

ИССЛЕДОВАНИЕ И ЮСТИРОВКА БОЛЬШОГО ПУЛКОВСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Г. Б. Гельфрейх, О. А. Голубчина

Рассматриваются вопросы, связанные с практическим применением радиоастрономического способа юстировки для исследования и повышения точности поверхности главного отражателя Большого пулковского радиотелескопа (БПР). Определены возможные и необходимые интервалы времени для юстировки, приведены алгоритмы расчета юстировочных программ, описана методика проведения юстировки. Практическое применение этого способа юстировки позволило существенно улучшить качество радиоастрономических наблюдений на БПР на волне 2 см.

Some problems concerning the practical application of the radio-astronomical technique of adjustment of the reflecting surface of the Large Pulkovo Radio Telescope for the purpose of investigation and increasing the accuracy of its main reflector are considered. The possible and necessary time intervals for adjustment procedure are determined, algorithms for calculation of adjustment programs are presented, the practical ways of adjustment are described. The application of this adjustment technique has made it possible to improve significantly the quality of radio-astronomical observations with the Large Pulkovo Radio Telescope at 2-cm wavelength.

В настоящее время для юстировки поверхности Большого пулковского радиотелескопа (БПР) используются три способа: геодезический, автоколлимационный и радиоастрономический, сравнение которых проведено в [1]. Принципы радиоастрономического способа юстировки описаны в [2]. Преимущества этого способа таковы: с его помощью может быть достигнута наибольшая реальная точность; он позволяет проводить юстировку без дополнительных специальных приспособлений, не прерывая текущих радиоастрономических наблюдений (кроме солнечных) в период юстировки.

В настоящей статье приводятся результаты работ, выполненных в 1967—1970 гг., по усовершенствованию метода радиоастрономической юстировки и его применению к исследованию и повышению точности поверхности главного отражателя БПР. При этом ставились следующие задачи: 1) разработать такой вариант радиоастрономической юстировки, который может использоваться как стандартный способ юстировки БПР; 2) исследовать реальные точности положений щитов отражателя БПР по всем координатам при установке их по шкалам; 3) добиться уменьшения минимальной рабочей волны БПР в режиме установки щитов по шкалам, доведя ее по возможности до $\lambda=0.8$ мм; 4) накопить опыт для дальнейшей разработки этого метода юстировки применительно к другим антеннам (в первую очередь к РАТАН-600).

К настоящему времени удалось в основном решить первую задачу — разработать стандартный способ радиоастрономической юстировки для БПР. Его применение позволило увеличить собирающую площадь и сни-

зять уровень широких боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Особенно эффективным оказалось применение описанного ниже способа юстировки для юстировки на больших углах места, при которых он позволяет исключить влияние ошибок нивелировки щитов, плохо поддающихся учету в других способах юстировки.

Что касается уменьшения минимальной рабочей волны БПР, то, хотя и удалось существенно повысить точность поверхности антенны, возможность регулярной работы на такой короткой волне, как 8 мм, остается проблематичной, и в этом направлении необходимо провести дополнительные исследования.

Основными недостатками радиоастрономического способа юстировки являются: 1) необходимость соблюдения строгого регламента заранее составленной программы юстировки, 2) трудность непосредственной привязки удаленных друг от друга щитов при юстировке шкал радиального перемещения, что связано с большими угловыми размерами наиболее ярких радиоисточников (Солнце и Луна). Оба эти недостатка не являются принципиальными и могут быть преодолены в будущем применением более совершенного оборудования, особенно для юстировки больших антенн. Однако, как показывает описанный ниже опыт, и в настоящее время эти недостатки не налагают существенных ограничений на успешное практическое применение радиоастрономического способа для юстировки отражающей поверхности БПР.

ВОЗМОЖНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ЮСТИРОВКИ

Как показала практика юстировки БПР, продолжительность юстировки одного щита, включая его наведение и отведение, составляет 1.5 мин. (при юстировке по азимуту или углу места) или 2.0 мин. (при юстировке пары щитов по расстоянию). Интервал времени, в течение которого можно юстировать один заданный щит, ограничен пределами его вращения по азимуту. Этот промежуток времени $\Delta t(N, r, h_{\odot})$ (здесь N — номер щита, r — расстояние облучателя от центра антенны, h_{\odot} — высота Солнца) с достаточной точностью находится по формуле

$$\Delta t = (\beta_{\max} - \beta_{\min}) / v_{\beta}, \quad (1)$$

где $(\beta_{\max} - \beta_{\min})$ — разность между максимальным и минимальным отсчетами азимутальной шкалы юстируемого щита, $v_{\beta}(N, r, h_{\odot})$ — скорость поворота щита по азимуту при слежении за Солнцем. К сожалению, реальные пределы азимутального вращения щитов БПР имеют большой разброс. Поэтому для выявления закономерностей в зависимости интервала времени для юстировки от номера щита, положения облучателя и высоты Солнца мы задали одинаковые пределы вращения β_{\max} и β_{\min} для всех щитов и одинаковую разность $\beta_{\max} - \beta_{\min} = 50$ мм, что соответствует углу азимутального поворота ± 3.7 . 48% всех реальных щитов имеют угол поворота, меньший принятого. Влияние индивидуальных отклонений от заданных пределов азимутального вращения щитов на интервал времени

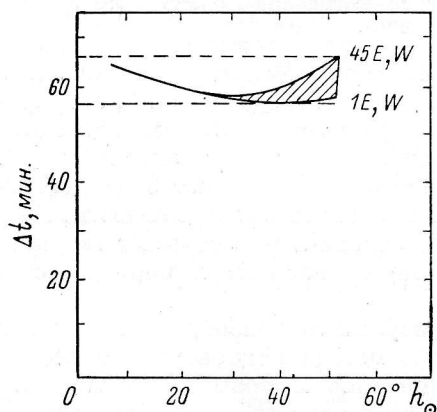


Рис. 1. Зависимость возможного интервала времени Δt для юстировки одного щита от высоты Солнца (h_{\odot}) (для щитов № 1 и № 45).

