.38, 2.08, 3.9, 8.2 и 13 см. Наблюдения выполнены тремя циклами с июля 1979 г. по январь 1980 г.

В первом цикле наблюдений решалась задача точной установки антенны на высокие радиоисточники. Щиты выставлялись с использованием данных геодезической юстировки:

- мест нулей по радиусу, азимуту, углу места;
- угломестных кинематических поправок; с добавлением последовательно новых поправок:
 - за кинематичность азимутальных и угломестных МО

$$\delta M_{\text{кин}} = M_0^* - M_0;$$

- за разновысотность угломестных осей.

$$\delta R(H) = 6\delta H_* \operatorname{tg} \beta;$$

- за наклон угломестных осей

$$\delta \alpha(u) = 12\Delta H_* \sin \beta.$$

В этих выражениях M_0^* и M_0 — места нулей, определенные на эллипсе и на окружности; δH_* — отклонения высот щитов от среднего горизонта; ΔH_* — наклон угломестных осей, мм; поправки выражены в делениях точной шкалы ОУУ, индекс * означает, что измерения выполнены на эллипсе.

Результаты наблюдений в этом цикле таковы. На записях Крабовидной туманности на волнах до 2 см включительно рассеянный фон практически исчез, а антенная температура источника резко возросла. Наилучший результат получился при введении всех поправок (21.07.79 и 26.07.79, рис. 10, табл. 7). Антенная температура источника оказалась наибольшей из всех ранее полученных, а выраженная через радиальную ср. кв. ошибка поверхности, определенная по (3), составила всего 0.4 мм. Аналогичный результат получился при наблюдениях Луны (рис. 11): увеличение температуры и резкое снижение рассеянного фона под источником. Результаты последующих наблюдений (в августе) оказались до-

статочны близкими, что подтвердило надежность и эффективность используемых поправок. В октябре наблюдения Крабовидной туманности были повторены. Выполненные по данным юстировки для первого цикла, они показали, что результаты летних наблюдений были не случайны: значения антенной температуры источника на волнах 2.08 и 3.9 см оказались

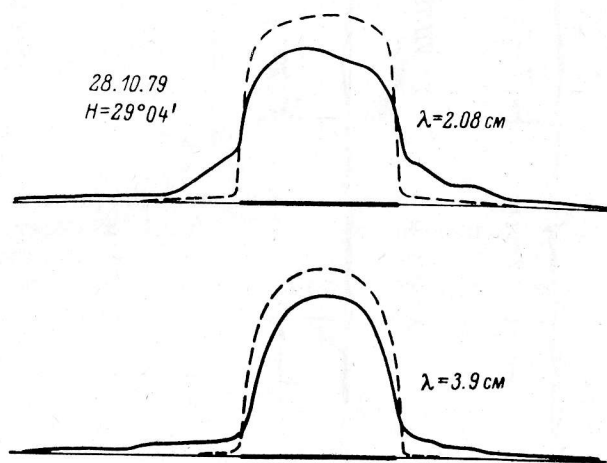


Рис. 9. Наблюдения Луны на волнах 2.08 и 3.9 см.

Сплошная линия — запись 28.10.79, высота Луны над горизонтом $\sim 29^{\circ}04'$, при установке антенны в положение щитов по радиусу введены случайные ошибки с $\sigma=1.5$ мм. Штриховая линия — результат наблюдения на хорошо выставленной антенне, высота Луны над горизонтом мало отличается от высоты 28.10.79.

равными 8.88 и 30.5 К соответственно. В то же время подтвердились опасения относительно изменения МО в результате выполнения ремонтных работ, поэтому перед проведением следующего цикла была сделана АК-юстировка.

ТАБЛИЦА 7

Измеренная величина	Длина волны, см	
	2.08	3.9
T_a , К	9.0	30.0
T_ϕ , К	0.03	0.02
σ_R , мм	0.4	0.5

ТАБЛИЦА 8

Длина волны, см	Величина подложки, %
1.38	~ 10
2.08	~ 4
3.9	< 1

Цель этого цикла — проверка возможности точной установки антенны на низкие источники. Проверка выполнялась по наблюдениям Луны, высота которой над горизонтом в это время была порядка $30-31^{\circ}$. На такой высоте основное улучшение поверхности должны давать радиальные кинематические поправки, поправки же за разновысотность угломестных осей на качество поверхности практически не влияют, поэтому при наблюдениях они не учитывались. Было проведено четыре наблюдения Луны. Использование новых АК-нулей и новых радиальных кинематических поправок позволило получить поверхность с рекордно малой ср. кв. ошибкой $\sigma_R=0.32$ мм. Если же не учитывать радиальные кинематические поправки, то значение σ увеличивается до 0.41 мм, т. е. в 1.3 раза.

