УДК 629.78
DOI 10.26732/2618-7957-2019-4-200-208

МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ РЕФЛЕКТОРОВ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. Б. Тайгин[1] ✉, А. В. Лопатин[2, 3]

[1] АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва», г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация
[2] Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация
[3] Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Российская Федерация

В статье выполнен анализ требований, которым должны удовлетворять зеркальные антенны космических аппаратов, предназначенные для передачи высокочастотных радиосигналов. Эти требования касаются прочности и жесткости конструкции, свойств материала рефлектора антенны и качества его поверхности. Отмечается, что с увеличением частоты радиосигнала возрастают требования к точности формы рефлектора. Вместе с тем существующие конструкции антенн и технологии их изготовления не позволяют обеспечить эти требования. В статье предложен оригинальный метод управления формой рефлектора зеркальной антенны, применение которого позволит создавать конструкции с высокой точностью поверхности. Этот метод предполагает, что требуемая точность формы рефлектора может быть достигнута за счет упругого деформирования его оболочки. Разработана конструкция регулировочных узлов для разного типа рефлекторов. Предложен алгоритм выбора количества узлов регулировки и мест их расположения. Этот алгоритм использует результаты конечно-элементного модального анализа оболочки рефлектора. Разработаны оригинальные конструкции осесимметричного и офсетного рефлекторов, форма оболочки которых может создаваться за счет управляемого деформирования. Предложена конструкция оболочки рефлектора со шпангоутом с расположенными на нем узлами регулирования. Такая конструкция позволяет существенно сократить количество узлов регулировки. Разработан проект рефлектора со шпангоутом и консольными спицами, обладающего малой массой и высокой жесткостью. Предложенный в статье метод обеспечения высокой точности рефлектора может найти применение при изготовлении конструкций новых космических антенн, работающих в высокочастотных диапазонах.

Ключевые слова: зеркальная антенна космического аппарата, управление формой рефлектора, узел регулирования, метод конечных элементов, модальный анализ.

Введение

Конструкция современных космических аппаратов связи в большой степени зависит от конструкции их антенных систем [1–6]. В настоящее время наиболее распространенным видом космических антенн являются зеркальные антенны. Зеркальные антенны обладают простой и надежной конструкцией и способны хорошо усиливать и направлять радиосигналы в различных диапазонах частот. Для успешной работы зеркальной антенны в составе космического аппарата необходимо соблюдение следующих требований:

1. Фронтальная поверхность рефлектора антенны должна быть выполнена из материала, способного не менее чем на 97 % отражать радиоволны в требуемой полосе частот.

2. Антенна должна сохранять геометрическую точность в процессе эксплуатации на орбите. Так, смещение облучателя и/или вторичного зеркала антенны от номинального положения не должно превышать 0,2λ, где λ – длина радиоволны.

✉ taygin@iss-reshetnev.ru

© Тайгин В. Б., Лопатин А. В., 2019

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60419X0233

3. Среднеквадратическое отклонение формы фронтальной поверхности рефлектора от теоретической не должно превышать 0,02λ в процессе эксплуатации антенны.

4. Частота собственных колебаний конструкции антенны не должна быть ниже 45 Гц.

5. Прочность конструкции антенны должна обеспечивать ее целостность в процессе выведения космического аппарата на орбиту.

6. Материалы антенны должны обладать температурной стойкостью в диапазоне температур от –150 °С до +150 °С и радиационной стойкостью в потоке ионизирующего излучения Солнца.

7. Масса антенны должна быть минимальной.

Современные системы комической связи имеют тенденцию к переходу на высокие радиочастотные диапазоны, такие как K_a, K, Q и V диапазоны. Преимущество этих диапазонов заключается в высокой пропускной способности радиоканалов. Однако с повышением рабочей частоты ужесточаются требования к форме отражающей поверхности рефлектора антенн. При этом антенны космического аппарата могут иметь совмещенный рабочий диапазон частот, например, C/K_a, K_a/Q и т. д. Это усложняет задачу разработки антенны, так как рефлектор должен иметь большие габариты для работы в нижнем диапазоне и при этом высокую точность отражающей поверхности, необходимую для работы в верхнем диапазоне.

Конструкция рефлектора, наиболее часто используемая в современных антеннах, выполнена в виде трехслойной оболочки с несущими обшивками из углепластика и алюминиевым сотовым заполнителем. На рис. 1 представлена типовая конструкция осесимметричной зеркальной антенны с трехслойным сотовым рефлектором.

