

Сравнение возможностей оптических и радиоастрономических методов измерения параметров крупных антенн

© Н. А. Дугин¹, А. В. Калинин¹,
Ю. В. Тихомиров¹, В. В. Петров²,
Г. Б. Бузик², В. О. Медяников², В. В. Шишкина²

¹ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
²ООО «Промышленная геодезия», г. Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются результаты анализа экспериментальных данных обследования крупногабаритных антенн координатоопределяющими методами и предварительной оценки зависимости характеристик этих антенн от рабочей частоты. Проводится сравнение с результатами, полученными радиоастрономическим и радиологическим способами.

Анализ возможностей оценки параметров крупногабаритных антенн с использованием данных оптических измерений показывает, что преимуществом этих методов можно считать то, что они позволяют определить величины отклонения от проектной формы, положения и взаимной ориентации отражающей поверхности основного и вторичного рефлекторов. Радиоастрономический метод дает «интегральные» данные о параметрах антенны, которые не позволяют определить конкретные области источников ошибок, но являются наиболее точными с точки зрения оценки эффективности системы. Влияние переменных нагрузок, в том числе весовых и температурных деформаций зеркал, на характеристики антенн может быть эффективно исследовано оптическим координатоопределяющим, радиоастрономическим или радиологическим методами.

Сопоставление результатов обоих методов позволяет улучшить точность определения параметров крупных антенных систем.

Ключевые слова: параметры антенн, методы измерений, координатоопределяющая технология, радиоастрономия, радиологическая, выверка, лазерное сканирование.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.48.41-49>

Введение

Измерение или оценка характеристик антенн при вводе их в действие и контроль стабильности системы в процессе эксплуатации являются практически обязательной процедурой. Особенно это касается полноповоротных антенн с диаметрами зеркал в десятки метров, так как они подвержены сильному влиянию весовых и температурных деформаций из-за большой массы и «парусности».

К наиболее часто применяемым способам измерений параметров антенн можно отнести механические, оптические и радиоастрономические методы (к которым можно отнести и радиоголографию). Механические замеры, скорее всего, проводятся в процессе изготовления элементов конструкций антенн и при их сборке.

Наиболее эффективные оптические методы реализуют координатоопределяющую технологию, в которой на исследуемой поверхности определяют координаты точек относительно какой-либо опорной точки, например, фокуса зеркала, по которым затем вычисляют отклонения формы поверхности (регулярные и случайные) от заданной. К преимуществам этих методов можно отнести возможность:

- 1) отдельных измерений величин среднеквадратичного отклонения (СКО) поверхности от расчетной для основного и вторичного рефлекторов антенны;
- 2) определения взаимного положения и ориентации элементов конструкции;
- 3) исследования геометрических характеристик конструкции на любом угле места независимо от работы приводных и приемных систем антенны;
- 4) контроля величины юстировочных перемещений в режиме реального времени.

Эти особенности метода позволяют для каждого элемента конструкции точно локализовать области деформаций, но затрудняют оценку общих потерь коэффициента использования поверхности (КИП). Кроме того, существуют трудности в оперативном контроле стабильности геометрических параметров зеркальной системы в неблагоприятных атмосферных условиях — дождь, снег, мороз и др. Однако в ряде случаев измерения параметров антенных систем другими методами провести не представляется возможным. Весьма актуальным при этом является выбор оптимального числа отсчетов и обоснование соответствия полученных данных «интегральным» параметрам антенны. Поэтому требуются независимые измерения другими способами для подтверждения достоверности расчетов исследуемых параметров по координатоопределяющей технологии.

