

## АВТОКОЛЛИМАЦИОННАЯ ЮСТИРОВКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

*А. А. Стоцкий, Г. Н. Каличевич, Т. Н. Осина, Г. А. Пинчук*

Описан автоколлимационный метод, применяющийся на радиотелескопе РАТАН-600 для юстировки (взаимной привязки щитов, образующих главное зеркало) и некоторых других измерений. Автоколлимационный метод юстировки используется для обеспечения наблюдений на радиотелескопе более 10 лет. На основании результатов измерений, выполненных за это время, приводятся оценки стабильности фокусирующей системы радиотелескопа и надежности отсчетно-установочных механизмов щитов.

Autocollimation method used for adjusting the radio telescope (relative positioning of the main mirror screens) and for some other measurements is described.

Autocollimation method of adjustment is being used for providing observations at the radio telescope for more than 10 years. Stability of the radio telescope focusing system and reliability of counting-adjusting mechanisms of screens are estimated on the basis of measurement results obtained during this time.

Радиотелескоп РАТАН-600 является одним из крупнейших рефлекторных радиотелескопов сантиметрового диапазона волн. Его главное зеркало, имеющее форму кольца со средним диаметром 576 м, состоит из большого количества (895 штук) независимых подвижных элементов — щитов. Размеры каждого щита  $7.4 \times 2$  м [1].

Необходимая для наблюдений в заданном направлении форма главного зеркала (вырезка из эллиптического конуса) образуется путем линейных (радиальных) перемещений щитов и их разворотов. Величина этих перемещений и разворотов контролируется с необходимой точностью с помощью отсчетно-установочных устройств, имеющих на каждом щите.

Для получения высокой точности отражающей поверхности зеркала в целом необходимо осуществить высокоточную взаимную привязку отсчетно-установочных устройств — определить места нулей их шкал. Под местами нулей подразумеваются отсчеты, при которых главное зеркало образует исходную поверхность заданной формы. В радиотелескопе РАТАН-600 такой исходной поверхностью является вертикальный круговой цилиндр радиусом 288 м, касательно к которому устанавливаются щиты. Определение мест нулей шкал отсчетно-установочных устройств составляет основную задачу юстировки радиотелескопа [2].

Возможность достаточно частого повторения юстировок позволяет поддерживать высокую точность большой отражающей поверхности, компенсируя разного рода эффекты «старения» — подвижки фундаментов щитов, износ механизмов наведения щитов, деформации металлоконструкций, рассогласование шкал вследствие ремонта отсчетно-установочных устройств и т. п. В практике работы радиотелескопа оказалось необходимым проводить юстировки 1—2 раза в год.

Для юстировки радиотелескопа РАТАН-600 и исследования его характеристик был разработан специальный автоколлимационный метод [3], который прошел предварительную экспериментальную проверку на Большом пулковском радиотелескопе [4, 5].

С момента ввода в строй первой очереди радиотелескопа в 1974 г. автоколлимационный метод нашел самое широкое применение как для первоначальной юстировки радиотелескопа на завершающем этапе строительства, так и при дальнейшей его эксплуатации. Благодаря высокой точности, простоте и удоб-

ству проведения измерений этот метод стал основным рабочим методом юстировки и контроля радиотелескопа РАТАН-600.

В основном режиме работы радиотелескопа используется какая-либо часть главного зеркала (около 200 щитов). Поскольку при юстировках используются те же самые вторичные зеркала, то при каждой юстировке измеряются положения щитов, как правило, одного из четырех секторов радиотелескопа (225 щитов).\*

Помимо решения основной задачи — формирования точной отражающей поверхности радиотелескопа — автоколлимационные юстировки использовались для исследования собственных деформаций фокусирующей системы. Величины и характер деформаций определялись путем сравнения мест нулей юстировок, выполненных в разное время.

Кроме юстировок автоколлимационный метод использовался для проведения ряда других измерений.

#### Автоколлимационный метод

**Автоколлимационный метод юстировки.** В основе автоколлимационного метода измерений лежит принцип обратной фокусировки электромагнитных волн, отраженных главным зеркалом, в точку, где расположен источник излучения.

Автоколлимационный метод юстировки РАТАН-600 относится к чисто радиофизическим методам, использующим информацию, которая содержится в амплитуде и фазе сигнала, отраженного непосредственно от рабочей поверхности элементов зеркала антенны. Юстировка осуществляется следующим образом.

В качестве заданной поверхности главного зеркала, которую образуют щиты при юстировке, принимается вертикальный круговой цилиндр. В центре антенны устанавливается облучатель, к которому подсоединены передатчик и приемник (рис. 1).

Для определения мест нулей угловых шкал каждый юстируемый щит поочередно устанавливается примерно вертикально вблизи заданной окружности, а затем наводится по углу места и азимуту таким образом, чтобы отраженный им сигнал был максимальным. Показания отсчетных устройств, соответствующие такому положению щита, являются местами нулей соответствующих угловых шкал.

Для определения мест нулей радиальных шкал используется интерференция между каждым из юстируемых щитов и одним щитом, принятым за опорный. Опорный щит по угловым координатам устанавливается в положение, соответствующее максимуму отраженного сигнала, и остается в этом положении на все время дальнейших измерений. Затем каждый юстируемый щит поочередно устанавливается по угловым координатам в положение, соответствующее максимуму отраженного от него сигнала. Для этого используются ранее найденные места нулей угловых шкал. Затем юстируемый щит перемещается по радиусу до получения максимума (или минимума) интерференционного сигнала. Отсчет по радиальной шкале в этом положении является местом нуля этой шкалы.

Неоднозначность определения места нуля радиальной шкалы, обусловленная периодическим характером интерференционной картины, устраняется одним из следующих способов: проведением юстировки на нескольких разных частотах, использованием для юстировки широкополосного шумового сигнала, визуальным — по наличию «ступенек» между соседними щитами, использованием в качестве приближенных значений мест нулей результатов предыдущей автоколлимационной юстировки. Практически оказалось удобнее всего пользо-

\* Южный сектор кольцевого зеркала может также работать с дополнительным плоским перископическим зеркалом. При вводе перископического зеркала в строй для его первоначальной юстировки также использовался автоколлимационный метод. Однако в дальнейшем оказалось удобнее юстировку плоского зеркала проводить методами инженерной геодезии [6]. Поэтому здесь мы не будем рассматривать применение автоколлимационного метода для юстировки плоского перископического зеркала.

ваться результатами предыдущей юстировки с последующим визуальным контролем.

Необходимо отметить, что все измерения при автоколлимационной юстировке являются относительными. Поэтому места нулей определяются с точностью до слагаемых, которые зависят от положения фазового центра облучателя радиотелескопа в горизонтальной плоскости (для радиальных и азимутальных шкал), величины радиуса исходной окружности (для радиальных шкал)

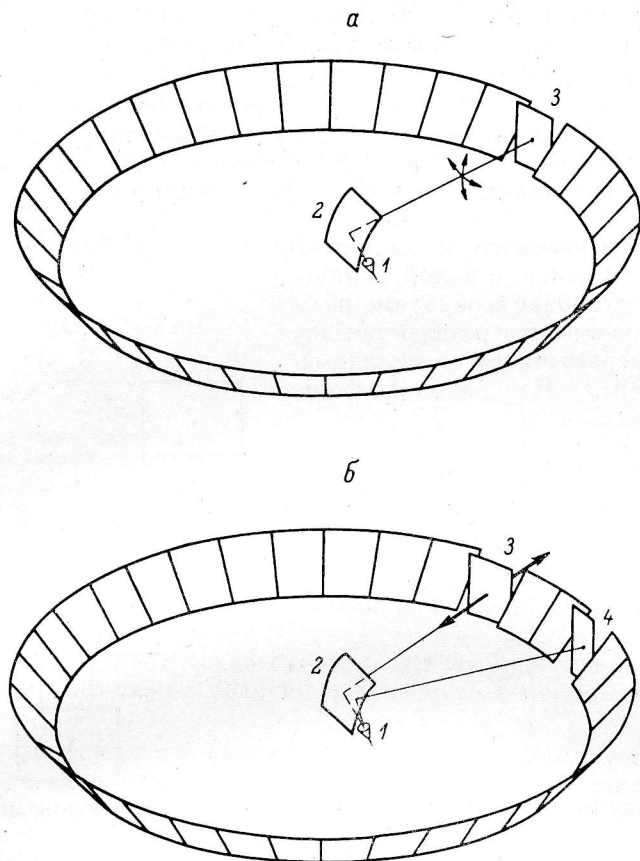


Рис. 1. Схема автоколлимационной юстировки главного кольцевого зеркала РАТАН-600.  
 а — определение мест нулей угловых шкал; б — определение мест нулей радиальных шкал; 1 — облучатель; 2 — вторичный отражатель; 3 — юстируемый щит; 4 — опорный щит.

и наклона облучателя (для угломестных шкал). Так как в процессе юстировки облучатель остается неподвижным, то для данной юстировки все эти слагаемые являются константами. Однако при следующей юстировке они могут принимать другие значения. Учет изменения величин этих слагаемых при изменении положения облучателя составляет задачу приведения результатов юстировок к общему центру.

**Энергетические соотношения.** При юстировке радиотелескопа, вследствие того что облучается все главное зеркало, а принимается сигнал, отраженный лишь от одного или двух щитов, принятый автоколлимационный сигнал значительно меньше излучаемого. Мощность сигнала, поступающего на вход автоколлимационного приемника, после отражения от  $n$ -го щита равна

$$P_n = P_0 K \left[ \frac{F(\varphi_n)}{N} \right]^2, \quad (1)$$

где  $P_0$  — излучаемая мощность;  $F(\varphi_n)$  — диаграмма направленности облучателя в горизонтальной плоскости (по мощности);  $\varphi_n$  — угловая координата щита;  $N$  — количество облучаемых щитов (рис. 2).

Коэффициент  $K$  определяется величиной КПД перископической системы в вертикальной плоскости в автоколлимационном режиме  $\eta_{AK}$ , коэффициентом отражения  $n$ -го щита  $\xi_n$  и отношением эффективной ширины диаграммы направленности облучателя  $\Delta\varphi_{эф} = \int_0^{2\pi} F(\varphi) d\varphi$  к угловой апертуре облучаемой части зеркала  $\Delta\varphi_{обл} = N\Delta\varphi$  ( $\Delta\varphi$  — угловой размер одного щита):

$$K = \eta_{AK} \xi_n \frac{\Delta\varphi_{обл}}{\Delta\varphi_{эф}}. \quad (2)$$

Так как величины  $\eta_{AK}$  и  $\xi_n$  несколько меньше единицы, а отношение  $\Delta\varphi_{обл}/\Delta\varphi_{эф}$  обычно близко к 2, то коэффициент  $K$  имеет величину, близкую к единице.

В практике измерений на РАТАН-600 величина  $P_n/P_0$  колеблется в пределах от -47 дБ для центральных до -57 дБ для крайних щитов юстируемого сектора.

**Разделение излучаемого и принимаемого сигналов.** В связи с малой величиной  $P_n/P_0$  при юстировке необходимо обеспечить достаточно высокую развязку между приемником и передатчиком автоколлимационной системы. На радиотелескопе

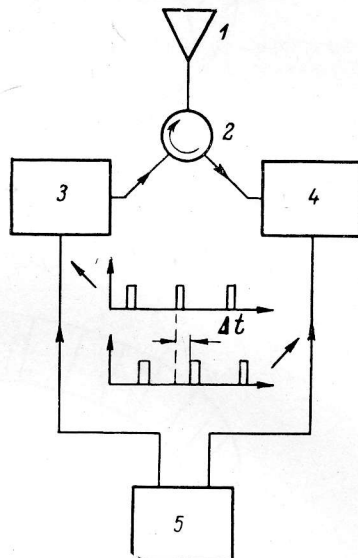
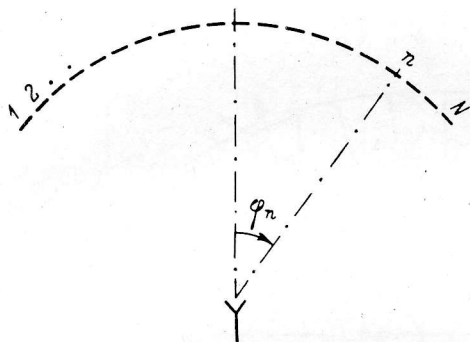


Рис. 2. К выводу формулы для определения мощности автоколлимационного сигнала.

