

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ЛУНЫ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ АПП

О. А. Голубчина

Приводятся результаты первых радиоастрономических юстировок по Луне отражающих элементов Северного сектора РАТАН-600. Показано, что точность определения мест нулей радиальных шкал отражающих элементов при радиоастрономической юстировке по Луне вполне удовлетворительная ($\sigma=0.2\div 0.3$ мм). Первые юстировки по Луне 13-й группы Северного сектора выявили наличие кинематического эффекта с высотой в местах нулей радиальных шкал. Среднеквадратичное отклонение разностей мест нулей радиальных шкал, найденных из радиоастрономических и автоколлимационных юстировок, растет от $\sigma=0.3$ до $\sigma=0.5$ мм для $h=28$ и 68° соответственно.

The results are given of the first radio-astronomical adjustment of the radio-telescope reflecting elements of the Northern sector of RATAN-600 by Moon. The accuracy of the determination of the radial scales of the radio-telescope reflecting elements by the radio-astronomical adjustment by Moon is quite satisfactory ($\sigma=0.2\div 0.3$ mm). The first adjustment of the 13 group of the Northern sector by Moon have detected the existence of the kinematic effect with the height in zero places of the radial scales. The r. m. s. of zero place differences of the radial scales, which have been found out radio-astronomical and the auto-collimation adjustment increase from $\sigma=0.3$ to $\sigma=0.5$ mm consistent with $h=28$ and 68° .

Одним из методов юстировки шкал отражающих элементов, из которых состоит главное зеркало АПП, является радиоастрономическая юстировка, использующая в качестве генератора излучения радиоизлучение Солнца, Луны и других космических источников [1—3]. Существенным преимуществом радиоастрономической юстировки перед «наземными» методами является использование для проведения юстировки штатной аппаратуры, что позволяет, во-первых, избежать создания специальной приемно-передающей аппаратуры и необходимых дополнительных приспособлений, во-вторых, проводить юстировки в условиях, максимально близких к реальным условиям наблюдений источников радиоизлучения. Последнее обстоятельство особенно важно, так как радиоастрономическая юстировка является пока единственным способом, позволяющим юстировать антенну при наклоне отражающих элементов под большими углами к горизонту [4]. Кроме того, на антеннах типа АПП (БПР, РАТАН-600) можно подобрать режимы юстировки, при которых реализуется сочетание реальной поверхности щита с таким его положением по радиусу и углу места, при котором проводятся наблюдения конкретных космических источников радиоизлучения. Положение вторичного отражателя можно также задать близким к его положению при конкретных наблюдениях.

Геодезический и автоколлимационный методы юстировок дают систему мест нулей установочных шкал отражающих элементов при их вертикальном положении [5]. Хотя конструкция главного зеркала РАТАН-600 предусматривает введение различного рода поправок в соответствующие места нулей расчетными методами при переходе от малых к большим высотам наблюдений, однако практически трудно учесть все возможные погрешности, существующие при наклонном положении щита. К настоя-

щему времени на РАТАН-600 известны две группы причин, ответственных за изменение мест нулей установочных шкал отражающих элементов. К первой группе относятся причины, которые обусловлены кинематикой конструкции:

- 1) разновысотностью угломестных осей (ошибки нивелировки);
- 2) разворотами угломестных осей относительно их проектного положения;
- 3) отклонением реальных расстояний от поверхности щита до оси;
- 4) неравномерностью шага винта по углу места (кинематические поправки по углу места);
- 5) неравномерностью шага винта по радиусу (кинематические поправки по радиусу).

Ко второй группе причин, вызывающих изменение мест нулей, относятся термические деформации поверхности и конструкций как отражающих элементов, так и вторичного отражателя и рельсовых путей. Для того чтобы изучить влияние некоторых из указанных причин, необходимо юстировать отражающие элементы под разными углами наклона к горизонту. При этом юстировки должны быть выполнены в течение небольшого промежутка времени, чтобы по возможности избежать влияния подвижных фундаментов и смещений мест нулей, неизбежных при профилактических работах с отчетно-установочными устройствами.