Радиоголографический метод позволяет определить распределение амплитуды и фазы (АФР) поля в апертуре многозеркальной антенны. Амплитудное распределение демонстрирует качество облучающей системы. Фазовое распределение обеспечивает возможность целенаправленной юстировки зеркальной системы — крупномасштабные искажения фазы могут компенсироваться путем коррекции положений облучателя и контррефлектора, среднемасштабные фазовые искажения можно уменьшить регулировкой положения отдельных панелей основного зеркала или контррефлектора. По распределению фазы поля в апертуре можно оценить также «интегральную» среднюю квадратическую ошибку (СКО) поверхностей зеркал. Пространственное разрешение восстанавливаемого АФР определяется угловым сектором измерения диаграммы направленности (ДН) антенны и может достигать нескольких десятков сантиметров. При этом продолжительность измерений может составлять от одного до десятков часов. Для данного метода требуется установка дополнительной

антенны диаметром 1–2 м и двухканального фазометрического приемника. При наличии соответствующего оборудования и программного обеспечения измерения на действующей антенне можно проводить регулярно.

Радиоастрономический метод позволяет наиболее просто измерить эффективную площадь антенны и разъюстировку и контролировать их изменения при внешних воздействиях. При многочастотных наблюдениях можно оценить СКО поверхности. Радиоастрономический метод дает «интегральные» данные о параметрах антенны, которые не позволяют выделить конкретные области источников ошибок, но являются наиболее точными с точки зрения общей оценки эффективности системы.

Возможности этих методов проиллюстрированы результатами измерений параметров радиотелескопа РТ-70 в пункте дальней космической связи (ДКС) «Уссурийск».

Координатоопределяющая технология

Фотограмметрические и лазерные сканирующие системы позволяют определить следующие основные сведения об антенне:

- 1) СКО формы отражающей поверхности рефлектора и контррефлектора от расчетной, рассчитанное по всем измеренным точкам;
- 2) отклонение отражающей поверхности отдельных щитов от проектной формы рефлектора антенной системы;
- 3) картограмму отклонений формы отражающей поверхности рефлектора антенной системы при различной ориентации по углу места;
- 4) взаимное положение и ориентацию элементов зеркально облучающей системы на различных азимутах и углах места.

Эти данные позволяют провести: 1) расчет спада КИП (или коэффициента усиления) в зависимости от рабочей частоты; 2) оценку возможности определения линейных, квадратичных и кубичных нелинейностей относительно теоретической формы поверхности зеркал, что дает возможность определить вероятные величины разъюстировки зеркала и искажений формы главного максимума ДН — сдвиг максимума, уширение и асимметрию; 3) расчет величины разъюстировки зеркала при сдвиге контррефлектора и возникновения линейных искажений распределения поля по раскрытию, в том числе при температурных и весовых деформациях, и другие параметры.

Эффективность работ по доводке поверхности зеркала с помощью регулировки положения отражающих щитов можно проиллюстрировать на примере антенны РТ-70 (рис. 1). Первые лазерные измерения поверхности основного рефлектора дали значение СКО, равное 2.18 мм. Далее была проведена регулировка положений щитов, и новое значение СКО получилось равным 0.55 мм для рабочего угла места $\text{УМ} = 30^\circ$.

Оценка парциального коэффициента спада КИП η_3 из-за погрешности изготовления поверхности зеркала σ проводилась по простому соотношению

$$\eta_3 = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right],$$

применимому для случая $C \gg \lambda$, где C — интервал корреляции неровностей поверхности зеркала, λ — длина волны; считаем, что зоны корреляции соответствуют размерам щитов поверхности зеркал, а рабочие длины волн — менее 5 см. На рис. 2 показаны графики зависимости спада КИП (η_z) от частоты для различных СКО (σ). Видно, что спад КИП на частоте 20 ГГц после регулировки стал менее 20 %, хотя до этого антенна на этой частоте была практически неработоспособна. Здесь достаточно сложной проблемой был учет совместного СКО поверхностей рефлектора (рфл) и контррефлектора (крфл). Наиболее близким результатом расчета спада КИП к экспериментальным данным можно считать данные при совместном СКО σ_Σ , определяемом как $\sigma_\Sigma^2 = \sigma_{рфл}^2 + \sigma_{крфл}^2$, где $\sigma_{рфл}$ — СКО рефлектора, $\sigma_{крфл} = 1.21$ мм — измеренное СКО контррефлектора. В этом случае КИП на частоте 20 ГГц составит примерно 28 %. В работе [1] даются более сложные расчетные формулы, но сравнительный анализ показал практически полное равенство η , вычисленных разными способами. Очевидно, что следует провести доработку поверхности контррефлектора, т. к. его вклад в потери площади велик. Размеры контррефлекторов крупных антенн обычно в пределах 2–6 м, т. е. возможна их доработка до состояния, когда СКО поверхности контррефлектора можно будет пренебречь.