Рис. 3. Временное разделение излучаемого и принимаемого сигналов.

1 — облучатель; 2 — циркулятор; 3 — передатчик; 4 — приемник; 5 — генератор сдвинутых импульсов.

РАТАН-600 нашли применение два метода разделения излучаемого и принимаемого сигналов:

а) временной (рис. 3). Передатчик и приемник подключаются к общему рупорному облучателю через циркулятор. Необходимая развязка обеспечивается попеременной импульсной работой передатчика и приемника. Задержка строб-импульса приемника относительно импульса передатчика определяется временем распространения сигнала от центра радиотелескопа до главного зеркала и обратно, которое для РАТАН-600 составляет 1.7 мкс. Длительность импульса передатчика и строб-импульса приемника должны быть меньше времени задержки и устанавливаются обычно около 1 мкс;

б) пространственный (рис. 4). Передатчик и приемник подключены каждый к своему рупорному облучателю, которые размещены на фокальной оси вторичного зеркала радиотелескопа на расстоянии, не превышающем 1 м друг от друга. При этом, строго говоря, автоколлимация не осуществляется. Щиты для точности фокусировки в этом случае должны образовывать не круговой, а эллиптический цилиндр. Однако вследствие очень малого эксцентриситета этот эллиптический цилиндр практически не отличается от кругового с осью, проходящей посередине между фокальными осями эллиптического цилиндра. Поэтому результаты измерений практически не отличаются от «чистой» автоколлимации.



**Другие применения автоколлимационного метода измерений.** Кроме решения основной задачи — взаимной привязки шкал отсчетно-установочных устройств всех щитов — автоколлимационный метод измерений нашел применение для решения ряда других задач, возникающих при настройке и исследовании радиотелескопа. Перечислим некоторые из них:

а) контроль качества отражающей поверхности путем исследования структуры фокального пятна при отражении сигнала от всех щитов, образующих рабочую часть главного зеркала. При измерении эта часть зеркала устанавливается вертикально на исходную окружность. Регистрируется распределение мощности в сечении автоколлимационного фокального пятна путем поперечного перемещения рупорного облучателя автоколлимационной системы (или обоих облучателей при пространственном разделении сигналов). Показателем качества отражающей поверхности являются ширина главного лепестка, уровень и структура боковых лепестков, величина рассеянного фона. На рис. 5 приведены примеры сечений автоколлимационных фокальных пятен на разных волнах, а на рис. 6 — результаты измерения поля рассеяния на волне 8 мм.

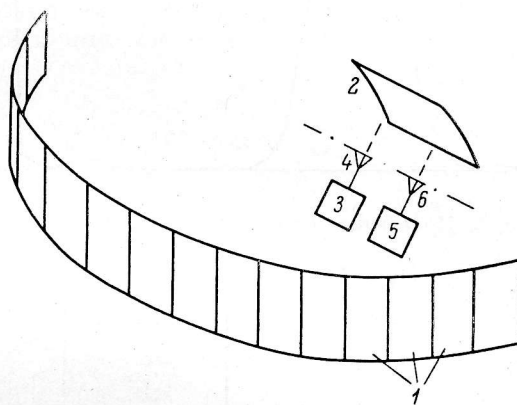


Рис. 4. Пространственное разделение излучаемого и принимаемого сигналов.

1 — щиты главного зеркала; 2 — вторичное зеркало; 3 — передатчик; 4 — облучатель передатчика; 5 — приемник; 6 — облучатель приемника.

На рис. 7 показано изменение формы фокального пятна в результате проведения очередной юстировки;

б) измерение КПД перископической системы, образуемой главным и вторичным зеркалами, путем сравнения величин излучаемого и принимаемого сигналов (рис. 8);

в) определение фактического положения фокуса радиотелескопа по максимуму сигнала, отраженного всеми или частью щитов главного зеркала. На основе таких измерений был разработан метод определения положения электрической оси радиотелескопа, который позволил существенно повысить точность координатных измерений [7, 8];

г) контроль качества отражающей поверхности щитов путем измерения величин сигналов, отраженных от отдельных щитов, и сравнения их между собой. Результаты таких измерений использовались для оценки эффективности замены обшивки щитов более высококачественным листовым алюминием (рис. 9) [9];

д) измерения линейности и цены деления шкал радиальных отсчетно-установочных устройств путем сравнения мест нулей, определенных при разных величинах радиуса исходной окружности. Измеренные таким образом радиальные кинематические поправки используются наряду с автоколлимационными местами нулей для расчета установок щитов при радиоастрономических наблюдениях [10].

**Аппаратура.** Для проведения юстировок, определения положения фокуса и других измерений в автоколлимационном режиме в настоящее время на радиотелескопе РАТАН-600 имеется три комплекта штатной юстировочной аппаратуры с временным разделением сигналов:

а) на волне 3 см с монохроматическим сигналом с возможностью работы на одной из трех фиксированных частот;

б) на волне 3 см с широкополосным шумовым сигналом (ширина полосы ~10 %);

в) на волне 8 мм с монохроматическим сигналом.

Для контроля качества юстировки и некоторых других измерений имеются также более простые автоколлимационные устройства меньшей чувствительности с пространственным разделением сигналов, работающие на волнах 8 мм и 4 мм.

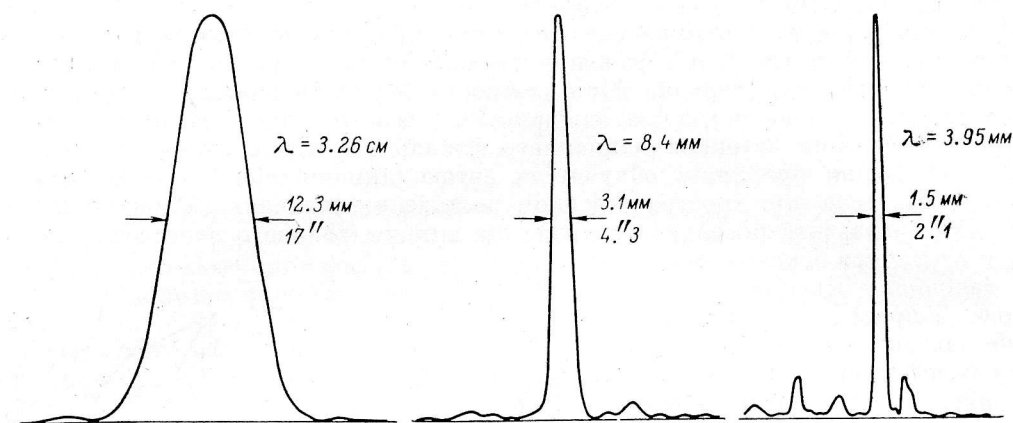


Рис. 5. Поперечное сечение автоколлимационных фокальных пятен на разных волнах.

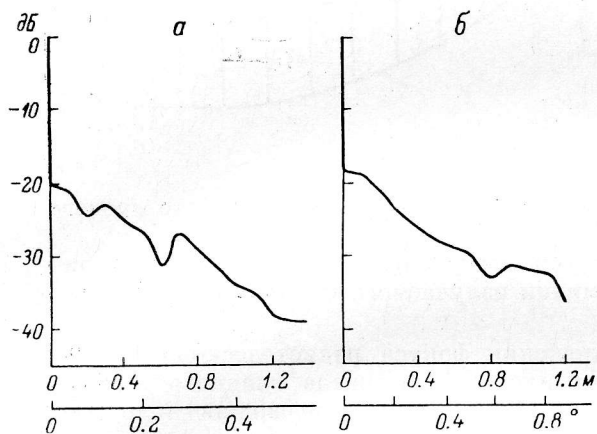
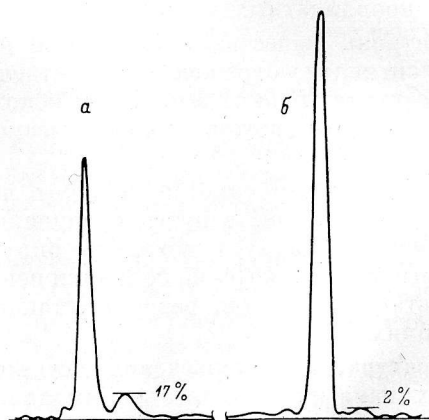


Рис. 6. Поле рассеяния на волне 8 мм.

Указаны размеры фокальных пятен в линейной мере в области фокуса и соответствующие им углы на небе. а — Северный сектор; б — Южный сектор с плоским зеркалом.

Рис. 7. Изменение автоколлимационного фокального пятна на волне 8 мм в результате проведения очередной автоколлимационной юстировки.

а — фокальное пятно через 7 мес после проведения юстировки № 3 перед юстировкой № 4; б — фокальное пятно сразу после проведения юстировки № 4. В результате юстировки в 1.54 раза возросла мощность в главном лепестке и уменьшились боковые лепестки.



Кроме специальной аппаратуры для автоколлимационных измерений в некоторых случаях используются штатные радиометры радиотелескопа. В этих случаях устанавливаются дополнительные монохроматические или шумовые генераторы, и измерения проводятся по схеме с пространственным разделением излучаемого и принимаемого сигналов.

При применении высокочувствительных радиометров и сильном отраженном сигнале, например при определении положения фокуса по сигналу, отраженному от всех щитов рабочей части главного зеркала, в качестве сигнала можно использовать тепловое излучение нагруженного рупора или собственное тепловое излучение радиометра. В некоторых случаях в качестве источника сигнала использовался кусок поглощающего материала («протяженный источник»).

### Точность юстировки

Уже первые наблюдения на радиотелескопе, начатые летом 1974 г., показали, что точность автоколлимационных юстировок достаточно высока и вполне обеспечивает нормальную работу радиотелескопа во всем сантиметровом диапазоне волн. Это было подтверждено затем всем опытом многолетней работы радиотелескопа и специальными исследованиями точности его поверхности [10].

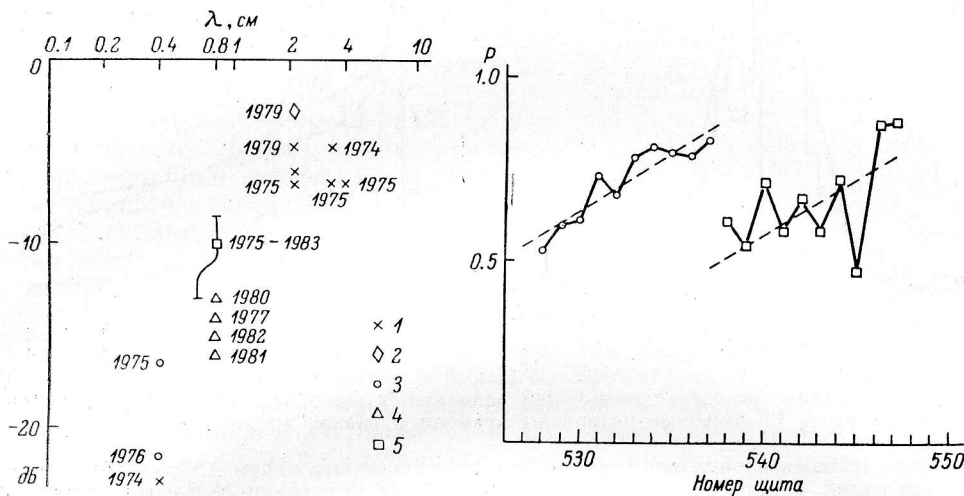


Рис. 8. Результаты измерения автоколлимационного кпд перископической системы РАТАН-600, выполненные в разное время на разных волнах ( $\lambda$ ).

1 — на Северном секторе; 2 — на Северном секторе по протяженному источнику; 3 — на Южном секторе; 4 — на Южном секторе с плоским зеркалом; 5 — среднее значение и пределы изменений кпд на волне 8 мм по измерениям на Северном, Южном, Восточном и Западном секторах (всего 27 измерений).

Рис. 9. Сравнение эффективных отражающих площадей щитов со старой и новой, более гладкой обшивкой по автоколлимационным измерениям на волне 8.6 мм.

Штриховые линии — изменение мощности в соответствии с диаграммой направленности облучателя. Замена обшивки приводит к увеличению средней эффективной площади в 1.7 раза и к меньшему разбросу значений площади от щита к щиту.