для юстировки от номера щита, положения облучателя и высоты Солнца мы задали одинаковые пределы вращения β_{\max} и β_{\min} для всех щитов и одинаковую разность $\beta_{\max} - \beta_{\min} = 50$ мм, что соответствует углу азимутального поворота ± 3.7 . 48% всех реальных щитов имеют угол поворота, меньший принятого. Влияние индивидуальных отклонений от заданных пределов азимутального вращения щитов на интервал времени

для юстировки анализируется отдельно. Расчет показал, что интервал времени (Δt), в течение которого возможна юстировка одного щита, практически не зависит от его номера, от положения облучателя и слабо зависит от высоты Солнца (рис. 1). Во всех случаях он равен одному часу с разбросом в пределах ± 5 мин. Мы разбили возможный интервал времени юстировки на два промежутка: $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$, первый — до кульминации Солнца (Δt_1) и второй — после кульминации Солнца (Δt_2), и вычислили значения Δt_1 и Δt_2 на ЭЦВМ по формулам

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= (\beta_{\max} - \beta_k) / v_\beta, \\ \Delta t_2 &= (\beta_k - \beta_{\min}) / v_\beta, \end{aligned} \quad (2)$$

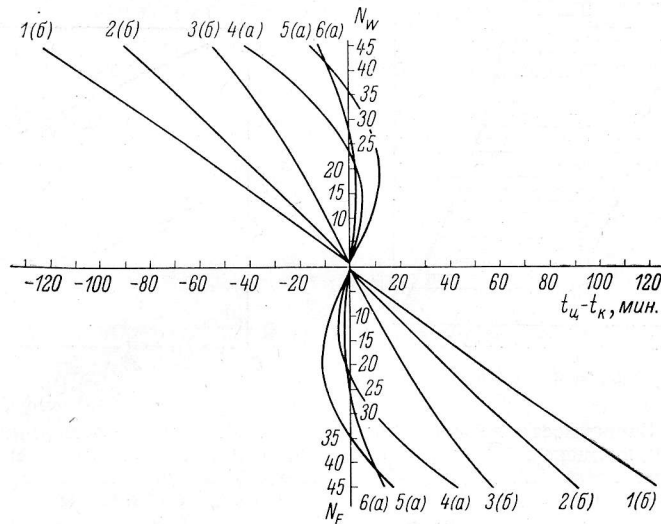


Рис. 2. Зависимость $t_n - t_k$ (в мин. времени) от номера щита для разных высот Солнца и положений облучателя.

N_E — номера восточных, N_W — номера западных щитов антенны.
1 (б), 4 (а) — $h_\odot = 7^\circ$; 2 (б), 5 (а) — $h_\odot = 30^\circ$; 3 (б), 6 (а) — $h_\odot = 53^\circ$.

где β_k — отсчет азимутальной шкалы на момент кульминации Солнца (рассчитывается также на ЭЦВМ). Как показали расчеты, величины Δt_1 и Δt_2 обнаруживают сильную зависимость от N , r , h_\odot , центральный момент юстировки (t_n), отсчитываемый от момента кульминации Солнца (t_k), сильно зависит от номера щита N , а величина $\Delta t_n = t_n - t_k$ от N , r , h_\odot . Для разных высот Солнца и положений облучателя зависимость $t_n - t_k$ от N представлена на рис. 2. Здесь рассмотрены два случая: (а) — облучатель устанавливается в положение, соответствующее высоте Солнца в день юстировки; (б) — облучатель, независимо от высоты Солнца, находится в одном и том же положении, соответствующем высоте источника Лебедь А.

Зависимость Δt , Δt_1 , Δt_2 от N для идеальных щитов плавная, а в зависимости для реальных щитов имеет место значительный разброс, который объясняется различиями характеристик механизмов щитов. Сравнить возможные интервалы времени юстировки для идеальных и реальных щитов можно по графику на рис. 3. Такие графики для реальных щитов позволяют установить очередность юстировки щитов.

Полный интервал времени Δt_n , в течение которого можно юстировать все щиты антенны БПР, зависит от r , h_\odot . Для любой $h_\odot = \text{const}$ Δt_n значительно увеличивается, если вторичный отражатель установлен в по-

ложение вблизи центра антенны. Рис. 4 показывает, что при $r=r_{\odot}$ $\Delta t_n=1^h 5 \div 2^h 5$, причем наибольший интервал времени для юстировки зимой. При $r=r_{\text{Суг}}$, т. е. при установке вторичного отражателя вблизи

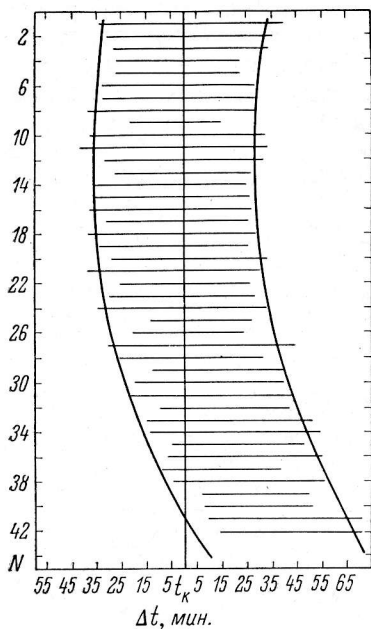


Рис. 3. Зависимость возможного интервала времени для юстировки от номера щита (N) для $h_{\odot}=7^{\circ}$ и $r=r_{\odot}$.

Горизонтальные отрезки прямых соответствуют интервалам времени юстировки для реальных щитов. Расстояние между плавными кривыми — интервалами времени юстировки для идеальных щитов. Вертикальная линия — момент кульминации Солнца.

ровать все 90 щитов по двум координатам (радиальному перемещению и азимуту).

2. Интервал времени, который можно использовать для юстировки одного щита, слабо зависит от номера щита, положения облучателя, высоты Солнца и для щитов БПР составляет около 1 часа.

РАСЧЕТ ПРОГРАММЫ ЮСТИРОВКИ БПР НА ЭЦВМ

До того как стали использоваться ЭЦВМ, расчет программы (эфемерид) и обработка результатов юстировки были чрезвычайно трудоемкими, что препятствовало применению радиоастрономической юстировки. Для расчета программы юстировки необходимо было проинтерполировать установку (угловые координаты α и β) каждого элемента (щита) антенны с момента кульминации Солнца (установка элемента на момент кульминации Солнца специально рассчитывается на каждый день для обычных наблюдений Солнца на БПР) на заданный момент юстировки с помощью дифференциальных формул коэффициента пересчета (при обработке операция обратная)

$$\alpha(t) = \alpha_r + A'(h_{\odot}, N)(t - t_r) + A''(h_{\odot}, N)(t - t_r)^2, \quad (3)$$

центра антенны, $\Delta t_n=3^h \div 5^h 5$, причем наибольший интервал времени для юстировки антенны также при малых h_{\odot} , т. е. зимой.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Чтобы увеличить интервал времени, который можно использовать для юстировки БПР с неподвижным

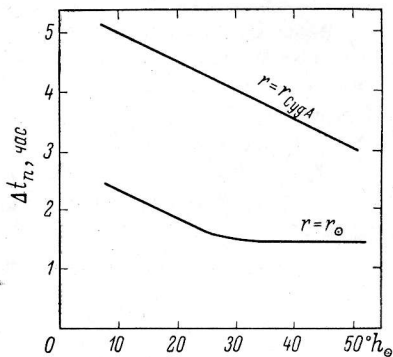


Рис. 4. Зависимость интервала времени, в течение которого можно юстировать все щиты антенны, от высоты Солнца.

