

УДК 523.164:53.08:621.396.67

ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫ РТ-70

*А. М. Асланян, А. Г. Гулян, А. Н. Козлов, В. Б. Тарасов,
Р. М. Мартиросян, В. А. Гришмановский, Б. Г. Сергеев*

Проведены измерения основных электрических характеристик антенны РТ-70 на волнах $\lambda = 3, 5, 6, 40$ см радиоастрономическими методами. По результатам измерений методом наименьших квадратов найдены аналитические выражения угломестных зависимостей характеристик антенны. Получено хорошее согласие между результатами экспериментальных исследований и теоретических расчетов. Установлен гомологический характер гравитационных деформаций зеркальной системы и выявлен близкий к оптимальному закон перемещения контррефлектора для компенсации фазовых искажений в раскрыве антенны.

1. Развитие радиоастрономии, радиолокационной техники, а также дальней космической связи тесно связано с созданием полноповоротных антенн все возрастающих размеров. Крупнейшей из действующих в мире антенн является полноповоротная антенна Боннского радиотелескопа с диаметром основного зеркала 100 м [1-4]. Осенью 1978 года было завершено строительство крупнейшей в Советском Союзе полноповоротной двухзеркальной антенны РТ-70 с диаметром основного зеркала 70 м. В настоящей статье приводятся результаты измерений основных электрических характеристик антенны РТ-70. Измерения проводились в период с 1978 по 1981 гг. на длинах волн $\lambda = 40, 6, 5$ и 3 см. Достигнутые точности изготовления поверхности зеркала антенны позволяют рассчитывать на то, что она должна быть достаточно эффективной вплоть до $\lambda = 8$ мм. Соответствующие измерения выполнены осенью 1981 г. Институтом космических исследований АН СССР.

2. Антенна РТ-70 построена по схеме двухзеркальной квазипараболической системы Грегори. Диаметр основного зеркала 70 м, а вспомогательного — 7 м. Поверхность основного зеркала образована из 1188 отдельных панелей, размеры которых меняются в пределах 2500×600 мм² ÷ 2500×2000 мм². Среднеквадратичная погрешность выставления панелей в расчетное положение, по результатам юстировочных работ, меняется от 0,6 мм в центре до 0,9 мм на крае зеркала.

Экспериментально установлено, что гравитационные деформации поверхности зеркала радиотелескопа являются гомологичными [5], поэтому для корректировки результирующего смещения фокальной точки предусмотрена возможность передвижения вспомогательного зеркала вдоль и поперек фокальной оси, а также его поворот в угломестной плоскости.

Вычислительно-управляющий комплекс позволяет управлять антенной по заданной программе в горизонтальной системе координат. Автоматически по заданной программе управляются также передвижения вспомогательного зеркала вдоль и поперек фокальной оси и его поворот в угломестной плоскости.

3. Исследования параметров антенны проведены радиоастрономическими методами [6,7]. В качестве эталонных были использованы ра-

диоисточники 3С123, 3С147, 3С218, 3С405, 3С461 и DR-21, данные о которых взяты в основном из [7,8].

Следует отметить, что характеристики выбранных эталонных радиоисточников известны с довольно высокой точностью. Так, погрешности экваториальных координат составляют всего несколько угловых секунд, а погрешности спектров не превосходят $\pm 4\%$.

4. С целью измерения параметров антенны были разработаны модуляционные радиометры на длинах волн 40, 6, 5 и 3 см. Радиометр на $\lambda = 6$ см является широкополосным приемником прямого усиления с входным усилителем на лампе бегущей волны. Остальные — радиометры супергетеродинного типа со смесительным входом без подавления зеркального канала.

При постоянной времени 1 с реализованы следующие значения флукутационной чувствительности (ΔT):

- на $\lambda = 40$ см $\Delta T = 0,3$ К при полосе пропускания 6 МГц,
- на $\lambda = 6$ см $\Delta T = 0,04$ К при полосе пропускания 300 МГц,
- на $\lambda = 5$ см и $\lambda = 3$ см $\Delta T = 0,2$ К при полосе пропускания УПЧ 30 МГц.

Кроме указанных разработан высокочувствительный радиометр на волне $\lambda = 5$ см с приемником прямого усиления, входным каскадом которого является вырожденный неохлаждаемый параметрический усилитель [9]. При постоянной времени 1 с и полосе пропускания 120 МГц реализована чувствительность 0,02 К.

