

СТАТИЧЕСКИЙ И МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРЕЦИЗИОННОГО КРУПНОГАБАРИТНОГО АНТЕННОГО РЕФЛЕКТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Ю. Власов, Н. А. Амельченко, К. А. Пасечник, М. А. Титов, М. В. Сержантова*

Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: 2074213@gmail.com

Представлена конструкция прецизионного крупногабаритного антенного рефлектора из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных волокон. Применение углеродных волокон позволяет достичь оптимального коэффициента линейного теплового расширения и относительно высокой жесткости конструкции в целом. Совокупность механических и точностных характеристик позволяет использовать углепластиковые рефлекторы в наземных приемопередающих станциях спутниковой связи, работающих на высоких частотных диапазонах. Основной задачей данной статьи является получение оптимальной силовой конструкции, обеспечивающей геометрическую стабильность рабочей поверхности рефлектора диаметром апертуры более 10 м и рабочим частотным диапазоном 42,5–45,5 ГГц из полимерных композиционных материалов, устойчивой к воздействию внешних деструктивных факторов.

Разработанная модель рефлектора включает трубный силовой каркас, сегменты отражающей поверхности и ступицу. Силовой каркас рефлектора состоит из плоских ферм, дополненных стержнями таким образом, что при сборке образуется пространственная конструкция с осевой симметрией. Особенность конструкции заключается в применении сварных соединений элементов силовых труб с фитингами, что существенно уменьшает массу готового изделия и повышает собственную частоту колебаний изделия в целом. Сегменты – это трехслойные оболочки из полимерных композиционных материалов с наполнителем.

Предложенная модель рефлектора была проанализирована с помощью метода конечных элементов с граничными условиями: ветровая нагрузка 20 м/с в раскрыт рефлектора; воздействие гравитации на рефлектор, ориентированный на зенит. Ветровая нагрузка моделировалась как равномерно распределенное давление, приложенное к сегментам. Полученные значения среднеквадратичного отклонения (СКО) геометрии и собственной частоты колебаний рефлектора из полимерных композиционных материалов на основе углеродных волокон достаточны для работы наземной станции спутниковой связи в высоких радиочастотных диапазонах Ka, Q и V.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, рефлектор, антенна.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 897–901

STATIC AND MODAL ANALYSIS OF THE POWER CONSTRUCTION OF THE PRECISION LARGE-SIZED ANTENNA REFLECTOR FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS

А. Ю. Власов, Н. А. Амел'ченко, К. А. Пасечник, М. А. Титов, М. В. Сержантова*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: 2074213@gmail.com

The design of a precision large-size antenna reflector made of polymer composite materials (PCM) based on carbon fibers is presented in the article. Such reflectors are used for operation in high frequency ranges, since they have a low coefficient of linear thermal expansion and a high modulus of elasticity. Therefore, the main task of this work is to design the geometric accuracy of the reflector working surface from composite materials with a diameter of more than 10 meters and a frequency range of 42.5–45.5 GHz.

The developed model of the reflector includes a power frame, segments of the reflecting surface and a hub. The power frame of the reflector consists of flat trusses supplemented with rods, so that during assembly a spatial construction with axial symmetry is formed. Segments are three-layer casings of polymer composite materials with filler.

The proposed model of the reflector was analyzed using the finite element method with boundary conditions: a wind load of 20 m/s in the opening of the reflector; Impact of gravity on the reflector, oriented to the zenith. The wind load was modeled as a uniformly distributed pressure applied to the segments. The obtained mean square deviation (SDE) of

the geometry and natural oscillation frequency of a reflector made from polymer composite materials based on carbon fibers is sufficient for operation of the satellite earth station in high radio-frequency ranges Ka, Q and V.

Keywords: polymer composite materials, reflector, antenna.