Как показали автоколлимационные исследования структуры поля в области фокуса на волне 4 мм, автоколлимационная юстировка обеспечивает получение устойчивого дифракционного фокального пятна и на миллиметровых волнах. Однако дать прямую количественную оценку достижимой точности юстировки автоколлимационным методом затруднительно, так как нет каких-либо других более точных методов измерения взаимного положения щитов.

Внутренняя точность юстировки, т. е. величина случайных ошибок, возникающих в процессе измерений, может быть оценена на основе сравнения результатов независимых юстировок. Проведение таких сравнений показало, что получающиеся разности тем меньше, чем меньше интервал времени между юстировками. Это указывает на то, что разности, по крайней мере частично, обусловлены деформациями самой антенны за время между юстировками.

При интервалах между измерениями около 1 мин были получены следующие среднеквадратичные величины разностей мест нулей отдельно взятых щитов: по радиусу  $\sigma_r = 0.067$  мм, по углу места  $\sigma_\beta = 11''$ , по азимуту  $\sigma_\alpha = 17''$ . Полагая,

что ошибки распределены равномерно между сравниваемыми отсчетами, получим следующие оценки внутренней точности юстировки:

$$\sigma'_r = \frac{\sigma_r}{\sqrt{2}} = 0.047 \text{ мм}; \quad \sigma'_\beta = \frac{\sigma_\beta}{\sqrt{2}} = 8''; \quad \sigma'_\alpha = \frac{\sigma_\alpha}{\sqrt{2}} = 12''.$$
 (3)

Необходимо отметить, что отсчет положения щита осуществляется по шкалам отсчетно-установочных устройств с точностью  $\pm 1/2$  деления шкалы. Цена деления по радиусу 0.17 мм, по углу места  $25''$ , по азимуту  $10''$ . В описываемых измерениях результаты юстировок по радиусу и углу места в подавляющем большинстве случаев отличались не более чем на полделения. Таким образом, приведенные величины  $\sigma'_r$  и  $\sigma'_\beta$  соизмеримы с шумами квантования отсчетов.

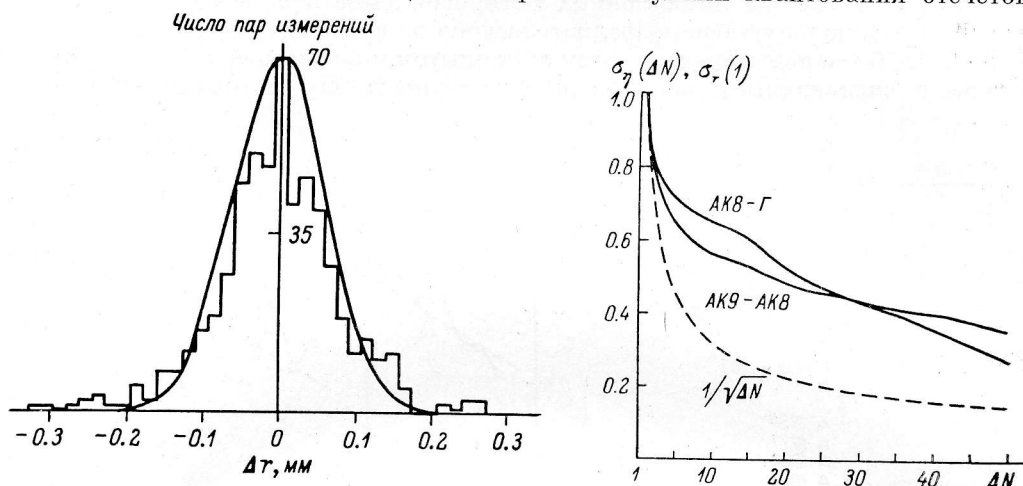


Рис. 10. Распределение разностей мест нулей радиальных шкал пар юстировок, проводившихся через 15-минутные интервалы времени в разное время суток.

Рис. 11. Результаты скользящего усреднения с прямоугольным окном  $\Delta N$  разностей радиальных мест нулей  $\sigma_r$  при сравнении автоколлимационной юстировки № 8 с геодезической юстировкой (AK8-Γ) и автоколлимационных юстировок № 8 и № 9 (AK8-AK9).

Действительно, полагая функцию распределения ошибок отсчетов в пределах одного деления равномерной, получим следующие формальные оценки среднеквадратичных ошибок отсчетов:

$$\sigma'_r = 0.048 \text{ мм}; \quad \sigma'_\beta = 7.2''; \quad \sigma'_\alpha = 2.9''.$$

Для исключения шумов квантования были проведены специальные исследования точности юстировки по радиусу с более точным отсчетом положения щитов непосредственно по фазе отраженного сигнала (без использования шкал отсчетно-установочных устройств). На рис. 10 приведена функция распределения разностей мест нулей, полученных в результате сравнения пар юстировок группы из 25 щитов, проводившегося через 15-минутные интервалы времени в разное время суток (всего 550 разностей). Среднеквадратичная величина разностей оказалась равной  $\sigma_r = 0.083$  мм, т. е. точность юстировки  $\sigma'_r = \sigma_r / \sqrt{2} = 0.056$  мм. Эта величина соизмерима с оценкой (3), но получена при большем интервале между юстировками. Если принимать во внимание только юстировки, выполненные в ночное время, то получается  $\sigma'_r = 0.03$  мм.

Обычно при юстировке измеряются положения щитов одного сектора радиотелескопа (225 щитов). Горизонтальный размер зеркала при этом равен 407 м. Следовательно, при случайной ошибке 0.03—0.06 мм относительная случайная ошибка взаимной привязки щитов главного зеркала составляет  $(0.7 \div 1.5) \times 10^{-7}$ . Эта величина соизмерима с величиной флуктуации разности электрических длин от облучателя до краев зеркала, возникающих вследствие нестабильности коэффициента преломления атмосферы [11, 12].

Таким образом, внутренняя точность автоколлимационного метода юстировки достаточна для формирования отражающей поверхности с точностью, ограничиваемой уже атмосферными флуктуационными эффектами.

Здесь уместно отметить, что влияние нестабильности атмосферы действительно наблюдается при проведении юстировок в дневное время. Поэтому основные высокоточные юстировочные работы на РАТАН-600 проводятся, как правило вечером, при более спокойной атмосфере.

Более сложной является оценка возможных систематических ошибок. Об отсутствии существенных систематических ошибок при автоколлимационной юстировке свидетельствует прежде всего четко выраженный дифракционный характер фокальных пятен на всех волнах вплоть до 4 мм и малый уровень поля рассеяния. Количественную оценку можно получить из сравнения автоколлимационных мест нулей с местами нулей, полученными при юстировках методами инженерной геодезии [13]. Возможность такой оценки основана на принципиальном различии радиофизического автоколлимационного и геодезического методов юстировки, так что наличие у них одинаковых систематических ошибок практически маловероятно.

В табл. 1 приведены среднеквадратичные разности мест нулей, полученных при автоколлимационной и геодезической юстировках Северного сектора в июне 1979 г. (АК8—Г). Приведенные величины формально дают верхний предел возможных систематических ошибок. Фактически ошибки, по-видимому, значительно меньше, так как автоколлимационная и геодезическая юстировки были разделены интервалом времени в несколько дней, так что в эти разности входят также и собственные деформации зеркала за время между юстировками. Это подтверждается тем, что разности мест нулей той же самой июльской автоколлимационной юстировки и ближайшей к ней автоколлимационной юстировки в ноябре 1979 г. (АК8—АК9), также приведенные в табл. 1, имеют близкую величину.

Показательными в этом отношении являются также результаты скользящего усреднения по группе в  $\Delta N$  щитов разностей радиальных мест нулей, полученных в этих парах юстировок (рис. 11). Обе кривые имеют одинаковый характер зависимости от  $\Delta N$ , заметно отличающийся от  $\Delta N^{-1/2}$ . Это указывает на наличие в разностях крупномасштабных деталей, которые не являются следствием накопления случайных ошибок и имеют статистически близкую пространственную структуру при разных методах юстировок.

Все это свидетельствует о том, что приведенные разности характеризуют не столько ошибки самих юстировок, сколько собственные деформации антенны за время между юстировками. Как будет видно из дальнейшего, такие деформации действительно существуют, причем их величины соизмеримы с разностями, приведенными в табл. 1.

Таким образом, вероятнее всего, систематические ошибки автоколлимационного метода юстировки существенно меньше величин, приведенных в табл. 1, и, по-видимому, не превышают случайных ошибок.

### Приведение результатов юстировок к общему центру

Положение центра исходной окружности и ее радиус при проведении каждой последующей юстировки могут не совпадать в точности с положением центра и радиусом исходной окружности предыдущей юстировки. Поэтому места нулей, полученные в результате разных юстировок, в общем случае будут соответствовать разным исходным окружностям.

Для того чтобы избежать неудобств, связанных с переходом после каждой юстировки к новой системе координат радиотелескопа, а также для сравнения результатов юстировок производится пересчет (приведение) мест нулей, полученных для новой исходной окружности, к старой исходной окружности.

ТАБЛИЦА 1

Среднеквадратичная ошибка	АК8 — Г	АК8 — АК9
$\sigma_r$	0.35 мм	0.48 мм
$\sigma_\beta$	63"	61"
$\sigma_\alpha$	55"	52"



Для вычисления разности мест нулей радиальных  $\Delta r_n$  и азимутальных  $\Delta \alpha_n$  шкал  $n$ -го щита при переходе от окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $O$  к окружности радиуса  $R'$  с центром в точке  $O'$  (рис. 12) используются следующие формулы [14]:

$$\Delta r_n = r'_n - r_n = \Delta R + y \sin \varphi_n - x \cos \varphi_n; \quad (4)$$

$$\Delta \alpha_n = \alpha'_n - \alpha_n = \frac{x}{R} \sin \varphi_n + \frac{y}{R} \cos \varphi_n, \quad (5)$$

где  $x, y$  — величины, характеризующие смещение центра новой исходной окружности относительно старой;  $\varphi_n$  — угловая координата середины  $n$ -го щита (для РАТАН-600  $\varphi_n = 0.4^\circ n$ );  $\Delta R = R' - R$  — изменение радиуса исходной окружности.

Формулы (4) и (5) являются приближенными. Они получены в предположении, что  $\Delta R/R \ll 1, x/R \ll 1, y/R \ll 1$ . Практически эти условия выполняются достаточно хорошо. Более того, в большинстве случаев при переходе к новой исходной окружности достаточно учитывать лишь

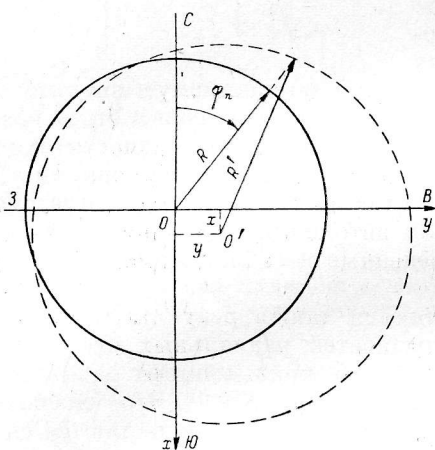


Рис. 12. Приведение результатов юстировок к общему центру.

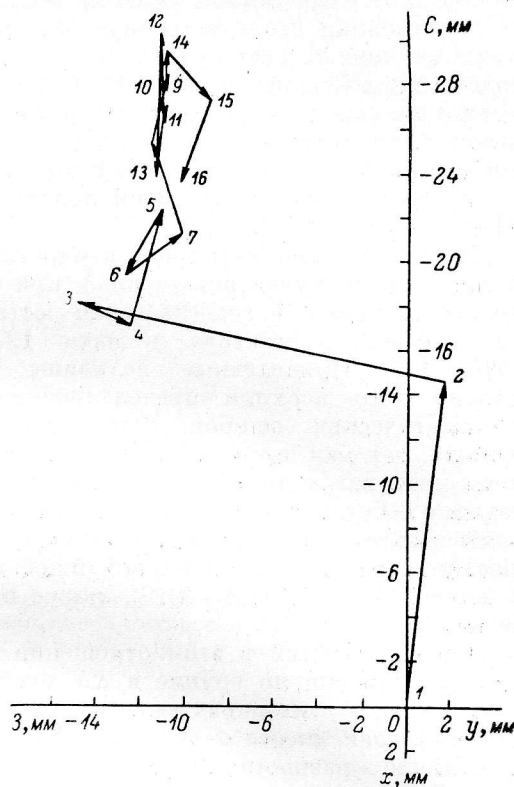


Рис. 13. Перемещение центра исходной окружности радиотелескопа РАТАН-600 по данным автоколлимационных юстировок.