Для проведения таких исследований возможности радиоастрономической юстировки по Солнцу ограничены медленным изменением высоты Солнца (изменение высоты Солнца от $h=23$ до 70° происходит за 5—6 месяцев). Радиоастрономическая юстировка по Луне, освоенная на Северном секторе РАТАН-600 в январе—июне 1978 г., позволила снять это ограничение. Луна — протяженный ($R_a \approx 15'$) достаточно мощный источник радиоизлучения ($T_a \approx 235$ К для $\lambda=3.2$ см). В течение двух недель высота Луны меняется от 28 до 64° на момент кульминации для данной эпохи и для данного места наблюдения (РАТАН-600). Максимальное же изменение высоты может лежать в пределах от 17 до 74° [6]. Радиоизлучение Луны достаточно стабильное. При расчете таблиц уставок для проведения радиоастрономических юстировок по Луне желательно учитывать постепенное смещение эффективного центра радиоизлучения вдоль экватора [7]. Поправка к эфемериде Луны может быть вычислена по формуле

$$R_{ц. п.}/R_a = 0.3T_{-1} \sin(\Phi - \zeta) / [T_0 + (\pi/4)T_{-1} \cos(\Phi - \zeta)], \quad (1)$$

где T_0 — постоянная составляющая яркостной температуры в центральной части лунного диска; T_{-1} — амплитуда переменной составляющей яркостной температуры; ζ — фазовое запаздывание первой гармоники переменной составляющей.

Так, для $\lambda=3.2$ см максимальная величина относительного смещения центра радиоизлучения Луны из центра диска $R_{ц. п.}/R_a < 20''$. В обсуждаемой серии радиоастрономических юстировок центральной группы щитов Северного сектора РАТАН-600 по Луне на $\lambda=3.95$ см при расчете юстировочных таблиц смещение эффективного центра радиоизлучения относительно центра оптического диска Луны не учитывалось, что привело к развороту отражающей поверхности юстируемой части главного зеркала АПП в горизонтальной плоскости на соответствующий угол α [8]. По методике приведения результатов юстировок к общему центру [9] в полученные места нулей вводились поправки за фазовое смещение эффективного центра радиоизлучения Луны. В дальнейшем с целью повышения точности определения радиальных мест нулей предполагается учитывать фазовое смещение центра радиоизлучения Луны при расчете ее эфемерид.*

* Программа расчета эфемерид Луны выполнена Е. И. Румянцевой (ИТА).

