

УДК 621.396.531.395

Н. А. Бей, В. Н. Зимин, А. В. Крылов, В. Е. Мешковский, С. А. Чурилин

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РАКРЫВАЮЩЕЙСЯ БОРТОВОЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ АНТЕННЫ

Рассмотрен вариант отечественной бортовой многолучевой антенны для системы спутниковой связи геостационарного космического аппарата. Приведены результаты численной оптимизации формы поверхностей зеркал и анализа основных прочностных параметров конструкции модуля многолучевой антенны с учетом динамических нагрузок, действующих при выводе на орбиту.

Ключевые слова: антенна, модуль, зеркало, модель, композит.

Бортовые многолучевые антенны (МЛА) используются практически во всех современных зарубежных ретрансляторах, в частности, в Anik-F2, Thaicom-4 и др. Установленные на таких ретрансляторах антенны имеют большие размеры и являются очень дорогими системами, во многом определяющими стоимость всего бортового ретрансляционного комплекса (БРТК). Их применение оправдано в тех случаях, когда БРТК предназначен для межконтинентальной связи. Для обеспечения связи в пределах территории России можно использовать антенны меньших размеров [1]. При проектировании МЛА за основу принята двухзеркальная антенная система с многоэлементным облучателем. Учитывая достаточно большой угол отклонения парциального луча в меридиональной плоскости, в качестве расчетной модели антенны принята зеркальная система апланатического типа. Устранение aberrаций для отклоненных лучей достигается применением специальной формы зеркал.

В проектируемой антенне ширина сектора сканирования в одной плоскости (меридиональной) должна превосходить ширину сектора в ортогональной плоскости примерно в 5 раз. В этом случае хорошие характеристики можно получить, применяя зеркала тороидального типа. У двухзеркальной антенны с зеркалами тороидального типа сектор сканирования вытянут в плоскости, ортогональной оси тороида. Главное зеркало в плоскости оси тороида описывается кривой четвертого порядка, близкой по форме к параболе, а сечение вспомогательного зеркала в этой плоскости близко по форме к эллипсу, один из фокусов которого близок к фокусу параболы сечения главного зеркала. В целом, вспомогательное зеркало имеет отрицательную гауссову кривизну, а характеристики такой антенны сочетают в себе свойства как антенны Кассегрена, так и антенны Грегори.

Вспомогательное зеркало не затеняет апертуру главного зеркала, а решетка облучателей, формирующих многолучевую диаграмму направленности (ДН), размещена вблизи края главного зеркала, ближайшего к вспомогательному. Главное зеркало ограничено контуром сечения тороида плоскостью апертуры. Оси тороидальных главного и вспомогательного зеркал предполагаются параллельными. Размеры, форма и расположение зеркал и решетки облучателей оптимизированы по минимуму aberrаций и кросс-поляризации в секторе сканирования с учетом сохранения усиления каждого луча на уровне усиления параболической антенны с апертурой диаметром 1 600 мм.

Контур лучей в проекции на карту России представлены на рис. 1. При этом предполагается, что МЛА установлена на геостационарном спутнике (рис. 2) в точке стояния 90° в. д., а оси тороидов главного и вспомогательного зеркал наклонены к оси Земли на $7,5^\circ$ для отклонения лучей от плоскости экватора к северу. Расчеты соответствуют тороидальной антенне с главным зеркалом диаметром 1 600 мм, работающей в K_u -диапазоне частот. Контур лучей создается 32-мя излучателями решетки облучателей. Лучи антенны неосесимметричны, их ширина больше в плоскости, проходящей через ось тороида, и меньше в ортогональной плоскости.

