

**АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ МЕТОД
УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОСИ
РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ
ПРЯМЫХ ВОСХОЖДЕНИЙ РАДИОИСТОЧНИКОВ**

Г. А. Пинчук, А. А. Стоцкий

Описан радиотехнический метод ориентирования главного зеркала и установки облучателя радиотелескопа РАТАН-600 относительно местной геодезической сети, обеспечивающий наведение радиотелескопа в плоскость меридиана со среднеквадратичной ошибкой, не превышающей $1''$.

A radio-engineering method for orientation of the main antenna and placing the feed of the radiotelescope RATAN-600 relative to the local geodesic network is described. The network provides putting the radiotelescope in the meridian plane with a mean square error no higher than $1''$.

Одним из основных режимов работы радиотелескопа РАТАН-600 является режим пассажного инструмента, позволяющий легко производить измерения прямых восхождений радиоисточников. Благодаря особенностям конструкции радиотелескопа такие измерения можно производить с весьма высокой для антенн со сплошной апертурой точностью. Предварительные оценки показали, что может быть достигнута абсолютная точность единичного измерения порядка $1''$ [1—3].

Ниже описывается метод установки электрической оси антенны, разработанный для практической реализации измерений с такой точностью и опробованный на первой очереди (северный сектор) радиотелескопа РАТАН-600. В основу этого метода положен автоколлимационный способ юстировки антенны [4], позволяющий с помощью наземного источника радиоизлучения осуществить с необходимой точностью ориентирование главного зеркала и установку облучателя относительно местной геодезической сети радиотелескопа.

Ориентирование главного зеркала. Ориентирование главного зеркала радиотелескопа осуществляется в процессе его юстировки автоколлимационным методом. Для этого перед началом юстировки вертикальная фокальная ось облучателя (мнимая фокальная ось вторичного зеркала) совмещается с центром опорной геодезической сети радиотелескопа. Делается это следующим образом.

В продольном направлении (вдоль меридиана) облучатель устанавливается на рельсовом пути в положение, при котором мнимая фокальная плоскость вторичного зеркала проходит через центральный плановый геодезический знак 0 (рис. 1). Этот плановый знак находится в центре радиотелескопа и является центром исходной окружности и началом полярной системы координат радиотелескопа [5]. Совмещение фокальной плоскости с плановым знаком 0 осуществляется с помощью специального оптического отвеса, установленного на облучателе. Ось оптического отвеса лежит в мнимой фокальной плоскости вторичного зеркала. Вертикальное положение оси отвеса устанавливается с помощью имеющихся на облучателе уровней.

Затем путем поперечного перемещения каретки с установленными на нем первичными рупорными облучателями производится совмещение с плановым знаком 0 (т. е. с меридианом радиотелескопа) фокальной оси облучателя радиотелескопа. Для этого используется автоколлимационный метод, состоящий в следующем. Сигнал, излучаемый облучателем, отра-

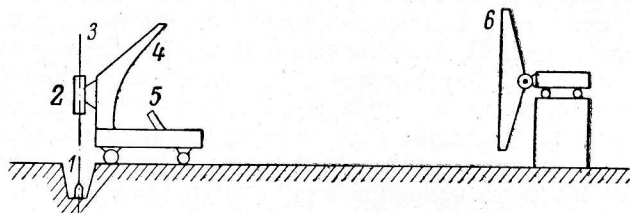


Рис. 1. Установка облучателя при автоколлимационной юстировке антенны.

1 — центральный геодезический знак; 2 — оптический отвес; 3 — мнимая фокальная ось облучателя; 4 — вторичное зеркало; 5 — первичный рупорный облучатель; 6 — щиты главного зеркала.

жается от двух установленных вертикально на исходной окружности щитов главного зеркала (525 и 675) и принимается на тот же облучатель. Каретка устанавливается так, чтобы первичный облучатель находился в середине центрального интерференционного максимума отраженного сигнала. Щиты 525 и 675 расположены симметрично по отношению к меридиану радиотелескопа (проходящему через середину щита 600) под углом $\pm 30^\circ$ к нему (рис. 2). Таким образом, облучатель (его мнимая фокальная ось) оказывается установленным в меридиан радиотелескопа.

Выбор в качестве опорных щитов 525 и 675 обусловлены тем, что они расположены над плановыми геодезическими знаками 11 и 1, так что положение этих щитов на исходной окружности контролируется по знакам опорной геодезической сети.

