

УДК 521.2

## Эффективная площадь антенны радиотелескопа РТ-22 НИИ “КрАО”

А.Е. Вольвач, Н.С. Нестеров

Лаборатория радиоастрономии НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98688,  
Украина, Крым, Ялта  
volvach@ukrpost.ua

Поступила в редакцию 22 февраля 2010 г.

**Аннотация.** По данным наблюдений калибровочных радиоисточников на длинах волн 13.5 мм и 8.2 мм в периоды 1985 и 2005 гг. выявлена зависимость эффективной площади антенны РТ-22 НИИ “КрАО” от температуры и угла места. Полученные результаты подтверждают высокие качества РТ-22 на миллиметровых длинах волн. Высокая точность отражающей поверхности позволяет проводить наблюдения на миллиметровых волнах вплоть до 2 мм. На длине волны 8.2 мм эффективная площадь антенны сохраняется с точностью 5 % при переустановке от зенита до угла места 15°. При строительстве крупных антенн, работа которых планируется на предельных частотах, необходимо учитывать климатические условия места строительства или принимать меры по термостабилизации поверхности.

THE ANTENNA EFFECTIVE AREA OF RADIO TELESCOPE RT-22 CrAO, by A.E. Volvach and N.S. Nesterov. According to the calibration source observations at wavelengths of 13.5 mm and 8.2 mm during 1985 and 2005 revealed the dependence of the antenna effective area of RT-22 CrAO on the temperature and the elevation. These results confirm the high quality of the RT-22 at millimeter wavelengths. High accuracy of the reflecting surface makes it possible to observe at millimeter waves up to 2 mm. At the wavelength of 8.2 mm the antenna effective area remains within 5 % when you reinstall from the zenith to the elevation angle of 15°. During the construction of large antennas, whose work is planned at the cutoff frequency must take into account the climatic conditions of construction sites, or take action on the thermal stabilization of the surface.

**Ключевые слова:** радиотелескоп, антенна, радиоисточники, эффективная площадь

---

## 1 Введение

22-метровый радиотелескоп НИИ “КрАО” (РТ-22), введенный в действие в 1966 г., находится в десятке наиболее эффективных инструментов в мире. С его помощью выполняются и будут выполняться в ближайшем будущем наблюдения в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн (Иванов и др., 1967). Первые РСДБ-наблюдения были проведены в 1969 г. на межконтинентальной базе “Симеиз” (РТ-22) и Грин Бэнк (РТ-43, США) (Бродерик и др., 1970). РТ-22 оснащен радиометрами на длины волн 92, 18, 13, 6, 3.5, 2.8, 2.3, 2.0 см, 13.5 мм и 8 мм.

Радиотелескоп РТ-22 имеет полноповоротное параболическое зеркало диаметром 22 м с фокусным расстоянием 9.525 м. Среднеквадратичная ошибка изготовления поверхности равна 0.15 мм. Горизонтальная ось смещена относительно азимутальной оси на величину  $-1.8 \pm 0.2$  мм. Рабочий диапазон углов поворота антенны по азимуту составляет  $[-210^\circ, 210^\circ]$ , по углу места  $[-3^\circ, 90^\circ]$ . Максимальная скорость поворота антенны составляет 1.5 град/сек.

В 1986 г. проведена модернизация системы управления РТ-22, установлены 5-секундные индукционные датчики углов азимута и высоты, управление движением переведено на персональный компьютер. Точность наведения инструмента на источник с учетом систематических ошибок доведена до  $10''$ . Для радиоинтерферометрических наблюдений РТ-22 оснащен в 2007 г. системой регистрации Марк-5 (Вольвач, Грэхем, 2008).

С помощью РТ-22 проводятся: многочастотный регулярный мониторинг активных ядер галактик; исследования солнечной и звездной активностей; РСДБ-наблюдения в рамках международных астрофизических, геофизических и радиолокационных программ; исследуются космические мазеры гидроксила, водяного пара, метанольные и SiO мазеры, а также спектральные наблюдения в диапазоне частот от 85 ГГц до 115 ГГц – что относится к числу наиболее актуальных проблем современной астрофизики и природоведения.