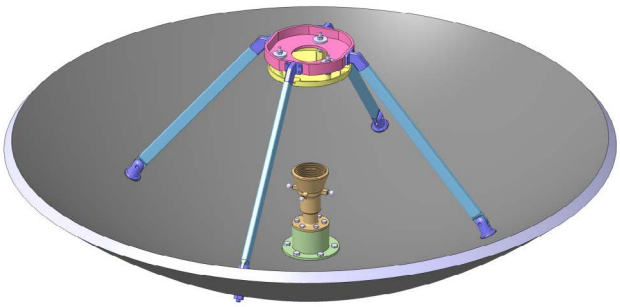

Рис. 1. Типовая конструкция осесимметричной антенны

Рефлектор антенны изготавливается за единый цикл формования [7]. Такая технология предполагает укладку препрега углеродного волокна, пленочного клея, алюминиевого сотового заполнителя на оправку из материала с низким коэффициентом термического расширения и совместное формование в автоклаве при температуре полимеризации смолы препрега. Эта технология относительно проста и позволяет получить практически готовое изделие после формования. Жесткость такого рефлектора определяется высотой заполнителя и модулем упругости материала несущих слоев. Однако в процессе формования из-за анизотропии свойств композиционного материала несущих слоев, усадки смолы и значительной разности в коэффициентах термического расширения материалов несущих слоев и сотового заполнителя в конструкции возникают напряжения [15]. Эти напряжения приводят к деформации рефлектора после снятия его с оправки. Пример диаграммы отклонений формы рефлектора приведен на рис. 2.

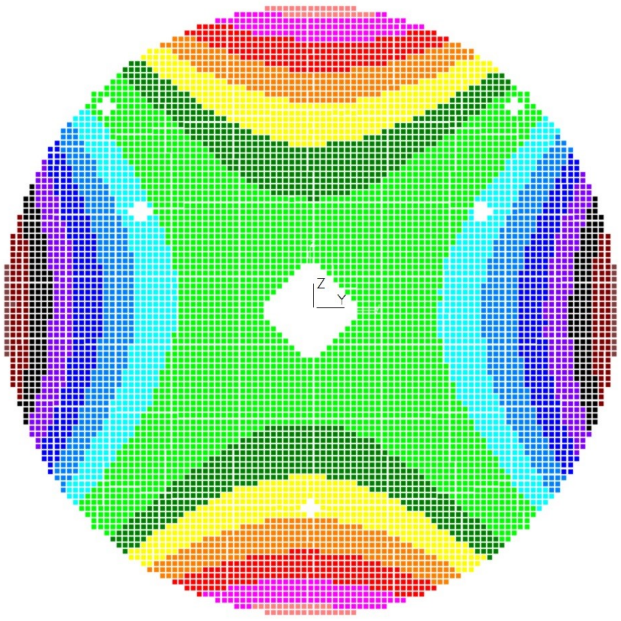

Рис. 2. Диаграмма отклонений поверхности рефлектора после формования

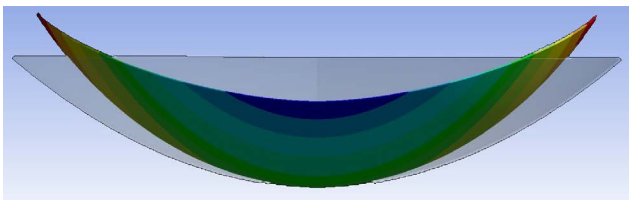

Рис. 3. Искаженная форма рефлектора после формования

Распределение напряжений в конструкции рефлектора после формования искажает его форму (рис. 3). Попытки технологической «борьбы» с этим искажением формы незначительно уменьшают отклонения. Величина отклонений превышает требования для диапазона частот K_a и выше. Поэтому обеспечение работоспособности рефлектора в высоких диапазонах частот потребовало поиска конструктивных решений, позволяющих обеспечить точность формы рефлектора.

В статье предложен оригинальный метод управления формой рефлектора зеркальной антенны, применение которого позволит создавать конструкции с высокой точностью поверхности. Этот метод предполагает, что требуемая точность формы рефлектора может быть достигнута за счет упругого деформирования его оболочки. Разработана конструкция регулировочных устройств, с помощью которых происходит исправление формы рефлектора. Представлен алгоритм выбора мест расположения регулировочных устройств. Разработаны конструкции антенн, поверхность рефлектора которых формируется посредством принудительного деформирования.

1. Методы обеспечения точности формы рефлектора

Процесс формования трехслойной оболочки не отличается стабильностью результата. Поэтому на предприятиях космической отрасли постоянно происходит поиск методов обеспечения требуемой точности формы рефлектора. Рассмотрим некоторые из этих методов.

В работе [8] представлена антенна с двумя тонкими оболочками. Фронтальная и поддерживающая оболочки образуют замкнутую конструкцию, которая за счет такого соединения обладает значительной жесткостью. Тыльная оболочка поддерживает кромку отражающей оболочки и связывает ее с основанием рефлектора. Отмечается, что рефлектор такой конструкции имеет малые среднеквадратические отклонения формы. Это обеспечивается тем, что искажение формы каждой оболочки компенсируется при сборке в жесткую конструкцию.

Еще одним вариантом обеспечения точной формы рефлектора является установка жесткого рамного элемента на его тыльную поверхность [9]. Такая установка осуществляется когда рефлектор прижат к формообразующей оправке. При этом рама фиксируется на небольшом удалении от рефлектора с помощью приклеиваемых соединительных элементов в виде пластин и уголков (рис. 4).

Рис. 4. Трехслойный рефлектор с жесткой рамой

Такой метод обеспечивает некоторое улучшение формы рефлектора, но имеет ряд недостатков, связанных с точностью позиционирования склеиваемых частей, возникновением в них напряжений при термоциклировании и ограниченной жесткостью собранной конструкции [10; 11].

