

## СРАВНЕНИЕ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОГО И РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОГО МЕТОДОВ ЮСТИРОВКИ БОЛЬШОГО ПУЛКОВСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА

*О. А. Голубчина, Ю. К. Зверев,  
А. А. Стоцкий, Н. Ходжамухаммедов \**

Приводятся результаты сравнения автоколлимационного и радиоастрономического методов юстировки Большого пулковского радиотелескопа. Показано, что одной из основных причин обнаруженного различия значений мест нулей радиальных шкал отражающих элементов радиотелескопа является разновысотность угломестных осей этих элементов, учет которой — путем введения поправок в значения мест нулей радиальных шкал — при наблюдениях радиоисточников значительно улучшает радиоизображение.

The results are given of a comparison of the autocollimation adjustment method with the radio-astronomical one of the Large Pulkovo Radio Telescope. A major cause of the detected differences in zero places of the radial scales of the radio-telescope reflecting elements is shown to be the differences in height of elevation axes of the elements. The allowance made for these differences by correcting the zero places of the radial scales improves significantly the radio image in observations of radio sources.

В настоящее время для определения мест нулей (МО) отсчетно-установочных шкал отражающих элементов Большого пулковского радиотелескопа (БПР) разработаны и применяются радиоастрономический и автоколлимационный методы юстировки [1—3]. В обоих методах при определении положения отражающего элемента (щита) используется вся его отражающая поверхность, а не отдельные реперные точки, как в других способах юстировки [4, 5]. Это позволяет получать большую эффективную отражающую поверхность главного зеркала (антенны переменного профиля — АПП). Поскольку в обоих случаях положение щитов определяется по одной и той же отражающей поверхности, то значения МО отсчетно-установочных шкал, определенные радиоастрономическим и автоколлимационным методами, в принципе должны быть одинаковыми. Однако на практике оказалось, что между значениями МО, определенными этими методами, имеется различие. Для выяснения причин расхождения результатов юстировок было проведено специальное исследование, результаты которого приводятся ниже.

В первую очередь было обращено внимание на то, что результаты юстировки разными методами могут различаться вследствие разновысотности угломестных осей щитов БПР, т. е. вследствие того, что угломестные оси щитов не лежат в одной горизонтальной плоскости (имеют разную высоту, или отметку), потому что юстировка радиотелескопа указанными методами производится при различном положении щитов: автоколлимационным — при вертикальном положении ( $h=0$ ), радиоастрономическим —

\* Сотрудник Физико-технического института АН ТуркмССР.

при наклонном — щиты наклоняются на угол примерно  $h/2$  ( $h \neq 0$ , здесь  $h$  — высота радиостанции в момент юстировки щита). При наличии разброса отметок угломестных осей поворот щита по углу места вызывает смещение его эффективной отражающей поверхности по радиусу на величину  $\Delta l_{iH}$  [4, 6]:

$$\Delta l_{iH} = \Delta H_i \operatorname{tg}(h_i/2), \quad (1)$$

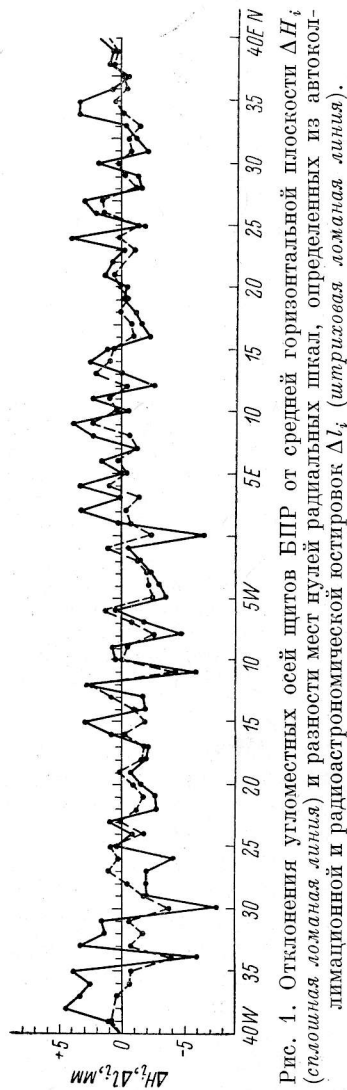


Рис. 1. Отклонения угломестных осей щитов БПР от средней горизонтальной плоскости  $\Delta H_i$  (сплошная ломаная линия) и разности мест нулей радиальных шкал, определенных из автоколлимационной и радиоастрономической юстировок  $\Delta l_i$  (штриховая ломаная линия).