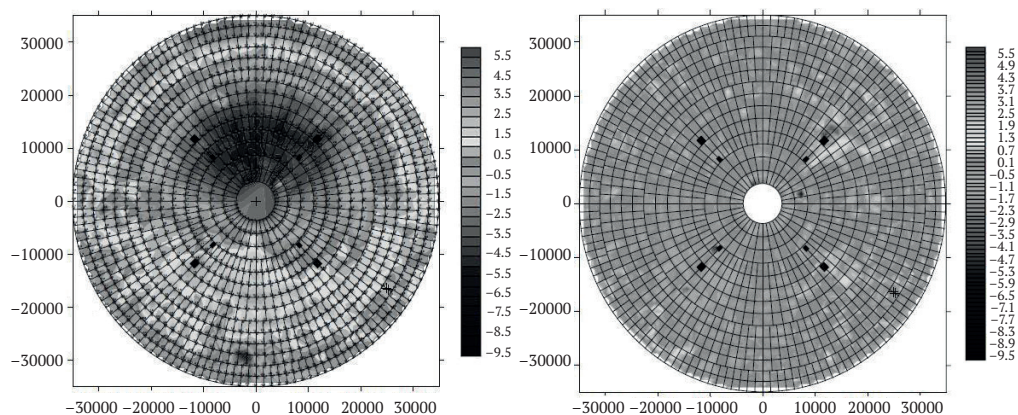


Рис. 1. Картограммы отклонений формы отражающей поверхности рефлектора РТ-70: слева — до юстировки поверхности СКО = 2.18 мм, справа — после юстировки СКО = 0.55 мм для рабочего УМ = 30°

Очень существенными являются деформации зеркала при резких изменениях температуры окружающей среды (в том числе сезонные и суточные), при поворотах зеркала по углу места и при воздействии внешних сил (ветер, снег и т. д.). На рис. 3а приведены данные об отклонении одного из щитов антенны РТ-70 в двух плоскостях при ее наклоне по углу места. Смещение контррефлектора достигает величины 40 мм, т. е. требуется вводить поправки наведения в зависимости от угла места, которые могут достигать нескольких угловых минут. Этот же вывод касается влияния температурных деформаций: на рис. 3б приведены данные об отклонении края рефлектора антенны РТ-70

при суточном перепаде температуры до 15°C — смещение края рефлектора при диаметре 70 м достигает величины 6 мм, т. е. также требуется вводить поправки наведения.

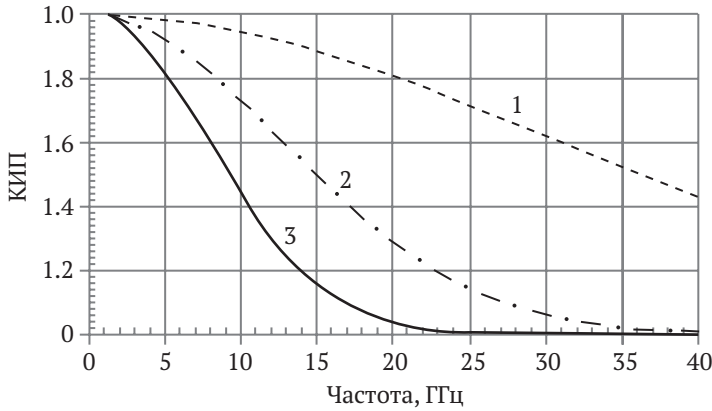


Рис. 2. Зависимость КИП от частоты при различных СКО:

- 1) $\sigma_{\text{рфл}} = 0.55$ (после регулировки); 2) $\sigma_{\text{рфл} + \text{крфл}} = 1.33$ (после регулировки с учетом контррефлектора); 3) $\sigma_{\text{рфл}} = 2.18$ (до регулировки) для антенны РТ-70

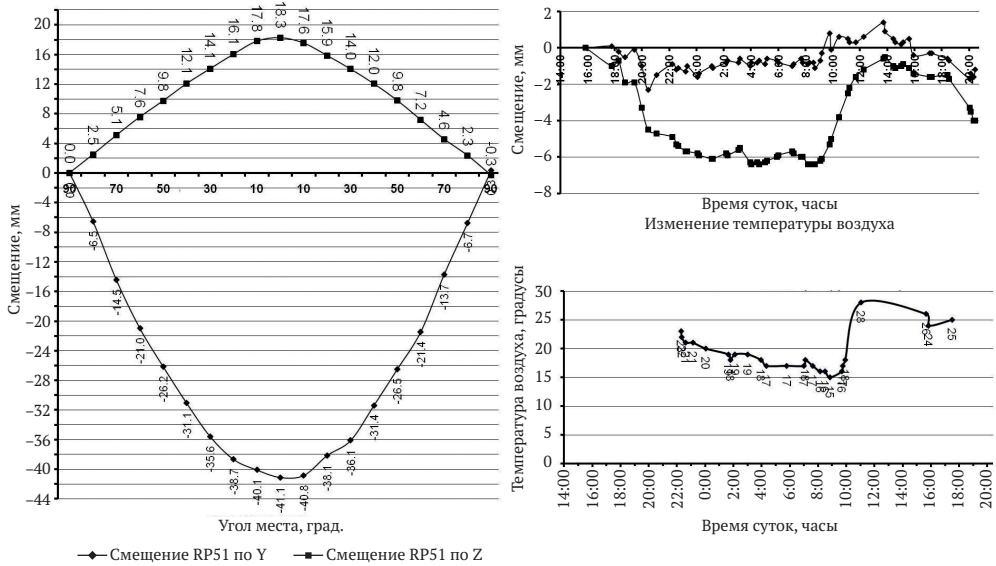


Рис. 3. Деформация зеркальной системы РТ-70: а) при наклоне по углу места; б) при суточном перепаде температуры

Радиоголографический метод

Этим методом измерялись неровности поверхности РТ-70 по сигналам геостационарных искусственных спутников Земли (ИСЗ) и по радиостанции Лебедь А, интенсивность излучения которого существенно меньше, чем у ИСЗ. На рис. 4 показаны АФР поля, измеренные по ИСЗ и по Лебедю А на

близких углах места (36° и 38°). Использование естественного внеземного радиосточника обусловлено тем, что геостационарные ИСЗ находятся в зоне низких углов места, радиосточники же можно наблюдать и на высоких углах. Как видно из приведенных рисунков, восстановленные АФР качественно совпадают, но измерения по сигналам ИСЗ позволяют получить гораздо более высокое пространственное разрешение. Представленные результаты получены при продолжительности каждого сеанса порядка одного часа.