Следующий цикл наблюдений был проведен в конце декабря — начале января 1980 г., для чего была выполнена еще одна АК-юстировка.

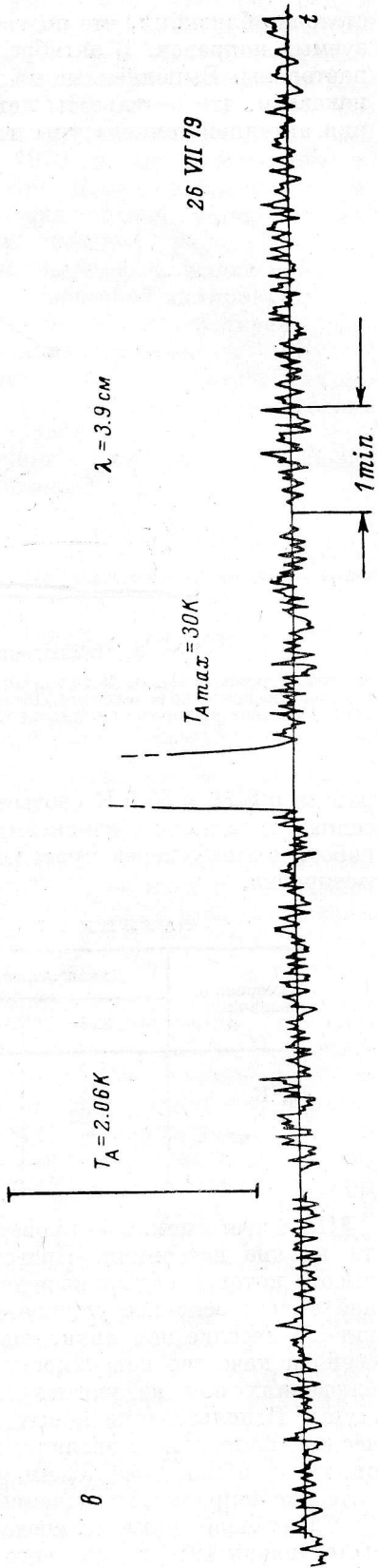
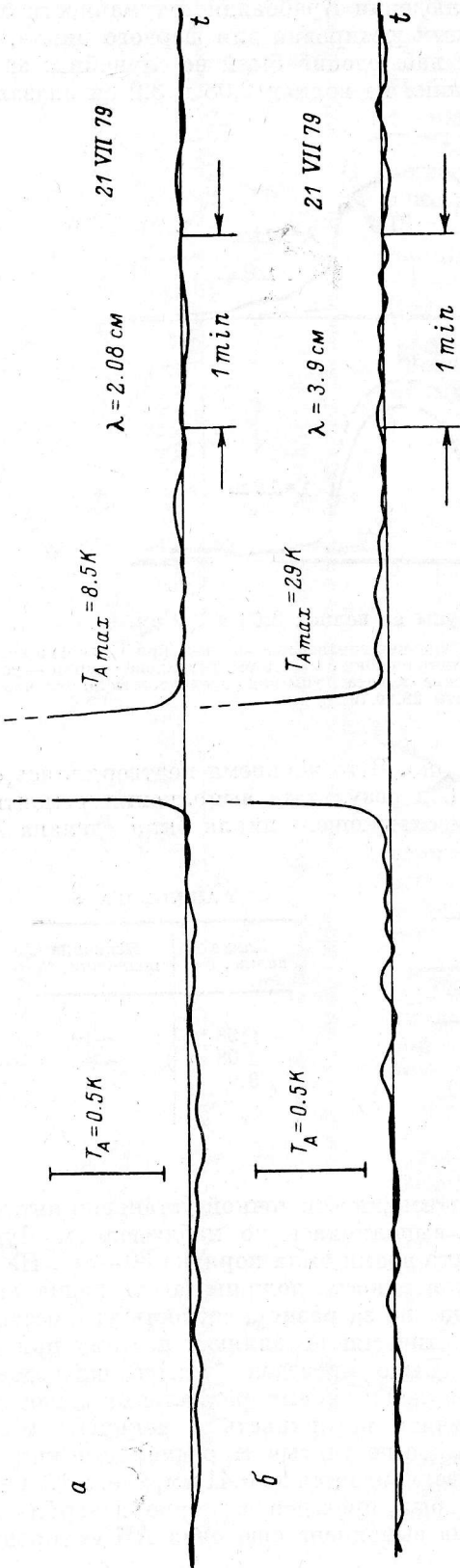