Цифры — номера юстировок (табл. 2).

изменения радиальных мест нулей  $\Delta r_n$ , а поправки к азимутальным отсчетам  $\Delta \alpha_n$  оказываются пренебрежимо малыми.

Определение смещения центра исходной окружности  $(x, y)$  и изменение ее радиуса  $\Delta R$  производится на основании сравнения измеренных мест нулей радиальных шкал  $r'_n$  в системе  $O'$  и  $r_n$  в системе  $O$ . Аппроксимируя экспериментально полученные разности  $\Delta r_n$  выражением (4), методом наименьших квадратов находим величины  $x, y$  и  $\Delta R$ . Для этих вычислений удобно использовать результаты юстировок щитов, расположенных симметрично относительно оси:  $-N \leq n \leq N$ . В этом случае

$$x = \frac{2N \sum_{n=-N}^N \Delta r_n \cos \varphi_n - \sum_{n=-N}^N \Delta r_n \sum_{n=-N}^N \cos \varphi_n}{\left( \sum_{n=-N}^N \cos \varphi_n \right)^2 - 2N \sum_{n=-N}^N \cos^2 \varphi_n}; \quad (6)$$

$$y = \frac{\sum_{n=-N}^N \Delta r_n \sin \varphi_n}{\sum_{n=-N}^N \sin^2 \varphi_n}; \quad (7)$$

$$\Delta R = \frac{\sum_{n=-N}^N \cos \varphi_n \sum_{n=-N}^N \Delta r_n \cos \varphi_n}{\left( \sum_{n=-N}^N \cos \varphi_n \right)^2 - 2N \sum_{n=-N}^N \cos^2 \varphi_n}. \quad (8)$$

На рис. 13 показаны перемещения центра исходной окружности, построенные по результатам вычислений величин  $x$  и  $y$  при последовательном сравнении юстировок Северного сектора РАТАН-600 (табл. 2). При первых двух юстировках установка облучателя на центре антенны производилась довольно грубо по меткам на рельсах. Затем, с третьей по восьмую юстировки, облуча-

ТАБЛИЦА 2  
Автоколлимационные юстировки Северного сектора РАТАН-600

Номер юстировки	Дата	Номера юстируемых щитов	Номер юстировки	Дата	Номера юстируемых щитов
1	26.06—21.07.74	488—712	10	26.02—03.01.80	513—687
2	18—20.11.74	488—712	11	21—22.02.80	513—687
3	14—21.02.75	488—712	12	20—21.01.81	520—687
4	14—20.09.75	488—712	13	13—15.05.81	513—712
5	22—29.11.76	488—712		15—16.03.81	488—538
6	13—18.12.77	488—712	14	16—18.06.81	488—712
7	20—22.06.78	488—712	15	06—10.12.82	488—687
8	14—15.07.79	488—712	16	20—23.08.83	513—712
9	19—21.11.79	513—687			

тель устанавливался над центральным геодезическим репером радиотелескопа с помощью оптического визира. Это привело к заметному уменьшению смещения центра исходной окружности от юстировки к юстировке. В дальнейшем облучатель перед юстировкой устанавливался в центр автоколлимационного фокального пятна, получающегося при установке главного зеркала на исходную окружность по результатам предыдущей юстировки. Применение этой методики, как видно из рис. 13, еще более уменьшило смещение центра исходной окружности.

#### Сравнение результатов юстировок

**Общая характеристика юстировок.** Первые юстировки и наблюдения были выполнены на Северном секторе радиотелескопа в июле—августе 1974 г., когда была введена в строй первая очередь РАТАН-600. Затем по мере завершения строительства были отъюстированы Южный (октябрь 1975 г.), Восточный (август 1977 г.) и Западный (май 1980 г.) секторы. В процессе регулярной эксплуатации радиотелескопа по мере необходимости проводились юстировки для поддержания требуемой точности зеркала. Всего за 10 лет работы радиотелескопа (с 1974 по 1984 г.) было проведено 36 автоколлимационных юстировок. Из них на Северном секторе — 16, на Южном — 7, на Восточном — 6 и на Западном — 3. Кроме того, 3 юстировки было проведено для сопряжения Северного и Восточного секторов и одна — для Северного и Западного.

Сравнение мест нулей отсчетно-установочных устройств одного и того же участка зеркала, полученных при разнесенных во времени юстировках, позволяет судить об изменении формы зеркала за время между юстировками и надежности отсчетно-установочных устройств. Удобнее всего такие сравнения делать, используя результаты юстировок Северного сектора, так как вследствие более раннего ввода его в строй и наиболее интенсивного использования для наблюдений на нем было проведено наибольшее количество юстировок.

В табл. 2 приведен список юстировок Северного сектора. Общее количество щитов, образующих сектор, 225 (с № 488 по № 712). В некоторых случаях часть щитов по краям не юстировалась (юстировки № 9—13 и 15). При юстировках № 2 и 14 определялись только места нулей радиальных шкал, во всех остальных юстировках — радиальных, угломестных и азимутальных шкал. Юстировки проводились на волне 3 см, как на монохроматическом, так и на шумовом сиг-

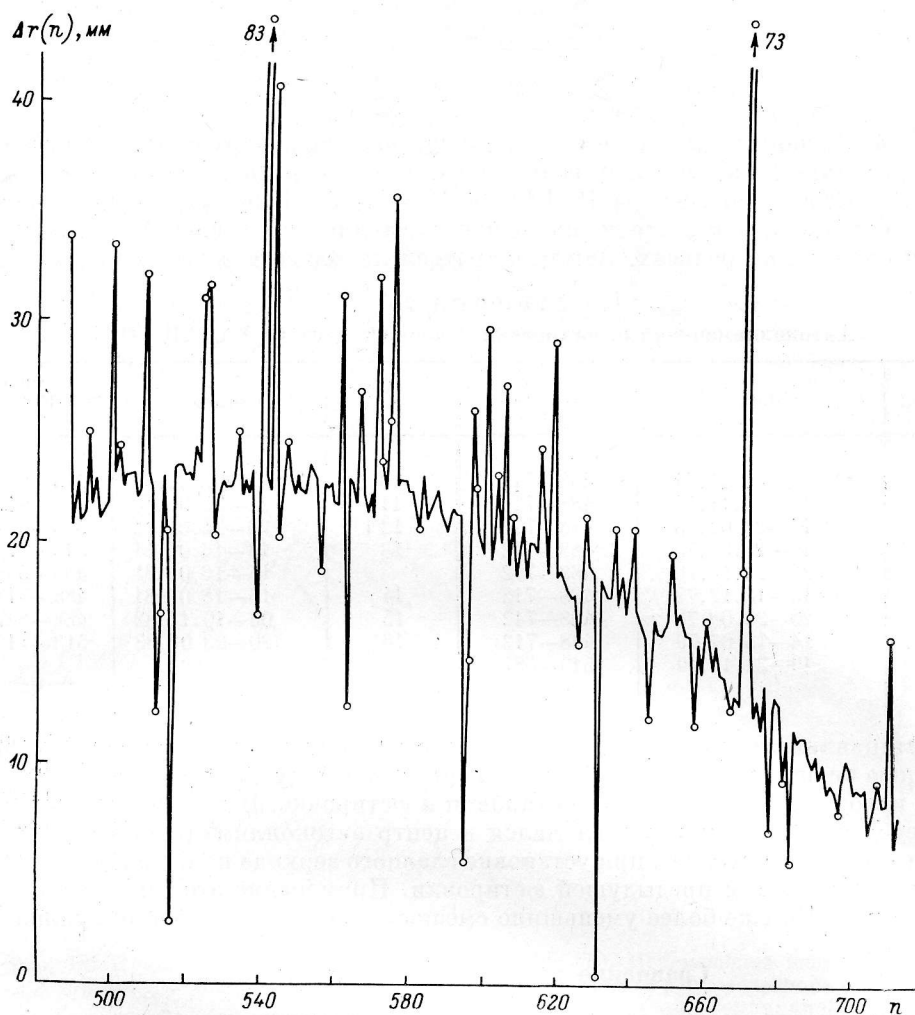


Рис. 14. Пример разностей мест нулей радиальных шкал. Сравнение юстировок № 7 и № 1. Кругом отмечены выбросы.

нале. Большинство юстировок выполнялось с облучателя № 1, часть (№ 13—15) — с облучателя № 2. Средняя продолжительность интервала времени между юстировками 7.3 мес. Юстировка № 13 проводилась в два этапа из-за ремонтных работ на главном зеркале.

**Методика сравнения результатов юстировок.** Практически при сравнении мест нулей, полученных в результате двух юстировок, вычисляются разности этих мест нулей в виде функции номера щита:  $\Delta r(n) = r_n - r'_n$  (рис. 14).<sup>\*</sup> Эту функцию удобно представить в виде суммы трех компонент:

$$\Delta r(n) = \Delta_1(n) + \Delta_2(n) + \Delta_3(n).$$

Компоненты имеют различную физическую природу:

<sup>\*</sup> Для определенности в этом разделе мы будем использовать обозначения мест нулей радиальных шкал. Сравнение угломестных и азимутальных мест нулей проводится аналогичным образом.

а) регулярная составляющая  $\Delta_1(n)$  обусловлена несовпадением центров и величин радиусов исходных окружностей при разных юстировках. Эта составляющая была рассмотрена выше;

б) случайная составляющая  $\Delta_2(n)$  обусловлена реальными изменениями формы отражающей поверхности за время между юстировками. Функция распределения этой составляющей должна быть близка к гауссовой;

в) случайная составляющая  $\Delta_3(n)$  в виде «выбросов». Она не связана с реальным изменением формы отражающей поверхности, а обусловлена «сдвигом» шкал в результате текущего ремонта отсчетно-установочных устройств и механизмов наведения щитов за время между юстировками. Эти выбросы могут быть очень большими и по своей природе должны иметь равномерное распределение вероятностей.

Для разделения этих трех компонент разностной функции использовалось различие функций распределения вероятностей  $\Delta_2(n)$  и  $\Delta_3(n)$  и то обстоятельство, что функция  $\Delta_1(n)$  является медленно меняющейся по сравнению с  $\Delta_2(n)$  и  $\Delta_3(n)$ .

Практически процедура разделения компонент состоит из трех этапов.

#### 1. Предварительное устранение выбросов.

Вся функция  $\Delta r(n)$  разбивается на участки длиной  $\Delta N$ . Величина  $\Delta N$  выбирается достаточно большой, чтобы в пределах каждого участка имелись значения  $\Delta r(n)$  (не менее двух), не содержащие выбросов, но и достаточно малой, чтобы изменения регулярной составляющей  $\Delta_1(n)$  в пределах участка не превышали существенно флуктуаций  $\Delta_2(n)$ .

В пределах каждого участка выбросы определяются и устраняются следующим образом. Находятся наибольшее ( $\Delta r_{\max 1}$ ) и наименьшее ( $\Delta r_{\min 1}$ ) значения функции  $\Delta r(n)$  и их разность  $\delta_{11} = \Delta r_{\max 1} - \Delta r_{\min 1}$ . Если  $\delta_{11} < \delta_0$ , где  $\delta_0$  — наперед заданная величина, то выбросов нет. Если  $\delta_{11} \geq \delta_0$ , то либо  $\Delta r_{\max 1}$ , либо  $\Delta r_{\min 1}$ , либо оба эти значения — выбросы. Рассматривается массив без  $\Delta r_{\max 1}$ . Находится максимальное значение  $\Delta r_{\max 2}$  и разность  $\delta_{21} = \Delta r_{\max 2} - \Delta r_{\min 1}$ . Затем рассматривается массив без  $\Delta r_{\min 1}$ . Находится наименьшее значение  $\Delta r_{\min 2}$  и разность  $\delta_{12} = \Delta r_{\max 1} - \Delta r_{\min 2}$ . Сравниваются  $\delta_{21}$  и  $\delta_{12}$ . Если  $\delta_{21} > \delta_{12}$ , то  $\Delta r_{\max 1}$  — выброс, если  $\delta_{21} < \delta_{12}$ , то  $\Delta r_{\min 1}$  — выброс. При  $\delta_{21} = \delta_{12}$  и  $\Delta r_{\max 1}$  и  $\Delta r_{\min 1}$  — выбросы. Найденный таким образом выброс отбрасывается, а оставшийся массив исследуется по этой же схеме дальше, пока не будут устранены все выбросы.

