

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕКЦИИ ФОРМЫ ТОНКОСТЕННОГО КОМПОЗИТНОГО РЕФЛЕКТОРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Е. В. Москвичев✉

Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий
г. Красноярск, Российская Федерация

В работе рассматривается регулируемый тонкостенный композитный рефлектор в составе малого космического аппарата. Рефлектор состоял из 6 одинаковых секторов, каждый из которых имел по 4 регулировочных узла в виде линейных актуаторов. Цель работы заключалась в оценке возможностей численного моделирования для обеспечения геометрической стабильности рефлектора путем коррекции его формы с помощью регулировочных узлов. Для этого были представлены две эскизные модели, соответствующие стадиям жизненного цикла конструкции. Модель формования применялась для проведения расчетов остаточных деформаций при изготовлении рефлектора в автоклаве. Модель орбитального полета рассчитывала температурные деформации рефлектора во времени от воздействия переменного потока солнечного излучения. Для каждой из моделей были проведены серии оптимизационных расчетов методом Нелдера-Мида. Расчеты позволили определить положения регулировочных узлов рефлектора, обеспечивающих минимальное значение среднеквадратичного отклонения отражающей поверхности от параболоида. Результаты расчетов показали, что найденные оптимальные регулировки позволяют существенно компенсировать деформации рефлектора и повысить его геометрическую стабильность как одновременно после формования, так и в зависимости от времени при орбитальном полете. Таким образом, представленная методология многовариантного численного анализа может быть перспективной для создания системы коррекции формы рефлектора на его основных жизненных стадиях.

Ключевые слова: регулируемый рефлектор, космический аппарат, коррекция формы, актуатор, цифровой двойник.

Введение

Развитие современных зеркальных антенн космических аппаратов (КА) следует по пути увеличения апертуры и рабочих частот при стремлении улучшить массовые характеристики. В связи с этим во многих перспективных конструкциях рефлекторов зеркальных антенн отражающая поверхность формируется посредством тонкостенной композитной оболочки. Такие рефлекторы по сравнению с широко применяемыми сетчатыми рефлекторами имеют значительный потенциал по обеспечению стабильности формы при сравнительно небольшой массе [1–3]. Однако максимальные показатели точности отражающей поверхности рефлектора могут быть достигнуты при условии стабильности его формы на всех стадиях жизненного цикла – изготовления,

сборки, наземной отработки и эксплуатации. Это определяет комплекс требований к конструкции, свойствам материалов, технологии производства, которые должны быть обоснованы путем междисциплинарного инженерного анализа.

Такой анализ традиционно выполняется методами цифрового моделирования. При этом среди современных средств создания цифровых моделей набирает популярность концепция цифрового двойника, которая позволяет решать задачи прогнозирования, контроля и управления конструкцией непрерывно на всех стадиях жизненного цикла [4]. Пример применения такой концепции к рефлектору зеркальной антенны малого КА был представлен автором ранее в работе [5].

На основе предложенной концепции в упомянутой работе рассматривался рефлектор, выполненный из тонкой композитной оболочки и оснащенный регулировочными узлами для коррекции формы. В качестве компонентов циф-

рового двойника были выделены следующие модели, соответствующие характерным стадиям жизненного цикла конструкции:

- модель формирования композитной оболочки;
- модель наземной отработки;
- модель орбитального полета.

Для каждой из моделей были сформулированы задачи численного расчета теплового воздействия на рефлектор, деформирования его композитной оболочки, а также задача нахождения оптимального положения регулировочных узлов для минимизации среднеквадратичного отклонения (СКО) отражающей поверхности.

Стоит отметить, что конструкции регулируемых рефлекторов являются не новыми и в значительной степени проработанными. К таким конструкциям, например, можно отнести системы активной оптики, применяемые на наземных и космических телескопах [6, 7]. Для рефлекторов прочих антенн также были разработаны перспективные способы регулировки, которые представлены в работах [8–19]. Однако необходимо принять во внимание, что искажение формы отражающей поверхности сложно прогнозировать, поскольку оно зависит от суммарного влияния производственных и эксплуатационных факторов, таких как режимы формования в автоклаве и тепловые режимы в космическом пространстве. Это обуславливает высокую сложность расчета оптимальных регулировок, которые в общем случае не являются постоянными величинами, а могут изменяться во времени на разных стадиях жизненного цикла рефлектора.