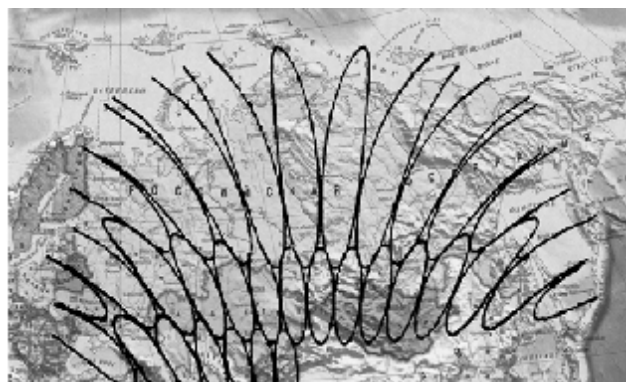


Рис. 1. Контур лучей в проекции на карту России

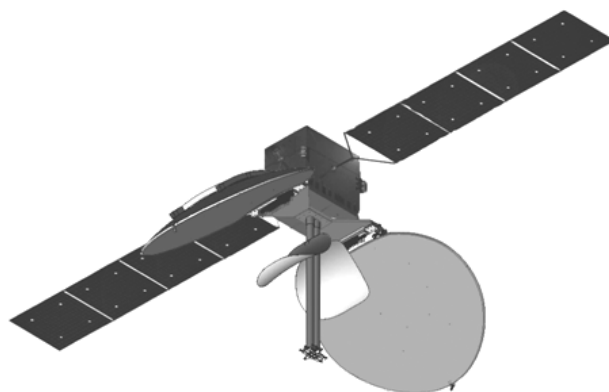


Рис. 2. Геостационарный спутник с бортовой МЛА

МЛА для космического аппарата имеет различные конфигурации в транспортном и рабочем состоянии на орбите. Для размещения МЛА под обтекателем ракеты-носителя трансформируемые элементы антенны должны быть определенным образом уложены в компактное транс-

портное положение. С целью оптимизации параметров приемо-передающей МЛА предлагается применить два практически идентичных по схеме построения и конструкции антенных модуля – приемный и передающий. Габаритные размеры модуля МЛА в транспортном положении составляют 680×1 637×1 684 мм, а в рабочем раскрытом состоянии он имеет размеры 1 917×1 638×1 684 мм. В состав модуля входят: облучатель, большое и малое зеркала, рама крепления, стойка для крепления малого зеркала и устройства раскрытия и фиксации большого зеркала в рабочем и транспортном положениях. После выведения космического аппарата (КА) на геостационарную орбиту трансформируемый элемент конструкции МЛА (большое зеркало антенны) раскрывается по заданной программе. В процессе движения трансформируемого элемента конструкции МЛА происходит его фиксация в рабочем положении, при этом раскрытие может выполняться как принудительно, с помощью электропривода, так и за счет потенциальной энергии, запасаемой в различного рода пружинах. Малое зеркало является неподвижным и закреплено на стойке в своем рабочем положении. Стойка крепления малого зеркала представляет собой трубчатый стержень длиной 1 585 мм, внешним диаметром 75 мм и толщиной стенки 3 мм. В транспортном состоянии большое зеркало антенны находится в пределах зоны полезной нагрузки под обтекателем ракеты-носителя (РН). Рама крепления большого зеркала представляет собой сборную конструкцию из двух продольных и двух поперечных ребер. Все элементы конструкции рамы представляют собой профили в виде швеллеров. Жесткость и прочность элементов антенны на участке ее выведения на геостационарную орбиту в составе КА, когда действуют максимальные механические перегрузки, обеспечивает также замок зачековки, входящий в устройство фиксации.

Основными требованиями к материалам, из которых предполагается выполнить элементы антенного модуля, являются стабильность размеров зеркал при эксплуатации, включая широкий диапазон температур; прочность элементов конструкции МЛА; жесткость и отсутствие собственных частот упругих колебаний в заданной рабочей полосе.

Конструкция наиболее сложных и ответственных элементов антенного модуля – зеркал МЛА – должна удовлетворять всем этим требованиям и при этом иметь минимальную массу. В качестве материала для термостабильных элементов конструкции (зеркала, рама, стойка) предлагается использовать композитные материалы на основе углепластика.