2. Метод управления формой рефлектора

Наиболее эффективным методом устранения технологических погрешностей рефлектора является метод непосредственной регулировки формы поверхности в процессе изготовления. Для реализации этого метода конструкция рефлектора должна содержать три основных компонента: оболочку рефлектора, опорную конструкцию и узлы регулировки [12]. При этом опорная конструкция должна быть значительно жестче оболочки рефлектора.

Суть метода заключается в упругом деформировании оболочки рефлектора в отдельных точках при помощи регулировочных узлов, закрепленных на опоре. Опора должна обладать малой деформативностью по сравнению с деформативностью оболочки и обеспечивать необходимую жесткость всей конструкции антенны. Оболочка в таком методе может быть очень тонкой. Малая толщина будет обеспечивать ее большую податливость. Такая оболочка обладает меньшей массой по сравнению с трехслойным рефлектором.

Регулировка рефлектора является итерационным процессом, включающим сканирование и коррекцию формы. После формования и сборки конструкции производится ее регулировка. Измеряются координаты точек на поверхности оболочки рефлектора с помощью координатно-измерительной машины [13]. Затем осуществляется сравнение результатов измерений с идеальной моделью. При неудовлетворительном среднеквадратическом отклонении производят коррекцию формы при помощи регулировочных узлов и повторяют измерения формы. Такие итерации необходимо повторять пока форма не будет соответствовать требованиям по точности.

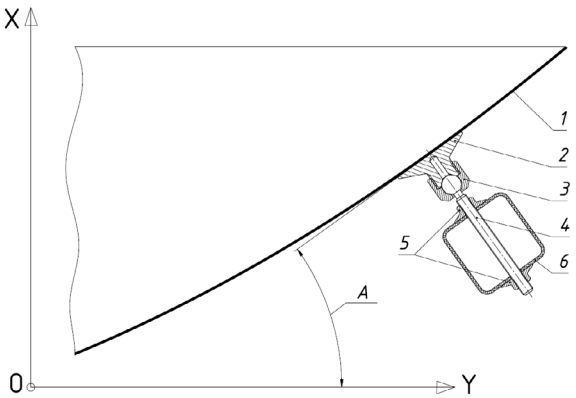

Рис. 5. Регулировочный узел, установленный перпендикулярно к поверхности оболочки рефлектора

Рассмотрим конструктивные особенности разработанных двух узлов регулировки оболочки рефлектора, отличающихся направлением действия (рис. 5 и 6).

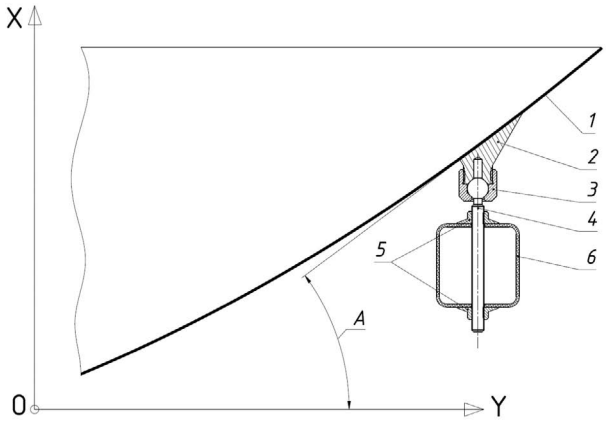

Рис. 6. Регулировочный узел, установленный перпендикулярно плоскости апертуры рефлектора

Оболочка рефлектора (1) выполнена из углепластика и имеет малую толщину. Накладка (2) приклеивается к оболочке и служит для соединения с остальными частями узла. Шпилька с резьбой (4) зафиксирована в опоре (6) двумя гайками (5). Вращая эти гайки можно перемещать шпильку относительно опоры. Сферический наконечник шпильки входит в коническое углубление в накладке и фиксируется накидной гайкой (3) так, что образуется сферический шарнир. Назначение этого шарнира состоит в том, что он исключает изгибающий оболочку момент, который может возникать при регулировке.

Различие двух представленных схем заключается в расположении регулировочного узла относительно оболочки. В первом случае ось шпильки перпендикулярна поверхности параболоида рефлектора. Во втором эта ось перпендикулярна плоскости апертуры рефлектора. В первом варианте накладка имеет правильную коническую форму. Для реализации такого случая закрепления опора должна быть эквидистантной к оболочке рефлектора. Этот случай подходит для осесимметричных оболочек с большой кривизной, при которой угол *A* (рис. 5) больше 20°. Во втором варианте опора может быть плоской, но при этом накладки имеют форму усеченного конуса и менее компактны. Такой вариант больше подходит для оболочек с меньшей кривизной, у которых угол *A* меньше 20°, например, в офсетных рефлекторах (рис. 6).