В дальнейшем каждому значению  $\Delta r(n)$ , содержащему выброс, приписывается среднее значение, вычисленное на интервале длиной  $\Delta N$ , в середине которого находится выброс.

Опыт показал, что, например, при юстировках по радиусу скорость изменения регулярной составляющей  $\Delta_1(n)$  обычно не превышает 0.1 мм/щит. Величины  $\delta_0$  и  $\Delta N$  могут выбираться в пределах  $1.5 \text{ мм} \leq \delta_0 \leq 3.5 \text{ мм}$ ,  $5 \leq \Delta N \leq 10$ . Практически вычисления проводились при  $\delta_0 = 2.5 \text{ мм}$ ,  $\Delta N = 9$ . Для контроля использовались и другие значения  $\delta_0$  и  $\Delta N$ , лежащие в указанных пределах. Результаты вычислений при этом не изменялись.

#### 2. Выделение регулярной составляющей.

Полученный после предварительного устранения выбросов массив разностей мест нулей используется для вычисления смещения центра и изменения радиуса исходной окружности по формулам (6)–(8). По найденным значениям  $x$ ,  $y$  и  $\Delta R$  строится регулярная составляющая

$$\Delta_1(n) = \Delta R + y \sin(\Delta \varphi n) - x \cos(\Delta \varphi n),$$

где  $\Delta \varphi$  — угловой размер щита. При юстировках из центра радиотелескопа  $\Delta \varphi = 0.4^\circ$ .

#### 3. Окончательное устранение выбросов.

Из исходной функции  $\Delta r(n)$ , содержащей выбросы, вычитается регулярная составляющая  $\Delta_1(n)$ . Для оставшегося массива  $\Delta_\Sigma(n) = \Delta_2(n) + \Delta_3(n)$  строится гистограмма плотности распределения величин (рис. 15).

Учитывая, что распределение величин выбросов близко к равномерному в широком диапазоне значений, маловероятно, что величины  $\Delta_3(n)$  будут иметь

много повторяющихся значений. Действительно, опыт показал, что во всем массиве  $\Delta_{\Sigma}(n)$  каждое значение  $\Delta_3(n)$  встречается обычно один, редко два раза. С другой стороны, при нормальном распределении случайной компоненты  $\Delta_2(n)$  с дисперсией  $\sigma^2$  при общем количестве щитов 225 вероятность отклонений, выходящих за пределы  $\pm 3\sigma$ , будет встречаться в среднем меньше, чем у одного щита.

В соответствии с этим полученная гистограмма плотности распределения обрезается снизу на два щита. По оставшимся значениям вычисляются оценочные величины среднего значения  $\bar{\Delta}_2$  и среднеквадратичного отклонения  $\sigma_2$ . Величины массива  $\Delta_{\Sigma}(n)$ , попадающие в интервал  $(\bar{\Delta}_2 - 3\sigma_2, \bar{\Delta}_2 + 3\sigma_2)$ , считаются относящимися к случайной компоненте  $\Delta_2(n)$ , и для них вычисляется окончательная среднеквадратичная величина  $\sigma_r$ . Величины, лежащие вне этого интервала, относятся к выбросам  $\Delta_3(n)$ , и подсчитывается их относительное количество  $N_r$ .

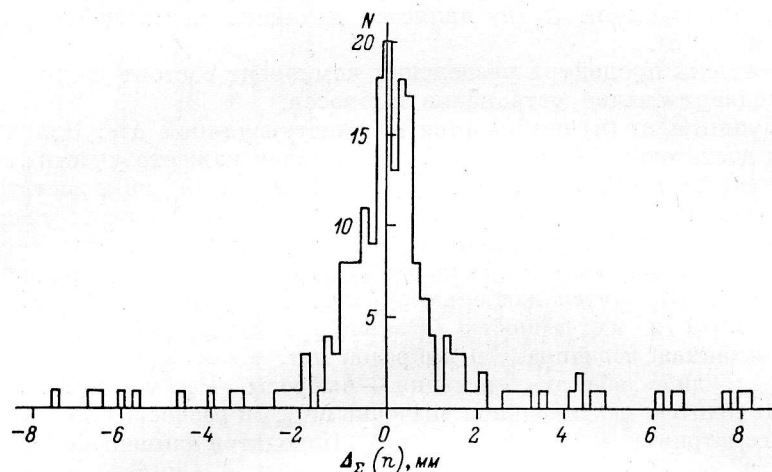


Рис. 15. Пример распределения величин разностей мест нулей радиальных шкал. Сравнение юстировок № 8 и № 1.  $N$  — количество отсчетов. Значения  $|\Delta_{\Sigma}(n)| > 8$  мм не показаны.

Аналогичным образом производится сравнение разностей мест нулей угломестных и азимутальных шкал. Некоторое различие состоит лишь в том, что в случае угловых шкал регулярная составляющая практически является постоянной величиной, и процедура, аналогичная вычислению смещения центра исходной окружности, отсутствует.

Описанная процедура разделения компонент была реализована в виде программы для ЭВМ. По этой программе было проведено сравнение всех юстировок Северного сектора. Производились сравнения каждой юстировки с предыдущей и каждой из первых 14 юстировок с первой. Сравнение последующих юстировок с первой было прекращено, так как к моменту 14-й юстировки (июль 1981 г.) в результате ремонтных работ была нарушена первоначальная юстировка по радиусу и углу места более чем у 30 % щитов, а по азимуту — более чем у 50 %.

В результате для каждой двух сравниваемых юстировок были определены следующие величины:

- количество выбросов для каждой координаты  $N_r, N_{\beta}, N_{\alpha}$ ;
- среднеквадратичная величина Гауссовой составляющей для каждой координаты  $\sigma_r, \sigma_{\beta}, \sigma_{\alpha}$ ;
- смещение центра исходной окружности  $x, y$  для радиальной координаты;
- постоянные составляющие разности для угломестных и азимутальных координат  $\Delta\beta, \Delta\alpha$ .

Кроме того, для Гауссовой составляющей разности вычислялись спектр и структурная функция.

Напомним, что индекс  $r$  относится к радиальной координате,  $\beta$  — к угломестной,  $\alpha$  — к азимутальной.



**Нарушение юстировки при ремонте (выбросы).** Ниже приводятся результаты подсчетов количества грубых нарушений юстировки (выбросов) из-за ремонта отсчетно-установочных устройств. На рис. 16 показано количество выбросов по отношению к числу юстируемых щитов для каждой из трех координат при сравнении двух следующих друг за другом юстировок (нижний график) и общее количество выбросов за время между первой юстировкой и каждой последующей (верхний график).

Среднее количество выбросов за время между двумя соседними юстировками приведено в табл. 3. Там же даны средние скорости увеличения общего количества выбросов за рассматриваемый период, полученные в результате линейной аппроксимации методом наименьших квадратов экспериментальных данных (штриховые линии на рис. 16).

ТАБЛИЦА 3  
Среднее количество выбросов

Координата	Среднее количество выбросов, %	Средняя скорость увеличения, % в год
Радиус	8.4	4.1
Угол места	5.9	3.4
Азимут	13	5.6
Всего . . .	27.3	4.4

ТАБЛИЦА 4  
Качество отсчетно-установочных устройств, %

Координата	Высокое качество	Высокое качество ремонта	Низкое качество
Радиус	42	29	29
Угол места	67	23	10
Азимут	44	21	35
В среднем	51	24	25

Так как нормальная работа щита невозможна при нарушении юстировки по любой из координат, а выбросы по двум и трем координатам одновременно на одном и том же щите редки, то общее количество щитов, вышедших из строя, можно охарактеризовать суммой выбросов, а скорость увеличения количества вышедших из строя щитов — средним значением скорости увеличения количества выбросов по разным координатам. Эти величины приведены в нижней строке табл. 3.

То обстоятельство, что количество выбросов при сравнении каждой юстировки с первой существенно меньше суммы выбросов между всеми предшествующими юстировками, указывает на наличие значительного количества повторных нарушений работы отсчетно-установочных устройств на одних и тех же щитах. Это подтверждается непосредственным подсчетом количества выбросов  $M$  по каждой координате, приходящихся на каждый щит за время между 1-й и 14-й юстировками. Результаты подсчетов в виде распределения количества щитов с разным числом выбросов приведены на рис. 17. Полученные распределения хорошо аппроксимируются экспоненциальными функциями (штриховые кривые на рис. 17):

$$p_r = 0.42 \exp(-0.5M); \quad p_\beta = 0.67 \exp(-M); \quad p_\alpha = 0.44 \exp(-0.6M).$$

Если условно считать, что те отсчетно-установочные устройства, которые не ремонтировались, имеют высокое качество, те, которые ремонтировались один раз, имеют высокое качество ремонта, а остальные — низкое качество, то получим следующие оценки качества отсчетно-установочных устройств, приведенные в табл. 4.

Таким образом, высокое качество имеет около половины отсчетно-установочных устройств, и примерно в половине случаев был выполнен высококачественный ремонт. Более высококачественными оказались угломестные отсчетно-установочные устройства.

**Долговременная стабильность фокусирующей системы.** После устранения выбросов и приведения мест нулей к единой исходной окружности сравнение результатов юстировок позволяет получить величины деформаций фокусирующей системы за время между юстировками. На рис. 18 показаны среднеквадратичные

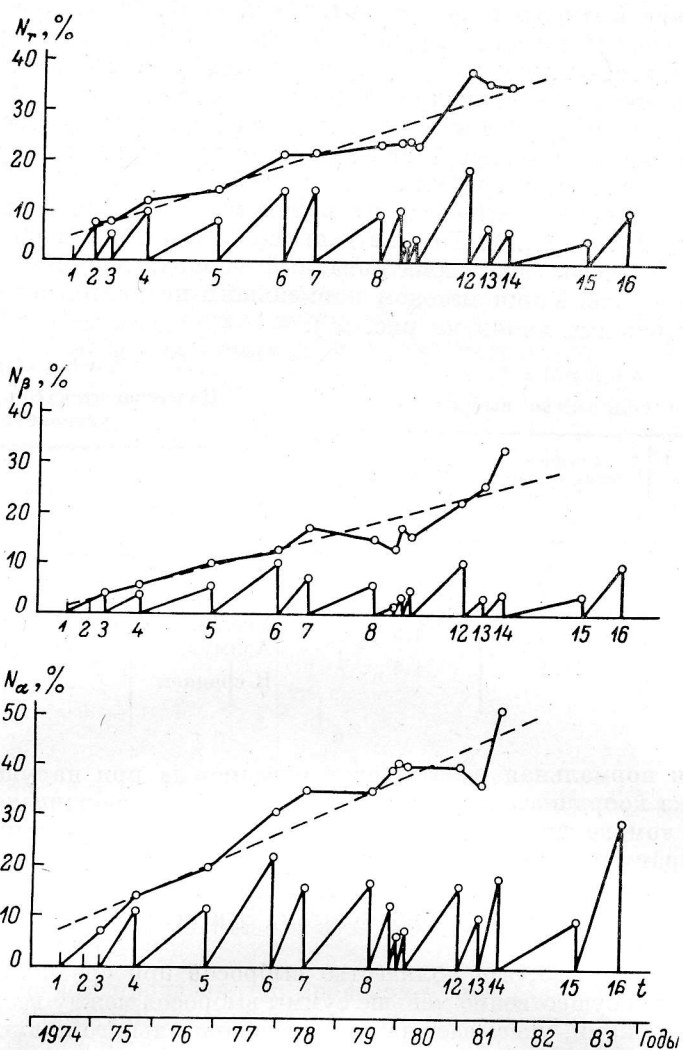


Рис. 16. Относительное количество выбросов при сравнении каждой юстировки с предыдущей (нижние кривые) и каждой юстировки с первой (верхние кривые).

Цифры — номера юстировок.  $N_r$  — радиальные шкалы,  $N_\beta$  — угловые,  $N_\alpha$  — азимутальные.