1. Описание модели

В данной работе была выполнена отработка эскизных моделей формования композитного рефлектора и его деформирования во время орбитального полета КА. Под эскизными моделями понимались модели с упрощенными геометрией, расчетной схемой и граничными условиями. Эскизные модели создавались на примере КА, представленного на рисунке 1. КА имел в составе

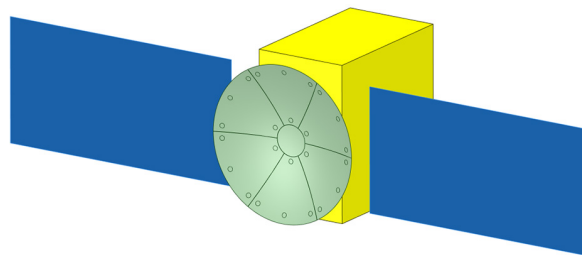


Рисунок 1. Космический аппарат с рефлектором из 6 секторов

корпус в форме параллелепипеда, две солнечные панели и регулируемый рефлектор из тонкостенной композитной оболочки. Рефлектор состоял из 6 одинаковых и независимо деформируемых секторов, закрепленных на абсолютно жестком основании. Регулировка каждого сектора осуществлялась в 4 узлах с помощью линейных актуаторов. Актуаторы моделировались как линейное перемещение круглой площадки в определенном направлении (рисунок 2). Направления регулировки были выбраны эмпирически с учетом симметрии таким образом, чтобы обеспечить наиболее всестороннее деформирование сектора.

Для рассматриваемых моделей были проведены расчеты оптимальных положений регулировочных узлов путем многовариантного численного анализа. Критерием для оптимального положения являлась минимизация СКО рефлектора от параболоида. Оптимизация выполнялась методом Нелдера-Мида, который был интегрирован в CAE-систему ANSYS Workbench посредством подпрограмм на языке APDL (ANSYS Parametric Design Language).

2. Модель формования

Модель формования была выполнена с использованием модуля ANSYS Composite Cure Simulation, который имитирует процесс отверждения композиционного материала по заданному температурному режиму. Это позволяет смоделировать остаточные напряжения и деформации, которые возникают в композитной конструкции при ее изготовлении

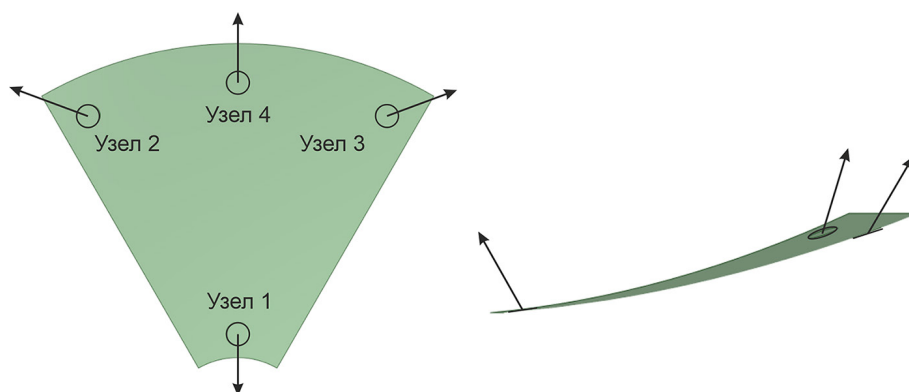


Рисунок 2. Сектор рефлектора и регулировочные узлы

в автоклаве. Стоит отметить, что результаты расчета во многом зависят от применяемых моделей деформирования и отверждения композиционного материала, а также от множества параметров режима работы автоклава. Одно из исследований по данной тематике представлено в работе [20].

В данной же работе принималась встроенная в программный продукт модель композиционного материала, которая соответствовала биаксиальной углеродной ткани с ортотропными механическими свойствами и эпоксидной смоле, описываемой автокаталитическим уравнением полимеризации [21]. Для одного сектора рефлектора симулировался режим отверждения, представленный на рисунке 3. Первый этап нагрева до 120 °С и выдержки соответствовал наполнению смолой, а второй этап нагрева до 180 °С – ее полимеризации.

Из результатов моделирования следует, что остаточные деформации после формования приводят к существенному отклонению рефлектора от изначальной формы. Однако расчет оптимальной регулировки позволяет это компенсировать на этапе наземной отработки рефлектора и значительно уменьшить его СКО.