облучателем, последний следует ставить вблизи центра антенны. При этом в зимние месяцы оказывается возможным за один прием отъюсти-

где A' , A'' — коэффициенты пересчета, t_k — момент кульминации Солнца, t — текущий момент юстировки, h_{\odot} — высота Солнца в момент кульминации. Формула для $\beta(t)$ аналогична.

Помимо трудоемкости расчета коэффициентов A' , A'' , существенным недостатком такого способа расчета является также то, что облучатель антенны должен устанавливаться в положение, соответствующее $h=h_{\odot}$, что, как уже было сказано выше, сокращает интервал времени, который можно использовать для радиоастрономической юстировки БПР.

В настоящее время расчет установки элементов выполняется на ЭЦВМ «Минск-22» по точным формулам, непосредственно для заданной юстировки. Машинное время расчета программы юстировки 90 щитов БПР по угловым координатам (α , β) около 1.5 мин., а по расстоянию (l) — около 10 мин.

Угловые координаты (α , β) щита рассчитываются на ЭЦВМ следующим образом.

Исходные данные для расчета:

1) параметры щита:

t — текущий момент юстировки каждого щита,

r — положение вторичного отражателя, т. е. расстояние от центра антенны до фокуса,

$l_{n1} \dots l_{ni}$ — радиальное смещение щита (i — номер щита),

$\alpha_{01} \dots \alpha_{0i}$ } — предварительные значения мест нулей угловых шкал,

$\beta_{01} \dots \beta_{0i}$ }

$\varphi_1 \dots \varphi_i$ — горизонтальный угол щита из центра антенны,

ρ — радиорефракция,

φ , l — широта и долгота места наблюдения;

2) эфемеридные данные из астрономического ежегодника:

$\delta_{\odot}(0)$ — склонение Солнца,

$\eta(0)$ — уравнение времени,

v_0 , v_1 — часовые изменения склонения,

v'_0 , v'_1 — часовые изменения уравнения времени,

ΔT — разность эфемеридного и всемирного времени;

3) некоторые параметры антенны:

R — радиус антенны ($R = 99\,835$ мм),

L — база азимутальной шкалы для юстируемого щита и др.

Вычисления $\alpha(t)$, $\beta(t)$ для каждого щита производятся по формулам

$$T = t_m - 3^h + \Delta T, \quad t = t_m,$$

$$\delta_{\odot}(t_m) = \delta_{\odot}(0) + T \cdot v,$$

где $v = v_0 + T/48 \cdot D$, $D = v_1 - v_0$.

$$m_e = t - 3^h - l,$$

$$t = \eta + m_e,$$

где $\eta = \eta(0) + T \cdot v'$, $v' = v'_0 + T/48 \cdot D$, $D = v'_1 - v'_0$.

$$a_{\odot}(t) = \arctg [\cos \delta \sin t / (\sin \varphi \cos \delta \cos t - \cos \varphi \cos \delta)],$$

$$z_{\odot}(t) = \arccos (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t),$$

$$h' = 90^{\circ} - z_{\odot}, \quad h_{\odot}(t) = h' + \rho,$$

$$R_1 = 99\,835 - 118 \left(\sec \frac{h_{\odot}(t)}{2} - 1 \right) - l_{ni},$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \left[\sin \varphi_N / \left(\cos \varphi_N - \frac{r}{R_1} \right) \right], \quad (4)$$

$$\beta_p(t) = 385 \sin \beta_N,$$

$$\sin \beta_N = \cos \alpha' \sin \beta_b,$$

$$\alpha' = \arcsin \left(\sin h_{\odot}(t) / \sqrt{2(1 + \cos h_{\odot}(t) \cos(\psi + a_{\odot}))} \right),$$

$$\beta(t) = \beta_p(t) + \beta_0,$$

$$\operatorname{tg} \zeta = \sec \beta_b \operatorname{tg} \alpha' \cos \beta_N,$$

$$2\zeta = \alpha_p,$$

$$\alpha(t) = \alpha_p + \alpha_0.$$

Здесь $a_{\odot}(t)$, $z_{\odot}(t)$, $h_{\odot}(t)$ — азимут, зенитное расстояние, высота Солнца на момент наблюдения.

Подробный вывод формул см. в работе [2].

Для расчета программы юстировки по l вычисляются угловые координаты (α , β) для каждого щита юстируемой пары по вышеприведенным формулам (4) и три значения радиального смещения (l_{21} , l_{22} , l_{23}) передвигаемого щита, которые находятся из системы уравнений

$$\begin{aligned} \Delta r_1 &= \Delta r_{21} \rightarrow l_{21}, \\ \Delta r_1 - \lambda/4 &= \Delta r_{22} \rightarrow l_{22}, \\ \Delta r_1 + \lambda/4 &= \Delta r_{23} \rightarrow l_{23}. \end{aligned} \quad (5)$$

Δr — оптический путь луча от фронта падающей волны до фокуса после отражения луча от центра щита — определяется по формуле

$$\begin{aligned} \Delta r &= (R_1 - l) \cos h_{\odot}(t) \cos(A_A - a_{\odot}(t) - \varphi) + \\ &+ \sqrt{(R_1 - l)^2 + r^2 - 2(R_1 - l)r \cos \varphi}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для вычислений по этой программе, кроме вышеприведенного числового массива (исключая l_{ni}), вводятся:

l'_{ni} — отсчет радиальной шкалы неподвижного щита пары юстируемых по l щитов,

$l_{01} \dots l_{0i}$ — предварительные места радиальных шкал юстируемых щитов,

λ — длина волны радиометра, с помощью которого производится радиоастрономическая юстировка,

A_A — азимут центрального сечения антенны.