Большое значение имеет выбор местоположения регулировочных узлов и их количества. При типичном искажении формы рефлектора имеются два полюса с положительными и два полюса с отрицательными отклонениями. Полюса расположены на двух взаимно перпендикулярных осях. Теоретически достаточно четырех регулировочных узлов для исправления формы оболочки рефлектора. Однако на практике обнаружено, что такое количество узлов не обеспечивает стабильную форму оболочки. При попытке воздействия на эти полюса искажения перемещаются в свободные от узлов зоны. Практически установлено, что минимальное количество регулировочных узлов должно быть не менее шести.

Если оболочка рефлектора тонкостенная, то возникает необходимость обеспечения ее жесткости введением дополнительных узлов регулировки. Однако чрезмерно большое количество узлов увеличивает массу всей конструкции. Таким образом, возникает задача определения оптимального количества узлов.

Для решения поставленной задачи был проведен параметрический анализ, выполненный с привлечением метода конечных элементов [14]. На рис. 7 показаны места крепления шарнирных опор на тонкой оболочке рефлектора. Варьируемыми параметрами в проводимом анализе по выбору мест расположения узлов являются диаметры, на которых они расположены, и их количество. В расчетах оценивалась основная частота колебаний рефлектора как критерий жесткости конструкции. Результаты вычислений основной частоты колебаний как функции числа узлов и диаметра их расположения представлены в табл. 1. Типовые формы первых тонов колебаний показаны на рис. 8.

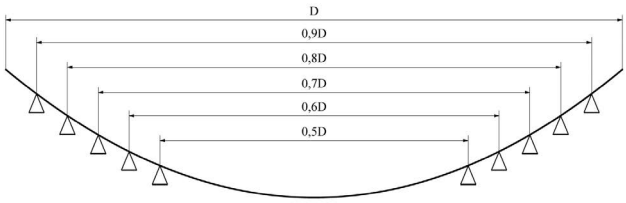

Рис. 7. Схема расположения мест крепления узлов регулировки

Анализ показал, что наиболее эффективным местом положения узлов регулировки является окружность, диаметр которой равен 0,9 диаметра апертуры антенны. С увеличением количества узлов происходит очевидный рост частоты собственных колебаний.

Основываясь на результатах проведенных исследований, были спроектированы осесимметричный и офсетный рефлекторы с системой регулировки формы. На рис. 9 представлена антенна с осесимметричным рефлектором.

В качестве опорной конструкции использована трехслойная оболочка. Эта опора изготавливается на той же оправке что и оболочка рефлектора. После формования трехслойную оболочку механически обрабатывают и в ней устанавливают необходимые закладные детали для регулировочных узлов. Затем формуют оболочку рефлектора

толщиной 0,42 мм и, не снимая ее с оправки, крепят к ней опорную оболочку с установленными регулировочными узлами.

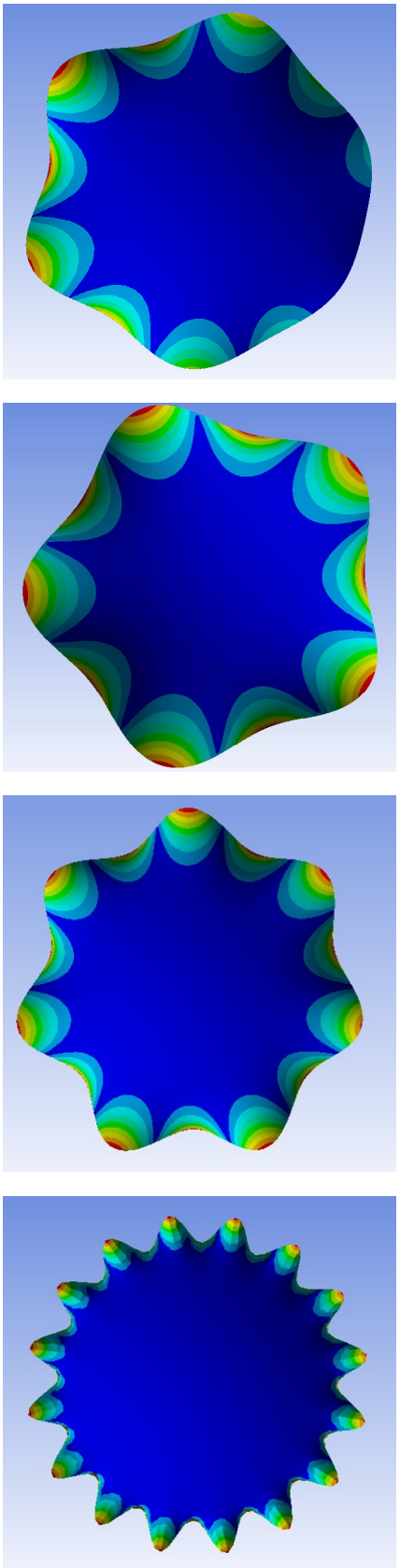

Рис. 8. Типовые основные формы колебаний оболочки рефлектора

Таблица 1

Зависимость основной частоты колебаний оболочки (Гц) рефлектора от положения узлов регулировки

Количество узлов регулировки	Положение узла регулировки				
	0,5*D*	0,6*D*	0,7*D*	0,8*D*	0,9*D*
6	20	27	28	31	36
7	24,5	31	37	40	47
8	25,5	37	47	51	59
9	26	40	53	62	71
10	26	41	59	76	85
11	27,5	41	62	88	101
12	28	41	64	99	116