3. Модель орбитального полета

В модели орбитального полета был реализован последовательный расчет температурного поля рефлектора в составе КА и расчет его деформирования при регулировке в процессе движения по геостационарной орбите. Взаимосвязь тепловой модели и модели деформирования осуществлялась стандартными средствами ANSYS Workbench путем передачи температуры из узлов

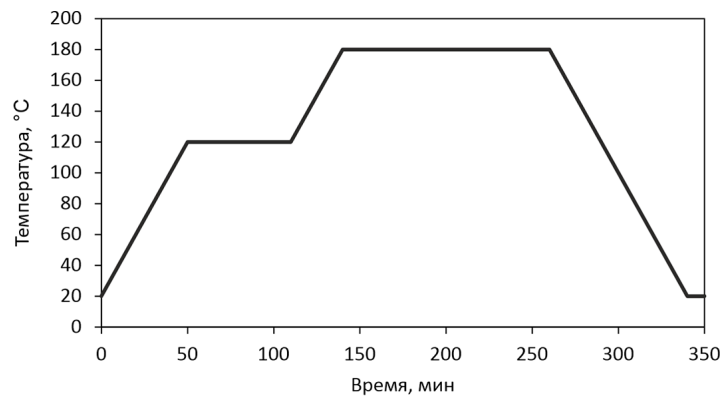


Рисунок 3. Температурный режим процесса отверждения

После этапа остывания на следующем шаге нагружения сектор рефлектора фиксировался на регулировочных узлах. При этом вследствие наличия остаточных деформаций после формования сектор терял исходную параболическую форму. Далее для компенсации остаточных деформаций методом Нелдера-Мида решалась задача нахождения оптимальных положений регулировочных узлов, соответствующих минимуму СКО. Рассчитанные поля отклонений поверхности сектора рефлектора от параболоида до и после оптимизации представлены на рисунке 4. СКО после формования составило 0,54 мм, а после регулировки – 0,06 мм.

одной расчетной сетки в другую методом интерполяции (рисунок 5). Данная процедура выполнялась для каждого временного шага движения КА, что позволяло рассчитать изменение СКО рефлектора в зависимости от времени.

При полете КА по геостационарной орбите направление потока солнечного излучения на его поверхности постоянно изменяется вследствие суточного вращения Земли. Это приводит к тому, что рефлектор периодически затеняется другими элементами КА или же полностью попадает в тень Земли в периоды весеннего и осеннего равноденствия. Изменения потока солнеч-

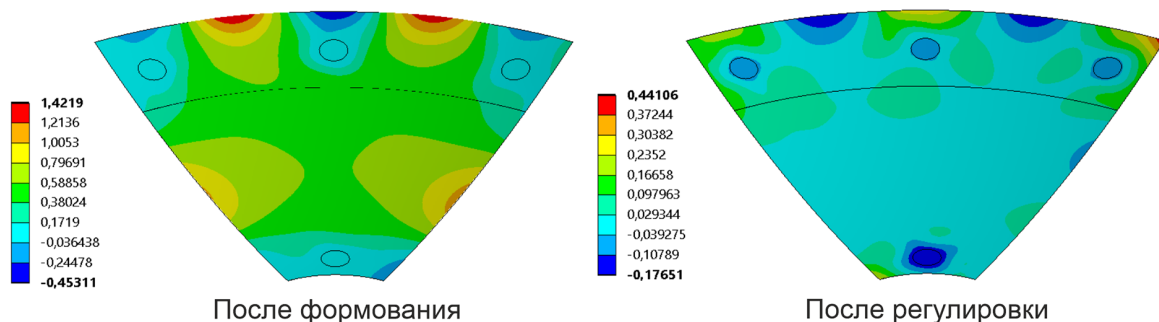


Рисунок 4. Отклонения поверхности сектора рефлектора от параболоида

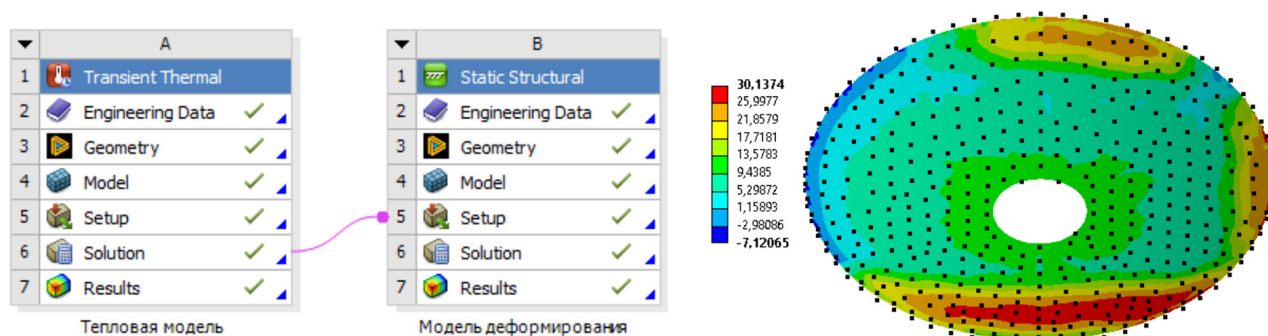


Рисунок 5. Схема модели орбитального полета в ANSYS Workbench и узлы интерполяции температуры

ного излучения, а также затенение рефлектора в модели учитывались с помощью специального радиационного модуля. Таким образом, температура рефлектора циклически изменялась в широком диапазоне, что приводило к его деформациям и существенному изменению СКО. Данный эффект продемонстрирован на рисунке 6 по результатам расчета разработанной модели орбитального полета в течение нескольких дней января и марта.