Исследования ведутся сотрудниками как лаборатории радиоастрономии НИИ “КрАО”, так и других институтов Украины, Европы и Америки. Радиотелескоп РТ-22 входит в Международную и Европейскую сети радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами.

Характеристики РТ-22 учитываются при проведении радиоастрономических наблюдений.

## 2 Измерения

В диапазоне длин волн 8.2 мм и 13.5 мм исследуется радиоизлучение ядер галактик и нестационарных звезд нашей Галактики. Процесс наблюдений автоматизирован с помощью персонального компьютера.

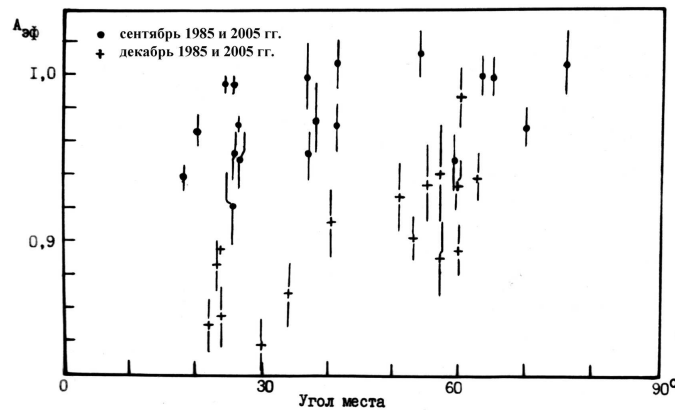


Рис. 1. Эффективная площадь РТ-22 на длине волны 8.2 мм

Рис. 1 иллюстрирует результаты измерений эффективной площади антенны РТ-22  $A_{ef}$  на длине волны 8.2 мм в течение двух интервалов времени в 1985 и в 2005 гг. Параметры антенны измеряются радиоастрономическими методами по калибровочным источникам и холодной нагрузке.

Из рис. 1 следует, что имеется уменьшение эффективной площади антенны  $A_{ef}$  примерно на 5 % от угла места в декабре 1985 и 2005 гг. относительно сентября 1985 и 2005 гг. Средняя температура

воздуха в сентябре была около  $20^\circ\text{C}$ , а в декабре – около  $5^\circ\text{C}$ , что связано с сезонными изменениями температуры окружающего воздуха  $T_B$ . Аппроксимация результатов измерений  $A_{ef}$  за 1985 и 2005 гг. методом наименьших квадратов выражением вида:

$$\ln A_{ef} = C - K_H(1 - \text{Sinh}) - K_T(T_B - T_0)^2 \quad (1)$$

позволила определить значения  $K_T = 65 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_H = 0.071$ , максимальное значение  $A_{ef} = 200 \text{ м}^2$  в зените при  $T_0 = 15^\circ\text{C}$  на длине волны 8.2 мм.

Частично изменения  $A_{ef}$  вызывались расфокусировкой облучающей системы РТ-22 под действием деформаций (рис. 2).

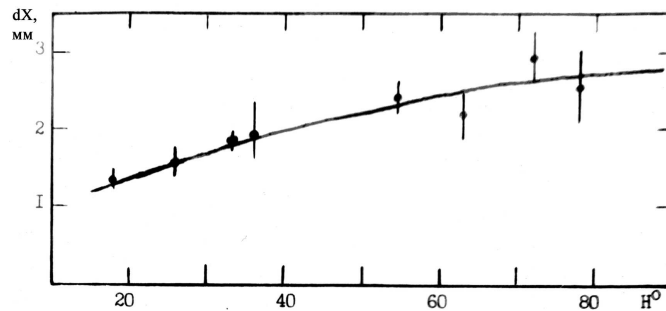


Рис. 2. Смещения гиперболы облучающей системы РТ-22 под действием деформаций

Анализ фокусируемых кривых, полученных на разных углах места, показал, что оптимальное положение гиперболы  $X_{opt}$ , при котором система оказывается сфокусированной, зависит от угла места следующим образом:

$$X_{opt}(\text{мм}) = 0.070(\pm 0.19) + 2.02(\pm 0.28)\text{Sinh}. \quad (2)$$

Влияние температуры на  $X_{opt}$  незначительно. Фокусируемые кривые, то есть зависимость антенной температуры источника от смещения гиперболы из оптимального положения  $\delta X = X - X_{opt}$ , имеют форму параболы с коэффициентом при квадратичном члене  $a = (-953 \pm 29) \cdot 10^{-5}$  и соответствуют теоретическому значению  $a_{теор} = -954 \cdot 10^{-5}$  (Цейтлин, 1976). После исправления результатов измерения  $A_{ef}$  за расфокусировку были определены уточненные значения коэффициентов в выражении (1):  $K_H = 0.108 \pm 0.025$ ,  $K_T = (733 \pm 76) \cdot 10^{-6}$ . Максимальное значение  $A_{ef} = 200 \text{ м}^2$  в направлении зенит осталось прежним при  $T_0 = 17.5 \pm 0.8^\circ\text{C}$ .

Один из методов оперативного контроля эффективной площади радиотелескопов основан на измерении диаграммы направленности антенны по космическим радиоисточникам с последующим определением отклонения поверхности зеркала от расчетной.

На рис. 3 показана диаграмма направленности РТ-22 на длине волны 13.5 мм, снятая до уровня  $-28 \text{ дБ}$ , по излучению точечного источника линии паров  $\text{H}_2\text{O W49A}$ .

Из рис. 3 видно, что главный лепесток диаграммы направленности РТ-22 на 13.5 мм имеет ширину на уровне 0.5 около  $9'$ .

### 3 Обсуждение

В (Рузе, 1966) было показано, что диаграмма направленности антенны со случайно распределенной по апертуре фазовой ошибкой может быть представлена в виде суперпозиции диаграммы направленности (ДН) идеальной антенны (чисто дифракционной)  $P_d$  и так называемой диаграммы рассеяния (ДР)  $P_p(\theta, \delta^2, l)$ , возникающей из-за наличия ошибок поверхности. Здесь  $\theta$  – угловая

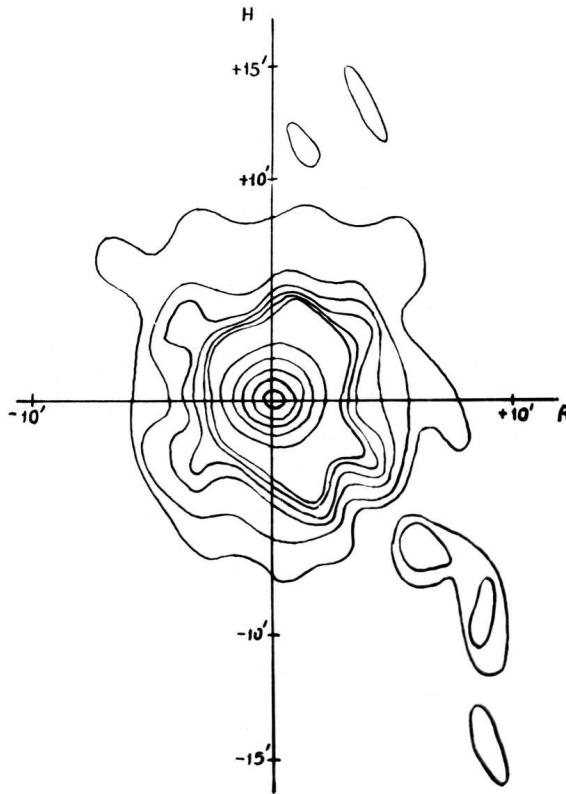


Рис. 3. Диаграмма направленности РТ-22 на длине волны 13.5 мм

переменная,  $\delta = 4\pi\epsilon/\lambda$  – среднее квадратичное значение фазовой ошибки,  $\epsilon$  – среднее квадратичное значение ошибки поверхности,  $\lambda$  – длина волны, а  $l$  – характерная длина, на которой ошибки поверхности коррелируют (корреляционный радиус). Эффективная площадь такой антенны может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} A_{ef} &= A_0 e^{-\delta^2} + \pi l^2 (1 - e^{-\delta^2}) && \text{при } \delta \leq 1, \\ A_{ef} &= A_0 e^{-\delta^2} + \pi (l^2/\delta^2) (1 - e^{-\delta^2}) && \text{при } \delta \geq 1, \end{aligned} \quad (3)$$