где  $\Delta H_i$  — отклонение отметки угломестной оси щита  $i$  от средней горизонтальной плоскости,  $h_i/2$  — угол наклона щита. Поэтому между разностями значения МО радиальных шкал, определенных автоколлимационным ( $h=0$ ) и радиоастрономическим ( $h \neq 0$ ) методами, и отклонениями угломестных осей щитов по высоте должна существовать линейная зависимость. Для установления такой зависимости сравнивались значения МО радиальных шкал, определенные автоколлимационным методом 24 мая 1971 г. и радиоастрономическим методом 2 июня 1971 г., с привлечением данных нивелировки выдвигаемых балок отражающих элементов БПР, выполненной 14—15 июня 1971 г. Определенные условные отметки выдвигаемых балок производилось нивелиром НА-1. Выдвигаемые балки нивелировались из центра БПР примерно через каждые пять щитов. Отсчеты брались по рейке с подвижной маркой, которая перемещалась по вертикали на величину, кратную 5 мм. Среднеквадратичная ошибка определения условных отметок выдвигаемых балок (полученных как средние из прямого и обратного ходов), оцененная по разностям двойных измерений, оказалась равной  $\pm 0.3$  мм. Отметки выдвигаемых балок промежуточных щитов определялись от опорных щитов с коротких расстояний. На рис. 1 сплошной ломаной линией показано положение щитов по высоте, когда антенна установлена на Солнце ( $h_{\odot} \approx 53^{\circ}30'$ ). Разброс отметок выдвигаемых балок характеризуется среднеквадратичной ошибкой, равной  $\pm 2.58$  мм. Штриховой ломаной линией показаны значения разностей МО радиальных шкал,

определенных автоколлимационным и радиоастрономическим методами. Эти разности характеризуются среднеквадратичной ошибкой  $\pm 1.34$  мм. Как видно из рис. 1, обе ломаные линии близки по форме, но не настолько, как это было бы при наличии прямой зависимости между разностями МО и разновысотностью угломестных осей. Однако это не исключает статистической связи между ними. На рис. 2 представлено поле точек с координатами  $\Delta l_i$  и  $\Delta H_i$  ( $\Delta l_i$  — разность МО радиальных шкал,  $\Delta H_i$  — отклонение отметок выдвигаемых балок щитов от средней горизонтальной плоскости). Точки ( $\Delta l_i$  и  $\Delta H_i$ ) группируются вдоль определенного направления, что свидетельствует о наличии статистической связи между величинами  $\Delta l_i$  и  $\Delta H_i$ . Коэффициент корреляции  $r$

между этими величинами равен  $+0.66$  при среднеквадратичной ошибке его определения  $m_r = \pm 0.06$ . Так как  $r \gg 3 m_r$ , то связь между величинами  $\Delta l_i$  и  $\Delta H_i$  можно считать установленной. Наклон прямой (штриховая линия на рис. 2), вокруг которой группируются точки, вычисленный по способу наименьших квадратов, равен  $+0.35$ . При наличии линейной зависимости между величинами  $\Delta l_i$  и  $\Delta H_i$ , определяемой формулой (1), наклон прямой должен быть равен  $+0.56$ . Наличие статистической связи, а не линейной зависимости, может быть объяснено следующими причинами:

1. В процессе нивелирования определялись отметки выдвижных балок отражающих элементов, а не угломестных осей. Положение угломестных

