Перспективы развития конструкций космических самораскрывающихся антенн на основе ферменно-стержневого каркаса

Prospects for the development of space erectable antennas on the basis of a truss structure

Бондарев / Bondarev A.
Андрей Вячеславович
(andrey.bondarev@scaegroup.com)
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
начальник расчетно-исследовательского отдела.
г. Санкт-Петербург

Блинов / Blinov A.
Александр Филиппович
(alexander.blinov@scaegroup.com)
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
начальник конструкторского отдела.
г. Санкт-Петрбург

Артамонов / Artamonov S.
Станислав Владимирович
(stanislav.artamonov@scaegroup.com)
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
ведущий инженер-конструктор
расчетно-исследовательского отдела.
г. Санкт-Петербург

Недашковская / Nedashkovskaya E.
Евгения Сергеевна
(eugenia.nedashkovskaya@scaegroup.com)
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
инженер-конструктор 2-й категории
расчетно-исследовательского отдела.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: космическая самораскрывающаяся антенна – space erectable antenna; ферменно-стержневой каркас – truss-core framework; полномасштабный макет рефлектора – reflector full-scale prototype; фрагмент сетеполотна – mesh dish piece.

Описаны конструктивные особенности космических самораскрывающихся антенн на основе ферменно-стержневого каркаса, их достигнутый технический уровень и ряд недостатков. Приведена конкретная разработка и реализация макета крупногабаритного рефлектора. Определены задачи дальнейших проработок по усовершенствованию конструкций этого типа, а также результаты проведенных исследований.

Design features, engineering level and a number of shortcomings of the space erectable antennas based truss-core framework are described. The development and the implementation of a large-sized reflector prototype are given. The further goals of the design improvement and the conducted research results have been determined.

При отработке принципиальных конструктивных решений и компоновочных вариантов конструкций космических самораскрывающихся антенн на основе ферменно-стержневого каркаса (ФСК) Особым конструкторским бюро Московского энергетического института (ОКБ МЭИ) создано несколько модификаций ферменной конструкции размером 5 и 6 метров. Конструкции предназначены для использования в системах космического базирования в качестве складной транспортабельной антенны.

Основу каркаса составляют: узловые шарнирные соединения, складывающиеся стержни, диагональные стержни. Фрагмент ФСК рефлектора представлен на рис. 1.

В развернутом положении стержни ФСК сходятся в узловых шарнирных соединениях 1, которые расположены на двух криволинейных поверхностях. В каждом узловом шарнирном соединении сходятся по три диагональных стержня 4, обеспечивающих связь узловых точек вогнутой и выпуклой поверхностей каркаса, а также по шесть складывающихся стержней 3, которые образуют ячейки поверхностей рефлектора. Складывающиеся стержни вогнутой стороны образуют отражающую поверхность (ОП), к которой крепится трикотажное сетеполотно из микропроволоки. Складывающиеся стержни 3 имеют в середине шарниры 2 с пружинами. Базовая ячейка вогнутой и выпуклой сетей поверхности – треугольник, образованный тремя складывающимися стержнями, а базовая ячейка ФСК – тетраэдр, образованный тремя диагональными стержнями и тремя складывающимися стержнями. Весь ФСК образуется повторением этих базовых ячеек. Необходимый профиль поверхности образуется за счёт разной длины складывающихся стержней вогнутой (отражающей) и выпуклой (тыльной) сети. Длина всех диагональных стержней одинакова.

При свертывании рефлектора стержни отражающей и тыльной сети поворачиваются в узловых шарнирах и шарнирах складывающихся стержней, убираются внутрь ФСК. Диагональные стержни поворачиваются в своих шарнирах узловых шарниров и сближаются.

4-2017.indd 22 12.12.2017 11:24:33

Габаритный размер укладки по высоте определяется длиной диагональных стержней. Поперечные габаритные размеры укладки рефлектора определяются возможностями наиболее тесного расположения диагональных стержней, шарниров складывающихся стержней и самих складывающихся стержней.

Достигнутый технический уровень выявил и ряд недостатков конструкций:

– высокая удельная масса конструкций – около 2 кг/м^2;

– точность аппроксимации поверхности, определяемая плоскими треугольными элементами из-за крепления сетеполотна ОП непосредственно к узлам и стержням каркаса;

– снижение точности профиля ОП из-за отсутствия фиксации формы каркаса в развернутом положении;

– сборка каркаса на стапеле с применением силовых операций, не исключающая появления напряжений и последующих деформаций;

– развертывание только за счет энергии сжатых пружин шарнирных устройств.