Уравнения (5) решаются на ЭЦВМ методом последовательных приближений:

$$1\text{-е приближение} \dots l'_{21} = 0 \rightarrow \Delta r_{21} \rightarrow \Delta' = \Delta r_1 - \Delta r_{21},$$

$$2\text{-е приближение:} \dots l''_{21} = 0 + \Delta' / (1 + \cos h_{\odot}) \rightarrow \Delta r_{21} \rightarrow \Delta'' = \Delta r_1 - \Delta r_{21},$$

.....

$$\begin{aligned} n\text{-е приближение} \dots l^{n+1}_{21} &= l^n_{21} + \Delta^n / (1 + \cos h_{\odot}) \rightarrow \Delta r_{21} \rightarrow \Delta^{n+1} = \\ &= \Delta r_1 - \Delta r_{21}. \end{aligned}$$

Решением уравнения $\Delta r_1 = \Delta r_{21}$ является такое l_{21} , при котором $\Delta^{n+1} = 0.01$ мм. Аналогично решаются и два других уравнения системы (5).

Программу расчета юстировки по l можно использовать для расчета антенны при произвольно заданном положении облучателя и одного исходного щита.

ЮСТИРОВКА АЗИМУТАЛЬНЫХ ШКАЛ

Как известно из [2], радиоастрономическую юстировку щита по азимуту можно выполнить либо по максимуму записи прохождения источника через диаграмму направленности одного щита, либо по записи сигнала от источника на склонах диаграммы. В указанный выше период радиоастрономические юстировки проводились первым способом при положении вторичного отражателя в меридиане антенны. Юстируемый щит выставляется по двум рассчитанным угловым координатам $\alpha(t)$, $\beta(t)$ и одной заданной координате l . По максимуму сигнала находится действительный момент прохождения источника через вершину диаграммы одного щита (t_1). На этот момент с заранее известным местом нуля рассчитывается азимутальная координата $\beta(t_1)$. Поправка $\Delta\beta_0$ к предполагаемому месту нуля азимутальной шкалы находится из уравнения

$$\Delta\beta_0 = \beta(t) - \beta(t_1). \quad (7)$$

Однако при ручной обработке $\Delta\beta_0$ гораздо проще определить с помощью следующей приближенной формулы:

$$\beta(t_1) = \beta(t) + v_\beta \Delta t. \quad (8)$$

Из (7) и (8) можно видеть, что $\Delta\beta_0 = v_\beta \Delta t$, где $\Delta t = t_1 - t$. Скорость поворота отражающего элемента по азимуту $v_\beta(N, r, h_\odot)$ при слежении за Солнцем рассчитывается по специальной программе на ЭЦВМ по формуле

$$v_\beta = (L/\rho') \frac{d\beta}{dt}, \quad (9)$$

где ρ' — число угловых минут в радиане,

$$\frac{d\beta}{dt} \approx [1/2 \cdot \cos \alpha \sin 2a_1 (\operatorname{ctg} \psi - \operatorname{tg} a_1)] \frac{da'}{dt}$$

— скорость поворота отражающего элемента по азимуту в угловых минутах за минуту времени; здесь $\operatorname{tg} a_1 = -\cos h_\odot(t) \sin \psi / (1 + \cos h_\odot(t) \cos \psi)$,

$$\frac{da'}{dt} = 15 \cos \delta_\odot(t) / \cos h_\odot(t). \quad (10)$$

v_β легко определить по основной юстировочной программе расчета угловых координат, для чего $\beta(t)$ рассчитывается на два последующих момента: t_1 и $t_2 = t_1 + \Delta t$, где $\Delta t = 1$ мин., тогда

$$v_\beta = \beta(t_2) - \beta(t_1). \quad (11)$$

Итак, уточненное место нуля азимутальной шкалы

$$\beta_0^p = \beta_0 + \Delta\beta_0. \quad (12)$$

В качестве предварительного места нуля азимутальной шкалы юстируемого элемента можно принять значение нуля, найденное из геодезической юстировки, $\beta_0 = \beta_0^g$, или полученное каким-либо иным способом.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АЗИМУТАЛЬНЫХ ШКАЛ

Различие мест нулей $\beta_0^p - \beta_0^g$, полученных из радиоастрономической и геодезической юстировок, обусловлено случайными и систематическими ошибками обоих методов. Систематические ошибки дают общее для всех

щитов или плавно меняющееся по поверхности антенны (либо в течение юстировки) изменение мест нулей. Возможными причинами систематических ошибок радиоастрономической юстировки могут быть: 1) смещение центра тяжести радиоизлучения Солнца относительно оптического диска, 2) ошибки установки облучателя. Случайными ошибками (σ_c) могут быть ошибки шкал, ошибки снятия отсчетов сигнала и времени и ошибки, вызываемые люфтами механизмов (σ_d). Последние сильно меняются от одного щита к другому. Обозначим через σ_1 все случайные ошибки, кроме ошибок, вызываемых люфтами; тогда

$$\sigma_c = \sigma_1 + \sigma_d. \quad (13)$$

Величина случайной ошибки $\sigma_c = \sigma_1$ может быть оценена из многократных юстировок щитов с малыми люфтами ($\sigma_d^2 \ll \sigma_c^2$). Например, 26 IX 1967 щит № 8E юстировался на протяжении одной юстировки 34 раза на $\lambda = 0.8$ см; было найдено $\sigma_c = \sigma_1 = 0.05$ мм. Таким образом, точность определения (случайная ошибка) азимутальных мест нулей из радиоастрономической юстировки при наличии хороших механизмов равна сотым долям миллиметра. Полагая $\sigma_1 = 0.05$ мм для всех щитов, можно определить σ_d для каждого отражающего элемента. Среднеквадратичное отклонение β_0^p для щита № 8E, найденное из разных радиоастрономических юстировок, $\sigma = 0.12$ мм (период юстировок сентябрь 1968—август 1969 г., $\lambda = 4$ см). Вероятными основными причинами увеличения σ являются: 1) уход фундамента антенны, 2) влияние систематических ошибок радиоастрономического способа юстировки, 3) зависимость мест нулей от наклона щита. Среднеквадратичное отклонение β_0^g для щита № 8E, найденное из геодезических юстировок, проведенных в тот же период, $\sigma = 0.19$ мм (удовлетворительно совпадает с $\sigma = 0.12$ мм, полученным при радиоастрономических юстировках).