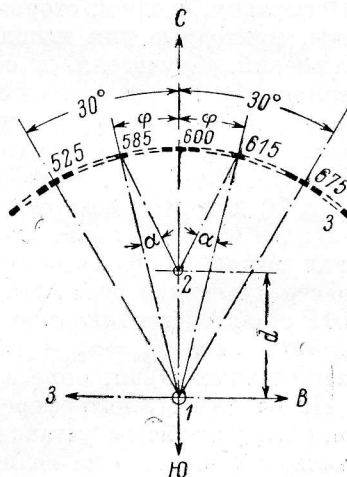


Рис. 2. Расположение опорных щитов.

1 — центральный геодезический знак — положение облучателя при юстировке и при наблюдении в зенит; 2 — положение облучателя при наблюдении низких источников; 3 — щиты, образующие главное зеркало.

После совмещения фокальной оси облучателя с центром опорной геодезической сети проводится обычная автоколлимационная юстировка главного зеркала радиотелескопа, т. е. определяются отсчеты радиальных, азимутальных и угломестных отсчетных устройств щитов, при которых щиты, образующие главное зеркало, находятся в исходном положении (вертикально на исходной окружности).

При наблюдении радиоисточников щиты главного зеркала устанавливаются в рабочее положение, отличное от исходного. Установка каждого щита в рабочее положение осуществляется независимо от других щитов, так что ошибки отражающей поверхности, которые могут возникнуть при переводе главного зеркала радиотелескопа из исходного положения в рабочее, имеют масштаб, определяемый горизонтальным размером щита (2 м вдоль исходной окружности) и статистически независимы.

Поэтому общая ориентация главного зеркала относительно опорной геодезической сети при переводе его из исходного положения в рабочее практически не меняется.

Установка облучателя. Для установки облучателя в меридиан в рабочем положении радиотелескопа применяется также автоколлимационный метод. Особенностью здесь является то, что в зависимости от угла места наблюдаемого источника облучатель может занимать на рельсовом пути различные положения. При наблюдении в зенит облучатель располагается в центре исходной окружности радиотелескопа, а при наблюдениях в направлениях, близких к горизонту, — примерно в 155 м от центра. Поэтому опорные щиты должны по азимуту устанавливаться так, чтобы отраженный от этих щитов сигнал попадал в облучатель, даже если облучатель не стоит в центре исходной окружности (рис. 2).

Величину азимутального разворота опорного щита α можно найти из простых геометрических соотношений:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\sin \varphi}{R/d - 1} \right), \quad (1)$$

где φ — угловое расстояние между центральным (600) и опорным щитами; R — радиус максимальной окружности радиотелескопа; d — расстояние от центра антенны до вертикальной фокальной оси облучателя.

Азимутальные механизмы допускают разворот щитов в пределах $\pm 7^\circ$. Из (1) следует, что в случае наблюдения низких источников, когда облучатель находится в 155 м от центра, в качестве опорных могут использоваться щиты с $\varphi \leq 6^\circ$, т. е. щиты с номерами $585 \leq N \leq 615$ (центральный щит сектора 600, угловые расстояния между соседними щитами $0^\circ 4'$).

Поскольку, с одной стороны, в качестве опорных щитов удобно иметь щиты, пригодные для использования в широком диапазоне возможных положений облучателя, а с другой стороны, для повышения точности установки облучателя желательно, чтобы расстояние между опорными щитами (база интерферометра) было максимально, в качестве опорных щитов при установке облучателя в рабочее положение использовались щиты 585 и 615. Для этих щитов были построены графики зависимостей $\alpha_{585}(d)$ и $\alpha_{615}(d)$ для всех возможных значений d .

После обычной подготовки главного зеркала для наблюдений (установка щитов в рабочее положение по таблицам) и установки облучателя в расчетную точку рельсового пути (на расстоянии d от центра) щиты 585 и 615 ставятся вертикально и разворачиваются по азимуту в положения $\alpha_{585} = \alpha_{585}^0 - \alpha$ и $\alpha_{615} = \alpha_{615}^0 + \alpha$ соответственно, где α_{585}^0 и α_{615}^0 — места нулей азимутальных шкал, определенные при юстировке.

По максимуму интерференционного сигнала облучатель автоколлимационного устройства устанавливается в меридиан, затем каретка с облучателями смещается на величину, равную расстоянию между автоколлимационным облучателем и облучателем радиометра. Таким образом, облучатель радиометра оказывается установленным в меридиан радиотелескопа.

Важно отметить, что при установке облучателя в рабочее положение сразу устанавливается в нужное положение мнимый фокус вторичного зеркала, так что нет надобности учитывать отдельно разворот вторичного зеркала, как это делалось при координатных измерениях на Большом пулковском телескопе [1, 2]

Анализ возможных ошибок. Наиболее существенными ошибками, приводящими к ошибке установки электрической оси радиотелескопа по рассматриваемой методке, являются следующие.