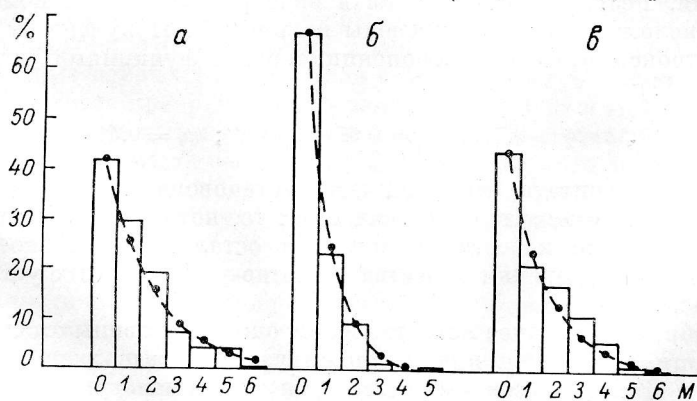


Рис. 17. Распределение количества выбросов, приходящихся на один щит, за время между 1-й и 14-й юстировками.

Координата: а — радиус, б — угол места, в — азимут.

точные значения разностей мест нулей по всем трем координатам при последовательном сравнении каждых двух следующих друг за другом юстировок (нижние кривые), а также каждой юстировки с первой (верхние кривые).

Средние величины среднеквадратичных разностей мест нулей между соседними юстировками приведены в табл. 5. Там же даны скорости увеличения среднеквадратичных разностей, полученные на основе линейной аппроксимации методом наименьших квадратов результатов сравнения каждой юстировки с первой (штриховые линии на рис. 18).

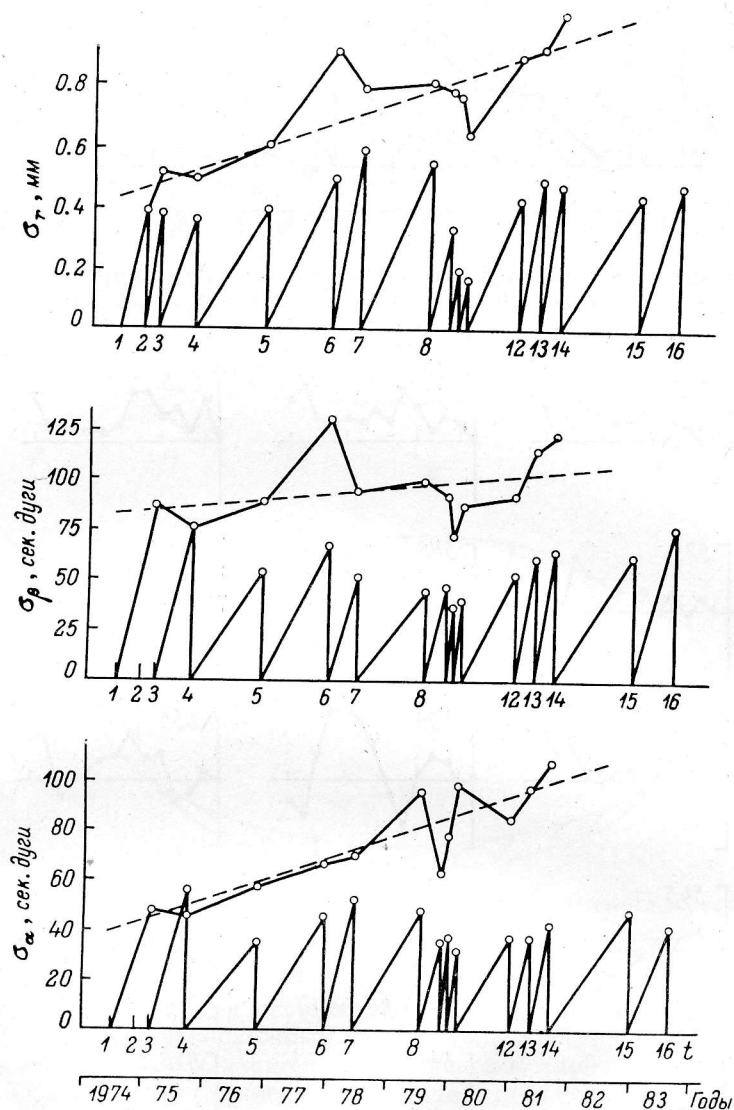


Рис. 18. Среднеквадратичные значения разностей мест нулей при сравнении каждой юстировки с предыдущей (нижние кривые) и каждой юстировки с первой (верхние кривые).

$\sigma_r$  — радиальные шкалы,  $\sigma_\beta$  — угломестные,  $\sigma_\alpha$  — азимутальные.

Нарастание среднеквадратичной разности мест нулей при сравнении каждой юстировки с первой характеризует увеличение ошибок фокусирующей системы радиотелескопа, которое происходило бы, если бы не было периодически повторяющихся юстировок. Видно, что возможность проведения корректирующих юстировок в процессе эксплуатации радиотелескопа позволила не допустить «старения» фокусирующей системы, которое при отсутствии юстировок привело бы через 10 лет работы радиотелескопа к случайным ошибкам привязки шифтов, примерно в 2—3 раза превышающим существующие.

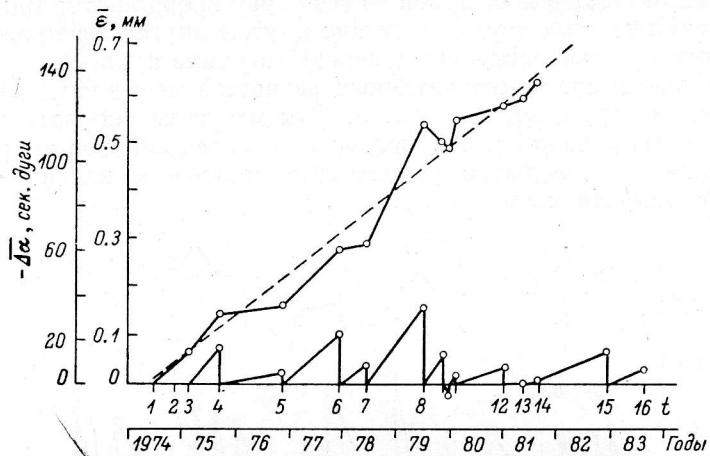


Рис. 19. Постоянная составляющая разности азимутальных мест нулей при сравнении каждой юстировки с предыдущей (нижняя кривая) и каждой юстировки с первой (верхняя кривая).

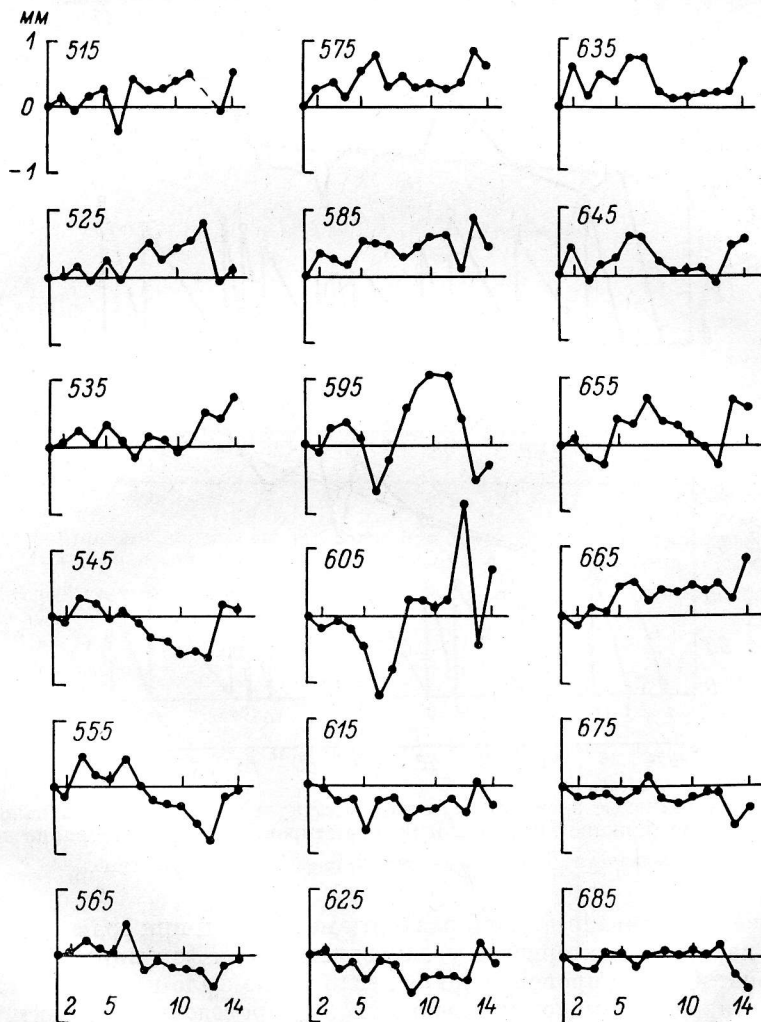


Рис. 20. Радиальные перемещения щитов за время между юстировками. Цифры на оси абсцисс — номера юстировок, Цифры около кривых — номера щитов.

При сравнении мест нулей азимутальных шкал кроме случайной компоненты обнаружена значительная постоянная составляющая разности  $\Delta\alpha$ . Величина  $\Delta\sigma$  при сравнении соседних юстировок имеет, как правило, один и тот же знак, а при сравнении каждой юстировки с первой увеличивается со временем почти

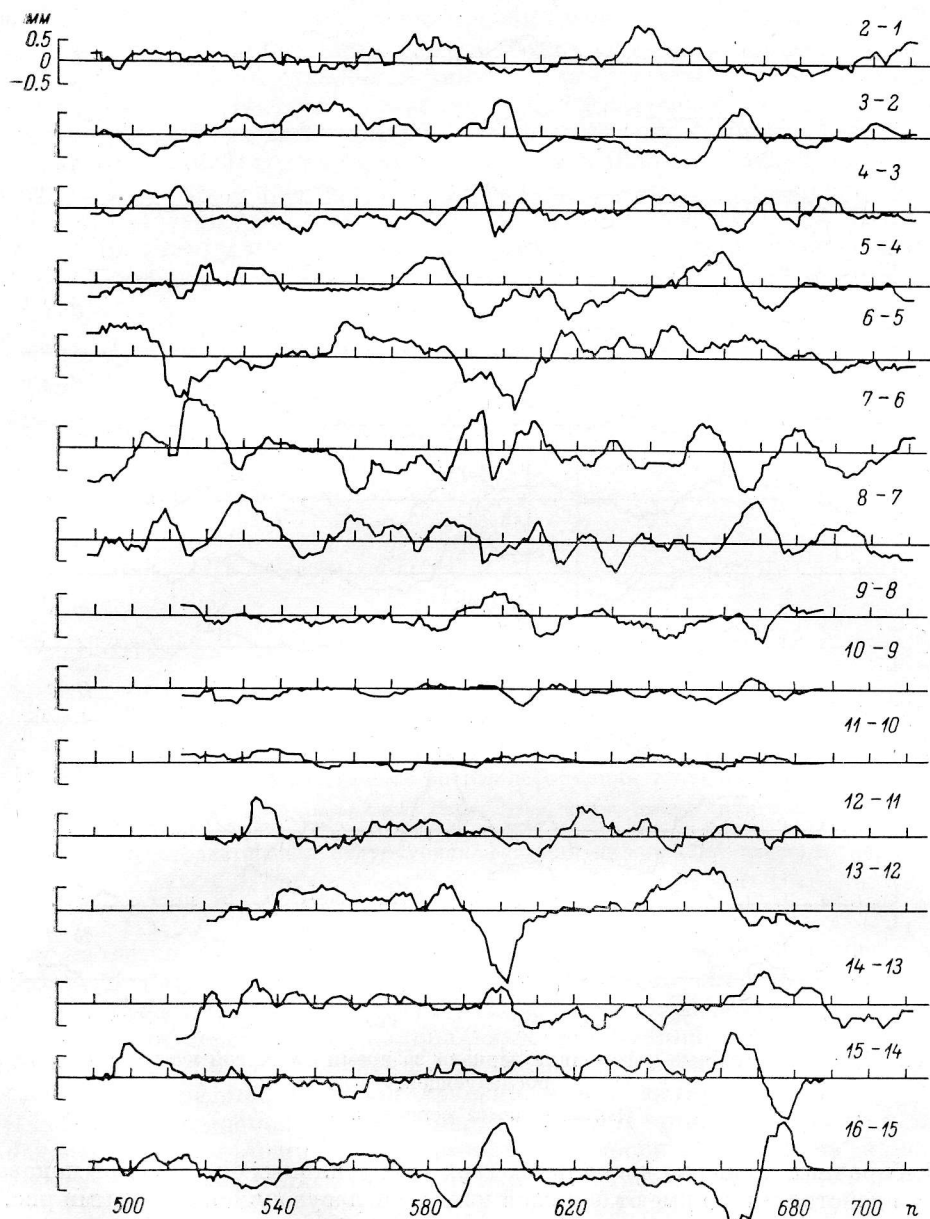


Рис. 21. Крупномасштабные деформации зеркала за время между соседними юстировками. Цифры — номера юстировок.