ТАБЛИЦА 9

Длина волны, см	Эффективная площадь, м ² , по источникам			Ср. значение площади	КИП
	Краб. тум.	ЗС 286	ЗС 84		
1.35	580	680	720	660	0.35
2.08	1010	970	720	900	0.50
3.9	1260	950	990	1060	0.57
8.2	1000	840	750	860	0.47
13.0	—	1000	700	850	0.46

Наблюдения Луны проводились на волнах 1.38, 2.08, 3.9 и 8.2 см на разных углах места: $\sim 26, 42, 61-64^\circ$. В установочные таблицы вводились все полученные в ходе эксперимента поправки. Результаты наблюдений отражены на рис. 12, на котором приведены наилучшие полученные за весь цикл одномерные изображения Луны на волнах от 1.38 до 8.2 см. Величина «подложки» в процентах на разных волнах приведена в табл. 8.

Наблюдения Крабовидной туманности, а также источников ЗС84 и ЗС286, были использованы для оценки эффективной площади северного сектора. Результаты оценки представлены в табл. 9 и на рис.13.

Во-первых, следует отметить общее увеличение эффективной площади на всех длинах волн, происшедшее в результате принятых мер. [Наилучшее значение эффективной площади, полученное до сих пор, составляло 890 м^2 ($\lambda=3.9 \text{ см}$, источник ЗС286, январь 1978 г.). На других длинах волн (2.08—13.0 см) это значение колеблется от 560 до 780 м^2 . И, во-вторых, обращают на себя внимание значения эффективной площади, полученные по Крабовидной туманности; для волн $\geq 2 \text{ см}$ эти значения $\geq 1000 \text{ м}^2$.

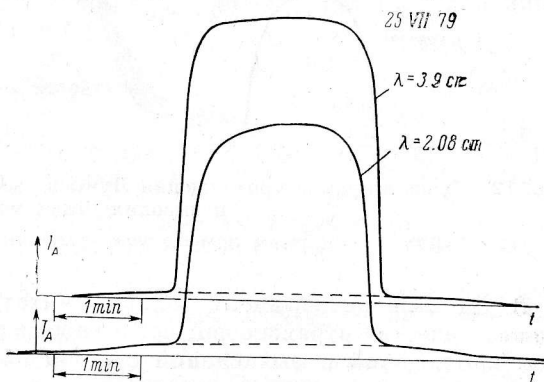


Рис. 11. Наблюдения Луны 25.07.79 на волнах 2.08 и 3.9 см.

Заключение

Основные результаты проведенных исследований можно сформулировать следующим образом.

1. Правильный учет выявленных погрешностей в положении элементов кругового отражателя позволил получить отражающую поверхность высокой точности и большой эффективной площади при наблюдении источников как на высоких, так и на низких углах места: $\sigma_R=0.3 \div 0.5 \text{ мм}$; $S_{эф} \approx 1000 \text{ м}^2$. Длительность эксперимента свидетельствует, что поддержание высокого качества антенны может быть обеспечено стандартными режимами юстировки и эксплуатации.

Рис. 10. Наблюдения Крабовидной туманности.

Записи 21.07.79 на волнах 2.08 ($T_A \text{ max} = 8.5 \text{ К}$) и 3.9 см ($T_A \text{ max} = 29 \text{ К}$); запись 26.07.79 на волне 3.9 см ($T_A \text{ max} = 30 \text{ К}$). Кривые, полученные 21.07.79, сглажены для лучшего выделения фона.