Для калибровки радиометров использованы согласованные нагрузки, находящиеся при комнатной температуре, и низкотемпературные генераторы шума с эффективной шумовой температурой $T_T = (80 \pm \pm 0,9)$ К. Аттестации генераторов шума были проведены во ВНИИФТРИ. Калибровка радиометра на $\lambda = 3$ см проводилась методом прецизионного поглощающего аттенюатора [10].

5. Выполненные в настоящей работе исследования радиотелескопа РТ-70 сводятся к измерению угломестных зависимостей следующих его параметров:

- 1) шумовой температуры $T_{ш-а}(h)$;
- 2) эффективной площади $A_{эфф}$;
- 3) ширины главного лепестка диаграммы направленности (ДН) в главных ее сечениях $\theta_{0,5}$, $\varphi_{0,5}$;
- 4) уровней первых боковых лепестков ДН;
- 5) смещения электрической оси от геометрической в виде поправок к азимутальной и угломестной шкалам поворотных устройств.

В дециметровом диапазоне волн параметры антенны измерены в основном из записей прохождения эталонного источника через ДН неподвижной антенны, направленной в упрежденную расчетную точку траектории его движения.

Измерения в сантиметровом диапазоне волн проведены в режиме непрерывного сопровождения источника. Каждый цикл измерений включает:

- сопровождение источника по программе его движения;
- поиск положения ДН, соответствующего максимальной антенной температуре источника путем ввода дискретных поправок к программе сопровождения по азимуту и углу места;
- поиск оптимального положения контррефлектора (КР) вдоль фокальной оси антенны, соответствующего максимальной антенной температуре источника;
- отвод антенны от программы по одной координате (по углу места или по азимуту) в сторону движения источника, ее остановка по этой координате и запись прохождения источника через ДН (получение угломестного или азимутального сечения ДН).

Обработка наблюдательного материала, позволяющая получить угломестные зависимости параметров в виде эмпирических формул, проведена методом наименьших квадратов.

В результате детального анализа всех видов ошибок измерений того или иного параметра получены следующие величины погрешностей:

— $\pm 4\%$ при измерении шумовой температуры;

— $\pm 4,5\%$ при измерениях эффективной площади, ширины главного лепестка и смещения электрической оси;

— $\pm 0,5 \text{ дБ}$ при измерениях уровней первых боковых лепестков.

Чтобы избежать трудностей учета ослабления радиоволн в земной атмосфере при сложных метеорологических условиях, все наблюдения были проведены при ясной, сухой погоде в ночное время. Приведенные ниже результаты относятся к выходу облучателя, т. е. учтены потери в тракте, соединяющем выход облучателя со входом радиометрического устройства.

6. Результаты измерений на $\lambda = 40 \text{ см}$. Поскольку, как показали предварительные измерения и соответствующий расчет, смещения КР от расчетного положения как в осевом, так и в радиальном направлениях незначительно влияют на параметры антенны, их измерения производились при неподвижном контррефлекторе, установленном в расчетное положение.

Измеренная зависимость шумовой температуры антенны от угла места выражается формулой

$$T_{ш.а}(h) = 12,1 + 2,35 \operatorname{cosech} h. \quad (1)$$

Измеренные угломестные зависимости поправок к азимутальной и угломестной шкалам поворотных устройств в угловых минутах выражаются формулами

$$\Delta A(h) = 0,5 \operatorname{sech} h, \quad (2)$$

$$\Delta h(h) = -6 \cos^2 h.$$

Форма ДН антенны изучалась по радиоисточникам 3С147, 3С218, 3С295 и 3С461. Она имеет почти симметричные боковые лепестки. Уровень первого бокового лепестка составляет — 16 дБ. Расчетное значение, вычисленное от заданного амплитудного распределения, составляет — 16, 5 дБ. Главный лепесток ДН симметричен и не зависит от угла места. Его форму с большой точностью можно вычислить по формуле

$$F(\theta) = \left\{ \frac{2I_1[(\pi D/\lambda) \sin \theta]}{(\pi D/\lambda) \sin \theta} \right\}^2, \quad (3)$$

где I_1 — функция Бесселя первого рода первого порядка, D — диаметр основного зеркала, λ — длина волны.