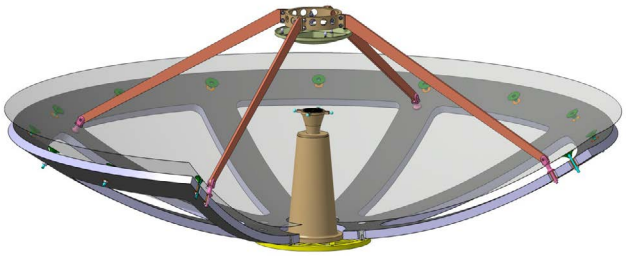

Рис. 9. Осесимметричная антенна

На рис. 10 показано сечение спроектированного регулировочного узла. Для крепления узла в трехслойной оболочке используется цилиндрическая втулка с резьбой. Шпилька со сферическим наконечником вкручивается в отверстие во втулке. Накладка фиксируется на сферическом наконечнике при помощи стопорного кольца. Масса такого узла составляет 20 гр. Масса всех узлов равна 320 гр. Масса рефлектора в сборе составила 2,5 кг. Удельная масса рефлектора равна 1,4 кг/м^2.

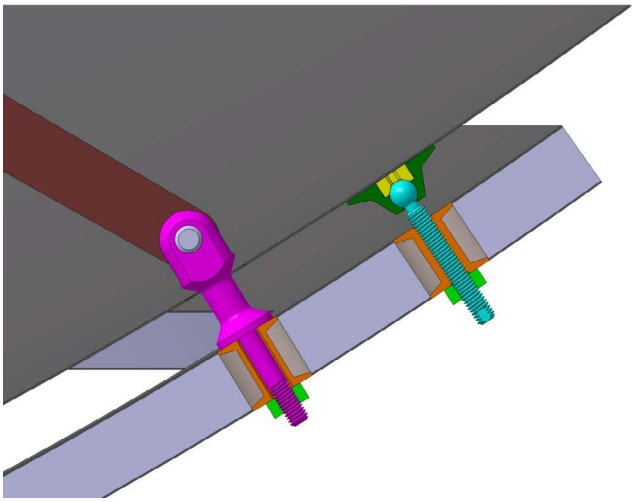

Рис. 10. Регулировочный узел

Трехслойная опора рефлектора служит также для крепления стоек, поддерживающих кон-

ттрефлектор, для установки облучателя и для крепления антенны на КА.

Офсетный рефлектор, как правило, имеет большое фокусное расстояние и, как следствие, меньшую кривизну. В силу этого система регулировки для него может быть выполнена по схеме, показанной на рис. 6. Модель спроектированного офсетного рефлектора представлена на рис. 11.

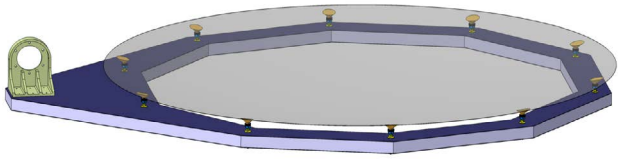

Рис. 11. Офсетный рефлектор с системой регулировки формы

В качестве опорной конструкции рефлектора применена плоская трехслойная сотовая панель с обшивками из углепластика. Такое решение является простым и технологичным в изготовлении и обеспечивает требуемую жесткость конструкции. Для монтажа узлов регулировки, как и в предыдущем варианте, в панель установлены цилиндрические вставки. Для крепления рефлектора на поворотном устройстве на панели имеется треугольный выступ с установленным кронштейном.

Как показал выполненный анализ, для рефлектора с большой апертурой (2 м и более) необходимое количества узлов регулировки превышает 20. Это приводит к увеличению массы конструкции и создает трудности при регулировке. Уменьшить количество узлов можно за счет введения шпангоута вдоль линии крепления оболочки (рис. 12).

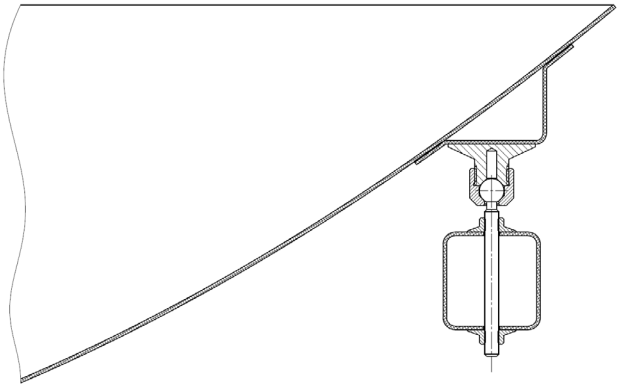

Рис. 12. Оболочка со шпангоутом и регулировочным узлом

Такой шпангоут, установленный вблизи апертуры, обеспечивает жесткость тонкой оболочки и дает возможность свести количество узлов регулировки к минимуму. Для подтверждения этого конструктивного решения был проведен конечно-элементный анализ и создана лабораторная модель рефлектора. Анализ проводился для двух оболочек: тонкостенной оболочки и оболочки со шпангоутом. На каждой оболочке размещалось 6 узлов регулирования. Результаты модального анализа обеих конструкций показали, что при наличии тонкостенного шпангоута основная частота колебаний как критерий жесткости оболочки возрастает в 9 раз. Масса такой оболочки увеличивается в 1,15 раза. Основные формы колебания обеих оболочек приведены на рис. 13.