2. Радиоизображения источников, полученные в ходе эксперимента с высокоточной поверхностью, отличаются рекордными значениями антенной температуры и исчезающе малым рассеянным фоном.

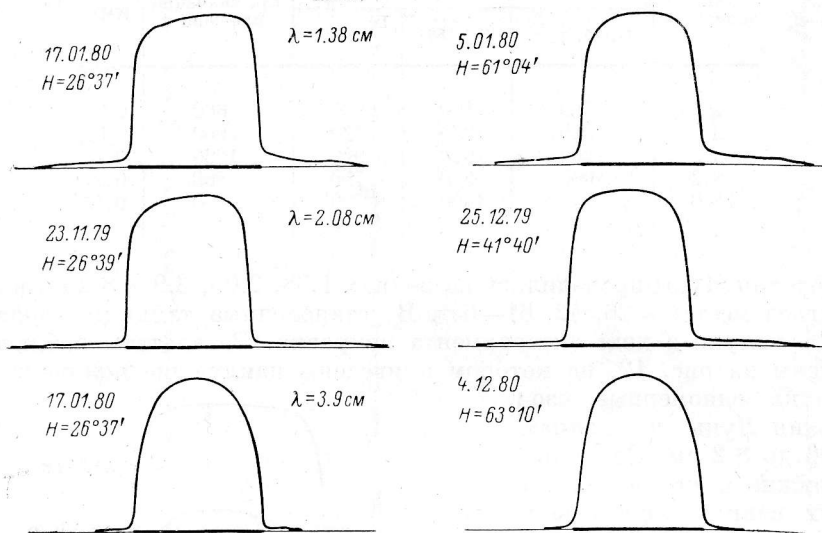


Рис. 12. Лучшие кривые прохождения Луны на волнах 1.38, 2.08 и 3.9 см на низких и высоких углах места.

Размеры лунного диска отмечены жирной чертой.

3. Данный эксперимент можно считать также проверкой методов оценки качества отражающей поверхности по рассеянному фону. Результаты наблюдений и вычислений ошибок поверхности показали правильность, надежность и высокую точность этих методов.

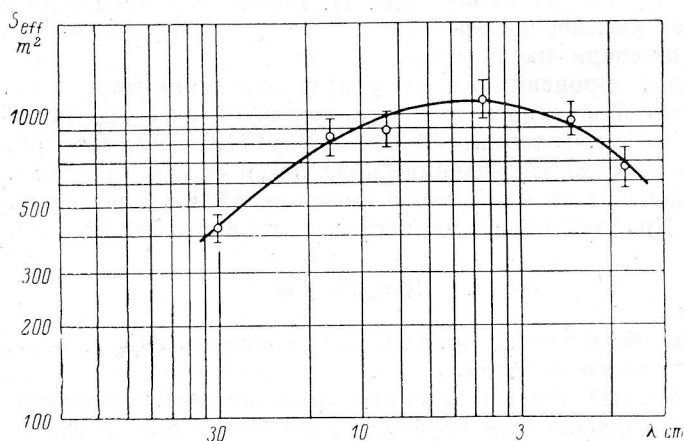


Рис. 13. Значения эффективной площади Северного сектора РАТАН-600 (укороченный сектор — 175 элементов) для разных длин волн по измерениям в июле—августе 1979 г.

4. На данном этапе при подготовке радиотелескопа к наблюдениям необходимо учитывать следующие величины:

- места нулей по трем координатам;
- поправку в автоколлимационные MO по углу места за систематическую разность с геодезическими MO_{β} ;
- угломестные кинематические поправки;
- радиальные кинематические поправки;

- радиальные поправки за разновысотность угломестных осей;
- азимутальные поправки за наклон угломестных осей.

Следует отметить, что возможности для дальнейшего повышения точности главного зеркала этим не исчерпываются. Так, требует более подробного изучения характера изменений в положении щитов при их радиальном движении во всем диапазоне перемещений. Может быть увеличена на несколько процентов точность нивелирования угломестных осей. Кроме того, в настоящее время проводится работа по улучшению поверхности щитов Северного сектора, которая в дальнейшем будет распространена на весь круговой отражатель. Согласно контрольным измерениям, центральная часть поверхности переобшитых щитов имеет ср. кв. ошибку порядка 0.07—0.10 мм. И, наконец, повышение точности установки элементов ожидается в связи с автоматизацией кругового отражателя за счет уменьшения ошибок считывания со шкал ОУУ, ввода и обработки задания, а также за счет оперативности контроля и юстировок.

