

УДК 621.3.088

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К КОМПЛЕКСУ КАЛИБРОВКИ КРУПНОАПЕРТУРНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

А.С. Завгородний

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
zavgor@vniiftri.ru

*Аннотация.* На основании проведённых оценок сформулированы требования к геометрическим параметрам антенной системы комплекса метрологического обеспечения крупноапертурных антенн.

*Ключевые слова:* крупноапертурные антенны, комплекс калибровки.

## DEFINION OF REQUIREMENTS FOR A CALIBRATION COMPLEX LARGE-APERTURE ANTENNA SYSTEMS

A.S. Zavgorodniy

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
zavgor@vniiftri.ru

*Annotation.* On the basis of assessments carried out, the requirements for the geometric parameters of the antenna system of the complex for metrological of large-aperture antennas are formulated.

*Key words:* large-aperture system, calibration complex.

### Введение

Мировая практика измерений радиотехнических параметров спутниковых сигналов основана на применении направленных антенных систем. Не являются исключением из этого и комплексы метрологического обеспечения сигналов ГНСС [1, 2]. Проблемы применения крупноапертурных антенн связаны со сложностями калибровки их параметров. Так как методы ближней зоны использовать затруднительно, а часто и вовсе не возможно, то остаётся проводить калибровку таких антенн методами дальней зоны. Это подразумевает наведение антенны на источник сигнала с известными характеристиками, удалённый на так называемое «расстояние дальней зоны»  $L = 2D^2/\lambda$ , где  $D$  — характерный геометрический размер апертуры антенны,  $\lambda$  — длина волны радиосигнала. Источником калибровочного сигнала может выступать излучатель, расположенный на удалённой от калибруемой антенной

системы вышке или высотном здании, однако в этом случае высок риск попадания в боковые лепестки диаграммы направленности наземных источников радиопомех. Более удачный вариант — размещение источника на летательном аппарате (в том числе беспилотном). Подвижный источник позволяет измерить параметры антенной системы при любых углах наведения, однако работа с ним связана с большим количеством технических, эксплуатационных и организационных сложностей. Также источниками сигнала могут выступать естественные астрономические радиоисточники, самый мощный из которых — Солнце.

Измерение параметров антенн по радиоизлучению Солнца — проверенный и хорошо известный в радиоастрономии метод (например, [3]). Однако хорош ли радиосигнал Солнца в качестве калибровочного? Процессы, происходящие на Солнце, приводят к перепадам энергетических характеристик излучения. Также изучены циклы солнечной активности [4]. В целях обеспечения метрологических характеристик радиоизлучения Солнца в интересах калибровки крупноапертурных антенных систем требуется создать измерительный комплекс, также использующий крупноапертурную антенную систему, характеристики которой, однако, необходимо будет определять по другим источникам, не используя радиоастрономические. Выбору размеров апертуры этой антенной системы посвящена настоящая статья.

### Обсуждение

Основным преимуществом использования крупноапертурных антенн является возможность увеличения превышения мощности полезного сигнала над мощностью шумов, которое называют отношением «сигнал — шум». Средства измерений радиотехнических величин, как правило, требуют существенного превышения уровня полезного сигнала в занимаемой им полосе над шумами. Разработчики гарантируют метрологические характеристики аппаратуры при значениях не менее 10–13 дБ, то есть мощность сигнала должна быть больше шумовой более чем в 10–20 раз. Очевидно, при работе с сигналами разной мощности в целях выполнения этих условий требуется различное усиление, а значит, и различные по габаритам и конструкции антенные системы.

Мощность полезного сигнала  $P_c$  на выходе крупноапертурной зеркальной антенны определяется как [3]:

$$P_c = P_{\text{ант вых}} = G_A \cdot P_{\text{ант вх}} = G_A \cdot S_c \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \Delta f.$$

Здесь  $P_{\text{ант вых}}$  — мощность сигнала на выходе антенны, Вт;  $G_A$  — коэффициент усиления антенны, безразмерная величина;  $P_{\text{ант вх}}$  — мощность сигнала на входе изотропной (ненаправленной) антенны, Вт;  $S_c$  — спектральная плотность потока мощности полезного сигнала в плоскости апертуры приёмной антенны, Вт/(м<sup>2</sup>·Гц);  $\lambda$  — длина волны излучения, м;  $\Delta f$  — занимаемая сигналом (излучением) полоса частот, Гц.

Мощность шумов  $P_{\text{ш}}$  находится по формуле:

$$P_{\text{ш}} = kT_{\text{ш}} \cdot \Delta f,$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T_{\text{ш}}$  — шумовая температура антенны в отсутствие полезного сигнала, К.

Важно отметить, что шумовая температура антенны не имеет отношения к её термодинамической температуре. Её вводят как температуру резистора, который имел бы такую же мощность шумов в указанной полосе частот  $\Delta f$ , как и антенна, при его нагреве до температуры  $T_{\text{ш}}$ .