Из опыта установки антенны известно, что люфты механизмов шкал различны при наведении щита вращением ручки азимутальной установки по часовой и против часовой стрелки. Для оценки величины этого различия 19 IX 1967 была проведена юстировка щита № 9E с поочередным применением двух способов его наведения. Результаты этой юстировки таковы:

Способ вращения	σ , мм
по часовой стрелке	0.27
против часовой стрелки	0.11

Отсюда видно, что люфты механизмов шкал вносят существенную ошибку, причем количественно различную при вращении ручки азимутальной установки по часовой и против часовой стрелки. Учитывая результаты юстировки щита № 8E, оценим ошибку люфтов для других щитов (для № 8E полагаем $\sigma_d = 0.00$ мм). Используя соотношение $\sigma_c^2 = \sigma_1^2 + \sigma_d^2$, найдем σ_d , например, для щитов № 17E и № 10E (табл. 1).

Обработка юстировок, проводившихся в период с сентября 1968 по май 1969 г. на $\lambda = 4$ см, позволила определить для каждого щита средне-

ТАБЛИЦА 1

Номер щита	Количество юстировок	σ_c , мм	σ_1 , мм	σ_d , мм
17E	3	0.23	0.05	0.22
10E	3	0.57	0.05	0.33

ТАБЛИЦА 2

Пределы σ , мм	Количество щитов, %	
	Радиоастрономическая юстировка	Геодезическая юстировка
0.00—0.20	30	48
0.21—0.40	50	40
0.41—0.60	20	2

квадратичное отклонение (σ) мест нулей азимутальных шкал при наличии всех случайных и систематических ошибок. На основе этих оценок составлена табл. 2, в которой для 50 щитов указано количество щитов с заданными пределами ошибок.

Среднеквадратичное значение разброса мест нулей для всех щитов по радиоастрономическим юстировкам составляет $\sigma=0.30$ мм, а по геодезическим $\sigma=0.22$ мм.

Геодезические и радиоастрономические юстировки щитов по азимуту позволили определить номера хороших, средних и плохих отражающих элементов.

Приведенные выше результаты сопоставления ошибок установки щитов по азимутальным шкалам показывают большой разброс мест нулей, определенных по данным радиоастрономических юстировок, по сравнению с геодезическими определениями. Можно думать, что основной причиной увеличения σ для радиоастрономической юстировки является изменение положения места нуля и люфтов при наклоне щита. Поскольку радиоастрономическая юстировка проводилась при разных высотах Солнца, то это привело к увеличению разброса мест нулей. Аналогичное влияние могла оказать неточность поверхности вторичного отражателя, положение которого менялось от юстировки к юстировке.

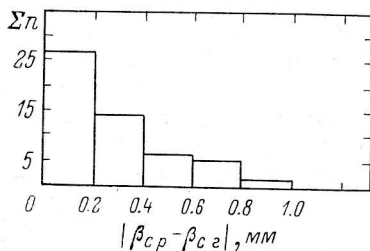


Рис. 5. Распределение количества центральных щитов (Σn) по параметру $|\beta_{cp} - \beta_{cg}|$.

Оценим систематическую разность среднеарифметических мест нулей азимутальных шкал по нескольким радиоастрономическим (β_{cp}) и нескольким геодезическим β_{cg} юстировкам за большой период времени. Эта

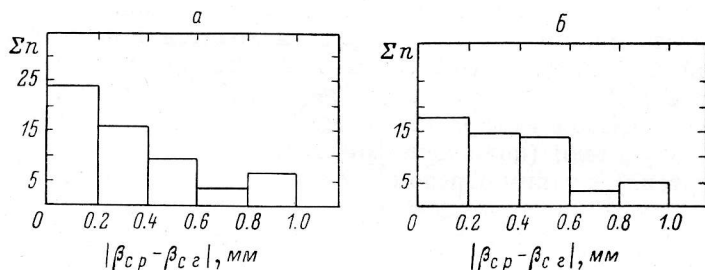


Рис. 6. Распределение количества центральных щитов (Σn) по параметру $|\beta_{cp} - \beta_{cg}|$ для двух периодов.

а — май—сентябрь 1968 г., б — ноябрь 1968 г.—май 1969 г.

разность $|\beta_{cp} - \beta_{cg}|$ определяется различием методов юстировок. Гистограммы разностей $|\beta_{cp} - \beta_{cg}|$ (рис. 5) дают распределения количества центральных щитов по параметру $|\beta_{cp} - \beta_{cg}|$. Гистограммы показывают, что около половины щитов имеют систематическую разность $|\beta_{cp} - \beta_{cg}| \in (0.00 \div 0.20)$ мм, значение дисперсии разностей мест нулей по всем щитам $\sigma^2=0.05$ ($\sigma=0.22$ мм).

Оценим и сравним разности $|\beta_{cp} - \beta_{cg}|$ для двух последовательных сезонных периодов. Гистограммы (рис. 6), соответствующие периодам май—сентябрь и ноябрь—май, несколько различны. Для периода май—сентябрь уменьшилось (относительно периода ноябрь—май) количество щитов с $|\beta_{cp} - \beta_{cg}| \in (0.00 \div 0.20)$ мм и увеличилось количество щитов

с $|\beta_{ср} - \beta_{сг}| \in (0.40 \div 0.60)$ мм. Это, по-видимому, связано с тем, что в этот период юстировка по Солнцу проводилась с большими наклонами щитов, т. е. в положениях, более далеких от вертикального, в котором производится геодезическая юстировка.

ЮСТИРОВКА ПО УГЛУ МЕСТА

Для юстировки по углу места использовался метод, описанный в [2]. Для определения поправки места нуля $\Delta\alpha_0$ необходимо сделать следующие перестановки юстируемого щита:

- 1) $\alpha = \alpha(t)$ (предполагается, что соответствует максимальному сигналу),
- 2) $\alpha = \alpha(t) + \Delta\alpha$,
- 3) $\alpha = \alpha(t) - \Delta\alpha$.

В этих трех положениях измеряются значения антенной температуры T_1 , T_2 , T_3 соответственно. Поправку к месту нуля шкалы угла места вычисляют по формуле

$$\Delta\alpha_0 = \Delta\alpha/2 \cdot [1 + 2 \lg(T_2/T_1)/\lg(T_3/T_2)]^{-1}. \quad (14)$$

Величину $\Delta\alpha$ выбирают так, чтобы при втором и третьем положениях щита сигнал от источника попадал на склоны диаграммы (вблизи уровня половинной мощности).

