

УДК 621.396 628 · 523 164

**ВОПРОСЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
РАДИОТЕЛЕСКОПОВ ДИАМЕТРОМ  $64 \div 128 \text{ м}$   
В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ САНТИМЕТРОВОГО  
ДИАПАЗОНА**

*Л. Ф. Богомолов, Б. А. Попереченко*

Как известно, перспективные задачи радиоастрономии требуют для своего решения создания самых разнообразных инструментов со сверхвысокой чувствительностью и разрешающей способностью. Основным препятствием на этом пути является большая стоимость сооружений и технические трудности в реализации высоких точностей. Особенно усложняется реализация сверхбольших радиотелескопов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн.

Наиболее обещающими в смысле экономичности и технической реализуемости представляются одиночные и агрегатированные полноповоротные параболические антенны диаметром в несколько десятков метров и более 100 м. Это обстоятельство постоянно подтверждается зарубежным и отечественным опытом. Поэтому авторы сосредоточили свои усилия в первую очередь на детальной разработке методов повышения эффективности и точности больших полноповоротных параболических антенн при одновременном увеличении их диаметра выше  $30 \div 60 \text{ м}$ .

Как будет видно из дальнейшего, это открывает реальные возможности использования таких сооружений не только в сантиметровом, но и в миллиметровом диапазонах. Кроме того, при разработке методов повышения эффективности удалось достичь заметного снижения экономических затрат без ущерба для характеристик сооружений. Указанные результаты достигнуты благодаря успешному развитию методов технико-экономической оптимизации больших полноповоротных параболических антенн. Рассмотрим эти результаты по существу.

Основные ограничения в эффективности указанных антенн в сантиметровом и миллиметровом диапазонах связаны прежде всего с точностью изготовления и сборки металлоконструкций зеркальной системы и с их деформациями в процессе эксплуатации при установке на конкретном опорно-поворотном устройстве. Как известно, среднеквадратичные результирующие погрешности изготовления и сборки для рассматриваемых условий составляют величины порядка  $0,5 \div 1 \text{ мм}$ . Если взять это значение как относительную погрешность для антенн диаметром  $50 \div 100 \text{ м}$ , то мы будем иметь дело с величинами  $\sim 10^{-5}$ .

Ширина луча антенны при указанных условиях достигает значений  $\sim 20 \div 30''$ . Естественно, что при этом реализация эффективности антенны существенно зависит от погрешностей системы управления положением радиоси в пространстве. В эту систему в больших высокоточных сооружениях оказываются завязанными не только привод, аппаратура наведения, но и все металлоконструкции радиотелескопа.

Обе основные составляющие точности радиотелескопа (зеркальной системы и системы управления) применительно к большим антеннам сантиметрового и миллиметрового диапазонов определяются главным образом эффективностью применяемых развитых систем компенсации, основные результаты по которым получены при проектировании радиотелескопа ТНА-1500 до 1968 г.

Кроме вопросов точности, для обеспечения наибольшей эффективности имеют не меньшее значение оптимальное построение облучающей системы вместе с предварительными малошумящими усилителями. Специфика этих вопросов для сантиметрового или миллиметрового диапазонов менее заметна. Однако применительно к антеннам диаметром более  $60 - 100$  м возникает ряд специфических задач, требующих своего практического решения, особенно в связи с необходимостью сохранения определенной степени универсальности радиотелескопов.

Указанный круг вопросов был предметом основного внимания в исследованиях последних нескольких лет в области больших антенн. В этот период велись более детальные исследования различных методов и схем компенсации деформаций в зеркальной системе [1] и системе наведения [2], а также методов повышения радиотехнической добротности наиболее крупных и универсальных антенн.

В качестве конкретных конструкций, применительно к которым велись количественные исследования, использовались радиотелескоп ТНА-1500 с зеркалом РТ-64 диаметром 64 м, находящийся в стадии монтажа, и радиотелескоп ТНА-8000 с зеркалом РТ-128 диаметром 128 м, по которому развернуто эскизное проектирование. Подробно результаты исследования конструктивных решений металлоконструкций зеркальных систем изложены в докладе Соколова и Поляка [3].

Существенное значение для реализации точностей зеркальной системы имеют методы и аппаратура для выверки зеркальной системы. Значительный вес зеркальной системы (ТНА-1500—700 т, ТНА-8000  $\sim 2700$  т) по существу исключает возможность ее монтажа без использования уникального дорогостоящего монтажного оборудования по схеме, применявшейся для меньших антенн. Поэтому методика и аппаратура для выверки разрабатывались исходя из сборки зеркала непосредственно на ОПУ при положении в зенит. При этом принималось во внимание, что стабильная вертикальность геометрической оси антенны с нужной точностью обеспечена быть не может. Это особенно существенно в связи с повышением требований к относительной точности юстировки, что предъявляет, в свою очередь, жесткие требования к выбору внешних условий для ее проведения.