В заключение авторы выражают признательность В. В. Витковскому, Н. Е. Гольневой, А. Д. Дибижеву, Э. И. Коркину, Е. К. Хильковой, С. А. Чеху и О. В. Чуканову за помощь в проведении исследований.

Литература

1. Гельфрейх Г. Б., Зверев Ю. К., Стоцкий А. А., Шиврис О. Н. Юстировка антенны переменного профиля. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 123—128.
2. Белевитин А. Г., Зверев Ю. К. Геодезические работы при строительстве и юстировке радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 114—119.
3. Зверев Ю. К., Коркин Э. И. Геодезические методы юстировки радиотелескопа РАТАН-600. — В кн.: VIII Всесоюзная конференция по радиоастрономии. Тезисы докладов. Пуцино, 1975, с. 31—32.
4. Стоцкий А. А., Ходжамухамедов Н. Экспериментальное исследование автоколлимационного метода юстировки антенны переменного профиля. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 129—138.
5. Стоцкий А. А., Лавров А. П., Магамадова Т. А. Радиотехническая юстировка радиотелескопа РАТАН-600. — В кн.: VIII Всесоюзная конференция по радиоастрономии. Тезисы докладов. Пуцино, 1975, с. 26—27.
6. Гельфрейх Г. Б. Радиоастрономический способ юстировки антенны переменного профиля. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 139—148.
7. Голубчина О. А., Зверев Ю. К., Стоцкий А. А., Ходжамухамедов Н. Сравнение автоколлимационного и радиоастрономического методов юстировки Большого пулковского радиотелескопа. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1973, 5, с. 157—165.
8. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н., Корольков Д. В., Берлин А. Б., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А., Зверев Ю. К., Копылов А. И., Коркин Э. И., Лавров А. П., Соболева Н. С., Стоцкий А. А., Тимофеева Г. М. Радиотелескоп РАТАН-600. Ввод в действие и исследование первой очереди. — Изв. вузов. Радиофизика, 1976, XIX, II, с. 1581—1593.
9. Kogol'kov D. V., Pariiskii Yu. N. The Soviet RATAN-600 Radio Telescope. — Sky and Telescope, 1979, v. 57, 4, p. 324—329.
10. Стоцкий А. А., Пинчук Г. А., Калихевич Г. Н., Гогина И. В., Магамадова Т. А., Дибижев А. Д. Некоторые оценки качества фокусирующей системы РАТАН-600 по автоколлимационным измерениям. — В кн.: XI Всесоюзная радиоастрономическая конференция по аппаратуре, антеннам и методам. Тезисы докладов. Ереван, 1978, с. 160—162.
11. Гельфрейх Г. Б., Голубчина О. А. Радиоастрономическая юстировка РАТАН-600. — Сообщ. САО, 1978, 23, с. 5—21.
12. Голубчина О. А. Использование радиоизлучения Луны для радиоастрономической юстировки АПП. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1980, 12, с. 141—147.
13. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А., Шиврис О. Н. Большой пулковский радиотелескоп. — Изв. ГАО, 1960, № 164, с. 3—26.
14. Белевитин А. Г., Глумов А. П., Зверев Ю. К., Кислов Н. Н., Коркин Э. И., Копылов А. И. Формирование отражающих поверхностей элементов кругового и плоского отражателей и вторичного зеркала РАТАН-600. —

В кн.: VIII Всесоюзная конференция по радиоастрономии. Тезисы докладов. Пушино, 1975, с. 43—44.

15. Копылов А. И., Чуканов О. В., Шиврис О. Н., Отсчетно-установочные устройства секции кругового отражателя радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 101—106.
16. Парийский Ю. Н. Контроль параметров антенны по радиоастрономическим наблюдениям. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 149—151.
17. Шифрин Я. С. Основы статистической теории антенн. М., «Сов. радио», 1970.
18. Крат О. И. Восстановление свертки диаграммы рассеянного фона и источника на записи протяженного источника. — Настоящий сб., с. 106—109.