В данной работе мы ставили следующие задачи: 1) нахождение нормали к эффективной поверхности отражающего элемента, 2) оценка внутренней точности радиоастрономической юстировки отражающего элемента по углу места, 3) оценка сходимости нескольких юстировок отражающих элементов.

Геодезическая юстировка по углу места производится с помощью отвеса, соприкасающегося в двух точках с поверхностью щита, выставленного вертикально. Отклонения в форме поверхности щита от теоретической приводит к ошибкам в определении мест нулей.

Из радиоастрономической юстировки находится положение нормали эффективной поверхности щита, так как юстируется непосредственно поверхность отражающего элемента, а не ее отдельные точки. Кроме этого, радиоастрономическая юстировка непосредственно учитывает неточность установки облучателя (положение рупора, наклон поверхности вторичного отражателя) и таким образом осуществляется компенсация фазовых ошибок, вносимых поверхностью вторичного отражателя.

В нашей серии юстировок в качестве отсчетного устройства по углу места использовался переносной секстант. Пятнадцать перестановок по углу места одного щита (№ 15W), не снимая секстанта, позволили оценить внутреннюю точность метода, которая оказалась $\sigma = 0.7$ деления шкалы секстанта. Основной причиной разброса, вероятно, является неточность наведения щита из-за инерционности пузырька ампулы секстанта, с помощью которого выставляются щиты. В пределах одной юстировки, когда секстант снимается, повторяемость результатов юстировок несколько ниже: $\sigma = 1.0 \div 1.3$. Такое увеличение разброса можно объяснить неповторяемостью установки секстанта. Нетрудно определить, что при базе секстанта, равной 30 см, неточность установки секстанта примерно 0.05 мм вызывает ошибку в установке щита по углу места около 0.5.

Результаты юстировок по углу места, выполненных в разные дни, также показали разброс результатов, связанный, вероятно, с неповторяемостью установки облучателя (вторичного зеркала и рупора). Ошибка в установке рупора, равная всего примерно 0.1 мм, вызывает ошибку в установке щита по углу места около 0.7 (в короткофокусной системе с $f = 50$ см).

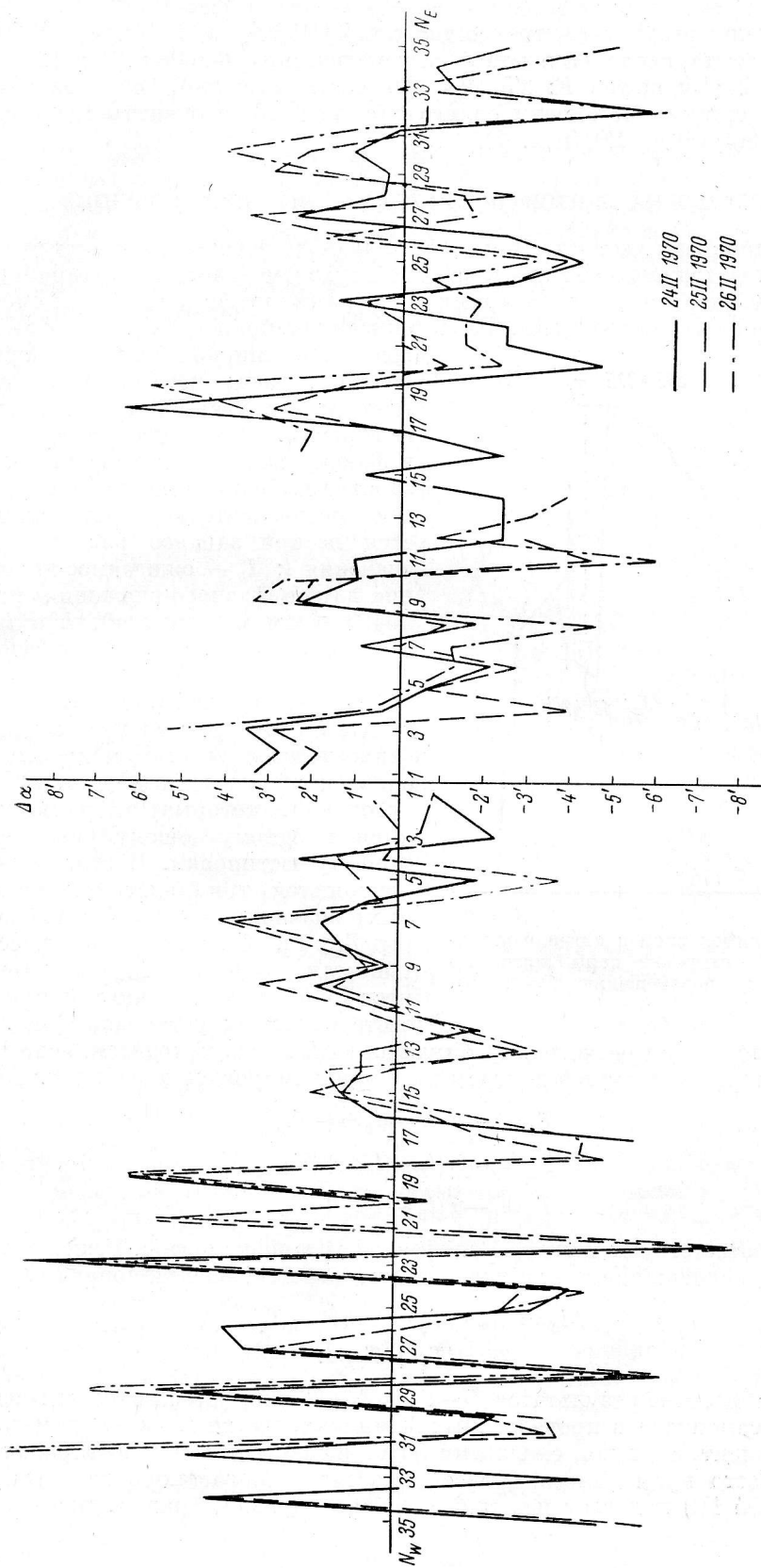


Рис. 7. Разности мест нулей шкал угла места ($\Delta\alpha$), найденных радиоастрономическим и геодезическим способами для трех радиоастрономических юстировок.

Сравнение результатов трех юстировок БПР (24, 25, 26 февраля 1970 г.) по углу места после вычитания систематических ошибок (у щитов W : 3,5, 1,8, 4,3; у щитов E : 2,5, 1,4, 2,5 соответственно), обусловленных неповторяемостью установки облучателя, позволило оценить сходимость по всем щитам $\sigma=1,0$ (рис. 7).