Большая площадь антенны и большое число контрольных точек на ее поверхности практически исключает возможность высокоточного ручного контроля их положения за относительно короткий промежуток времени.

Таким образом, оперативное проведение замеров на большой площади при нестрогой вертикальной установке зеркала на рабочей отметке для рассматриваемых антенн является принципиально необходимым.

Применение выверки с помощью различных механических шаблонов, в том числе флаг-шаблонов, возможно при условии привязки оси шаблона не к вертикали, а к геометрической оси зеркала и при условии автоматизации замеров, например, с помощью подвижных датчиков-электромикрометров, установленных на специальных каретках.

Однако применение механических шаблонов, будучи приемлемым в какой-то мере для ТНА-1500, вряд ли окажется пригодным для ТНА-8000. Кроме того, имеется еще одно принципиальное соображение, которое вообще исключает практическое применение механических шаблонов. Дело в том, что для достижения наименьших деформаций пара-

бологической поверхности зеркала необходимо его выверять в положении под определенным углом места  $\sim 30^\circ$ . Эту задачу можно решить лишь с помощью оптических средств.

Возможность юстировки зеркала в зенитном положении при специальном введении начальных поправок, принимающих нулевые значения при  $\beta = \beta_0$ , может быть реализована при условии достаточной точности и достоверности расчета этих поправок. Но и в этом случае проблема точной установки антенны в зенит и оперативной проверки большой поверхности остается.

Поэтому принято решение в качестве основного инструмента при выверке зеркала использовать лазерный дальномер. Принципиальная возможность такой выверки не вызывает сомнений. Основная задача на данном этапе состоит в отработке энергетических и точностных характеристик дальномера, соответствующих такому темпу замеров, который обеспечил бы достоверный контроль всей поверхности зеркала за одну ночь ( $\sim 3 \div 4$  ч) с необходимой точностью. По таким данным могут быть внесены необходимые уточнения в положение щитов рабочей поверхности. Проведение нескольких последовательных коррекций подобного рода, не требующих специальных условий и потому принципиально не ограниченных во времени, способно реально обеспечить необходимую высокую точность выверки без необходимости ожидания хорошей погоды.

Потенциальная точность лазерного дальномера позволяет реализовать случайные погрешности выверки для одноразового контроля не более нескольких десятых долей миллиметра. При этом систематические погрешности менее существенны, так как могут быть учтены и не являются преобладающими.

Суммарная погрешность юстировки складывается из следующих компонент, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

№	Составляющая погрешности	Величина погрешности
1	Максимальная погрешность измерения дальности	0,3 $\div$ 0,5 мм
2	Максимальная погрешность от неточности переустановки пентапризмы при переходе с пояса на пояс	0,2 мм
3	Максимальная погрешность от биения оси вращения пентапризмы	0,2 мм
4	Максимальная погрешность от нестабильности оптической оси дальномера	0,15 мм
5	Суммарная среднеквадратичная ошибка	0,45 $\div$ 0,6 мм

Выбор  $\beta_0$  целесообразно сделать исходя из условия равенства весовых деформаций при зенитном и горизонтальном положениях антенны:

$$\sigma_0^2\left(\frac{\pi}{2}\right) + \sigma_1^2\left(\frac{\pi}{2}\right) = \sigma_0^2(0) + \sigma_1^2(0),$$

где  $\sigma_0(\beta)$  и  $\sigma_1(\beta)$  — остаточные среднеквадратичные симметричные и кососимметричные погрешности после весовой фокусной компенсации, равные