1. Ошибки установки опорных щитов по радиусу. Эти ошибки определяются точностью отсчетно-установочных устройств и имеют величину ± 0.5 дел. шкалы или ± 0.08 мм. Считая, что в этих пределах ошибки имеют равномерный закон распределения, получим для среднеквадратич-

ной величины значение 0.05 мм. Длина базы интерферометра, образуемого щитами 585 и 615, равна 60 м, следовательно, среднеквадратичная величина угловой азимутальной ошибки будет 0'25. Эта ошибка входит дважды: один раз при юстировке этих щитов и второй раз при использовании их в качестве опорных. Таким образом, ошибки установки опорных щитов по радиусу могут дать среднеквадратичную азимутальную ошибку положения линии перемещения облучателя антенны $\sigma_{обл} \approx 0'35$. База интерферометра, образованного опорными щитами 525 и 675, почти в 7 раз больше, чем для щитов 585 и 615, соответственно азимутальная ошибка положения главного зеркала, обусловленная ошибкой установки этих щитов, будет в 7 раз меньше: $\sigma_a \approx 0'05$.

2. Ошибки поверхности главного зеркала. Сюда относятся ошибки юстировки, случайные деформации вследствие подвижек фундаментов, ошибки обшивки зеркала и т. п. Кроме того, при перестановке щитов зеркала из исходного положения в рабочее возникают дополнительные ошибки, связанные с кинематическими ошибками механизмов и ошибками нивелирования щитов, которые тем больше, чем больше угол места наблюдаемого источника. Не все из этих ошибок изучены в настоящее время достаточно хорошо. Однако можно с уверенностью считать, что в сумме среднеквадратичная величина меньше $\varepsilon = 2$ мм.

Рассматривая главное зеркало радиотелескопа, образованное N щитами, как эквидистантную решетку длиной L , состоящую из N антенн с фазовыми ошибками ε , следуя [5], найдем стандартную величину флуктуаций направления электрической оси, обусловленных этими ошибками:

$$\sigma_{пов} = \frac{\sqrt{6} \varepsilon}{L \sqrt{N}}. \quad (2)$$

Обычно при координатных измерениях используется один сектор главного зеркала, состоящий из $N = 225$ щитов при общей длине $L = 400$ м. В этом случае при $\varepsilon < 2$ мм $\sigma_{пов} < 0'16$.

3. Ошибки отсчета поперечного смещения каретки с первичным облучателем. При существующей конструкции шкалы и отсчетного устройства каретка может устанавливаться с точностью $\Delta y = \pm 0.5$ мм, что при равномерном распределении ошибок в этом интервале приводит к среднеквадратичной ошибке $\sigma_y \approx 0.3$ мм.

В дальнейшем предполагается усовершенствовать устройство отсчета положения каретки, так что величина Δy будет, по-видимому, не более ± 0.1 мм.

Кроме рассмотренных выше случайных ошибок при установке электрической оси антенны могут иметь существенное значение следующие систематические ошибки.

4. Ошибка определения расстояний от опорных щитов 525 и 675 до центрального репера (0). Эта ошибка в основном определяется ошибкой определения расстояний от плановых геодезических знаков 1 и 11 до репера 0 и составляет для каждого из знаков величину около 1 мм. Поскольку знаки 0, 1 и 11 образуют равносторонний треугольник со сторонами 288 мм, то указанная линейная ошибка эквивалентна азимутальному развороту главного зеркала радиотелескопа на угол $A_s \approx 1''$.

5. Ошибка определения азимутальных углов опорных щитов 585 и 615. Среднеквадратичная величина этой ошибки может быть сделана не более 0'5. Эта ошибка приводит к ошибке положения линии перемещения облучателя $A_{обл} \approx 0'7$.

Совокупность перечисленных выше ошибок определяет общую ошибку описываемой методики установки электрической оси антенны.

При практических измерениях прямых восхождений необходимо учитывать также следующие ошибки [1, 3].

6. Случайная ошибка $\sigma_{ш}$, обусловленная ошибкой отсчета момента прохождения источника через диаграмму направленности радиотелескопа

из-за аппаратурных шумов. Для оценки величины $\sigma_{ш}$ можно воспользоваться формулой

$$\sigma_{ш} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Delta T_{ш}}{T_A} \Delta \theta, \quad (3)$$

где $\Delta T_{ш}$ — температурная флуктуационная чувствительность радиотелескопа при постоянной времени, равной времени прохождения источника через диаграмму направленности; T_A — антенная температура источника; $\Delta \theta$ — ширина диаграммы направленности.