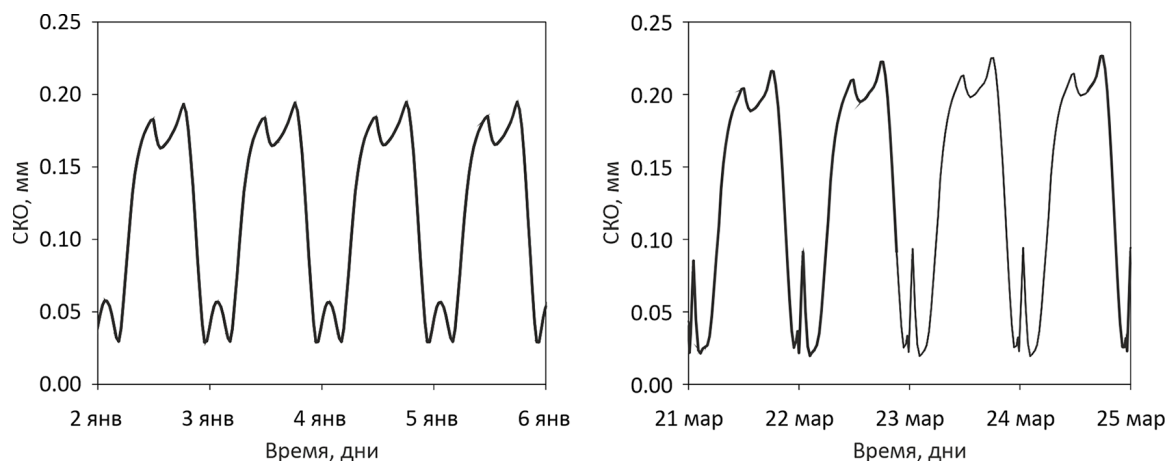


Рисунок 6. Суточное изменение СКО рефлектора, мм

Для минимизации СКО с учетом его суточных колебаний была поставлена задача определения оптимальных положений регулировочных узлов рефлектора в зависимости от времени. Поскольку секторы рефлектора регулируются независимо друг от друга, то для каждого из 6 секторов проводилась отдельная серия модельных расчетов. В каждой серии рассматривался одинаковый временной период, равный 2,5 суткам, который разбивался на 120 интервалов длительностью 1800 секунд. Для каждого интервала методом Нелдера-Мида решалась оптимизационная задача минимизации СКО и нахождения соответствующего положения регулировочных узлов. Решение оптимизационной задачи требовало в среднем 40 итераций алгоритма на каждом временном интервале. Таким образом, полное решение задачи для всех секторов и всего периода 2,5 суток примерно

потребовало $120 \times 40 \times 6 = 28800$ итераций. При этом каждая итерация представляла собой расчет конечно-элементной модели деформирования рефлектора. Это свидетельствует о высоких вычислительных затратах, которые требуются для решения подобных задач.

По результатам проведенных расчетов для каждого регулировочного узла в каждом из секторов рефлектора была получена зависимость его оптимального положения от времени в течение двух

циклов суточного вращения. Всего было получено 24 зависимости для 6 секторов. Зависимости для одного из секторов показаны на рисунке 7.

Данные зависимости непрерывны и имеют суточную периодичность аналогично суточному изменению СКО. Каждая из них была аппроксимирована тригонометрической функцией Фурье с периодом 86400 секунд. Данные функции были интегрированы в модель деформирования всего рефлектора для сравнительного расчета исходного СКО и СКО при оптимальном положении регулировочных узлов, меняющихся со временем. Результаты расчета показаны на рисунке 8.