Изготовленная лабораторная модель рефлектора (рис. 14) имеет оболочку с апертурой 2300 мм. Вблизи апертуры был приклеен шпангоут полукруглого сечения. Для монтажа узлов регулировки модель устанавливается на технологической подставке. В местах крепления имеются узлы регулировки по схеме рис. 11. Поверхность рефлектора после настройки (рис. 15) имела среднеквадратическое отклонение 0,06 мм. Отметим, что для рефлекторов таких габаритов среднеквадратическое отклонение, как правило, превышает 0,3 мм.

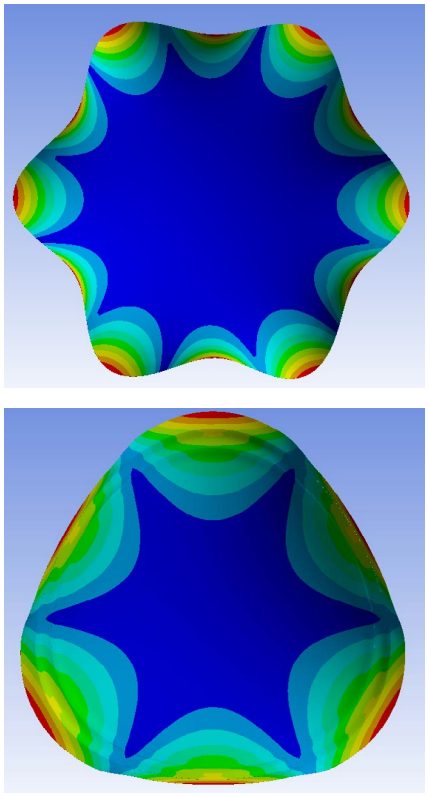

Рис. 13. Формы колебаний оболочки (вверху – без шпангоута, внизу – со шпангоутом)

Используя результаты конечно-элементного анализа и лабораторного макетирования, был спроектирован рефлектор со шпангоутом диаметром 1 м, представленный на рис. 16. Он имеет 6 консольных композитных спиц полого сечения. Спицы крепятся к основанию рефлектора и имеют фитинги для установки регулировочных узлов. Каждый из узлов имеет сферический шарнир и резьбовую шпильку. Он частично погружен в полость шпангоута для большей компактности рефлектора.