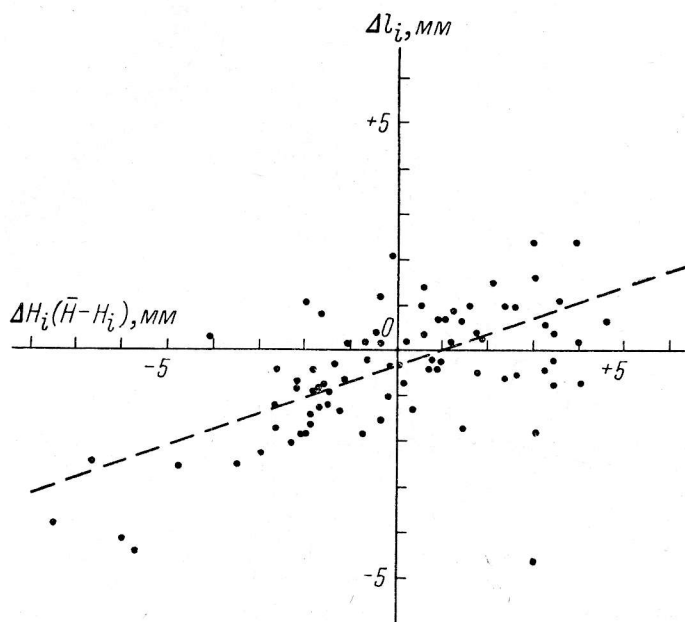


Рис. 2. Определение наличия статистической связи между величинами  $\Delta l_i$  и  $\Delta H_i$ .

осей по высоте относительно отметок выдвижных балок характеризуется среднеквадратичной ошибкой порядка  $\pm 1.0$  мм.

2. Само определение отметок выдвижных балок выполнено не без ошибок.

3. Влияние люфтов механизмов отражающих элементов при вертикальном и наклонном положениях щитов проявляется по-разному.

4. Несмотря на высокую внутреннюю сходимость результатов юстировки радиоастрономическим и автоколлимационным методами, каждому методу присущи свои особенности, связанные с методикой юстировки, которые могут привести к различию значений МО. В частности, следует отметить, что при радиоастрономической и автоколлимационной юстировках до сих пор использовались разные облучатели.

Основным критерием качества отражающей поверхности главного зеркала БПР являются результаты радиоастрономических наблюдений. На рис. 3 приведены кривые прохождения планеты Юпитер через диаграмму направленности радиотелескопа. Сплошной линией показана сумма шести кривых прохождения планеты 11, 12, 14—17 мая 1971 г. В указанные дни наблюдения антенна была выставлена по данным автоколлимационной юстировки, выполненной 8—9 мая 1971 г. Штриховой ли-

нией показана сумма шести кривых прохождения 14, 18, 19, 21—23 апреля 1971 г. В эти дни наблюдения антенна была выставлена по данным радиоастрономической юстировки, проведенной 7 и 16 апреля 1971 г. Средняя высота планеты Юпитер над горизонтом в момент наблюдения составляла  $10^{\circ}08'$ , средняя высота Солнца в момент радиоастрономической юстировки была  $38^{\circ}32'$ . Автоколлимационная юстировка выполнялась при положении щитов, соответствующем высоте радиосточника  $h=0^{\circ}$ . Как видно из рис. 3, переход от значений МО, определенных радиоастрономическим методом, к МО, определенным автоколлимационным методом, привел к увеличению температуры в 1.63 раза. Это, по-видимому, является следствием большого различия высот наблюдаемого радиосточ-

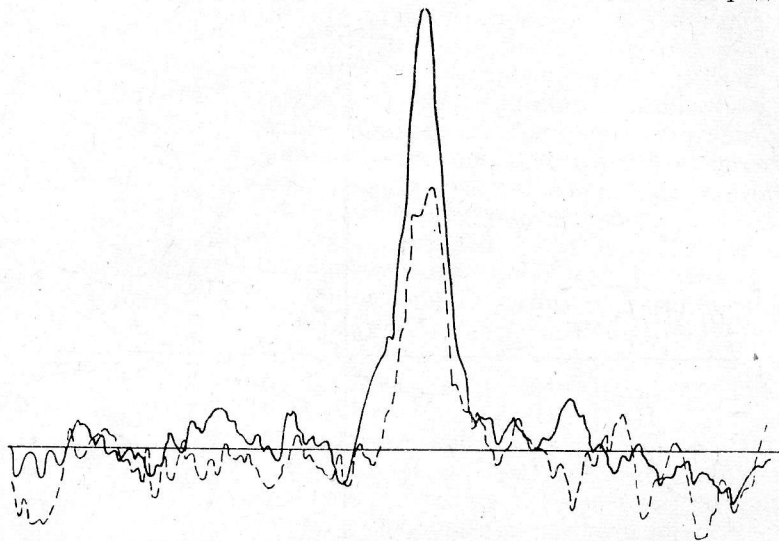


Рис. 3. Суммарные кривые прохождения планеты Юпитер через диаграмму направленности БПР.