Как видно из результатов, СКО регулируемого рефлектора существенно снизилось на всем рассмотренном временном периоде по сравнению с фиксированным рефлектором. Для фиксированного рефлектора среднее за сутки СКО составило

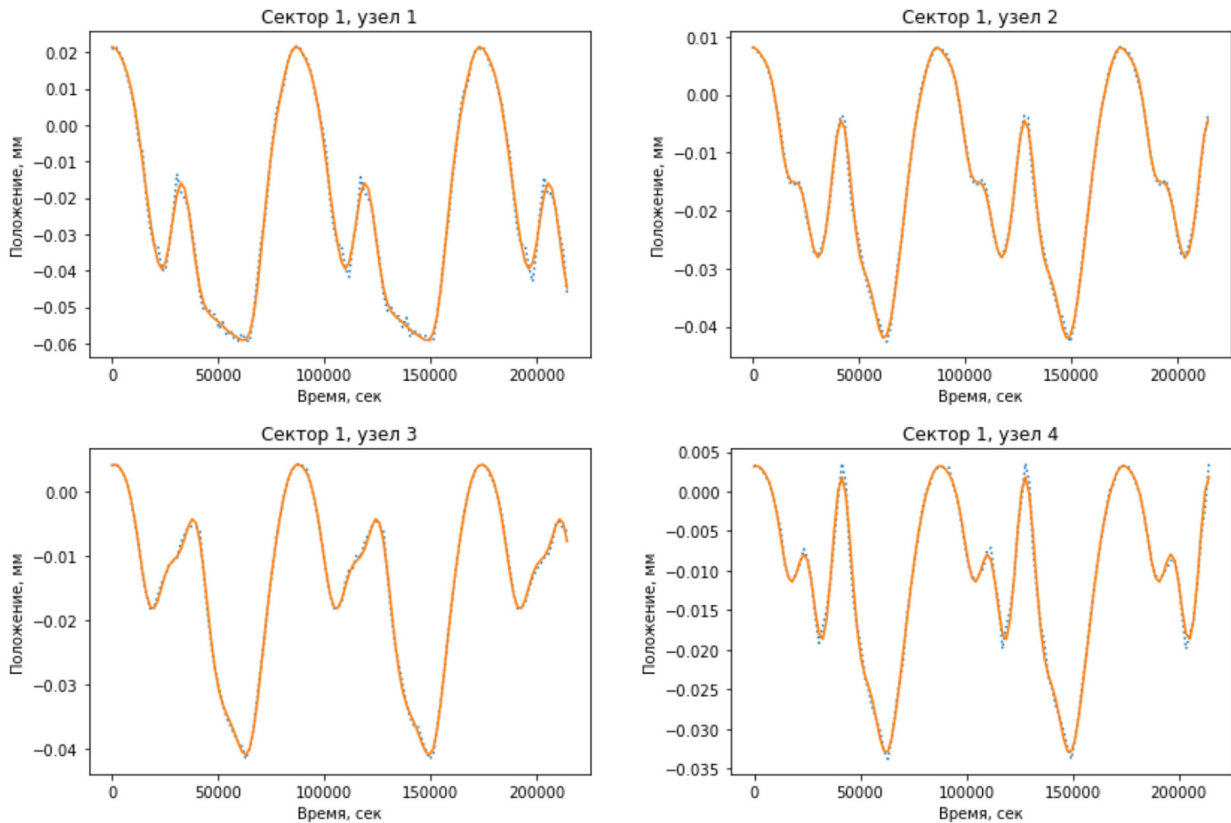


Рисунок 7. Зависимости оптимальных положений регулировочных узлов от времени

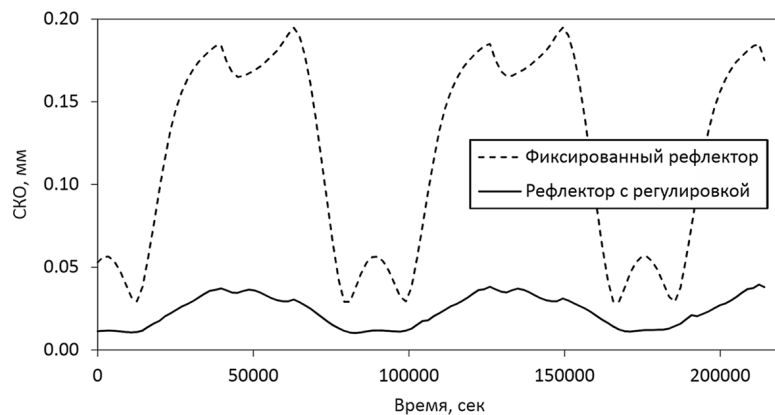


Рисунок 8. Изменение СКО фиксированного рефлектора и рефлектора с регулировкой

0,12 мм, а для рефлектора с оптимальной регулировкой – 0,02 мм.

Таким образом, набор рассчитанных функций Фурье с соответствующими константами, которые определяют оптимальные положения узлов регулировки рефлектора во времени, может быть основой для создания автоматизированной системы коррекции формы рефлектора при орбитальном полете.