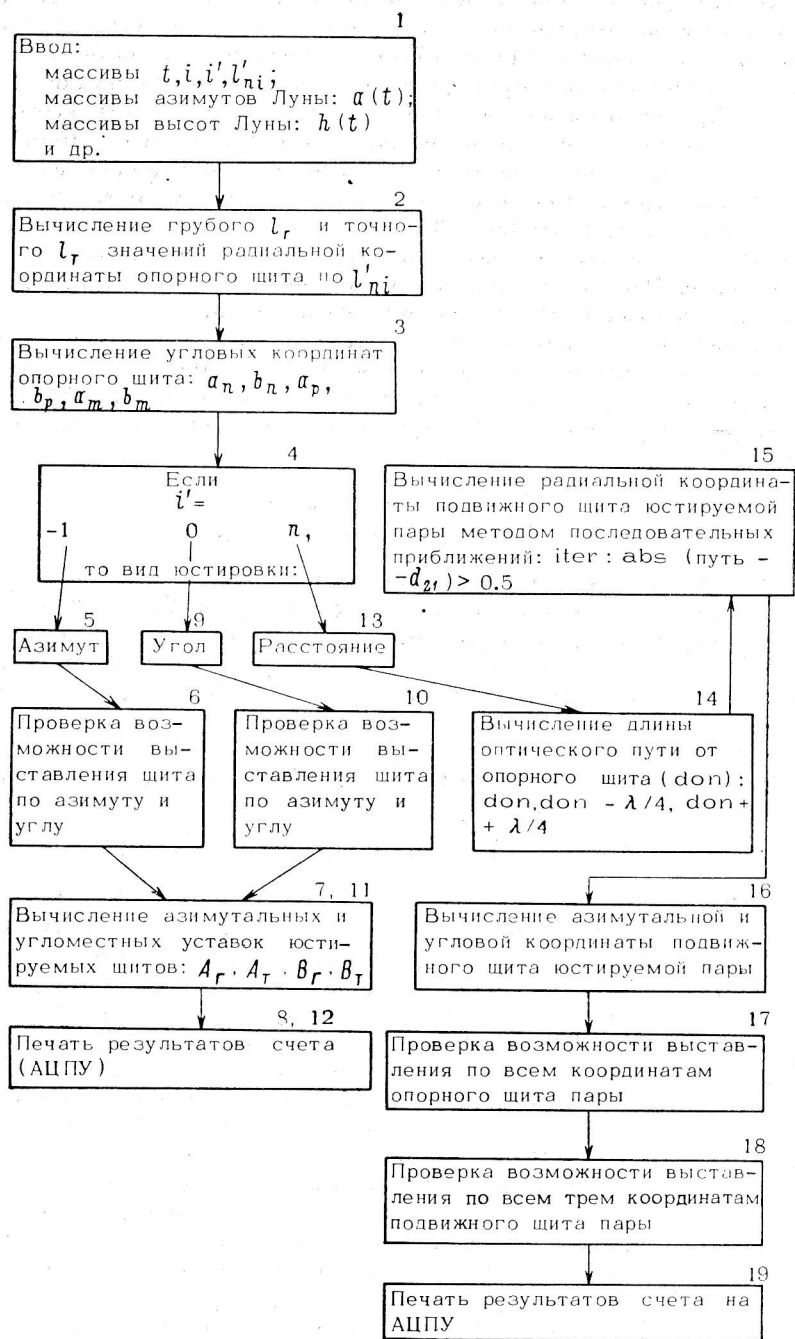


Рис. 1. Блок-схема программы расчета юстировочных таблиц по Луне для РАТАН-600.

Радиоастрономическая юстировка радиальных шкал по Луне выполняется в режиме двухэлементного интерферометра, элементами которого служат отражающие элементы главного зеркала АПП. Методика проведения юстировки по Луне ничем не отличается от методики юстировки по Солнцу. Однако схема расчета юстировочных таблиц для Луны отличается от схемы расчета таблиц для юстировок по Солнцу [2]. Суть расчета состоит в следующем: на заданный момент времени для данного места наблюдения по специальной программе, реализованной на языке «Алгол» на ЭВМ М-222, рассчитываются эфемериды (азимут и высота) Луны, которые затем используются в программе расчета юстировочных таблиц на ЭВМ М-222. На рис. 1 приведена блок-схема расчета юстировочных уставок на ЭВМ М-222. Программа реализована на языке «Алгол». Она занимает 400 ячеек памяти, включает 25 автономно транслированных процедур и использует предварительные значения мест нулей, записанные на магнитной ленте. Расчет юстировочных таблиц для юстировки 25 пар щитов по радиусу занимает 10 мин машинного времени.

Аппроксимируя диаграмму направленности двухэлементного интерферометра, элементами которого при радиоастрономической юстировке по радиусу являются два соседних щита главного зеркала АПП, косинусоидой, для двух положений щитов юстируемой пары имеем систему уравнений

$$\begin{aligned} T_1 &= T_0 [1 + \alpha \cos(x_0 + \pi/2)] \\ T_2 &= T_0 [1 + \alpha \cos(x_0 - \pi/2)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь и ниже T_0 — антенная температура, соответствующая расчетному синфазному положению отражающих элементов; T_1, T_2, T_m — антенные температуры, соответствующие первому, второму и синфазному положениям щитов; α — коэффициент косинусоиды; x_0 — ошибка в фазе интерференционной картины, обусловленная ошибкой места нуля; Δx — поправка к разности мест нулей юстируемых щитов в делениях точной шкалы сельсинов.