Введение. В настоящее время системы на базе спутников HTS (High Throughput Satellite) характеризуются использованием высоких частотных диапазонов, в том числе *Ka* (18,2–21,2 ГГц), *Q* (42,5–45,5 ГГц) и *V* (50–70 ГГц) [1]. Обеспечение широкополосных каналов связи требует создания крупногабаритных прецизионных рефлекторов антенн диаметром более 10 м, работающих в радиочастотных диапазонах *Ka*, *Q* и *V*. Задачей проектирования является достижение геометрической точности рабочей поверхности рефлектора, выраженной через СКО [2] от номинальной формы

$$\sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

где n – объем выборки точек поверхности рефлектора; \bar{x} – среднее арифметическое выборки; x_i – элемент выборки, а также обеспечение стойкости к механическим воздействиям и климатическим факторам.

Примерами крупногабаритных прецизионных рефлекторов являются IRAM (30-метровый и 15-метровый телескоп, Испания, Франция), Tian Ma (65 м, Китай, США), CSO (10 м, Гавайи), APEX (12 м, Чили), ALMA (12 м, Чили) [3–7]. Приведенные примеры проектов являются радиотелескопами, СКО отражающей поверхности которых варьируется от 0,015 до 0,03 мм при диаметрах до 12 м и до 0,3 мм при диаметре 65 м. Однако применение подобных технических решений для конструкций рефлекторов ЗССС неприемлемо из-за высокой стоимости и сложности технического обслуживания.

Постановка задачи. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных волокон имеют низкий коэффициент линейного теплового расширения и высокий модуль упругости [8]. Задачей данной работы является разработка крупногабаритной интегральной размеростабильной конструкции рефлектора из ПКМ, работающего в диапазоне 42,5–45,5 ГГц с низким значением среднеквадратичного отклонения отражающей поверхности и высокой жесткостью конструкции.

Допустимый интервал значений СКО для *Q*-частотного диапазона с длиной волны $\lambda = 6,58$ – $7,05$ мм определяется соотношением $\sigma_{\text{доп}} = \lambda/50$, что составляет 0,13 мм в случае отсутствия ветровой нагрузки, и соотношением $\sigma_{\text{доп}} = \lambda/12$ [9], что составляет 0,55 мм в случае ее наличия.

Описание модели. Разработанная модель рефлектора включает три части: силовой каркас, сегменты отражающей поверхности, ступицу [10; 11].

Силовой каркас – пространственная ферменная конструкция, предназначенная для обеспечения жесткости, прочности и температурной размеростабильности отражающей поверхности рефлектора (рис. 1).

Разработанная конструкция рефлектора состоит из плоских ферм, которые упрощают ее изготовление,

сборку и транспортировку. Плоские фермы собираются отдельно, что обеспечивает высокую точность сборки. Совместно с дополнительными соединительными стержнями плоские фермы монтируются под углом $58^\circ 30'$ относительно нормали, восстановленной к основанию рефлектора. Предлагаемое решение поставленной задачи позволяет изготовить силовой каркас, состоящий из набора плоских ферм двух типов 5-рядных и 3-рядных (рис. 1, 2), дополненных стержнями, узлы которых соединяют между собой плоские фермы таким образом, что при сборке образуется пространственная конструкция с осевой симметрией.

Стержни выполнены из углепластиковых труб диаметром 60 мм двух типов, с толщиной стенки 1,4 и 2,8 мм. Усиленные трубы располагаются в наиболее нагруженных частях силового каркаса – первом и втором ряду. В расчетах материал стержней считается изотропным с модулем упругости 70 ГПа.

Форма и габаритные размеры сегментов отражающей поверхности определяют расположение узловых точек силового каркаса в результате решения оптимизационной задачи по определению пространственной структуры каркаса, удовлетворяющего эксплуатационным требованиям.

Сегменты – трехслойные оболочки, лицевая и тыльная поверхности которых выполнены из ПКМ, в качестве заполнителя используется конструкционный пенопласт [12].

Ступица – сварная металлоконструкция цилиндрической формы, имеет интерфейсные точки крепления на опорно-поворотном устройстве.

Результаты исследования. Предложенная модель рефлектора была проанализирована с помощью метода конечных элементов [13; 14] со следующими граничными условиями: ветровая нагрузка 20 м/с в раскрыт рефлектора; воздействие гравитации на рефлектор, ориентированный на зенит. Силовой каркас моделировался балочными конечными элементами, сегменты – поверхностными конечными элементами. Сегменты жестко связаны с узлами силового каркаса. Точки крепления каркаса к ступице заданы жесткой заделкой.