7. Случайная ошибка $\sigma_{атм}$, обусловленная флуктуациями показателя преломления атмосферы. Величина этой ошибки в значительной степени зависит от метеоусловий. По порядку $\sigma_{атм} \leq 1''$ [3, 7].

8. Систематическая ошибка определения долготы места расположения радиотелескопа $\Delta \lambda$. В настоящее время долгота определена со среднеквадратичной ошибкой ± 0.1 .

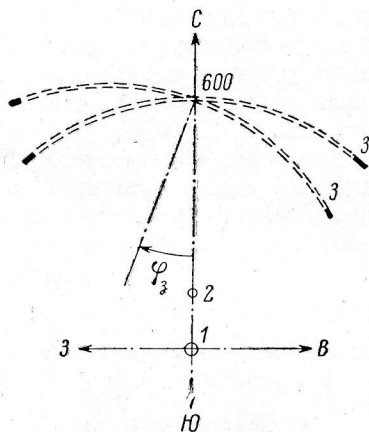


Рис. 3. Азимутальный разворот главного зеркала.

1 — центральный геодезический знак; 2 — положение облучателя; 3 — щиты, образующие главное зеркало.

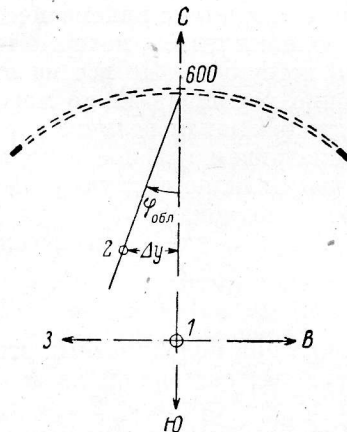


Рис. 4. Азимутальный разворот линии перемещения облучателя.

Условные обозначения см. на рис. 3.

9. Систематическая ошибка азимутальной ориентации радиотелескопа. Ее среднеквадратичная величина не превышает $A \approx 0.3$.

Для того чтобы определить общую ошибку измерений, рассмотрим основные эффекты, возникающие вследствие указанных выше ошибок, и их вклад в ошибку определения прямого восхождения $\Delta \alpha$:

а) азимутальный разворот главного зеркала (ошибки A_s, σ_s) на угол φ (рис. 3) приводит к ошибке определения прямого восхождения

$$\Delta \alpha_s = \varphi_s \eta \frac{1 + \cos h}{\sin(\varphi + h)}, \quad (4)$$

где h — угол места источника; φ — широта места расположения радиотелескопа (для РАТАН-600 $\varphi \approx 44^\circ$); η — коэффициент девиации, учитывающий влияние кубической фазовой ошибки на апертуре, его величина лежит обычно в пределах 0.8—1 [8];

б) азимутальный разворот линии перемещения облучателя $\varphi_{обл}$ (рис. 4, ошибки $\sigma_{обл}, A_{обл}$) приводит к ошибке [2]

$$\Delta \alpha_{обл} = -\varphi_{обл} \eta \frac{1}{\sin(\varphi + h)}; \quad (5)$$

в) поперечное смещение облучателя Δy (рис. 4, ошибка σ_y) приводит к ошибке.

$$\Delta \alpha_y = -\eta \frac{\Delta y}{P} \frac{1 + \cos h}{\sin(\varphi + h)}, \quad (6)$$

где P — параметр главного зеркала радиотелескопа (для РАТАН-600 его можно считать приблизительно равным 288 м);

г) угловое смещение диаграммы направленности φ_g в плоскости, проходящей через ось диаграммы направленности и линию восток—запад. Этот эффект является основным при ошибках $\sigma_{\text{пов}}$, $\sigma_{\text{ш}}$, $\sigma_{\text{атм}}$. Соответствующая ему ошибка определения прямого восхождения равна

$$\Delta\alpha_g = \varphi_g \frac{1}{\sin(\varphi + h)}; \quad (7)$$

д) азимутальный разворот радиотелескопа в целом A приводит к ошибке *

$$\Delta\alpha_A = \frac{A}{\sin \varphi + \cos \varphi \operatorname{tg} h}; \quad (8)$$

е) кажущееся смещение радиотелескопа в направлении восток—запад вследствие ошибки определения долготы места расположения радиотелескопа $\Delta\lambda$ приводит к ошибке

$$\Delta\alpha_\lambda = -\Delta\lambda. \quad (9)$$

Используя эти формулы, найдем, что среднеквадратичная ошибка единичного определения прямого восхождения радиоисточников при использовании описанного метода установки электрической оси антенны не должна превышать $0^{\circ}05$ (без учета $\sigma_{\text{ш}}$ и $\sigma_{\text{атм}}$). Систематическая ошибка метода (т. е. без учета $\Delta\alpha_A$ и $\Delta\alpha_\lambda$) может быть около $0^{\circ}2$. По мере накопления наблюдений опорных источников она может быть конечно учтена.