Решая систему уравнений (2), получим поправку к разности радиальных мест нулей щитов юстируемой пары по формуле

$$\Delta x = (2\Delta/\pi) \arcsin [(T_2 - T_1)/(2T_m - T_1 - T_2)]. \quad (3)$$

Радиоастрономическая юстировка по Луне выполнялась на радиометре с $\lambda = 3.95$ см, шумовая дорожка ~ 0.1 К, $\tau = 0.4$. Сигнал от Луны от двух соседних щитов, работающих в режиме двухэлементного интерферометра, имеет $T_A \approx 1$ К. Несмотря на то что сигнал от Луны в ~ 100 раз слабее сигнала от Солнца, точность радиоастрономической юстировки по Луне вполне удовлетворительная. Точность привязки двух соседних щитов составляет, как правило, 0.5—1 точного деления шкалы сельсина. Для определения точности радиоастрономической юстировки по Луне сравнивались радиальные места нулей, полученные из юстировок 26.07.1978 ($h_a \approx 52^\circ$) и 30.07.1978 ($h_a \approx 62^\circ$). В 85% случаев разность мест нулей (Δl) по двум юстировкам оказалась меньше 0.5 точных делений установочной шкалы (одно точное деление ~ 0.16 мм). Среднеквадратичное отклонение разностей мест нулей по двум юстировкам составляет $\sigma \approx 0.08$ мм для той части группы щитов, на которой особенно тщательно отработана механика, электрика и была произведена замена отражающей поверхности на более точную. По всей юстируемой группе щитов среднеквадратичное отклонение разностей радиальных мест нулей оказалось равным $\sigma \approx 0.2$ —0.3 мм (точность определения радиальных мест нулей, полученных из радиоастрономических юстировок по Солнцу, составляет $\sigma \approx 0.16$ мм [3]). Таким образом, радиоастрономические юстировки по Луне позволяют реализовать точность, которую дает механика и система отсчета установочных шкал отражающих элементов главного зеркала АПП РАТАН-600.

Сравнивая радиальные места, полученные из радиоастрономической и автоколлимационной юстировок, мы пытались установить зависимость между их разностью и разновысотностью угломестных осей для различных углов наклона отражающих элементов к горизонту. Как известно [5], разновысотность угломестных осей H вносит в радиальное место нуля отражающего элемента при его наклоне на угол $h/2$ (где h — высота наблюдаемого источника) «ошибку нивелировки» $\Delta L_H = H \operatorname{tg}(h/2)$. Однако корреляции между кривой разности радиальных мест нулей, найденных из радиоастрономических и автоколлимационных юстировок, и кривой «нивелировки», полученной по данным геодезических промеров, не было обнаружено. Тем не менее сравнение радиоастрономических и автоколлимационных мест нулей для $h=64^\circ$ показало существование вполне определенной и достаточно стабильной разности в местах нулей отражающих элементов исследуемой группы. Коэффициент корреляции разностей автоколлимационных и радиоастрономических юстировок, выполненных по Солнцу ($h_\odot \approx 64^\circ$, июль—август 1976 г.) и по Луне ($h_\Delta \approx 60^\circ$, 25.01.1978), равен $r=0.84$ (рис. 2).

Другой вероятной причиной возникновения ошибок в азимутальных и радиальных местах нулей при наклоне щита к горизонту на угол $h/2$ может быть разворот азимутальных осей отражающих элементов относительно его проектного положения. Разворот азимутальных осей отражающих элементов не вносит ошибок в азимутальные и радиальные места нулей при вертикальном положении щитов, но с увеличением угла наклона ошибка азимутального места нуля растет как $\Delta_\alpha(\nu) = \Delta \nu [1 - \cos(h/2)]$,

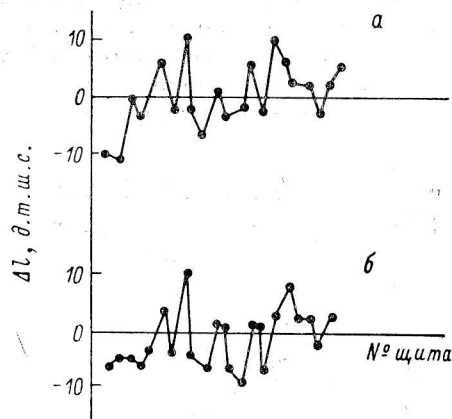


Рис. 2. Кривые разностей автоколлимационных и радиоастрономических мест нулей радиальных шкал в делениях точной шкалы сельсина (д. т. ш. с.).

a — радиоастрономическая юстировка по Солнцу, проведенная в июле—августе 1976 г., $h_\odot = 64^\circ$; b — радиоастрономическая юстировка по Луне, выполненная 25.01.1978, $h_\Delta = 60^\circ$, $\sigma = 1.1$ мм (1 д. т. ш. с. = 0.16 мм).