линейно (рис. 19), причем накопленная разность близка к сумме разностей между соседними юстировками. Среднее значение  $\Delta\alpha$  между соседними юстировками  $10.8''$ , а средняя скорость нарастания накопленной разности  $18.7''/\text{год}$  (штриховая линия на рис. 19). Эти цифры существенно больше величин, которые могли бы возникнуть вследствие смещения центра исходной окружности в соответствии с (5). Можно предположить, что компонента  $\Delta\alpha$  связана с износом пары ходовой винт—гайка в механизме поворота щита по азимуту. Величина износа  $\varepsilon$ , соответствующая наблюдаемому эффекту, показана на рис. 19.



Аналогичного регулярного изменения мест нулей радиальных и угломестных шкал не наблюдалось. Возможно, это связано с различием нагрузок на пары ходовой винт—гайка вследствие разных конструкций механизмов выбора люфтов.

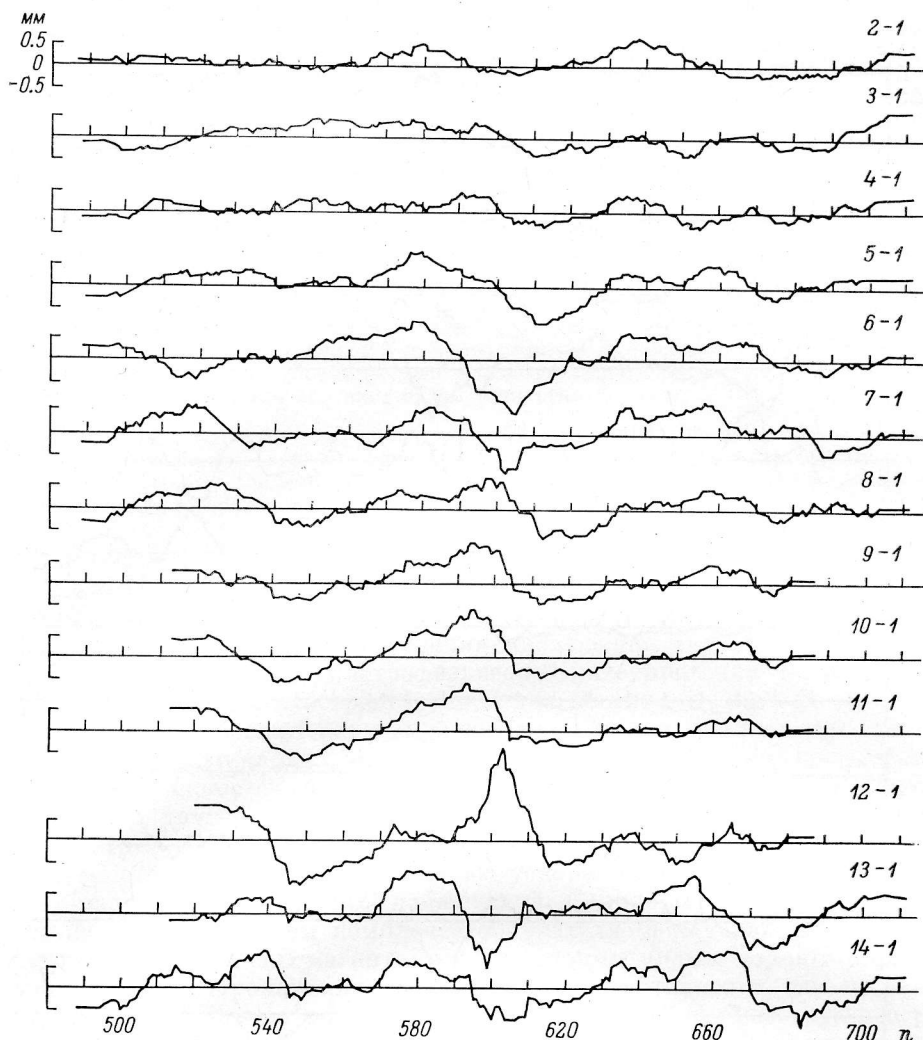


Рис. 22. Крупномасштабные деформации зеркала за время от первой юстировки до каждой последующей.

Цифры — номера юстировок.

Выборочная проверка нескольких гаек азимутальных механизмов показала, что они действительно имеют большой износ, согласующийся с данными рис. 19.

ТАБЛИЦА 5  
Сравнение результатов юстировок

Координата	Среднеквадратичная разность между соседними юстировками	Скорость увеличения среднеквадратичной разности
Радиус	0.42 мм	0.085 мм/год
Угол места	57"	6.6"/год
Азимут	43"	10"/год

Рассмотрим подробнее изменения мест нулей радиальных шкал. Они хорошо передают характер деформаций отражающей поверхности, так как непосредственно связаны со смещением элементов главного зеркала по нормали к отражающей поверхности.

Прежде всего необходимо отметить, что среднеквадратичные разности мест нулей следующих друг за другом юстировок имеют примерно одинаковые величины независимо от длительности промежутка времени между юстировками. Показательными в этом отношении являются результаты сравнения юстировок по радиусу, следующих друг за другом через 5 дней (в ноябре 1974 г. на Северном секторе и в октябре 1975 г. — на Южном). Среднеквадратичные разности мест нулей были 0.27 и 0.32 мм соответственно, т. е. того же порядка, что и при интервалах между юстировками в несколько месяцев.

Из сопоставления многолетней «накопленной» деформации с «парциальными» деформациями между соседними юстировками совершенно очевидно, что

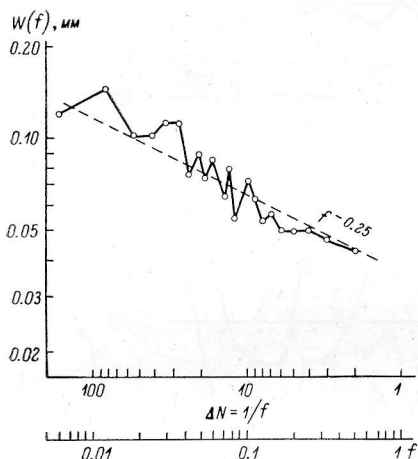


Рис. 23. Пространственный спектр деформаций главного зеркала.

$\Delta N$  — масштаб, измеряемый количеством щитов, размер щита 2 м.

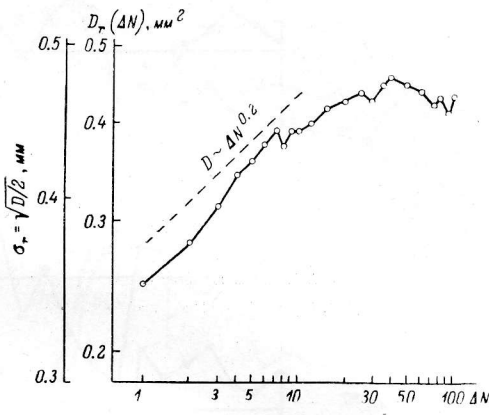


Рис. 24. Пространственная структурная функция деформаций главного зеркала.

$\Delta N$  — масштаб, измеряемый количеством щитов, размер щита 2 м.

она не является их суммой. Таким образом, не наблюдается существенного монотонного нарастания деформаций фокусирующей системы со временем.

Нельзя представить накопленную деформацию и как результат статистического сложения независимых парциальных деформаций, так как увеличение накопленной ошибки со временем  $t$  существенно меньше, чем  $(t/\Delta t)^{1/2}$ , где  $\Delta t = 7.3$  мес — средний интервал времени между юстировками.

Наиболее приемлемой моделью является комбинация случайных и квазипериодических деформаций. Действительно, выборочный анализ изменений мест нулей радиальных шкал от юстировки к юстировке показал, что движения щитов носят возвратно-поступательный характер (рис. 20).

Для того чтобы наглядно представить характер пространственных деформаций, были построены сглаженные (прямоугольным окном по 15 щитов) разности радиальных мест нулей соседних юстировок (рис. 21) и каждой юстировки с первой (рис. 22). Видно, что выделенные таким образом крупномасштабные деформации во многих случаях сильно коррелируют от юстировки к юстировке. Особенно заметно это, например, при сравнении разностей 3—2 и 4—3, 7—6 и 8—7.

Представление о пространственных характеристиках деформаций дают их пространственный спектр  $W(f)$  (рис. 23), где  $1/f = \Delta N$  — пространственный период, измеряемый количеством щитов, и структурная функция  $D(\Delta N)$  (рис. 24). Хотя амплитуда пространственных гармоник с частотой убывает, общая величина деформаций (ее среднеквадратичное значение), как это видно

из рис. 24, определяется главным образом суммарным вкладом мелкомасштабных компонент. Нарастающий характер структурной функции подтверждает сделанный ранее вывод, что крупномасштабные пространственные флуктуации с характерным масштабом до 50 щитов не являются результатом сложения случайных независимых смещений отдельных щитов.

### Быстрые деформации фокусирующей системы

Для выявления и исследования быстрых деформаций фокусирующей системы радиотелескопа было проведено несколько специальных юстировок по радиусу с интервалами между юстировками около 2 ч. Чтобы ускорить измерения,

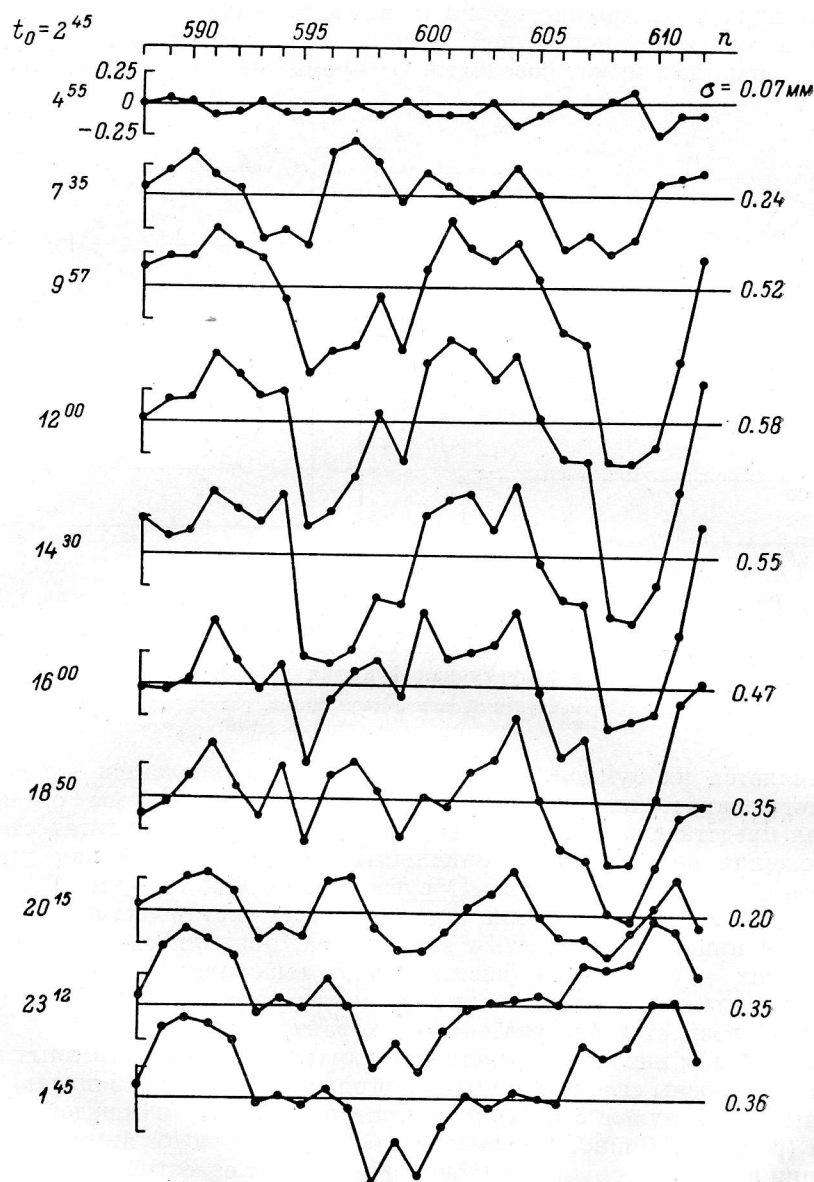


Рис. 25. Изменение профиля зеркала в течение суток 17—18 марта 1978 г. после юстировки. Юстировалась небольшая часть главного зеркала — 25 щитов (с № 588 по № 612). Каждая юстировка занимала 20—30 мин. Ниже приводятся типичные результаты, полученные в одной из серий таких юстировок.