Таблица 1

| θ , угл. мин | 0 | 2,4 | 4,8 | 7,5 | 10 | 13 | 15 | 17 | 20 | 23,5 |
|---------------------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|
| $F(\theta)$ (расч.) | 100 | 96,2 | 85,4 | 66,8 | 48,9 | 28 | 16,9 | 8,7 | 1,9 | 0 |
| $F(\theta)$ (изм.) | 100 | 96,2 | 85,6 | 67,9 | 49 | 29,4 | 17,9 | 9,4 | 3,1 | 0 |

В табл. 1 приведены относительные значения, определяющие форму главного лепестка ДН, рассчитанные по формуле (3) и измеренные

на основе записи прохождения источника ЗС218 через ДН антенны в точке верхней кульминации ($h = 33^\circ$).

Ширина главного лепестка на уровне 3 дБ составляет $\theta_{0,5} = \varphi_{0,5} = 20'$ и не зависит от угла места.

Эффективная площадь антенны определялась по известной формуле

$$A_{\text{эфф}} = g2kT_a/S. \quad (4)$$

Антенные температуры T_a измерялись для радиоисточников ЗС147, ЗС218 и ЗС461. Коэффициенты g , учитывающие соизмеримость угловых размеров источников с шириной главного лепестка ДН антенны, вычислены по формуле

$$g = (1 - 0,3266 \theta_{\text{н}}^2/\theta_{0,5}^2)^{-1}, \quad (5)$$

при этом оказалось $g_{\text{ЗС147}} = g_{\text{ЗС218}} = 1$, $g_{\text{ЗС461}} = 1,014$. Измеренные значения эффективной площади совпадают с высокой точностью: среднее значение составляет 3010 м^2 , а максимальное отклонение — $0,5\%$.

7. Результаты измерений в сантиметровом диапазоне волн. Было установлено, что гравитационные деформации зеркальной системы при наклоне антенны по углу места практически не влияют на ее шумовую температуру. Шумовая температура слабо зависит также от длины волны. Измеренные зависимости шумовой температуры антенны от угла места выражаются формулами

$$T_{\text{ш.а}}(h) = 11,8 + 2,44 \operatorname{cosech} h \quad (6)$$

на волнах 5 и 6 см и

$$T_{\text{ш.а}}(h) = 10,2 + 2,9 \operatorname{cosech} h \quad (7)$$

на волне 3 см.

Была проведена проверка расчетных законов перемещений КР как вдоль, так и перпендикулярно к фокальной оси, позволяющих эффективно компенсировать фазовые искажения в раскрые антенны. Измеренная зависимость оптимального положения КР вдоль оси, соответствующего максимальной антенной температуре источника, выражается формулой

$$l = -10,38 + 15,65 \sin h. \quad (8)$$

Расчетный же закон перемещения КР вдоль фокальной оси имеет вид

$$l = -9,2 + 17,5 \sin h. \quad (9)$$

Поиск оптимального закона перемещения КР в направлении, перпендикулярном к фокальной оси, проведен следующим образом:

— исследованы угломестные зависимости уровней первых боковых лепестков ДН и антенной температуры ЗС405 на волнах $\lambda = 6$ и 5 см и угломестная зависимость антенной температуры DR-21 на $\lambda = 3$ см при заторможенном КР;

— аналогичные исследования проведены при перемещении КР по трем расчетным законам, полученные результаты сравнены.

Оказалось, что самым близким к оптимальному является закон, определяемый выражением

$$125 \cos h + 3'10'' \cos h, \quad (10)$$

где слагаемые определяют амплитуды линейного перемещения КР (в миллиметрах) в направлении, перпендикулярном к фокальной оси, и угол поворота КР в угломестной плоскости.

Результаты измерений угломестной зависимости уровней первых боковых лепестков при заторможенном КР и при его перемещении по

закону (10) приведены в табл. 2. Анализ данных табл. 2 показывает, что найденный закон (10) не полностью обеспечивает симметрию боковых лепестков в угломестной плоскости и, по-видимому, не является оптимальным.