При вычислении отношения мощности сигнала к мощности шумов преобразуем выражение:

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = G_A \cdot S_c \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \Delta f \cdot \frac{1}{kT_{\text{ш}} \cdot \Delta f} = \frac{G_A}{T_{\text{ш}}} \cdot \frac{S_c \cdot \lambda^2}{4\pi k} = Q \cdot \frac{S_c \cdot c^2}{4\pi k \cdot f^2}. \quad (1)$$

Величина  $Q = G_A/T_{\text{ш}}$  называется шумовой добротностью антенной системы. Другие множители в правой части уравнения (1) не зависят от геометрических параметров антенны. Целесообразно рассматривать эту группу как один коэффициент, характеризующий принимаемый сигнал. Например, для радиоизлучения Солнца в диапазоне 1–4 ГГц этот коэффициент монотонно убывает от 2,1 до 0,3 К, а для радионавигационных сигналов он составляет приблизительно 5,0, 4,6 и 2,8 К для диапазонов L1, L2 и L3 соответственно. Автором предложена математическая модель, позволяющая рассчитать зависимость шумовой добротности от диаметра основного рефлектора зеркальной антенны  $Q = f(D)$ . Деталям и нюансам применения этой модели посвящена отдельная статья [5], поэтому этот материал в текст настоящей статьи не включён. Ориентировочные значения шумовой добротности для антенных систем с различными рефлекторами приведены в таблице.

Результаты моделирования показали, что рост диаметра рефлектора антенной системы приводит к увеличению шумовой добротности. Однако вместе с этим ухудшаются эксплуатационные и экономические показатели антенной системы, а главное — увеличивается расстояние дальней зоны.

Таблица

Модельные значения шумовой добротности при различных углах наведения

Диаметр рефлектора, м	2	4	6	8	10
Ориентировочные значения $Q$ , дБ исх. $K^{-1}$	4,1–8,5	12,1–15,2	16,6–19,0	19,7–21,5	22,0–23,5
Расстояние дальней зоны для сигналов диапазона $L_1/L_3$ , м	43/32	171/128	384/289	684/513	1068/801

Для калибровки полного коэффициента усиления антенной системы МК ОЭХ требуются данные об энергетических характеристиках радиоизлучения Солнца. Целесообразно развёртывать измерительный комплекс также на территории ФГУП «ВНИИФТРИ». Так как параметры антенной системы измерительного комплекса должны контролироваться с использованием источника тестового сигнала, то требуется размещение калиброванного облучателя в дальней зоне антенны. На территории института немного высотных зданий, вид на южную территорию, где предполагается разместить измерительный комплекс, открывается с двух корпусов — это корпуса № 27 и 28. На крыше корпуса № 28 размещены ненаправленные антенны приёмного оборудования, принимающего радионавигационные сигналы, калибровочный сигнал, пусть даже передаваемый направленной антенной, будет для них помеховым. По этим причинам для размещения источника опорного сигнала больше подходит крыша южной пристройки корпуса № 27 (см. рис. 1).



Рис. 1. Предполагаемое размещение антенной системы измерительного комплекса на территории ФГУП «ВНИИФТРИ»

Исходя из удобства подвода силовых линий и эксплуатации, целесообразно разместить измерительный комплекс на расстоянии 300–350 м от южной пристройки. По этой причине диаметр основного рефлектора не должен превышать 5 метров. При таком диаметре шумовая добротность антенной системы составит приблизительно 15 дБ.

### Выводы

На основании проведённых оценок сформулированы требования к геометрическим параметрам антенной системы комплекса метрологического обеспечения крупноапертурных антенн. Полученные результаты представляют собой научный задел для выполнения НИР и ОКР на этапе с 2021 года.

### Список литературы

1. Власов И.Б., Михайлицкий В.П., Рыжов В.С., Ефремов В.А. Результаты оценки энергетических характеристик сигналов КА ГЛОНАСС на радиотелескопе РТ-7,5 // Радионавигационные технологии. Сер. «Радиосвязь и радионавигация». — М.: 2015. — С. 108–116.
2. Завгородний А.С. Результаты наблюдений навигационных космических аппаратов при помощи специализированного метрологического комплекса (МК ОЭХ) // Сборник докладов XXIII международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация», 30 июня – 8 июля 2018 г., Евпатория. — М.: МАИ, 2018. — С. 33–34.
3. Власов И.Б., Михайлицкий В.П., Рыжов В.С. Калибровка радиотракта радиотелескопа РТ-7,5 при мониторинге сигналов навигационных космических аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». — 2014. — No. 6. — С. 96–107.
4. Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A. Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints // Astronomy & Astrophys. — 2007. — V. 471. — P. 301–309.
5. Завгородний А.С. Моделирование параметров крупноапертурной зеркальной антенны // Вестник метролога. — 2021. — № 2. — С. 20–24.

*Статья поступила в редакцию: 31.05.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 11.06.2021 г.*

*Статья принята в работу: 01.07.2021 г.*