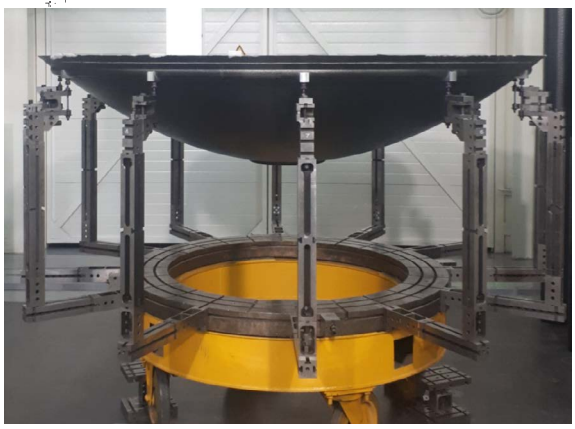

Рис. 14. Лабораторная модель рефлектора со шпангоутом

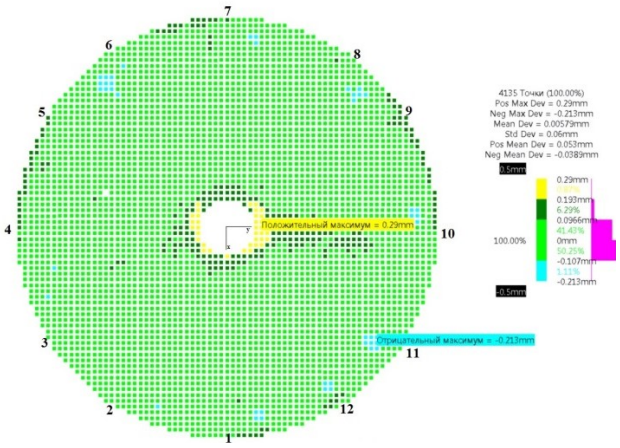

Рис. 15. Диаграмма отклонений оболочки рефлектора со шпангоутом после настройки

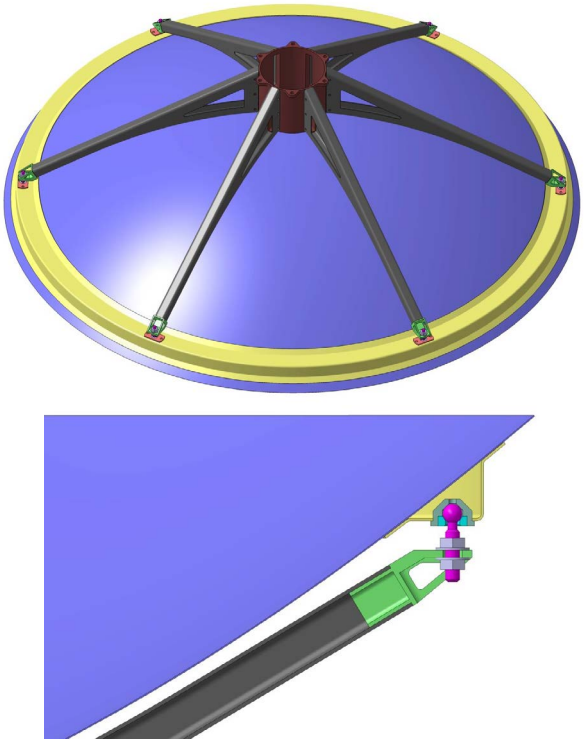

Рис. 16. Рефлектор со шпангоутом и консольными спицами

Был проведен модальный анализ рефлектора. На рис. 17 показана форма первого тона колебаний. Частота первого тона составила 96 Гц. Масса рефлектора равна 2,1 кг. Масса аналога в виде трехслойной оболочки составляет 5 кг.

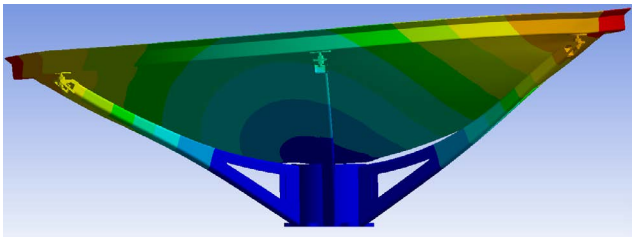

Рис. 17. Первая форма колебаний рефлектора

Заключение

Как показали выполненные в статье исследования, рефлекторы в виде тонких оболочек с возможностью регулировки формы обладают рядом преимуществ по сравнению с трехслойными рефлекторами. Удельная масса тонких оболочек меньше удельной массы трехслойных рефлекторов даже с учетом опорной конструкции. Экономия в весе зависит от выбранного типа конструкции и может достигать 50 %. Наибольшая экономия массы наблюдается в рефлекторах со шпангоутом, расположенном около апертуры. В таком исполнении оболочка может быть сколько угодно тонкой и количество поддерживающих элементов может быть минимальным. Сам же шпангоут вносит незначительный весовой вклад. Точность рефлекторов на основе тонких оболочек с системой регулировки значительно выше их трехслойных аналогов. Вероятность неисправимого брака, связанного с погрешностью формы при изготовлении, сводится к нулю, так как на любом этапе изготовления может быть произведена коррекция формы рефлектора.

В среднем точность формы оболочек с системой коррекции в 3–5 раза выше точности формы трехслойных конструкций. Стабильность геометрии тонких оболочек в условиях эксплуатации будет выше, чем у трехслойных рефлекторов. Это связано с меньшим градиентом температур в конструкции рефлектора. В трехслойных конструкциях при воздействии теплового потока градиент температур приводит к деформации рефлектора. В тонких оболочках градиент по толщине практически отсутствует. Поэтому деформации оболочки будут значительно меньше. Предложенный в статье метод обеспечения высокой точности рефлектора может найти применение при изготовлении конструкций новых космических антенн, работающих в высокочастотных диапазонах.

Список литературы

[1] Reflector Antennas [Электронный ресурс]. URL: http://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/ (дата обращения: 18.11.2019).
[2] Archer J. S. High-Performance Parabolic Antenna Reflectors // Journal of Spacecraft and Rockets, vol. 17, issue 1, 1980, pp. 22–26.
[3] Chen Z. N., Liu D., Nakano H., Qing X., Zwick Th. Handbook of Antenna Technologies, 2016. 3473 p.
[4] Imbriale W. A., Gao S., Boccia L. Space Antenna Handbook. John Wiley & Sons Ltd., 2012. 744 p.
[5] Dybdal R. Communication satellite antennas: system architecture, technology and evaluation. New York, McGraw-Hill, 2009.
[6] Галимов Г. К. Общая теория зеркальных антенн. Т. 6. М. : ООО «Адвансед Солюшнз», 2017. 704 с.
[7] Чичурин В. Е., Наговицин А. В., Наговицин В. Н., Мациенко А. В., Михнев М. М., Данилов В. Е. Способ изготовления многослойного антенного рефлектора. Пат. № 2686865, Российская Федерация, 2018, бюл. № 13.
[8] 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.
[9] Чичурин В. Е., Тайгин В. Б., Наговицын А. В., Болгов В. В., Патраев Е. В., Михнев М. М. Прецизионный рефлектор и способ его изготовления. Пат. № 2571718, Российская Федерация, 2015, Бюл. № 10.
[10] Новиков А. Д., Просунцов П. В., Резник С. В. Определение конструктивного облика рефлектора зеркальной космической антенны из композиционного материала // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. № 3. С. 308–317.
[11] Резник С. В., Просунцов П. В., Азаров А. В. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 3. С. 674–680.
[12] Шарловский Ю. В. Регулировочные устройства приборов и их элементы. М. : Машиностроение, 1976. 311 с.
[13] Золотухин И. С., Федорова К. М. Контроль геометрических параметров деталей с помощью координатно-измерительных машин : учеб. пособ. Тюмень : ТИУ, 2018, 114 с.
[14] ANSYS Theory Reference. USA, ANSYS Inc., 1994.
[15] Wijskamp S. Shape distortions in composites forming. PhD thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands, May, 2005, 183 p.