На рис. 25 показаны изменения профиля зеркала. Видны волны с характерным масштабом в несколько щитов. Движения каждого щита показаны на

рис. 26, а на рис. 27 приведен график изменения среднеквадратичной величины отклонения щитов от исходного положения  $\sigma_r$ .

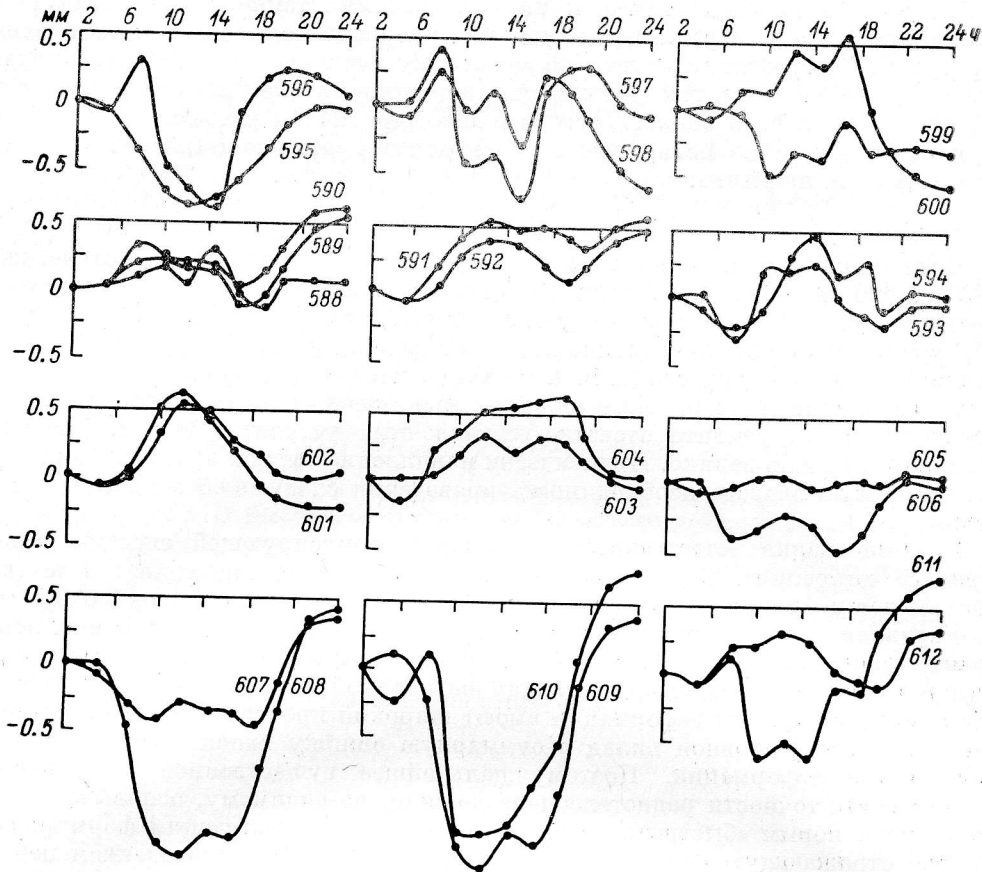


Рис. 26. Радиальные перемещения щитов в течение суток 17—18 марта 1978 г. после юстировки.

Цифры около кривых — номера щитов.

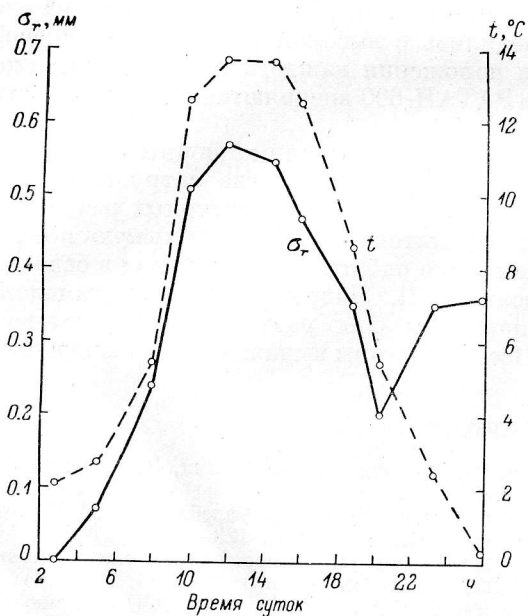


Рис. 27. Изменение среднеквадратичной величины деформаций зеркала  $\sigma_r$  в течение суток 17—18 марта 1978 г. после юстировки.

$t$  — температура воздуха.

Видно, что быстрые деформации, так же как и медленные, в значительной степени являются квазипериодическими с периодом, близким к суткам. Однако полного восстановления исходной формы поверхности через сутки не происхо-

дит. Среднеквадратичная величина остаточных деформаций 0.35 мм совпадает с обычно наблюдаемой разностью между двумя юстировками.

На рис. 27 нанесена также кривая изменения температуры воздуха  $t$ . Наблюдается явная корреляция между квазипериодической компонентой и температурой. Из графика следует, что юстировку лучше всего проводить в вечерние или утренние часы, так чтобы ночные и дневные экстремумы соответствовали деформациям разного знака. Тогда среднеквадратичная величина деформаций зеркала относительно юстировочного положения будет около 0.3 мм. Это и наблюдается на практике.

### Заключение

Более чем десятилетний опыт проведения юстировок радиотелескопа РАТАН-600 показал, что автоколлимационные юстировки вполне обеспечивают проведение наблюдений во всем сантиметровом диапазоне волн. В настоящее время роль автоколлимационных юстировок, которые проводятся регулярно 1—2 раза в год, сводится к решению следующих задач:

1) выявление и устранение ошибок, возникающих вследствие нарушения юстировки из-за ремонта отсчетно-установочных устройств щитов. Значение этих ошибок очень велико. Практически накопление именно этих ошибок вызывает в первую очередь необходимость проведения следующей очередной юстировки;

2) компенсация естественных деформаций фокусирующей системы вследствие ее «старения». Осуществление такой компенсации позволяет в течение многих лет сохранять взаимную привязку щитов с точностью около 0.3 мм.

Реальная точность отражающей поверхности радиотелескопа в настоящее время ограничивается не точностью измерений при юстировке, а собственными деформациями зеркала за время между юстировкой и наблюдениями и даже за время юстировки. Эти деформации имеют широкий пространственно-временной спектр, однако основной вклад в суммарную ошибку вносят быстрые мелко-масштабные деформации. Поэтому дальнейшее существенное продвижение в повышении точности радиотелескопа должно, по-видимому, основываться на переходе к новым «быстрым» методам юстировки, позволяющим формировать точную отражающую поверхность непосредственно перед проведением наблюдения. При наблюдениях на очень коротких (миллиметровых) волнах весь цикл юстировка—наблюдение должен занимать меньше 1 ч. При этом важно, чтобы юстировочные измерения проводились с высокой разрешающей способностью, достаточной для определения положения каждого щита. В настоящее время с этой целью на радиотелескопе РАТАН-600 внедряются радиоголографические методы измерений [15, 16].

В изготовлении аппаратуры и проведении автоколлимационных измерений на радиотелескопе РАТАН-600 принимали участие многие сотрудники САО АН СССР. Постоянным участником всех измерений и аппаратурных разработок был А. Д. Дибижев. В обработке результатов измерений большую помощь оказывала Н. П. Первакова. На первом этапе работы большой вклад в освоение автоколлимационных юстировок внесли А. П. Лавров и Т. А. Магамадова. Ряд узлов автоколлимационной аппаратуры был разработан и изготовлен В. И. Синянским и А. Ф. Ждановым. Всем им авторы выражают свою искреннюю благодарность.

### Литература

1. Новый радиотелескоп Академии наук РАТАН-600 / А. Б. Берлин, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. // ПТЭ. 1977. № 5. С. 8—16.
2. Юстировка антенны переменного профиля / Г. Б. Гельфрейх, Ю. К. Зверев, А. А. Стоцкий, О. Н. Шиврис // Изв. ГАО. 1972. № 188. С. 123—128.
3. Стоцкий А. А., Ходжамухаммедов Н. Способ юстировки антенны переменного профиля: Авт. свид. № 315231 // Бюл. изобр. и откр. 1971. № 28.
4. Ходжамухаммедов Н., Стоцкий А. А., Боровик В. Н. Автоколлимационный метод юстировки и контроля антенны переменного профиля // Радиотехника и электроника. 1970. XV, № 2. С. 257—262.
5. Стоцкий А. А., Ходжамухаммедов Н. Экспериментальное исследование автоколлимационного метода юстировки антенны переменного профиля // Изв. ГАО. 1972. № 188. С. 129—138.



6. Геодезическая юстировка плоского отражателя РАТАН-600 / В. М. Беляков, А. П. Глумов, С. Я. Голосова, Ю. К. Зверев // XIV Всесоюзная радиоастрономическая конференция, октябрь 1982 г.: Тез. докл. Ереван, 1982. С. 250—251.
7. Пинчук Г. А., Стоцкий А. А. Автоколлимационный метод установки электрической оси радиотелескопа РАТАН-600 для измерения прямых восхождений радиосточников // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1978. 10. С. 132—138.
8. Экспериментальные определения прямых восхождений Меркурия на РАТАН-600 / П. М. Афанасьев, В. А. Фомин, Ю. К. Зверев и др. // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1979. 11. С. 226—235.
9. Повышение точности отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 / В. М. Беляков, А. П. Глумов, С. Я. Голосова и др. // XIV Всесоюзная радиоастрономическая конференция, октябрь 1982 г.: Тез. докл. Ереван, 1982. С. 206—207.
10. Исследование точности отражающей поверхности главного зеркала РАТАН-600 (Северный сектор) / С. Я. Голосова, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1982. 15. С. 132—150.
11. Суточные и сезонные вариации флуктуаций разности фаз радиоволн, распространяющихся в приземном слое атмосферы / М. Гошджанов, А. К. Полтев, А. А. Стоцкий, Н. Д. Умарбаева // Изв. АН ТуркмССР. Сер. физ.-техн., хим. и геол. наук. Ашхабад, 1969. № 3. С. 21—24.
12. Стоцкий А. А., Лавров А. П., Магамадова Т. А. Влияние турбулентности атмосферы в пространстве между главным зеркалом и облучателем на работу радиотелескопа РАТАН-600 // VIII Всесоюзная конференция по радиоастрономии: Тез. докл. Пушино, 1975. С. 28—29.
13. Зверев Ю. К., Коркин Э. И. Геодезические методы юстировки радиотелескопа РАТАН-600 // VIII Всесоюзная конференция по радиоастрономии: Тез. докл. Пушино, 1975. С. 31—32.
14. Стоцкий А. А., Шиврис О. Н. Юстировка и установка антенны переменного профиля с помощью фазового компаратора // Изв. ГАО. 1970. № 185. С. 236—241.
15. Пинчук Г. А., Стоцкий А. А. Применение радиоголографии для исследования радиотелескопа РАТАН-600 // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1982. 16. С. 135—145.
16. Система автоматической обработки радиоголографических измерений на радиотелескопе РАТАН-600 / А. Ф. Жданов, Г. А. Пинчук, А. А. Стоцкий, В. Б. Хайкин // XVII Всесоюзная радиоастрономическая конференция: Тез. докл. Ереван, 1985. С. 29—30.

Поступила в редакцию  
21 февраля 1986 г.