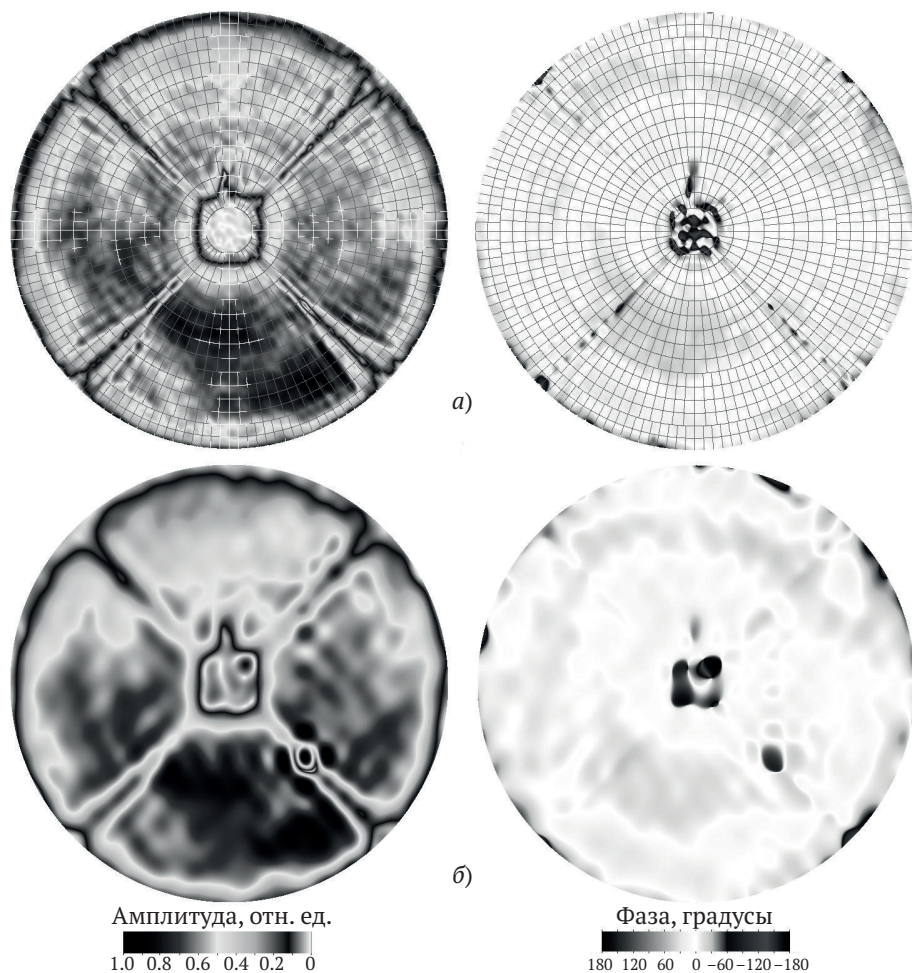


Рис. 4. АФР поля в апертуре РТ-70, восстановленные по сигналам:
а) геостационарного ИСЗ и б) радиосточника Лебедь А

Радиоастрономический метод

Радиоастрономический метод можно считать наименее затратным и оперативным, несмотря на определенные особенности. Поскольку используются внеземные радиосточники с известными, но очень малыми плотностями по-

токов излучения, требуется применение высокочувствительной аппаратуры. Временная переменность излучения большинства радиоисточников приводит к необходимости иметь обновляемые каталоги потоков этих источников. Кроме того, из-за сильного поглощения в атмосфере для радиоволн на частотах более 10 ГГц, желательно измерять поглощение в атмосфере непосредственно во время сеанса измерений параметров антенны и, соответственно, разработать алгоритмы и программы определения величины поглощения для уменьшения ошибок определения эффективной площади антенны.

Результаты изменения разъюстировки (направления электрической оси зеркала) и эффективной площади в зависимости от угла места могут быть получены в одном цикле наблюдений одного или нескольких радиоисточников. При двух- или многочастотных измерениях КИП определяется «интегральное» СКО поверхности по соотношению [2]

$$\sigma = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \ln \frac{\text{КИП}(\lambda_1)}{\text{КИП}(\lambda_2)}}$$

где λ_1, λ_2 — длины волн, на которых проводятся измерения.

На рис. 5а, б показаны зависимости разъюстировки и эффективной площади от угла места антенны на частотах 7.2 и 8.4 ГГц, проведенных по нескольким наиболее сильным источникам, показанных на рисунках справа. Использовались высокочувствительные радиометры и обновляемые каталоги радиоисточников.