ЮСТИРОВКА ЩИТОВ ПО РАДИАЛЬНОМУ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ

Для привязки мест нулей шкал радиального перемещения юстируемая пара щитов должна работать в режиме двухэлементного интерферометра. Дополнительная разность фаз в их сигналы вводится радиальным смещением одного из щитов пары. Ранее описанная процедура юстировки [2]

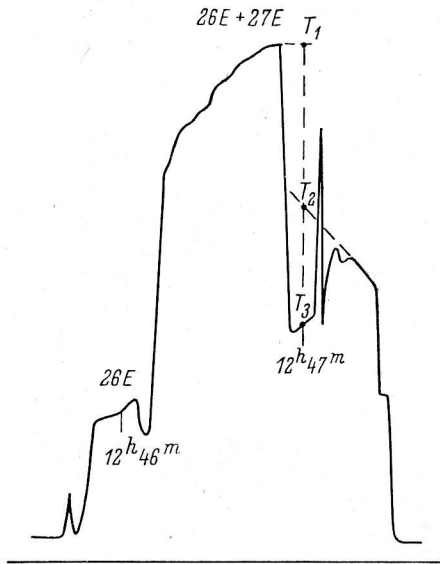


Рис. 8. Пример записи сигнала источника при юстировке пары щитов по радиальному перемещению ($\lambda=2$ см).

требовала слишком большой затраты времени, ввиду чего была разработана новая методика радиальной юстировки. Один щит выставляется в фиксированное, произвольное, но заранее выбранное положение, а другой последовательно устанавливается на три заранее рассчитанных значения l : l_1 — ожидаемое положение для синфазного сложения сигналов (максимум сигналов), l_2 и l_3 — положения, соответствующие фазовому сдвигу на $+\Delta$ и $-\Delta$ (склоны интерференционной диаграммы, обычно $\Delta \approx \pi/2$). Во всех трех положениях записываются участки кривой, обусловленной суточным движением источника, которые экстраполируются к одному общему расчетному моменту юстировки. В этот момент измеряются три (экстраполированных) значения антенной температуры T_1 , T_2 , T_3 , по которым рассчитывается поправка Δl_0 к разности мест нулей шкал, принятой при расчете исходных установок (рис. 8).

Приближенная расчетная формула для Δl_0 легко находится, если вершину интерференционной диаграммы аппроксимировать параболой. Тогда

$$\begin{aligned} T_1 &= -\alpha(l_1 - l_0)^2 + T_0, \\ T_2 &= -\alpha(l_2 - l_0)^2 + T_0, \\ T_3 &= -\alpha(l_3 - l_0)^2 + T_0. \end{aligned} \quad (15)$$

l_0 и T_0 соответствуют истинной синфазной установке щитов. Решение этой системы уравнений дает простую формулу для нахождения поправки

$$\begin{aligned} \Delta l_0 &= \Delta/2 \cdot (T_2 - \tilde{T})/(\tilde{T} - T_1), \\ \tilde{T} &= (T_2 + T_3)/2. \end{aligned} \quad (16)$$

При обработке результатов $\tilde{T} - T_1$ и $T_2 - \tilde{T}$ снимаются непосредственно с ленты самописца в произвольных единицах, например в миллиметрах. Каждый щит с двумя смежными щитами образует две юстировочные пары. Место нуля одного произвольно выбранного опорного щита $l_{0,оп}$ (обычно № 1E) полагаем известным. Таким образом, привязавшись к од-

ному щиту, последовательно привязывая шкалы юстируемых пар по номеру щита, находим места нулей каждого щита:

$$l_{0N} = l_{0_{\text{он}}} + \sum_{i=i_{\text{он}}}^N \Delta l_0^{i, i \pm 1}$$

(знак плюс берется, если $N > i_{\text{он}}$, в противном случае берем минус). Сравнение мест нулей l_{0i}^p , полученных из радиоастрономических юстировок, проведенных в июле 1970 г., с l_{0i}^r , найденными из геодезической юстировки (также в июле 1970 г.), показывает их существенное различие (рис. 9). Разность $\Delta l = l_{0i}^p - l_{0i}^r$ некоторых пар достигает 7 мм. Среднее значение разброса для разности мест нулей геодезической и радиоастрономической юстировок после приведения их к общему центру антенны $\bar{\sigma}_i = 1.84$ мм. Основной

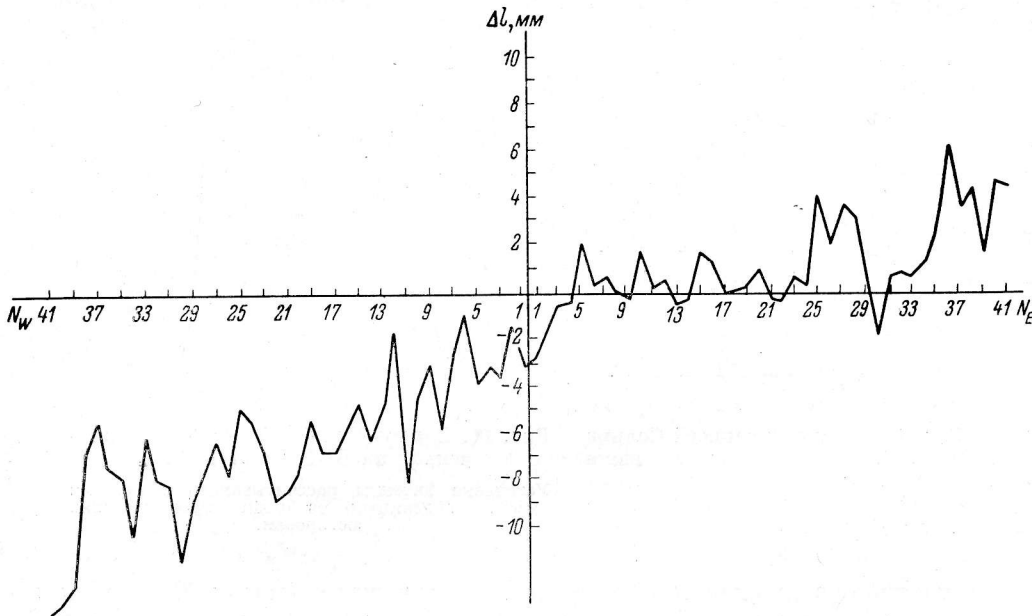


Рис. 9. Разности мест нулей шкал радиального перемещения (Δl), полученных из радиоастрономических и геодезических юстировок БПР в июле 1970 г.