Ветровая нагрузка моделировалась как равномерно распределенное давление, приложенное к сегментам. Сила тяжести учитывалась пропорционально массе элементов конструкций для каждого узла конечно-элементной сетки.

Расчетное значение СКО без ветровой нагрузки составляет 0,16 мм, включая тепловые деформации – 0,11 мм и гравитационные – 0,05 мм. При ветровых нагрузках вклад в деформации составляет 0,28 мм, и максимальное расчетное значение СКО увеличивается до 0,44 мм. Полученные значения СКО лежат в допустимом интервале отклонений для *Q*-диапазона. На рис. 3 приведен график зависимости СКО от диаметра рефлектора, изготовленного из различных конструкционных материалов, который показывает, что применение углепластика позволяет получить крупногабаритную размеростабильную конструкцию.

Проведённый модальный анализ силового каркаса рефлектора показал, что первая собственная частота составляет 47 Гц при массе конструкции около 800 кг, в то время как для аналогичных рефлекторов КАТ-7 диаметром 12 м собственная частота составляет 4 Гц [15]. Это свидетельствует о высокой жесткости разработанной конструкции.

Заключение. Разработанная модель крупногабаритного рефлектора из полимерных композиционных материалов на основе угольных волокон обладает высокой жесткостью конструкции и СКО отражающей поверхности в интервале от 0,13 до 0,55 мм, что обеспечивает стабильную работу ЗССС в диапазоне 42,5–45,5 ГГц.