При проработке конструкции МЛА были проведены расчеты прочностных характеристик элементов модуля МЛА, сделан выбор и расчет размеростабильности в полосе рабочих температур материала, из которого возможно изготовление элементов модуля, определены частоты и формы собственных упругих колебаний модели модуля МЛА. Для выполнения прочностных расчетов модуля МЛА построена конечно-элементная модель модуля МЛА. На основе данной модели разработана программа, позволившая провести подробный анализ процессов деформирования и разрушения многослойных композитов, а также построить диаграммы деформиро-

вания и поверхности прочности композитов при одно- и двухосном нагружении. С помощью программы можно определить причины начального и окончательного разрушения материалов. Для прочностных расчетов при заданных перегрузках использовался конечно-элементный программный комплекс MSC Patran-Nastran.

Основным условием проектирования размеростабильных композитных конструкций является определение таких структурных параметров композита, которые обеспечивают равенство нулю тех или иных компонент вектора деформаций при температурных воздействиях. При больших температурных интервалах необходимо учитывать как температурные зависимости коэффициента линейного термического расширения (КЛТР), так и жесткостные (прочностные) характеристики композита. В этом случае при расчете использовались пошаговые процедуры с кусочно-линейной аппроксимацией температурных деформаций на каждом шаге по температуре. При этом задача поиска оптимальных сочетаний свойств композитной конструкции принципиально не усложняется; необходимо лишь использовать вместо текущих значений КЛТР соответствующие интегральные характеристики для данного температурного диапазона.

Одним из основных факторов, определяющих геометрические размеры рамы крепления большого зеркала и стойки крепления малого зеркала, являются инерционные нагрузки, действующие на модуль МЛА в процессе вывода КА на орбиту. Из расчета на прочность на данный вид нагружения определялись необходимые размеры рамы и стойки. Величины инерционных нагрузок обусловлены осевой и боковой перегрузками РН. На основе анализа значений перегрузок для различных РН следует, что их максимальные значения в осевом направлении составляют 9 единиц, а боковой – 2 единицы.

Распределение максимальных значений напряжений σ_{11} и σ_{22} в обшивках большого зеркала МЛА для осевой перегрузки 9 g и боковой 2 g, рассчитанных с использованием конечно-элементного программного комплекса MSC Patran-Nastran, показано на рис. 3. Максимальные значения напряжений растяжения $\sigma_{11} = 4,72$ МПа и $\sigma_{22} = 4,89$ МПа действуют в области опорного узла устройства фиксации. В этой же области максимальными являются напряжения $\sigma_{12} = 1,37$ МПа.

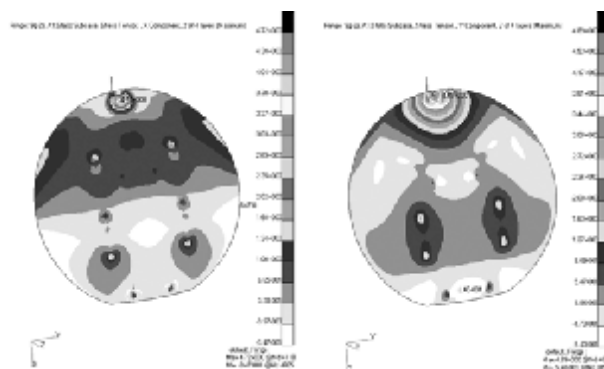


Рис. 3. Распределение максимальных напряжений σ_{11} , σ_{22} в большом зеркале модуля МЛА

Конечно-элементный программный комплекс MSC Patran-Nastran позволил рассчитать первые десять час-

тот и форм собственных колебаний модели модуля МЛА в транспортном и рабочем положениях. Одна из форм собственных колебаний показана на рис. 4 (нейтральное и два крайних положения деформируемых элементов по данному тону колебания). В основном, формы собственных колебаний в транспортном положении модуля МЛА обусловлены колебаниями большого зеркала.