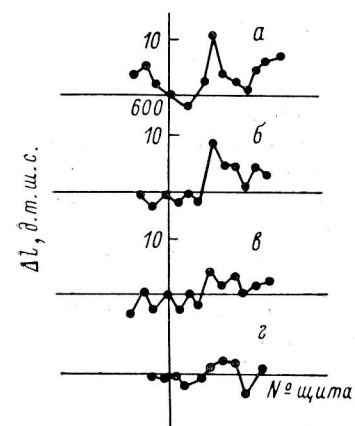


Рис. 3. Разности автоколлимационных и радиоастрономических мест нулей радиальных шкал для разных углов наклона отражающих элементов к горизонту.

Радиоастрономические юстировки выполнены по Солнцу и Луне (при подсчете σ данные для щита 604 отброшены как отскоки).

	1978	h_a	σ , мм
a	27.06	($h_\odot = 68^\circ$)	0.56
b	4.07	64.5	0.46
$в$	23.07	40	0.36
$г$	19.07	29	0.30

где $\alpha = h/2$ — угол наклона щита к горизонту [10]. При изучении системы азимутальных мест нулей была обнаружена корреляция $r=0.8$ между разворотами азимутальных осей, промеренных геодезическими методами, и разностью автоколлимационных и радиоастрономических азимутальных мест нулей, полученных из автоколлимационной и радиоастрономической юстировок по Солнцу в марте 1978 г.

После устранения разновысотности угломестных осей и разворотов азимутальных осей щитов исследуемой группы геодезическими методами

в июне—июле 1978 г. был проведен цикл юстировок по Солнцу ($h_{\odot} \approx 68^{\circ}$) и по Луне ($h_{\text{л}} \approx 29-64^{\circ}$).

Результаты юстировок показали, что выполненные геодезические работы по устранению разновысотности угломестных осей и разворотов азимутальных осей существенно улучшили кинематику конструкций отражающих элементов. Среднеквадратичное отклонение разностей автоколлимационных и радиоастрономических радиальных мест нулей для наклонов щитов над горизонтом ($h/2 \approx 14-34^{\circ}$) уменьшилось в два раза по сравнению с аналогичными измерениями, выполненными до устранения разновысотности и разворотов осей отражающих элементов $\sigma_1 = 1$ мм (из-

мерения в 1976 г. и в январе 1978 г.), $\sigma_2 \leq 0.5$ мм (измерения в июне—июле 1978 г.). Однако результаты сравнения радиоастрономических и автоколлимационных юстировок, выполненных в июне—июле 1978 г., показали, что влияние разновысотности и разворотов осей отражающих элементов было не полностью устранено, так как существует зависимость разности радиоастрономических и автоколлимационных радиальных мест нулей от угла наклона отражающих элементов (рис. 3). Среднеквадратичное отклонение разности радиоастрономических и

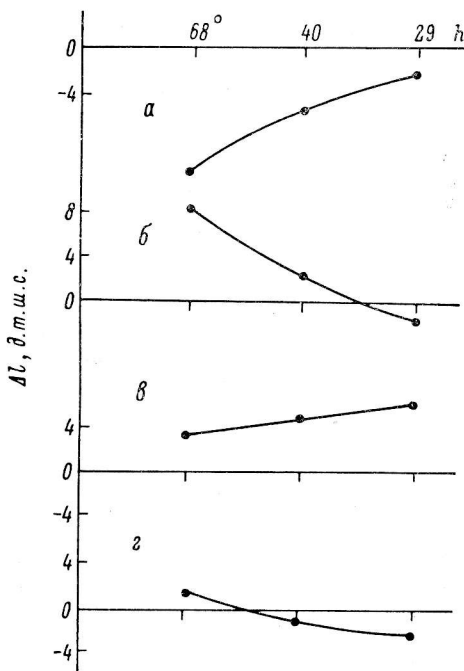


Рис. 4. Примеры хода разности автоколлимационных и радиоастрономических мест нулей радиальных шкал юстируемых пар.