где через  $A_0$  обозначена эффективная площадь идеальной антенны. Второе слагаемое в (3) дает амплитуду главного лепестка ДР, а его ширина на уровне половинной мощности равна согласно (Мезгер и др., 1966):

$$\theta_p(\text{мин. дуги}) = \begin{cases} 1.822 \cdot 10^3 \lambda/l & \delta \leq 1 \\ 2.290 \cdot 10^4 \epsilon/l & \delta \geq 1. \end{cases} \quad (4)$$

Согласно данным на рис. 2,  $\theta_p = 9'$  на  $\lambda = 13.5$  мм. Из первого соотношения (4) получаем корреляционный радиус  $l = 1.822 \cdot 13.5/9 = 2.6$  м. Первое соотношение из (3) позволяет оценить параметр  $\epsilon$ . Преобразовав его, мы получаем:

$$\epsilon = \lambda/4\pi \sqrt{-\ln \frac{A_{ef} - \pi l^2}{A_0 - \pi l^2}}. \quad (5)$$

$A_{ef}$  на волне 8.2 мм при температуре 17.5 °С в зените составляет 200 м<sup>2</sup>. Значение  $A_0$  можно оценить путем перемножения 5 основных коэффициентов, учитывающих (Есепкина и др., 1972): 1) переизлучение облучателя за край зеркала – 0.834; 2) затенение главного зеркала гиперболой – 0.98; 3) рассеяние на штангах, несущих гиперболу – 0.942; 4) потери на кроссполяризацию – 0.98; 5) закон облучения антенны (–10 дБ на краю) – 0.773. Коэффициент использования апертуры в этом случае получается равным 0.583, а  $A_0 = 0.583\pi D^2/4 = 221$  м<sup>2</sup>. Из соотношения (5) определяем  $\epsilon = 0.245$  мм. Сопоставляя (3) и (1) и учитывая полученное значение  $\epsilon$  в зените при  $T_0 = 17.5$  °С, можно сделать вывод, что изменения эффективной площади с углом места и температурой происходят из-за изменений среднеквадратичной ошибки поверхности РТ-22, которые происходят по закону:

$$\epsilon^2 = 0.060 + 0.045(1 - \text{Sin}h) + 312 \cdot 10^{-6}(T_B - 17.5)^2. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при установке на горизонт ( $h = 0$ ) появляются дополнительные деформации поверхности РТ-22, среднеквадратичное значение которых равно 0.21 мм. Прямые измерения деформаций поверхности (Монин, 1970) показывают, что в этом случае возникают дополнительные по отношению к имеющимся в зените отклонения поверхности антенны, пиковое значение которых составляет 0.8 мм. Среднеквадратичное значение деформаций, измеряемых перпендикулярно поверхности, должно составлять  $\Delta n = 0.8/3 = 0.27$  мм, а параметр  $\epsilon = 0.86 \cdot 0.27 = 0.23$  мм – в хорошем согласии с полученной по радиоастрономическим измерениям оценкой.

В (Заболотный и др., 1977) на длине волны 1.4 мм были определены размеры главного лепестка ДН РТ-22  $\theta_{0.5} = 2'$ . Как показывают оценки, на самой деле на указанной длине волны формируется только диаграмма рассеяния, поскольку на этой волне значение  $\delta = 2.4$ . Применяя второе соотношение из (4), получаем, что ожидаемая  $\theta_p = 2.2'$  для высоты  $h = 45^\circ$  находится в хорошем согласии с измеренной величиной. Рассчитанные по формулам (3) значения  $A_{ef}$  составляют 100 м<sup>2</sup> на волне 3.9 мм и 22 м<sup>2</sup> на  $\lambda = 2.25$  мм, что в пределах ошибок измерений совпадает с измеренными значениями  $A_{ef} = 86$  м<sup>2</sup> и 20 м<sup>2</sup> на указанных волнах соответственно (Ефанов, 1974; Ефанов и др., 1974). Приведенные примеры свидетельствуют о корректности определенных здесь среднеквадратичных значений ошибок поверхности и корреляционного радиуса для РТ-22.