Таблица 2

| Длина волн, см | Режим сопровождения КР | Угол места, град | Уровень боковых лепестков, дБ | | | |
|----------------|------------------------------------|------------------|-------------------------------|---------|--------------------------|----------|
| | | | В угломестной плоскости | | В азимутальной плоскости | |
| | | | к зениту | к земле | к востоку | к западу |
| 5 | При заторможенном КР | 57 | 18 | 13,6 | 15,5 | 15,5 |
| | | 10 | 18 | 9 | 15,5 | 15,5 |
| | При перемещенной КР по закону (10) | 57 | 17,6 | 19,5 | 19,5 | 19,5 |
| | | 10 | 15,7 | 19,5 | 19,5 | 19,5 |
| 6 | При заторможенном КР | 65 | 19 | 15,4 | 17,5 | 17,5 |
| | | 20 | 19 | 11,4 | 17,5 | 17,5 |
| | При перемещении КР по закону (10) | 52 | 18 | 19 | 20,4 | 20,4 |
| | | 20 | 16 | 19 | 20,4 | 20,4 |

В пользу существования оптимального закона говорит тот факт, что выраженный боковой лепесток при заторможенном КР обращен к земле, а при перемещении КР по закону (10) он обращен к зениту.

Данные относительно формы и ширины основного лепестка ДН антенны получены по ЗС405 и ЗС123 (на волнах 6 и 5 см) и DR-21 (на волне 3 см). До уровня — 13 дБ основной лепесток на всех длинах волн оказался обладающим круговой симметрией с одинаковыми и, в пределах ошибок измерений, не зависящими от угла места полуширинами в главных плоскостях ($\theta_{0,5}, \varphi_{0,5}$), причем это справедливо как при заторможенном КР, так и при перемещении КР по разным законам. Форма основного лепестка до указанного уровня аппроксимируется кривой 5. Результаты измерений ширины основного лепестка на уровне 3 дБ приведены в табл. 3.

Угломестные зависимости антенных температур источников ЗС405 (на волнах 6 и 5 см) и DR-21 (на волне 3 см) аппроксимировались формулой

$$T_a(h) = T_{a \max} (1 - a \cos^2 h), \quad (11)$$

коэффициенты которой ($T_{a \max}, a$) получены по результатам обработки измерений при разных углах места методом наименьших квадратов. В измеренных значениях антенных температур учтено ослабление радио-

Таблица 3

| $\lambda, \text{ см}$ | 6 | 5 | 3 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| $\theta_{0,5} = \varphi_{0,5}$ | 2",57 | 2",36 | 1",50 |

волн в земной атмосфере [7]. По измеренным антенным температурам эффективная площадь антенны определялась по формуле (4). На волнах 6 и 5 см коэффициент g вычислялся по формуле

$$g = \left[1 - 0,653 \frac{s^2 + 2R^2}{\theta_{0,5}^2} + 0,178 \left(\frac{s^2 + 2R^2}{\theta_{0,5}^2} \right)^2 + 0,753 \frac{s^2 R^3}{\theta_{0,5}^4} + 0,284 \frac{R^4}{\theta_{0,5}^4} \right]^{-1}, \quad (12)$$

где $s = 100''$, $R = 10''$, а на волне 3 см — по формуле (5), где $\theta_{и} = 20''$. Формулы (5) и (12) выведены для ДН, которая определяется формулой (3). Результаты вычислений $A_{эфф}$ и a , а также их среднеквадратичных отклонений, проведенных как при заторможенном КР, так и при его перемещении по закону (10), приведены в табл. 4.

Таблица 4

| $\lambda, \text{ см}$ | 6 | 5 | 3 | |
|-----------------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| При заторможенном КР | $A_{эфф} \pm \Delta A$ | $2794 \pm 8,5$ | $2780 \pm 7,3$ | $2181 \pm 7,9$ |
| | $a \pm \Delta a$ | $0,178 \pm 0,012$ | $0,198 \pm 0,003$ | $0,350 \pm 0,044$ |
| При перемещении КР по закону (10) | $A_{эфф} \pm \Delta A$ | $2849 \pm 5,6$ | $2792 \pm 6,1$ | $2240 \pm 2,6$ |
| | $a \pm \Delta a$ | $0,015 \pm 0,002$ | $0,030 \pm 0,003$ | $0,102 \pm 0,006$ |

Сравнение значений a показывает, что найденный закон перемещения КР достаточно эффективно компенсирует фазовые искажения в раскрыве антенны, в длинноволновой части сантиметрового диапазона, тогда как на более коротких волнах эффективность компенсации уменьшается.