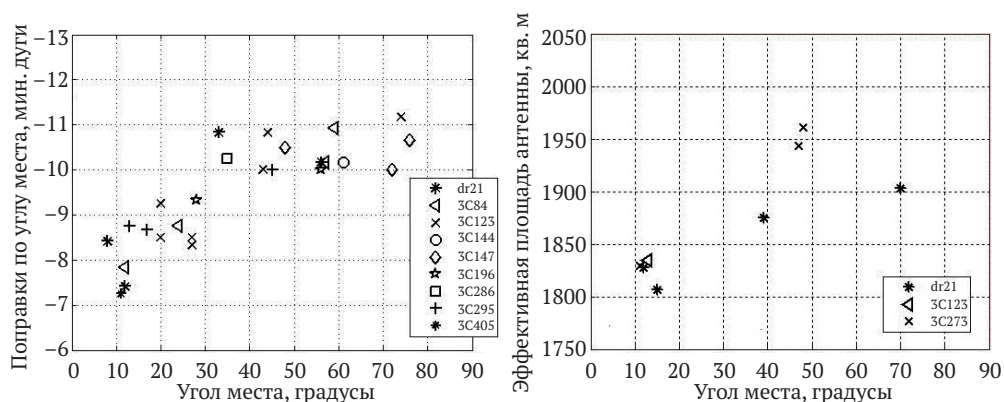


Рис. 5. а) поправки наведения антенны РТ-70 по углу места на частоте 8.4 ГГц; б) изменение эффективной площади в зависимости от угла места на частоте 7.2 ГГц

Заключение

Таким образом, анализ возможностей геодезических и радиоастрономических методов оценки параметров крупногабаритных антенн показал, что эти методы имеют как преимущества, так и недостатки, которые могут быть нивелированы при их параллельном применении и сопоставлении результатов.

Повышение точности оценки параметров антенн по данным лазерного сканирования требует существенного увеличения объема экспериментальных данных – детального обмера всех щитов основного и вторичного зеркал при разных внешних условиях и ориентации зеркальной системы.

Проблема учета суммарного влияния СКО поверхности главного и вторичных зеркал на спад КИП важна для достижения большей точности оценок параметров антенн только по данным лазерного сканирования.

Радиоастрономический метод дает «интегральную» величину СКО и может быть применен для «прямого» определения величины и стабильности эффективной площади антенны и ее разъюстировки.

Для определения суммарных искажений многозеркальных систем и их юстировки целесообразно применение радиоголографического способа. Влияние весовых и температурных деформаций зеркал также может быть более просто и надежно измерено радиоастрономическим и радиоголографическим методами.

Очевидно, что применение разных методов позволит повысить точность и достоверность результатов измерений характеристик антенн.

Исследования ведутся при финансовой поддержке Минобрнауки (госзадание № 3.2722.2017/4.6).

Л и т е р а т у р а

1. Фролов О. П., Вальд В. П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. — М.: Горячая линия-Телеком, 2008. — 496 с.

2. Мосалов И. В., Бахарев Н. В., Дугин Н. А., Цейтлин Н. М. Вантовый радиотелескоп НИРФИ // Изв. вузов. Радиофизика. — 1979.— Т. 22, № 11. — С. 1293–1300.

Comparison of the Possibilities of Optical and Radio Astronomy Methods for Measuring the Parameters of Large Antennae

**N. A. Dugin, A. V. Kalinin, Ju. V. Tikhomirov,
V. V. Petrov, G. B. Buzik, V. O. Medyannikov, V. V. Shishkina**

The article focuses on the experimented results of a survey of large-sized antennae using laser ranging and a preliminary estimation of antenna characteristics dependence on the operating frequency. A comparison is made with the results obtained by radio astronomy and radio holographic methods.

An analysis of the possibilities for estimating the large-sized antennae parameters using optical measurements shows that the advantage of these methods is that they give separate values of the standard deviation of the mirror surface from the calculated one for the primary and secondary reflectors. The radio astronomy method provides “integral” data on antenna parameters which do not allow to determine specific areas of errors sources but are the most accurate from the point of view of evaluating the system effectiveness. The impact of variable

loads, including weight and temperature distortions of mirrors, on the characteristics of antennae can also be effectively investigated by radio astronomy or radio holographic methods.

Comparison of the results of both methods allows to improve the accuracy of estimates of the large antenna systems parameters.

Keywords: antenna parameters, measurement methods, laser ranging, radio astronomy, radio holography.