Как показали представленные здесь измерения, на длине волны 8.2 мм эффективная площадь антенны РТ-22 уменьшается на  $\sim 7\%$  при отклонении температуры окружающего воздуха на 10 °С от значения  $T_B = 17.5$  °С. Последнее значение совпадает с температурой, при которой монтировалась поверхность антенны. Отсюда следует, что при изготовлении больших антенн, которые должны работать на длинах волн, близких к критическим, монтаж поверхности нужно производить при температуре, близкой к среднегодовой в месте локализации инструмента.

Из анализа результатов фокусировки РТ-22 следует, что при движении его от зенита к горизонту происходит смещение гиперболы от оптимального положения на 2 мм (выражение (2)). В первом приближении эффективная площадь антенны зависит от смещения гиперболы следующим образом:

$$A_{ef} = 1 - 0.641(\Delta X/\lambda)^2 \quad (7)$$

На угле места  $h = 45^\circ$  значение  $\epsilon = 0.27$  мм, что соответствует длине волны, на которой усиление РТ-22 максимально,  $\lambda = 4\pi\epsilon = 3.4$  мм. Из (7) следует, что из-за расфокусировки эффективная площадь антенны на этой волне уменьшится на 22 % в этом случае. Поэтому на коротких волнах миллиметрового диапазона длин волн необходимо учитывать смещение гиперболы из фокуса антенны введением соответствующей поправки в ходе наблюдений.

На волне 3.3 мм эта расфокусировка соответствует потере в эффективной площади около 20 %. Для удержания вторичного зеркала точно на электрической оси РТ-22 в данный момент производится только частичная компенсация поперечных смещений кассегрена с помощью регулировочного механизма. Эти задачи должна решать ЭВМ, управляющая радиотелескопом.

## 4 Заключение

40 лет интенсивных наблюдений на 22-метровом радиотелескопе НИИ “КРАО” и исследования его характеристик на миллиметровых длинах волн показали достаточно высокие качества инструмента.

Точность установки отражающей поверхности позволяет проводить наблюдения на длинах волн вплоть до 2 мм. На длине волны 8.2 мм эффективная площадь антенны уменьшается всего на 5 % при переустановке от зенита до угла места  $15^\circ$ . Эффективная площадь антенны РТ-22 уменьшается на  $\sim 7\%$  при отклонении температуры окружающего воздуха на  $10^\circ\text{C}$  от значения  $17.5^\circ\text{C}$ .

**Благодарности.** Авторы благодарны И.Д. Стрепка за подготовку приемной аппаратуры, М.М. Позднякову и персоналу пульта управления РТ-22 за помощь в проведении измерений.

## Литература

- Бродерик Д.Д., Виткевич В.В., Джонси Д.Л. и др. // Астрон. журн. 1970. Т. 47. С. 784.  
Вольвач и Грэхем (Volvach A.E. and Graham D.) // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. / Eds Behrend D. and Baver K. NASA. TP-2008-214151. 2008. P. 88.  
Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. // Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука. 1972.  
Ефанов В.А. // Кандидатская диссертация. Крым. Научный. 1974.  
Ефанов В.А., Зинченко И.И., Кисляков А.Г. и др. // Препринт НИРФИ. 1974. №. 55.  
Заболотный В.Ф., Моисеев И.Г., Павлов А.Е. и др. // Астрон. журн. 1977. Т. 49. С. 971.  
Иванов В.Н., Моисеев И.Г., Монин Ю.Г. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1967. Т. 38. С. 141.  
Мезгер и др. (Mezger P.Q., Brown H., Fauliny-Toth I., Sohraau J., Turlo Z.) // NKAO internal report. 1966. P. 1–69.  
Монин Ю.Г. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1970. Т. 41–42. С. 260.  
Рузе Дж. // Труды Инст. инж. по электротехн. и радиотехн. 1966. Т. 54. С. 205.  
Цейтлин Н.М. // Антенная техника и радиоастрономия. М.: Сов. радио. 1976. С. 155.