Результаты наблюдений. Для проверки описанной выше методики установки электрической оси радиотелескопа была проведена серия наблюдений опорных радиоисточников, координаты которых хорошо известны. Наблюдения проводились на волне 4 см с помощью радиометра с флуктуационной чувствительностью 0.008°K при постоянной времени 1 сек. Кривые прохождения записывались в память ЭВМ через каждые 0.1 сек. Моменты отсчета задавались службой точного времени радиотелескопа.

Момент прохождения источника через диаграмму направленности определялся методом равносигнальной зоны по нескольким (5—10) уровням с коррекцией за постоянную времени радиометра.

Источник	$T_A, ^{\circ}\text{K}$	h	n	$\overline{\Delta\alpha}$	σ_α	$\sigma_{\text{ш}}$
PKS 2203—18	0.68	27°30'	7	-0.05 ± 0.03	0.07	0.05
3C 120	1.58	51 29	4	-0.18 ± 0.03	0.07	0.04
3C 48	0.95	79 13	4	-0.23 ± 0.02	0.03	0.02
3C 84	14.2	87 36	5	-0.16 ± 0.01	0.02	0.01

Результаты наблюдений приведены в таблице, в которой для каждого из наблюдаемых источников указаны: антенная температура T_A , угол места h , количество наблюдений n , разность измеренного и расчетного значений прямого восхождения $\Delta\alpha$ с указанием среднеквадратичной ошибки, среднеквадратичная случайная ошибка единичного измерения σ_α .

При наблюдениях использовался метод диаграммной модуляции, так что при каждом наблюдении источник регистрировался дважды. Сравнение разности моментов прохождения одного и того же источника через основной облучатель и облучатель эквивалента позволило оценить погрешность отсчета $\sigma_{\text{ш}}$. Полученные таким образом значения $\sigma_{\text{ш}}$ также приведены

* Формулы (4)—(8) справедливы при малых ошибках, т. е. при φ_g , $\varphi_{\text{обл}}$, $\Delta y/P$, φ_g , $A \ll 1$.

в таблице. Они оказались близкими к величинам, вычисленным по формуле (3).

Результаты проведенных пробных наблюдений показывают, что собственная случайная ошибка метода не превышает полученной при предварительной оценке величины $0^{\circ}05$, а возможно, и меньше ее. На это указывает уменьшение σ_{α} по мере уменьшения $\sigma_{\text{ш}}$. Таким образом, можно сделать вывод, что применение автоколлимационного метода позволит устанавливать электрическую ось антенны со среднеквадратичной ошибкой менее $1''$.

Систематическая ошибка лежит в пределах ожидаемой величины. Ее зависимость от угла места источника может быть удовлетворительно объяснена соответствующей комбинацией рассмотренных выше компонент A_3 , A_{061} , A и $\Delta\lambda$.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. К. Звереву за полезные обсуждения ряда вопросов и выполнение необходимых геодезических измерений, а также А. Д. Дибжинову за помощь в измерениях.

Список литературы

1. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. Методы радиоастрономического использования РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 13—38.
2. Зверев Ю. К., Липовка Н. М. Повышение точности определения прямых восхождений радиосточников на Большом пулковском радиотелескопе. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1973, 5, с. 123—131.
3. Липовка Н. М., Стоцкий А. А. О точности измерения координат при помощи антенны переменного профиля. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 238—242.
4. Ходжамухаммедов Н., Стоцкий А. А., Боровик В. Н. Автоколлимационный метод юстировки и контроля антенны переменного профиля. — Радиотехника и электроника, 1970, 15, 2, с. 257—262.
5. Белевитин А. Г., Зверев Ю. К. Геодезические работы при строительстве и юстировке радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 114—118.
6. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М., «Сов. радио», 1970.
7. Стоцкий А. А. Тропосферные ограничения точности измерений координат космических источников. — Изв. вузов, Радиофизика, 1976, 19, № 11.
8. Сканирующие антенные системы С. В. Ч. М., «Сов. радио», 1966.