8. Теоретический расчет шумовой температуры и эффективной площади антенны РТ-70 с использованием результатов численного интегрирования экспериментальных диаграмм на вспомогательном зеркале проведен в [11]. Результаты теоретических расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

| $\lambda, \text{ см}$ | $A_{эфф}, \text{ м}^2$ | $T_{ш.а}, \text{ К}$ |
|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 3 | 2500 | 10 |
| 5 | 2850 | 10 |
| 30 | 3040 | 12,5 |
| 50 | 2960 | 13 |

На основе анализа результатов экспериментальных исследований параметров антенны РТ-70 и их сравнения с результатами теоретических расчетов можно сделать следующие заключения:

1) в дециметровом диапазоне волн фазовые искажения, обусловленные гравитационными деформациями зеркальной системы при наклоне антенны, практически не влияют на эффективную площадь антенны, и она может с достаточной эффективностью работать с неподвижным контррефлектором, установленным

в расчетном положении;

2) в сантиметровом диапазоне волн гравитационные деформации зеркальной системы при наклоне антенны приводят к фазовым искажениям в раскрыве, вызывающим значительное уменьшение эффективной площади. Зависимость эффективной площади от угла места усиливается с уменьшением длины волны;

3) найденный закон (10) перемещения контррефлектора достаточно эффективно компенсирует фазовые искажения в раскрыве антенны в длинноволновой части сантиметрового диапазона ($\lambda = 3 \text{ см}$);

4) результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов параметров антенны совпадают с довольно высокой точностью.

Не совпадают только значения эффективной площади на волне $\lambda = 3 \text{ см}$ (измеренное значение на 10% меньше расчетного). Это, по-видимому, объясняется неточной фокусировкой антенны на этой волне;

5) для нахождения оптимального закона перемещения контррефлектора и выяснения причины несовпадения измеренных и расчетных значений эффективной площади антенны на волне $\lambda = 3 \text{ см}$ необходимы дальнейшие более детальные экспериментальные исследования антенны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kronberg Ph. P.— J. Roy. Astron. Soc. Con., 1970, 64, № 2, p. 105.
2. Hachenberg O.— Sky and Telescope, 1970, 40, № 60, p. 332.
3. Wielebinski R.— Nature, 1970, 228, p. 507.
4. Wielebinski R.— Indian Eest. Eng., 1971, 113, № 11, p. 535.
5. Hoerner von S.— Astron. J., 1967, 72, № 2, p. 35.
6. Кузьмин А. Д., Саломонович А. Е. Радиоастрономические методы измерения параметров антенн. — М., 1963.
7. Baars J. W. M.— IEEE Trans. Anten. Propag., 1973, Ap-21, № 4, p. 461.
8. Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A.— Astron. and Astrophys., 1977, 61, p. 99.
9. Асланян А. М., Гулян А. Г., Мирзабекян Э. Г., Григорян Ф. А. Тезисы докладов XI Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам. — Ереван, 1978, с. 18.
10. Асланян А. М., Гулян А. Г.— Изв. АН АрмССР, Физика, 1973, 8, № 2, с. 148.
11. Козлов А. Н., Тарасов В. Б. и др.— Изв. вузов — Радиофизика, 1973, 24, № 12, с. 1909.

Поступила в редакцию
17 июня 1983 г.

THE MEASUREMENTS OF RT-70 ANTENNA MAIN PARAMETERS

*A. M. Aslanyan, A. G. Gulyan, A. N. Kozlov, V. B. Tarasov, R. B. Martirosyan,
V. A. Grishmanovskij, B. G. Sergeev*

Measurements of main electrical characteristics of the RT-70 antenna are made by radioastronomical methods at 39, 6, 5 and 3 cm wavelengths. Based on the measurements, analytical expressions for elevation angle dependences of antenna characteristics are obtained, using the least-square method. The results of experimental measurements and theoretical calculations are shown to be in a good agreement. Gravitational deformations of the specular system are shown to have a homological character and in order to compensate the phase distortions in the antenna aperture the counter reflector displacement is found which is close to the optimal one.