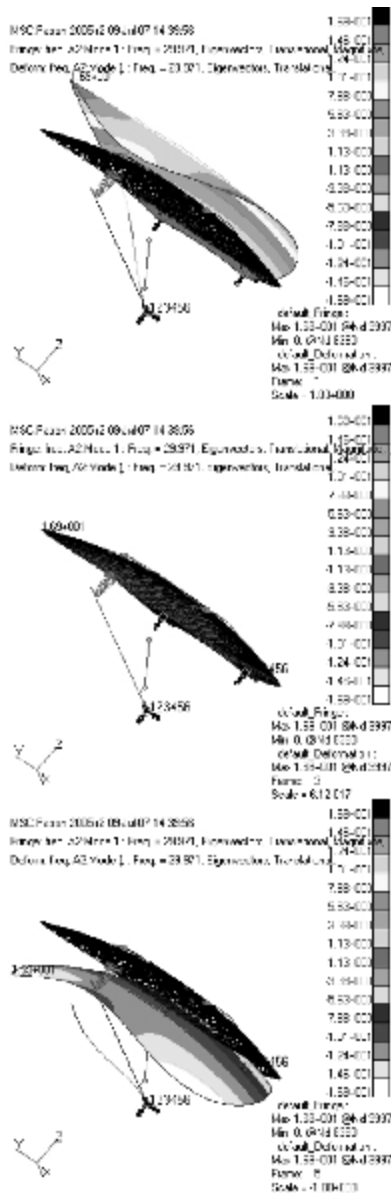


Рис. 4. Форма собственных колебаний, соответствующая 30 Гц

На основе результатов расчета изготовлены макеты элементов конструкции модуля МЛА (рис. 5). В качестве композиционной структуры использована углеродная лента ЛУ-П/0.1А ГОСТ 28006–88 и модифицированный эпоксидный связующий клей ЭНФБ ТУ 1-596-36-98 с толщиной монослоя 0,11...0,13 мм. Массовые характеристики модуля МЛА: большое зеркало 8,5 кг, малое зеркало 2,5 кг.



Рис. 5. Экспериментальный образец МЛА

Разработка МЛА для отечественных КА – одна из самых актуальных современных задач российской системы спутниковой связи, решение которой позволит получить совершенно новое качество услуг связи и коммуникаций. БРТК с МЛА на геостационарном КА обеспечит в едином цифровом блоке мультимедийные теле- и радиослужбы, передачу данных, управление, телефонию, прямой доступ в Интернет, видеоконференцсвязь в пределах всей территории РФ и сопредельных государств.

Разрабатываемая технология предусматривает использование для построения трансформируемой МЛА композитного материала на основе углепластика, благодаря чему при относительно малой массе будут обеспечены высокие электрические и прочностные характеристики в течение всего длительного срока эксплуатации (не менее 14 лет). Относительная простота конструктивных решений позволяет сокращать сроки и стоимость изготовления МЛА и обеспечивает привлекательность практической реализации.

Библиографическая ссылка

1. Аносов А. М., Бей Н. А., Вечтомов В. А. Применение бортовых многолучевых антенн в системах спутниковой связи // Антенны. 2005. № 10. С. 19–23.

N. A. Bey, V. N. Zimin, A. V. Krylov, V. E. Meshkovsky, S. A. Churilin

IMPLEMENTATION FEATURES OF DEPLOYABLE MULTIBEAM AEROSPACE ANTENNA

A variant of Russian multibeam aerospace antenna for satellite communication system of geostationary spacecraft is under consideration in this article. The results of mirror surface numerical optimization and analysis for main strength parameters of multibeam antenna module under launching dynamic forces are presented here.

Keywords: antenna, unit, mirror, model, composite.