причиной столь большой разности $l_{0i}^p - l_{0i}^r$ является ошибка нивелировки осей. Ошибка в нивелировке $\sigma_{\Delta h}$ приводит к возникновению ошибки σ_l в установке отражающего элемента по l [1]

$$\sigma_l = \sigma_{\Delta h} \operatorname{tg} \alpha.$$

Отсюда видно, что влияние ошибки нивелировки значительно на больших углах места наблюдения. Для рассматриваемого примера юстировки $\operatorname{tg} \alpha = 0.50$. Следовательно, для средней ошибки нивелировки получаем оценку $\sigma_{\Delta h} = \sigma_l / \operatorname{tg} \alpha = 3.68$ мм. По данным геодезических нивелировок, $\sigma_{\Delta h} = 3.02$ мм, что находится в хорошем согласии с нашей оценкой. Таким образом, основная часть различия значений мест нулей, найденных из радиоастрономической и геодезической юстировок, действительно связана с ошибками нивелировки щитов БПР. Конструкция БПР не предусматривает простых методов измерений нивелировки. Обычно она вообще не учитывается ни при геодезическом, ни при автоколлимационном способе юстировки.

На рис. 9 кроме хаотического разброса хорошо виден общий наклон кривой. Наклон может быть обусловлен, помимо ошибок нивелировки,

несовпадением положения облучателя с расчетным в меридиане и смещением ЦТР Солнца относительно центра оптического диска, а также влиянием постоянной времени выходного устройства радиометра. Случайный разброс, кроме ошибок нивелировки, включает также: 1) случайные ошибки геодезической и радиоастрономической юстировок, 2) неоднородность привязки геодезических реперов к эффективной отражающей поверхности щита, 3) уходы фундаментов за время между двумя юстировками, 4) люфты механизмов крепления щитов, которые приводят к неоднозначности в соответствии положения щита и отсчета шкалы радиального перемещения. В дальнейшем предполагается провести анализ влияния каждой из этих ошибок, для чего необходимо получить больший по объему экспериментальный материал. В качестве грубой предварительной оценки погрешности, обусловленной факторами 1, 3, 4, можно взять значение,

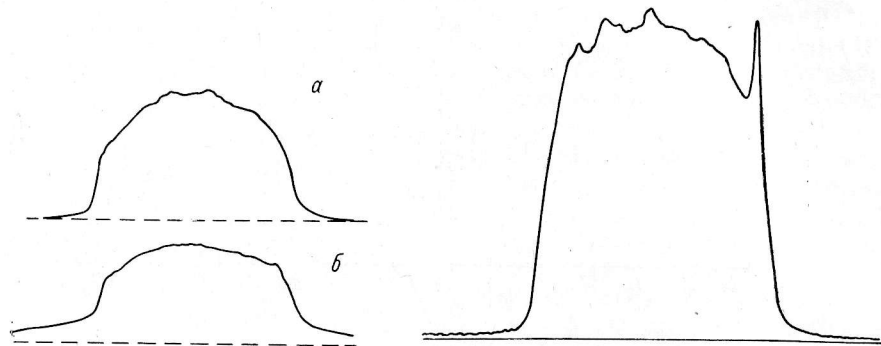


Рис. 10. Примеры записей Солнца на $\lambda=2$ см, типичных для июля 1970 г., с использованием мест нулей радиоастрономической (а) и геодезической (б) юстировки.

Рис. 11. Запись Солнца на $\lambda=2$ см, полученная на БПР 15 VIII 1970.

Установка антенны рассчитывалась с местами нулей, найденными из радиоастрономических юстировок.

полученное из сравнения юстировок 45 щитов, выполненных 30 октября и 5 ноября 1970 г.: $\sigma=0.37$ мм. Такая величина среднеквадратичного отклонения в определении разности мест нулей соседних щитов должна была бы давать расхождение мест нулей крайних щитов антенны примерно $\sigma\sqrt{N}=2.4$ мм. Места нулей, полученные при юстировках 15—30 июля 1970 г., были использованы при наблюдениях Солнца и дискретных источников на $\lambda=2$ см. При этом было отмечено резкое улучшение качества записей. В 3—4 раза уменьшилась «подложка» на записях Солнца (см. рис. 10), в 1.5—2.0 раза возросла антенная температура от дискретных источников, наблюдавшихся на больших углах места (Лебедь А), по сравнению с записями при установке антенны по геодезическим поправкам. В то же время улучшение записи при наблюдениях дискретных источников на малых углах места было незначительным. Такой характер улучшения работы антенны естествен, поскольку наиболее существенной ошибкой в установке антенны по геодезическим поправкам на больших углах места является ошибка нивелировки, достигающая 7 мм (см. выше).

Отдельные записи радиоизлучения Солнца на $\lambda=2$ см (рис. 11) иллюстрируют также существенное улучшение качества поверхности антенны по сравнению с таковым при наилучших записях, которые до сих пор удалось получить на этой волне (независимо от угла места наблюдений). Уровень «подложки» на записи в этом случае около 0.8% от максимальной антенной температуры, откуда следует, что падение эффективной площади антенны из-за случайных ошибок установки щитов на $\lambda=2$ см не превос-

ходило нескольких процентов. При пересчете на $\lambda=0.8$ см соответствующие потери не должны превосходить 20%. Поскольку случайная установка 80 щитов в правильное положение маловероятна, то записи Солнца 14—15 августа 1970 г. свидетельствуют о том, что точность радиоастрономической юстировки достаточна для обеспечения работы БПР на волнах короче 2 см (с учетом и ошибки люфтов при установке антенны).

Более детальный анализ ошибок радиоастрономической юстировки шкал радиального перемещения щитов БПР предполагается дать в отдельной статье, где будут обсуждаться также пути повышения точности юстировки и приведены данные экспериментов.

Авторы благодарят Ю. К. Зверева за любезно предоставленные им материалы геодезических юстировок, Г. М. Тимофееву и П. А. Фридмана за обеспечение юстировочных работ высокочувствительными радиометрами.

Литература

1. Г. Б. Гельфрейх и др., Изв. Глав. астр. obs. в Пулкове, № 185, 202, 1970.
2. Г. Б. Гельфрейх, Изв. Глав. астр. obs. в Пулкове, № 188, 139, 1972.

Декабрь 1970 г.