	№	σ , мм
a	603—604	0.73
б	604—605	0.80
в	606—607	0.19
г	608—609	0.24

автоколлимационных радиальных мест нулей изменяется с высотой от $\sigma = 0.52$ мм для $h_{\odot} \approx 68^{\circ}$ до $\sigma \approx 0.3$ мм для $h_{\text{л}} = 28^{\circ}$. Для некоторых отражающих элементов эта разность на высоких углах достигает десяти точных делений, т. е. 1.5—2 мм (рис. 4). Сравнение кривых, представленных на рис. 3, наводит на мысль о возможности существования квазипостоянной составляющей в разностях радиоастрономических и автоколлимационных радиальных мест нулей с $\sigma = 0.3$ мм, по крайней мере, в интервале высот наблюдения $h_{\text{л}}$ от 29 до 68° . Для выяснения природы квазипостоянной составляющей необходимо провести цикл радиоастрономических и автоколлимационных юстировок на низких углах ($h < 28^{\circ}$), что предполагается сделать в ближайшее время.

Выводы. Эксперименты, связанные с исследованием отражающих элементов 13-й группы Северного сектора РАТАН-600 (январь—июль 1978 г.), показали:

1) удовлетворительное качество радиоастрономических юстировок радиальных шкал отражающих элементов по Луне;

2) целесообразность устранения разновысотности угломестных осей и разворотов азимутальных осей конструкций отражающих элементов главного зеркала РАТАН-600 геодезическими методами ($\sigma_1/\sigma_2 \approx 2$);

3) наличие кинематического эффекта с высотой в местах нулей радиальных шкал ($\sigma = 0.3-0.5$ мм при $h = 28-68^{\circ}$), который у отдельных отражаю-

щих элементов достигает 1,5—2 мм, что, по-видимому, связано с неустраиваемыми «ошибками нивелировки» и разворотами азимутальных осей;

4) возможность существования квазипостоянной составляющей с $\sigma=0.3$ мм в разностях радиальных мест нулей, полученных из радиоастрономических и автоколлимационных юстировок.

Автор выражает благодарность научному руководителю Г. Б. Гельфрейху за постановку задачи и обсуждение результатов работы.

Список литературы

1. Гельфрейх Г. Б. Радиоастрономический способ юстировки антенны переменного профиля. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 139—148.
2. Гельфрейх Г. Б., Голубчина О. А. Исследование и юстировка Большого пулковского радиотелескопа радиоастрономическим способом. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1972, 4, с. 177—191.
3. Гельфрейх Г. Б., Голубчина О. А. Радиоастрономическая юстировка РАТАН-600. — Сообщ. САО, 1978, 23, с. 5.
4. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. М., «Сов. радио», 1976. 221 с.
5. Голубчина О. А., Зверев Ю. К., Стоцкий А. А., Ходжамухамедов. Сравнение автоколлимационного и радиоастрономического методов юстировки Большого пулковского радиотелескопа. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1973, 5, с. 157.
6. Кузьмин А. Д., Саломонович А. Е. Радиоастрономические методы измерений параметров антенн. М., «Сов. радио», 1964. 131 с.
7. Астрономический ежегодник, 1978. Л.
8. Голубчина О. А. Влияние смещения центра тяжести радиоизлучения Солнца на радиоастрономическую юстировку АПП. — Сообщ. САО, 1978, 22, с. 61.
9. Стоцкий А. А., Шиврис О. Н. Юстировка и установка антенны переменного профиля с помощью фазового компаратора. — Изв. ГАО, 1970, 185, с. 236.
10. Зверев Ю. К. Отчет 1978 г. (САО АН СССР, РАТАН-600).