$$\sigma_0(\beta) \approx \sigma_{0\max} |\sin \beta - \sin \beta_0|$$

и

$$\sigma_1(\beta) \approx \sigma_{1\max} |\cos \beta - \cos \beta_0|.$$

Таблица 2

№	Наименование параметров	Данные 1968 года			Данные 1972 года		
		$\lambda = 30 \text{ см}$	$\lambda = 5 \text{ см}$	$\lambda = 3 \text{ см}$	$\lambda = 30 \text{ см}$	$\lambda = 5 \text{ см}$	$\lambda = 3 \text{ см}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Апертурный КИП	0,93	0,93	0,93	0,97	0,97	0,97
2	Коэффициент рассеяния первичного облучателя	0,15	0,15	0,15	0,05	0,05	0,05
3	Коэффициент затенения	0,07	0,07	0,07	0,055	0,055	0,055
4	Потери от неточности и нежесткости металло-конструкций зеркальной системы	0,02	0,1	0,15	0,002	0,072	0,2
		(при скорости ветра $v = 15 \text{ м/сек}$ )			(при скорости ветра $v = 20 \text{ м/сек}$ )*		
5	Амплитудно-фазовые и поляризационные искажения облучающей системы	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
6	Коэффициент рассеяния на контрефлекторе	0,08	0,04	0,04	0,035	0,015	0,01
7	Результирующий КИП	0,63	0,60	0,57	0,79	0,75	0,75
		(при скорости ветра $v = 15 \text{ м/сек}$ )			(при скорости ветра $v = 20 \text{ м/сек}$ )*		
8	КПД СВЧ приемного тракта	0,93	0,92	0,90	0,99	0,98	0,97
9	Эффективная поверхность на входе приемного устройства	1870 $\text{м}^2$	1760 $\text{м}^2$	1640 $\text{м}^2$	2540 $\text{м}^2$	2400 $\text{м}^2$	2080 $\text{м}^2$
		(при скорости ветра $v = 15 \text{ м/сек}$ )			(при скорости ветра $v = 20 \text{ м/сек}$ )*		
10	Шумовая температура антенны при $\beta = 90^\circ/\beta = 20^\circ$	19°K	10°K	13°K	16°K	8°K	10°K
		24°K	21°K	28° K	19°K	15° K	21°K
11	Шумовая температура СВЧ тракта	20°K	25°K	30°K	3°K	7°K	10°K
12	Суммарная шумовая температура антенной системы с приемным устройством $\sim 4 - 9^\circ\text{K}$ , $\beta = 90^\circ/\beta = 20^\circ$	43°K	42°K	52°K	23°K	22°K	29°K
		48°K	53°K	67°K	26°K	29°K	40°K
13	Отношение $\frac{S_{\text{эфф}}}{T_w}$ для антенной системы с приемным устройством $\sim 4 - 9^\circ\text{K}$ , $\beta = 90^\circ/\beta = 20^\circ$	44	42	32	110	109	72
		39	33	25	98	83	52
		(при скорости ветра $v = 15 \text{ м/сек}$ )			(при скорости ветра $v = 20 \text{ м/сек}$ )*		

\* Ветровые нагрузки средние для возможных направлений ветра без компенсации ветровых деформаций.

Таким образом,  $\beta_{\text{ю}}$  определяется из соотношения

$$\frac{1 - 2 \sin \beta_{\text{ю}}}{1 - 2 \cos \beta_{\text{ю}}} = \left( \frac{\sigma_{1\max}}{\sigma_{0\max}} \right)^2.$$

В ТНА-1500 преобладают симметричные искажения, поэтому оптимальный угол  $\beta_{\text{ю}}$  близок к  $30^\circ$ . Если еще иметь в виду увеличение ветровых деформаций антенны и увеличение ее шумовой температуры с уменьшением угла места, то оказывается целесообразным значение  $\beta_{\text{ю}}$  дополнительно несколько уменьшить. Это позволяет частично компенсировать потери эффективности антенны под низкими углами места. Чрезмерное уменьшение  $\beta_{\text{ю}}$  приводит к снижению максимального значения эффективности антенны в области средних углов места, представляющих наибольший интерес для наблюдений, допускающих выбор времени суток и года.

Только за счет юстировки антенны под оптимальным углом места вместо зенитного положения достигается 1,5—2-кратное укорочение предельной длины волны или 3—4-кратное уменьшение потерь эффективности.

Модернизация радиотехнической части рассматриваемых радиотелескопов была направлена на дальнейшее повышение добротности антенны при сохранении ее универсальности для работы в широком диапазоне волн.

В качестве основного средства повышения КИП антенны использованы модифицированные профили зеркал при минимальной коррекции профиля главного зеркала. Также приняты дополнительные меры к снижению парциальных коэффициентов рассеяния, в том числе для первичных облучателей и контррефлектора, коэффициента затенения и т. п. Кроме того, отработаны усовершенствованные методы автосопровождения, не связанные с заметными потерями эффективности.

Совокупность мер по оптимизации конструкций зеркала, методов и аппаратуры его юстировки и радиотехнической схемы обеспечивает повышение добротности антенны и укорочение ее предельной рабочей волны. Количественные данные приведены в табл. 2.

Проводившаяся в течение четырех последних лет аппаратурная отработка элементов систем наведения показала, что принятые в проекте ТНА-1500 1968 года методы и технические решения перспективны и для более крупных и точных сооружений. Поэтому аппаратура наведения унифицируется с учетом усовершенствований ее в части повышения уровня автоматизации и надежности работы в круглосуточном режиме. Это связано с автоматизацией перехода из одного рабочего режима в другой, с автоматизацией контроля и устранения неисправностей путем переключения в дублирующие режимы и на резервный комплект аппаратуры. Причем автоматизация не связана с усложнением аппарата. Наоборот, достигается упрощение некоторой ее части.

Программа натурного эксперимента и аппаратура для ее осуществления в основном изложена в проекте 1968 г. и ждет своей ближайшей реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Поляк, Диссертация, Инженерно-строительный институт, М., 1972 г.
2. Б. А. Попереченко, А. И. Дулькин, А. В. Суетенко, Г. В. Кисленков, Н. А. Корсакова, Вопросы радиоэлектроники, сер. общетехн., вып. 5, 1970.
3. А. Г. Соколов, В. С. Поляк, Развитие конструктивных способов увеличения эффективности полноповоротных параболических антенн, Доклад на VII Всесоюзной конференции по радиоастрономии, Горький, 1972.