Сплошная линия — радиоизображение, полученное при автоколлимационной юстировке, штриховая линия — при радиоастрономической юстировке антенны.

ника ( $h_* = 10^{\circ}08'$ ) и радиосточника, по которому была проведена радиоастрономическая юстировка ( $h_{\odot} = 38^{\circ}32'$ ). При наблюдении высоких радиосточников, наоборот, имеет место значительное улучшение качества радиоизображения при использовании радиоастрономических значений МО по сравнению с автоколлимационными.

Для выяснения вопроса, в какой степени учет разновысотности угломестных осей отражающих элементов может повлиять на качество отражающей поверхности БПР, 16 и 17 июня 1971 г. были проведены наблюдения Солнца с выставлением антенны по данным автоколлимационной юстировки 24 мая 1971 г.: 16 июня — без учета, 17 июня — с учетом разновысотности осей. В последнем случае в значения МО радиальных шкал, определенные из автоколлимационной юстировки, вводились поправки

$$\delta l_{iH} = (\bar{H} - H_i) \operatorname{tg} \beta_i, \quad (2)$$

где  $H_i$  — условные отметки выдвижных балок щитов,  $\bar{H}$  — условная отметка средней горизонтальной плоскости,  $\beta_i$  — углы наклона щитов.

После введения поправок среднеквадратичная ошибка, характеризующая разность значений МО из двух методов юстировки, снизилась с  $\pm 1.34$  мм до  $\pm 1.11$  мм. На рис. 4 приведены записи Солнца 16 июня (сплошная линия) и 17 июня 1971 г. (штриховая линия). Введение поправок за разновысотность угломестных осей привело к уменьшению уровня

«подложки» в 1.84 раза. В то же время возросла температура на 14%. При наблюдении Солнца с использованием радиоастрономических зна-

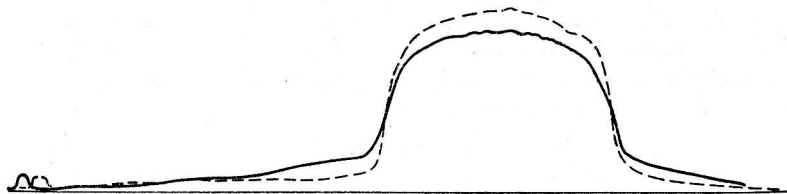


Рис. 4. Радиоизображение Солнца.

Сплошная линия — наблюдение при автоколлимационной юстировке, штриховая линия — наблюдение при автоколлимационной юстировке с введением поправок за разновысотность угломестных осей.

чений МО радиальных шкал уровень «подложки» еще ниже (рис. 5). В таблице приведены значения уровня «подложки» (в произвольных единицах) по результатам наблюдений Солнца 15—18 июня 1971 г.

Дата (1971 г.)	Уровень «подложки», усл. ед.	Данные для установки антенны БПР
15 VI	0.06	Радиоастрономическая юстировка
16 VI	0.20	Автоколлимационная юстировка
17 VI	0.12	Автоколлимационная юстировка с учетом разновысотности осей
18 VI	0.05	Радиоастрономическая юстировка