Заключение

Проведенный в работе численный анализ показывает, что проблема геометрической стабильности композитных тонкостенных рефлекторов достаточно сложна, но в качестве перспективного

направления для ее решения возможно применение управляемой коррекции. Это подтверждается результатами проведенного автором многовариантного моделирования, которое показало существенное снижение СКО для регулируемого рефлектора. Для применения данного подхода в реальной конструкции необходимо проведение комплексных расчетных исследований с учетом множества конструктивных особенностей, которые в контексте данной работы остались не рассмотренными. Однако концептуально в работе было продемонстрировано, что применение современных средств цифрового моделирования делает доступными многовариантные и междисциплинарные расчеты для анализа множества производственных и эксплуатационных

факторов. Их взаимное сочетание может быть учтено на основе таких концепций, как «цифровой двойник» с перспективой создания сложных автоматизированных систем управления геометрической стабильностью рефлектора на всех жизненных стадиях конструкции.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Список литературы

- [1] Дуань Б. Большие развертываемые космические антенны (БРКА) – Подробное описание // Китайский журнал электроники. 2020. Т. 29. № 1. С. 1–15. DOI 10.1049/cje.2019.09.001
- [2] Тайгин В.Б., Лопатин А.В. Разработка зеркальной антенны космического аппарата с ультралегким высокоточным размеростабильным рефлектором // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 3. С. 121–131. DOI 10.26732/2618-7957-2019-3-121-131
- [3] Ланг М., Байер Х., Эрнст Т. Высокоточные тонкостенные рефлекторы – концепции конструкции, оптимизация конструкции и методы коррекции формы, Материалы Европейской конференции по конструкциям космических аппаратов, материалам и механическим испытаниям, Нордвейк, Нидерланды, 2005.
- [4] Ходж Дж. Проектирование модельно-ориентированных систем (ПМОС) Подход к проектированию и оптимизации антенных систем с фазированной решеткой [Электронный ресурс] // Phoenix Integration: [сайт]. [2020]. URL: https://www.phoenix-int.com/wp-content/uploads/2020/08/MC_Presentation-2020-Final-1.pdf (дата обращения: 26.04.2024).
- [5] Москвичев Е.В. Концепция цифрового двойника рефлектора антенны космического аппарата // Распределенные информационно-вычислительные ресурсы (DICR-2022): Сборник трудов XVIII Российской конференции с международным участием, Новосибирск, 05–08 декабря 2022 г. Новосибирск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий», 2022. С. 186–189. DOI 10.25743/DIR.2022.10.76.031
- [6] Преумонт А., Алалуф Д., Ван К., Родригес Г. Адаптивные тонкостенные рефлекторы для будущих космических телескопов, ECSSMET 2016–14 Европейская конференция по конструкциям космических аппаратов, материалам и механическим испытаниям, 2016.
- [7] Барто А., Экстон Д.С., Финли П., Галлахер Б., Харди Б., Найт Дж.С., Лайтси П. Применение и отказоустойчивость актуаторов оптических элементов зеркала космического телескопа Джеймса Уэбба // SPIE Астрономические телескопы + приборы. 2012. Т. 8442. DOI 10.1117/12.924596
- [8] Ажевский Я.А., Просунцов П.В. Использование активной системы терморегулирования для создания рефлектора антенного комплекса космического базирования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 4. С. 87–96. DOI 10.18698/0536-1044-2022-4-87-96
- [9] Нильсен К. Дж.Г., Тиан Д., Ван К., Преумонт А. Адаптивные развертываемые рефлекторы с тонкой сферической оболочкой // Актуаторы. 2022. Т. 11. № 7. DOI 10.3390/act11070198
- [10] Кабанов С.А., Митин Ф.В. Оптимальное управление пьезоактуатором для настройки радиоотражающего сетеполотна космического рефлектора // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 3. С. 183–191. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-3-183-191
- [11] Сато Й., Фуруя Х., Когисо Н. Специальная коррекция режима ошибки для деформируемого рефлектора путем одновременной оптимизации конструкции и актуатора // Журнал космических аппаратов и ракет. 2020. Т. 57. № 4. С. 728–739. DOI 10.2514/1.A34480
- [12] Тайгин В.Б., Лопатин А.В. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 4. С. 200–208. DOI 10.26732/2618-7957-2019-4-200-208
- [13] Лу Ю.Ф., Юэ Х.Х., Дэн З.Ц., Цзоу Х.С. Адаптивное управление формой при температурном деформировании мембранного зеркала с плоскими ПВДФ актуаторами // Китайский журнал машиностроения. 2018. Т. 31. DOI 10.1186/s10033-018-0212-y
- [14] Шао С., Сун С., Сюй М., Цзян В. Механически реконфигурируемый отражатель для будущего применения в умной космической антенне // Умные материалы и конструкции. 2018. Т. 27. № 9. DOI 10.1088/1361-665x/aad480
- [15] Гото К., Сакамото Х., Инагаки А., Танака Х., Ишимура К., Окума М. Проектирование актуатора для космического умного рефлектора для уменьшения температурных деформаций // Труды Японского общества аэронавтики и космических наук, аэрокосмических технологий. Япония. 2016. Т. 14. № 30. С. 25–31. DOI 10.2322/tastj.14.pc_25
- [16] Рябов К.В., Федотов О.В., Филимонов В.Н. Разработка и исследование актуатора для радиотелескопа с активным рефлектором // Вестник машиностроения. 2014. № 6. С. 14–20.