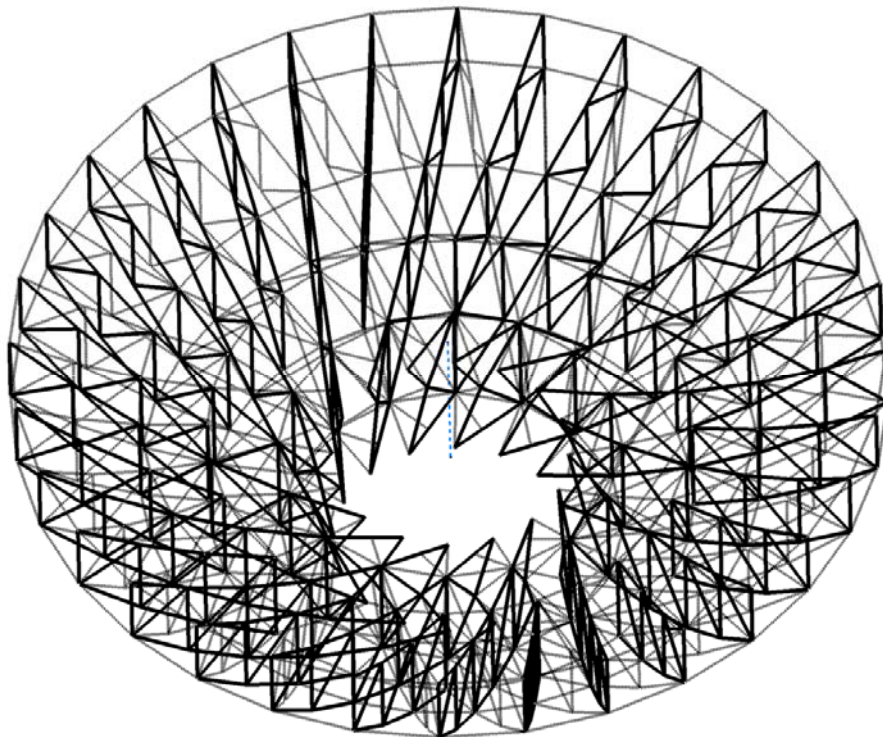


Рис. 1. Общий вид фермы рефлектора

Fig. 1. General view of the reflector truss

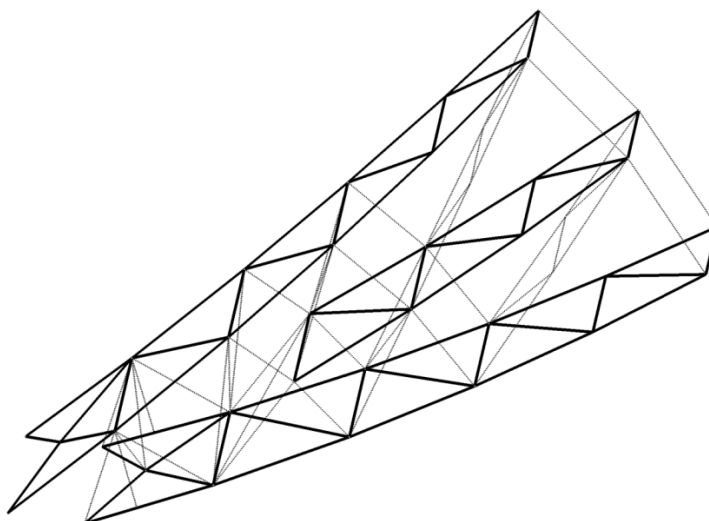


Рис. 2. Повторяющийся элемент фермы рефлектора
(утолщенными линиями изображены плоские радиальные фермы)

Fig. 2. Regular element of the reflector truss
(the thickened lines show flat radial trusses)

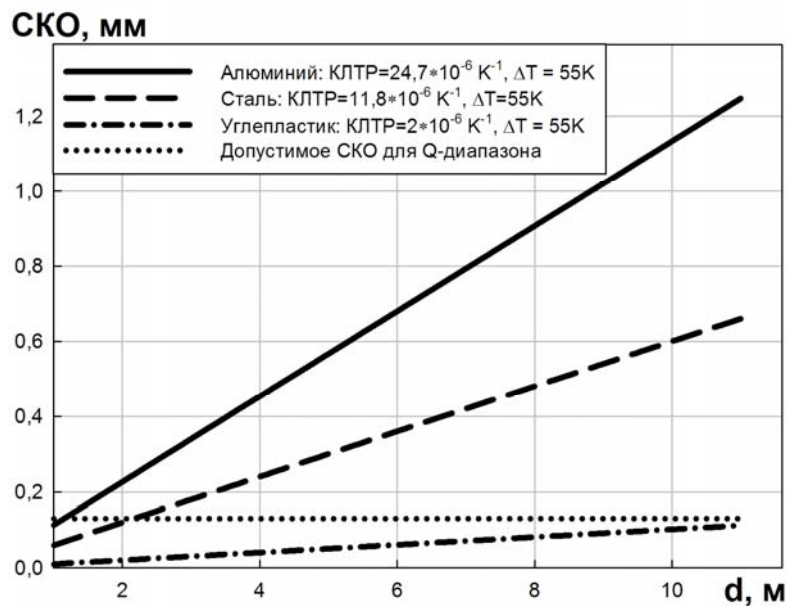


Рис. 3. График функции СКО

Fig. 3. Standart deviation function graph

Благодарности. Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Министерства образования и науки России). Договор № 02.G25.31.0147.

Acknowledgments. The work was carried out during the implementation of a comprehensive project with the financial support of the Government of the Russian Federation (Ministry of Education and Science of Russia). Contract No. 02. G25.31.0147.

Библиографические ссылки

1. Тестоедов Н. А., Кузовников А. В. Перспективы и приоритеты развития информационных спутниковых систем // Исследования наукограда. 2017. № 1 (19). С. 7–10.
2. Беклемишев Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Физматлит, 2008. 312 с.
3. Верещагин Е. М. Антенны и распространение радиоволн. М.: Воениздат, 1964. 240 с.
4. Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн. М.: Радио и связь, 1984. 208 с.
5. Scott C. Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design. London: Artech House Boston, 1990. 144 p.
6. Cheng J. The principles of astronomical telescope design. New York: Springer, 2009. 631 p.
7. Христиансен У., Хёгбом И. Радиотелескопы. М.: Мир, 1988. 304 с.
8. Систематизация базисных факторов, препятствующих внедрению полимерных композиционных материалов в России (обзор) [Электронный ресурс]. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=958.