Другим критерием качества отражающей поверхности является форма фокального пятна. Для получения фокального пятна был использован автоколлимационный метод. Измерения проводились на волне 8 мм. Отражающие элементы БПР были выставлены на окружность радиусом ~70 м в вертикальном положении. В центре этой окружности был установлен малый облучатель БПР. Путем перемещения этого облучателя в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси антенны были получены поперечные сечения фокального пятна. На рис. 6 показаны эти сечения при установке щитов по данным автоколлимационной (рис. 6, а) и радиоастрономической (рис. 6, б) юстировок. После установки щитов по данным радиоастрономической юстировки с учетом разновысотности угломестных осей форма фокального пятна значительно улучшилась (рис. 6, в). Дальнейшее улучшение поперечного сечения фокального пятна было получено при оптимизации радиального положения облучателя (рис. 6, г). Тот факт, что исправленные за разновысотность угломестных осей результаты радиоастрономической юстировки дают в конечном итоге форму фокального пятна даже лучшую, чем при автоколлимационной юстировке, по-видимому, связан с ошибками вторичного зеркала (облучателя): радиоастрономическая юстировка и исследование формы фокального пятна произво-

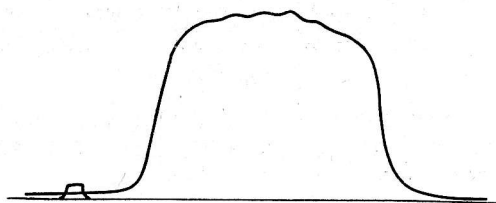


Рис. 5. Радиоизображение Солнца, полученное при радиоастрономической юстировке.

дильсь с помощью одного и того же облучателя, а автоколлимационная юстировка — с помощью другого.

Имея в своем распоряжении результаты сравнения двух методов юстировки и данные о положении по высоте угломестных осей щитов БПР, можно попытаться рассчитать, каким будет улучшение или ухудшение радиоизображения наблюдаемого источника.

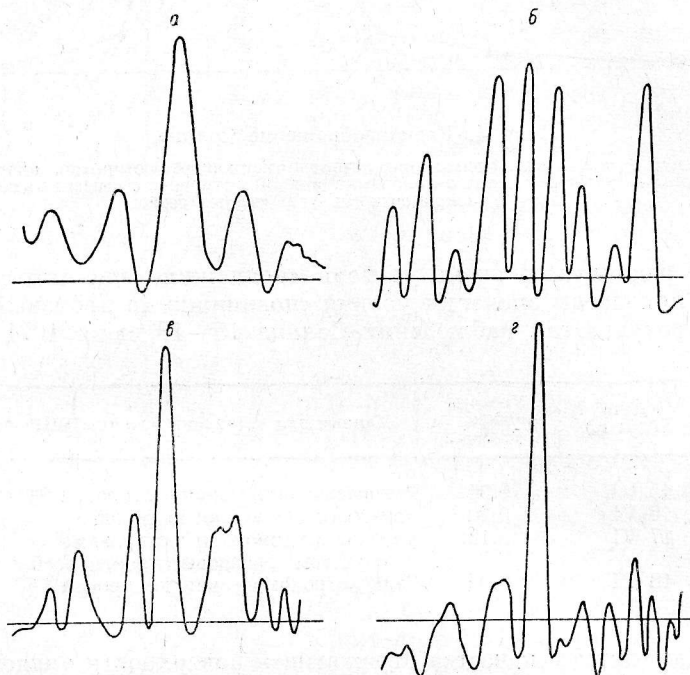


Рис. 6. Поперечные сечения фокального пятна.

а — при автоколлимационной юстировке, б — при радиоастрономической юстировке, в — при радиоастрономической юстировке с введением поправок за разновысотность угломестных осей, г — при радиоастрономической юстировке с введением поправок за разновысотность угломестных осей после оптимизации положения облучателя по радиусу.

Как показано в [6], ошибка положения щита по радиусу  $\Delta R$  при наклоне щита на угол  $h/2$  приводит к искажению синфазной поверхности на величину

$$\Delta l_R = 2\Delta R \cos^2(h/2), \quad (3)$$

а смещение угломестной оси щита по вертикали на величину  $\Delta H$  искажает синфазную поверхность на величину

$$\Delta l_H = \Delta H \sin h. \quad (4)$$

При наличии разновысотности угломестных осей и юстировке АПП радиоастрономическим методом по источнику с высотой над горизонтом  $h_\odot$  значения МО радиальных шкал\* получаются с ошибкой  $\Delta R =$

\* Под МО радиальных шкал, в соответствии с практикой эксплуатации БПР, мы понимаем отсчеты по радиальным шкалам, при которых щиты установлены на исходную окружность в вертикальном положении [4].