- [17] Хилл Дж., Ван К. В., Фанг Х. Достижения в методологиях управления поверхностью гибких космических рефлекторов // Журнал космических аппаратов и ракет. 2013. Т. 50. № 4. С. 816–828. DOI 10.2514/1.A32231
- [18] Кабрия Л., Гарсия Х. А., Гутьеррес-Риос Х., Тейзон А., Вассалло Дж. Активные рефлекторы: возможные решения на основе решеток и отражателей Френеля // Международный журнал антенн и распространения радиоволн. 2009. Т. 2009. DOI 10.1155/2009/653952
- [19] Фанг Х., Им Э., Кихано У. О., Ван К. В., Хилл Дж., Мур Дж., Пирсон Дж., Луи К., Джут Ф. Высокоточное адаптивное управление поверхностью большого рефлектора, Конференция по технологиям наук о Земле 2008, США, 2008.
- [20] Бердникова Н. А., Белов О. А., Лопатин А. В. Исследование и оптимизация режима изготовления высокоточного композитного рефлектора антенны космического аппарата // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 2. С. 59–72. DOI 10.26732/2618-7957-2019-2-59-72
- [21] Джон М., Нама С., Д'Антрасси Н., Вустенхаген С., Кромбхольц А., Шлиппер Р. Моделирование процесса прессования препрега с использованием ANSYS Composite Cure Simulation (ACCS), Конференция CADFEM по моделированию в ANSYS, 2017.

MODELING THE SHAPE CORRECTION OF A THIN-WALLED COMPOSITE REFLECTOR OF A SPACECRAFT

E. V. Moskvichev

*Federal Research Center for Information and Computational Technologies
Krasnoyarsk, The Russian Federation*

This paper examines an adjustable thin-wall composite reflector for a small satellite. The reflector consisted of 6 identical sectors which had 4 adjusting units in the form of linear actuators. The purpose of this work was to explore the capabilities of numerical modeling to ensure the shape correction of the reflector using adjusting units. For this purpose, two sketch models were presented corresponding to the stages of the design life cycle. The mold model was used to calculate the residual deformations after manufacturing of the reflector in an autoclave. The orbital model was used to calculate temperature deformations of the reflector over time under a variable solar flux. For each of these models a series of optimizations were performed by the Nelder-Mead method. As a result, the positions of the adjustment units were determined, which provide the minimal standard deviation of the reflector shape from paraboloid. The calculations showed that the optimal adjustments can significantly compensate for the deformations of the reflector and increase its shape stability both after molding and during orbital flight. Thus, the presented method of multifactor numerical analysis can be promising for creating a shape correction system of the reflector at its main life stages.

Keywords: adaptive reflector, spacecraft, shape correction, actuator, digital twin.

References

- [1] Duan B. Large Spaceborne Deployable Antennas (LSDAs) – A Comprehensive Summary // Chinese Journal of Electronics, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 1–15. DOI 10.1049/cje.2019.09.001.
- [2] Taygin V. B., Lopatin A. V. Design of the mirror antenna of a spacecraft with the ultralight high precision size-stable reflector // Spacecrafts & Technologies, 2019, vol. 3, no. 3, pp. 121–131. DOI 10.26732/2618-7957-2019-3-121-131 (in Russian)