METHOD OF ACHIEVEMENT THE HIGH ACCURACY OF THE SHAPE OF REFLECTORS OF MIRROR ANTENNAS OF SPACECRAFT

V. B. Taygin[1], A. V. Lopatin[2, 3]
[1] JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation
[2] Institute of Computational Technologies of SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation
[3] Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

Analysis of conditions, which are required for mirror antennas of spacecrafts destined for transmission of high-frequent radio signals, is done in this paper. These conditions are regarded to resistance and rigidity of the construction features of the material of an antenna's reflector and its surface's quality. It is mentioned that the requirements to the accuracy of the reflector's shape grow together with the frequency of a radio signal. Altogether, the existing constructions of antennas and the producing technologies are not capable to obtain those requirements. The innovative method of controlling the shape of a reflector of a mirror antenna is presented in the paper. Its application gives an opportunity to produce constructions with a highly accurate surface. This method deals with the fact that the required accuracy of a reflector can be achieved via elastic deformation of its shell. Design of the regulating units for different types of reflectors is developed. We propose an algorithm of choosing the number of the regulating units and their locations. This algorithm uses the results of finite-element modal

analysis of a reflector's shell. Innovative design of axisymmetric and offset reflectors which shell's shape can arise from controlled deformation is developed. We also suggest the design of the reflector's shell with a timber with regulating units on it. Such design provides an opportunity to significantly decrease the number of the regulating units. Project of the reflector with a timber and console rods possessing low mass and high stiffness is developed. Method of achievement the high accuracy of a reflector, presented in the paper, can be applied to design of new space antennas operating in high-frequency interval.

Keywords: spacecraft mirror antenna, controlling the shape of a reflector, regulating unit, finite-element method, modal analysis.

References

[1] Reflector Antennas. Available at: http://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/ (accessed 18.11.2019).
[2] Archer J. S. High-Performance Parabolic Antenna Reflectors // Journal of Spacecraft and Rockets, vol. 17, issue 1, 1980, pp. 22–26.
[3] Chen Z. N., Liu D., Nakano H., Qing X., Zwick Th. Handbook of Antenna Technologies, 2016. 3473 p.
[4] Imbriale W. A., Gao S., Boccia L. Space Antenna Handbook. John Wiley & Sons Ltd., 2012. 744 p.
[5] Dybdal R. Communication satellite antennas: system architecture, technology and evaluation. New York, McGraw-Hill, 2009.
[6] Galimov G. K. *Obshchaya teoriya zerkal'nyh antenn. T. 6* [General theory of mirror antennas. Vol. 6]. Moscow, Advantsed Solutions, 2017. 704 p. (In Russian)
[7] Chichurin V. E., Nagovitsyn V. N., Nagovitsyn A. V., Matsienko A. V., Mikhnev M. M., Danilov V. E. *Sposob izgotovleniya mnogosloynogo antennogo otrazhatelya* [A method of manufacturing a multilayer antenna reflector]. Patent RU 2686865, 2018, bulletin no. 13.
[8] 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
[9] Chichurin V. E., Taigin V. B., Nagovitsyn A. V., Bolgov V. V., Patraev E. V., Mikhnev M. M. *Precizionnyj reflektor i sposob ego izgotovleniya* [Precision reflector and method for its manufacture]. Patent RU 2571718, 2015, bulletin no. 10.
[10] Novikov A. D., Prosuntsov P. V., Reznik S. V. *Opredeleniye konstruktivnogo oblika reflektora zerkalnoy kosmicheskoy antenny iz kompozitsionnogo materiala* [Definition of constructive image of the reflector of a reflective space antenna from a composite material] // RUDN Journal of Engineering Researches, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 308–317. (In Russian)
[11] Reznik S. V., Prosuntsov P. V., Azarov A. V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 88, no. 3, pp. 699–705.
[12] Sharlovskiy Yu. V. *Regulirovochnyye ustroystva priborov i ikh elementy* [Adjustment devices and its elements]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1976. 311 p. (In Russian)
[13] Zolotukhin I. S., Fedorova K. M. *Kontrol geometricheskikh parametrov detaley s pomoshch'yu koordinatno-izmeritelnykh mashin* [Control of the geometric parameters of parts using coordinate measuring machines]. Tyumen, TIU, 2018. 114 p. (In Russian)
[14] ANSYS Theory Reference. USA, ANSYS Inc., 1994.
[15] Wijskamp S. Shape distortions in composites forming. PhD thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands, May, 2005, 183 p.