$= -\Delta H \operatorname{tg}(h_{\odot}/2)$ . При установке антенны на радиоисточник с высотой  $h_*$  искажение синфазной поверхности в соответствии с (3) и (4) будет равно

$$\Delta l_{\text{pa}} = -2\Delta H \operatorname{tg}(h_{\odot}/2) \cos^2(h_*/2) + \Delta H \sin h_*. \quad (5)$$

Очевидно, что при  $h_* = h_{\odot}$   $\Delta l_{\text{pa}} = 0$ , так как при юстировке по источнику с высотой, равной высоте наблюдаемого радиоисточника все ошибки автоматически компенсируются. При автоколлимационной юстировке разновысотность угломестных осей не влияет на точность определения МО радиальных шкал (так как  $h_{\text{ак}} = 0^\circ$ ), поэтому при наблюдении радиоисточника с высотой  $h_*$  синфазная поверхность будет искажена на величину

$$\Delta l_{\text{ак}} = \Delta H \sin h_*. \quad (6)$$

Разность искажений синфазных поверхностей при юстировке разными методами будет равна

$$\Delta l = \Delta l_{\text{ак}} - \Delta l_{\text{pa}} = 2\Delta H \operatorname{tg}(h_{\odot}/2) \cos^2(h_*/2). \quad (7)$$

Выражения (5) и (6) были использованы для вычисления среднеквадратичной ошибки отражающей поверхности. Падение усиления антенны при наличии случайных ошибок фазы в раскрыве выражается отношением [7]

$$G/G_0 = e^{-k^2\sigma^2},$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\sigma^2$  — дисперсия фазовых ошибок (в линейной мере), закон распределения предполагается нормальным.

Для точечных радиоисточников, наблюдаемых с установкой щитов по данным автоколлимационной и радиоастрономической юстировок, можно написать

$$G_{\text{ак}}/G_0 = e^{-k^2\sigma_{\text{ак}}^2}; \quad G_{\text{pa}}/G_0 = e^{-k^2\sigma_{\text{pa}}^2}.$$

Тогда отношение температур радиоисточника будет представлено в виде

$$G_{\text{ак}}/G_{\text{pa}} = e^{-k^2(\sigma_{\text{ак}}^2 - \sigma_{\text{pa}}^2)}. \quad (8)$$

При значениях  $\sigma_{\Delta H} = 2.58$  мм,  $h_{\odot} = 38^\circ 32'$ ,  $h_* = 10^\circ 08'$  величина  $G_{\text{ак}}/G_{\text{pa}}$  составляет 1.17, т. е. наблюдение радиоисточника с высотой над горизонтом  $h_*$  (Юпитер) с использованием автоколлимационных МО радиальных шкал должно привести к увеличению температуры (по сравнению с радиоизображением, полученным при радиоастрономической юстировке) на 17%. На самом деле при экспериментальной проверке температура увеличилась на 63%.

Поскольку Солнце является протяженным радиоисточником, то улучшение его радиоизображения проще оценивать по уменьшению уровня «подложки». В этом случае

$$T_1/T_2 = (1 - e^{-k^2\sigma_1^2}) : (1 - e^{-k^2\sigma_2^2}), \quad (9)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — уровни «подложки» без учета и с учетом разновысотности угломестных осей,  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  — соответствующие им дисперсии синфазной поверхности. При  $h_{\odot} = 52^\circ 22'$ ,  $h_* = 53^\circ 36'$ ,  $\sigma_1 = 2.14$  мм,  $\sigma_2 = 1.77$  мм уровень «подложки» должен уменьшиться в 1.34 раза. При экспериментальной проверке произошло уменьшение в 1.84 раза.

Таким образом, и расчеты и эксперименты показывают, что учет разновысотности угломестных осей даже в первом приближении (о положении угломестных осей, как указывалось выше, мы судили по положению выдвинутых балок) при значительных различиях высот радиоисточников,

по которым проводились юстировки и наблюдения, приводит к ощутимому улучшению радиоизображения. Количественное различие расчетных и экспериментальных результатов может быть связано со следующими обстоятельствами.