9. Фролов О. П., Вальд В. П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Горячая Линия – Телеком, 2008. 496 с.

10. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Конструкторско-технологические аспекты создания прецизионных изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов // Вестник СибГАУ. 2015. № 2 (17). С. 460–466.

11. Власов А. Ю., Титов М. А., Пасечник К. А. Разработка оптимальной конструктивно-силовой схемы шестисегментного офсетного антенного рефлектора с применением полимерных композиционных материалов // Международный научно-технический журнал. Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 10, С. 28–33.

12. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Разработка технологии частичного отверждения тонкостенных оболочек при создании конструкций из полимерных композиционных материалов // Вестник СибГАУ. 2015. № 4 (16). С. 918–924.

13. Разработка прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов: конечно-элементное моделирование конструкции / А. Ю. Власов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 73–78.

14. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Определение диапазонов изменения ключевых параметров, обеспечивающих стабильность технологического процесса производства изделий сложной формы из ПКМ методом RTM // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 197–201.

15. Engineering and Science Highlights of the KAT-7 Radio Telescope / A. R. Foley [et al.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2016. 000. P. 1–17.

References

1. Testodov N. A., Kuzovnikov A. V. [Prospects and priorities for the development of information satellite systems]. *Issledovaniya naukoigrada*. 2017, No. 1 (19), P. 7–10 (In Russ.).
2. Beklemishev D. V. *Kurs analiticheskoi geometrii i lineinoi algebry* [The Course of Analytic Geometry and Linear Algebra]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 312 p.
3. Vereshchagin E. M. *Antenny i rasprostranenie radiovoln* [Antennas and propagation of radio waves]. Moscow, Voenizdat Publ., 1964, 240 p.
4. Vud P. *Analiz i proektirovanie zerkal'nykh anten* [Analysis and design of mirror antennas]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984, 208 p.
5. Scott C. *Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design*. London: Artech House Boston, 1990, 144 p.
6. Cheng J. *The principles of astronomical telescope design*. New York: Springer, 2009, 631 p.
7. Khristiansen U., Khegbom I. *Radioteleskopy* [Radiotelescopes]. Moscow, Mir Publ., 1988, 304 p.
8. *Sistematizatsiya bazisnykh faktorov, prepyatstvuyushchikh vnedreniyu polimernykh kompozitsionnykh materialov v Rossii (obzor)* [Systematization of basic factors impeding the introduction of polymer composite materials in Russia (overview)] (In Russ.). Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=958.
9. Frolov O. P., Val'd V. P. *Zerkal'nye anteny dlya zemnykh stantsii sputnikovoi svyazi* [Mirror antennas for satellite earth stations]. Moscow, Goryachaya Liniya–Telekom Publ., 2008, 496 p.
10. Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A., Martynov V. A. [Design–Technological Aspects of Creating Precision Products of Complex Form from Polymer Composite Materials]. *Vestnik SibGAU*. 2015, No. 2 (17), P. 460–466 (In Russ.).
11. Vlasov A. Yu., Titov M. A., Pasechnik K. A. [Development of the optimal constructive-power scheme of a six-segment offset antenna reflector using polymer composite materials]. *Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii zhurnal. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2015, No. 10, P. 28–33 (In Russ.).
12. Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A., Martynov V. A. [Development of the technology of partial curing of thin-walled casings when creating a structure of polymer composite materials]. *Vestnik SibGAU*. 2015, No. 4 (16), P. 918–924 (In Russ.).
13. Vlasov A. Yu., Lopatin A. V. et al. [Development of precision antenna reflectors from polymer composite materials: finite element simulation of the structure]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3 (49), P. 73–78. (In Russ.).
14. Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A. et al. [Description of the ranges of changes in key parameters that ensure the stability of the technological process, the information of complex shapes from PCM by the RTM method]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 4 (56), P. 197–201 (In Russ.).
15. Foley A. R. et al. Engineering and Science Highlights of the KAT-7 Radio Telescope. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016, 000, P. 1–17.

© Власов А. Ю., Амельченко Н. А., Пасечник К. А.,
Титов М. А., Сержантова М. В., 2017