- [3] Lang M., Baier H., Ernst T. High precision thin shell reflectors – design concepts, structural optimisation and shape adjustment techniques, Proceedings of the European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing, Noordwijk, The Netherlands, 2005.
- [4] Hodge J. A Model-Based Systems Engineering (MBSE) Approach to the Design & Optimization of Phased Array Antenna Systems [Phoenix Integration]. Available at https://www.phoenix-int.com/wp-content/uploads/2020/08/MC_Presentation-2020-Final-1.pdf (accessed: 26.04.2024).
- [5] Moskvichev E.V. The digital twin concept of the spacecraft antenna reflector, Proceedings of XVIII Russian Conference Distributed information and computational resources (DICR-2022), Novosibirsk, Russia, 2022, pp. 186–189. DOI 10.25743/DIR.2022.10.76.031 (in Russian)
- [6] Preumont A., Alaluf D., Wang K., Rodrigues G. Adaptive Thin Shell Reflectors for Future Space Telescopes, ECSSMET 2016–14th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing, 2016.
- [7] Barto A., Acton D. S., Finley P., Gallagher B., Hardy B., Knight J. S., Lightsey P. Actuator usage and fault tolerance of the James Webb Space Telescope optical element mirror actuators // SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2012, vol. 8442. DOI 10.1117/12.924596.
- [8] Azhevsky Ya. A., Prosuntsov P.V. Employment of an Active Thermal Control System for Developing a Space-Based Antenna Complex Reflector // BMSTU Journal of Mechanical Engineering, 2022, no. 4, pp. 87–96. DOI 10.18698/0536-1044-2022-4-87-96 (in Russian)
- [9] Nielsen C.J. G., Tian D., Wang K., Preumont A., Adaptive Deployable Thin Spherical Shell Reflectors // Actuators, 2022, vol. 11, no 7, DOI 10.3390/act11070198
- [10] Kabanov S.A., Mitin F.V. Optimal control of the piezo actuator for tuning the radio-reflecting mesh of space reflector // Journal of Instrument Engineering, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 183–191. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-3-183-191 (in Russian)
- [11] Satou Y., Furuya H., Kogiso N. Specific Error Mode Correction for Deformable Reflector by Structure–Actuator Simultaneous Optimization // Journal of spacecraft and rockets, 2020, vol. 57, no. 4, pp. 728–739. DOI 10.2514/1.A34480
- [12] Taygin V.B., Lopatin A.V. Method of achievement the high accuracy of the shape of reflectors of mirror antennas of spacecraft // Spacecrafts & Technologies, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 200–208. DOI 10.26732/2618-7957-2019-4-200-208 (in Russian)
- [13] Lu Y.F., Yue H.H., Deng Z.Q., Tzou H.S. Adaptive Shape Control for Thermal Deformation of Membrane Mirror with In-plane PVDF Actuators// Chin. J. Mech. Eng, 2018, vol. 31, DOI 10.1186/s10033-018-0212-y
- [14] Shao S., Song S., Xu M., Jiang W. Mechanically reconfigurable reflector for future smart space antenna application // Smart Materials and Structures, 2018, vol. 27, no. 9. DOI 10.1088/1361-665x/aad480
- [15] Gotou K., Sakamoto H., Inagaki A., Tanaka H., Ishimura K., Okuma M. Actuator Design for Space Smart Reflector to Reduce Thermal Distortion // Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 2016, vol. 14, no. 30, pp. 25–31. DOI 10.2322/tastj.14.pc_25
- [16] Ryabov K.V., Fedotov O.V., Filimonov V.N. Development and research of actuator for radiotelescope with active reflector // Vestnik mashinostroyeniya, 2014, no. 6. pp. 14–20 (in Russian)
- [17] Hill J., Wang K. W., Fang H. Advances of Surface Control Methodologies for Flexible Space Reflectors // Journal of Spacecraft and Rockets, 2013, vol. 50, no. 4, pp. 816–828. DOI 10.2514/1.A32231
- [18] Cabria L., Garcia J.A., Gutierrez-Rios J., Tazon A., Vassal’lo J. Active Reflectors: Possible Solutions Based on Reflectarrays and Fresnel Reflectors // International Journal of Antennas and Propagation, 2009, vol. 2009, DOI 10.1155/2009/653952
- [19] Fang H., Im E., Quijano U.O., Wang K. W., Hill J., Moore J., Pearson J., Lui C., Djuth F. High-Precision Adaptive Control of Large Reflector Surface, Earth Science Technology Conference 2008, U.S.A., 2008.
- [20] Berdnikova N.A., Belov O.A., Lopatin A.V. Research and optimization of production cycle of high-precision composite spacecraft antenna reflector // Spacecrafts & Technologies, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 59–72. DOI 10.26732/2618-7957-2019-2-59-72 (in Russian)
- [21] John M., Nama S., D’Antrassi N., Wuestenhagen S., Krombholz A., Schlimper R. Simulation of a prepreg press process using ANSYS Composite Cure Simulation (ACCS), CADFEM ANSYS Simulation Conference, 2017.

Сведения об авторе

Москвичев Егор Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Красноярского филиала, руководитель Инженерно-испытательного центра Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2006 году. Область научных интересов: прочность материалов и конструкций, композиционные материалы, механические испытания, метод конечных элементов.