1. В формулах (8) и (9) значения  $\sigma$  характеризуют систему случайных величин, подчиняющихся нормальному закону распределения. На рис. 7 показано распределение отклонений отметок выдвижных балок от средней горизонтальной плоскости. Из гистограммы видно, что больших отклонений, как правило, больше, чем при нормальном распределении, поэтому учет их должен приводить к улучшению радиоизображения, более значительному, чем расчетное.

2. При сравнении результатов наблюдений планеты Юпитер, полученных при автоколлимационной и радиоастрономической юстировках,

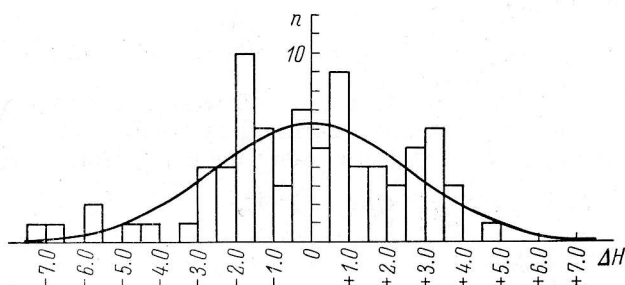


Рис. 7. Распределение отклонений угломестных осей от средней горизонтальной плоскости.

в расчете было принято, что разброс положений угломестных осей по вертикали характеризуется среднеквадратичной ошибкой  $\pm 2.58$  мм. Однако эта величина относится к установке антенны на Солнце, а при изменении формы образующей отражающей поверхности изменяются и отклонения щитов от средней отметки. Это связано с тем, что при выдвижении щита к центру антенны его отметка уменьшается.

3. Не учитывались ошибки облучателей. Так как при наблюдениях и при автоколлимационной юстировке использовались разные облучатели, то ошибки отражающей поверхности облучателей могли влиять на несоответствие расчетных и экспериментальных результатов.

Таким образом, одной из основных причин различия между значениями МО радиальных шкал щитов БПР, обнаружившегося при сравнении автоколлимационного и радиоастрономического методов юстировки, является разновысотность угломестных осей. Поэтому при наблюдении радиоисточников с высотами, отличными от высот радиоисточников, по которым производились юстировки, в значения МО радиальных шкал необходимо вводить соответствующие поправки. Имея в виду, что отметки угломестных осей меняются при радиальных перемещениях щитов, получим следующие выражения для значений МО радиальных шкал при установке антенны на радиоисточник с высотой над горизонтом  $h_*$ :

для автоколлимационной юстировки

$$l_{*i} = l_{0i} + (\bar{H}_* - H_{*i}) \operatorname{tg} \beta_{*i}, \quad (10)$$

для радиоастрономической юстировки

$$l_{*i} = l_{\odot i} + (H_{\odot i} - \bar{H}_{\odot}) \operatorname{tg} \beta_{\odot i} - (H_{*i} - \bar{H}_*) \operatorname{tg} \beta_{*i}. \quad (11)$$



Здесь  $l_i$  — места нулей радиальных шкал,  $i$  — номер щита,  $\beta$  — угол наклона щита,  $H_i$  — условные отметки угломестных осей щитов; индексы «О», «\*» и « $\odot$ » соответствуют высотам  $h=0$ ,  $h=h_*$ ,  $h=h_{\odot}$ .

#### Литература

1. Н. Ходжамухаммедов, А. А. Стоцкий, В. Н. Боровик, Радиотехника и электроника, 2, 257, 1970.
2. Г. Б. Гельфрейх, О. А. Голубчина, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 4, 177, 1972.
3. Г. Б. Гельфрейх, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 188, 139, 1972.
4. Ю. К. Зверев, А. Н. Копылов, О. Н. Шиврис, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 185, 219, 1970.
5. А. А. Стоцкий, О. Н. Шиврис, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 185, 236, 1970.
6. Г. Б. Гельфрейх и др., Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 188, 123, 1972.
7. Р. К. Хансен. Сканирующие антенные системы СВЧ. Изд-во «Советское радио», М., 1965, стр. 107.

Декабрь 1971 г.