Современные требования по повышению точности ОП и увеличению размеров рефлекторов при сохранении габаритных размеров укладки и массы рефлектора уже не могут быть достигнуты на имеющейся элементной базе, и определили задачи дальнейших разработок по усовершенствованию конструкций:

– снижение удельной массы конструкций до 1,0...1,2 кг/м^2;

– уменьшение динамических нагрузок на стыке рефлектора с космическим аппаратом (КА);

– повышение надежности фиксации формы каркаса в развернутом положении;

– уменьшение напряжений в элементах конструкции и повышение надежности при развертывании за счет введения управляемого развертывания.

В 2009 году перед АО "НЦПЭ" была поставлена задача создания полноразмерного макета рефлектора (ПМР) космической самораскрывающейся антенны на основе ФСК с размером ОП 12,1x4,1 м, фокусным расстоянием 5,0 м и среднеквадратическим отклонением (СКО) ОП ≈ 1,5 мм. При схожести конструктивного исполнения с уже существующими конструкциями на основе ФСК в целом, учитывая возросшие размеры рефлектора, был внесен ряд существенных изменений в конструкцию, в том числе:

– для повышения надежности развертывания значительно увеличена энергия пружин, за счет которых происходит развертывание рефлектора;

– для снижения динамических нагрузок при развертывании рефлектора введено контролируемое развертывание;

– для снижения СКО ОП введено развертывание складывающихся стержней на расчетный угол, меньший 180°.

Исследования и результаты экспериментов АО "НЦПЭ" завершены в 2012 году разработкой и изготовлением полномасштабного макета. По результатам проведенных исследований и экспериментов определены состав и структура ФСК ПМР, приведенные на рис. 2. Основные соединительные элементы конструкции показаны на рис. 3. Общий вид ПМР в свернутом и развернутом положениях приведен на рис. 4. КЭМ рефлектора в ПК «ANSYS» – на рис. 5.

Рассматриваются пути решения сформулированных выше задач, а именно:

– повышение точности профиля ОП разбиением на треугольные элементы требуемого размера за счет уменьшения длин стержней или применением профилированных стержней при сохранении габаритов укладки, а также с применением оттяжек сетеполотна к тыльной поверхности рефлектора;

– оптимизация геометрии ФСК рефлектора и характеристик элементов по поясам конструкции за счет применения полномасштабного математического моделирования;

– использование новых конструкционных материалов с наилучшим сочетанием физико-механических и теплофизических характеристик;

– разработка способов управляемого развертывания;

– разработка способов надежной фиксации формы каркаса в развернутом положении.

Следующим этапом работы стала проработка рефлектора с малым фокусным расстоянием. Рефлекторы с меньшим фокусным расстоянием имеют ряд конструктивных преимуществ, но в соответствии с формулой

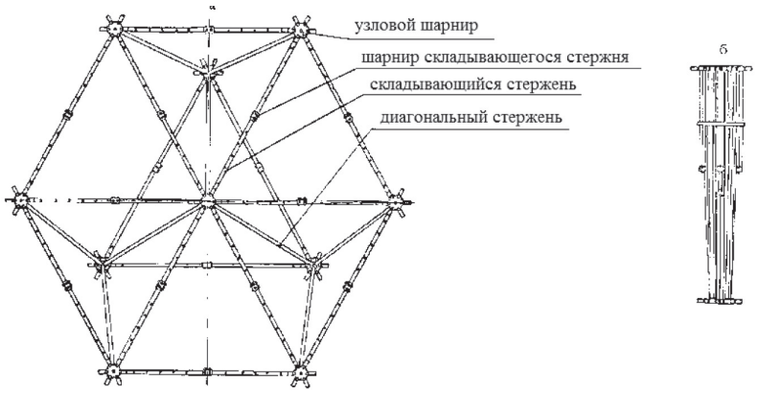

Рис. 1. Фрагмент ФСК рефлектора:
а – развернутое положение; б – свернутое положение

4-2017.indd 23 12.12.2017 11:24:33

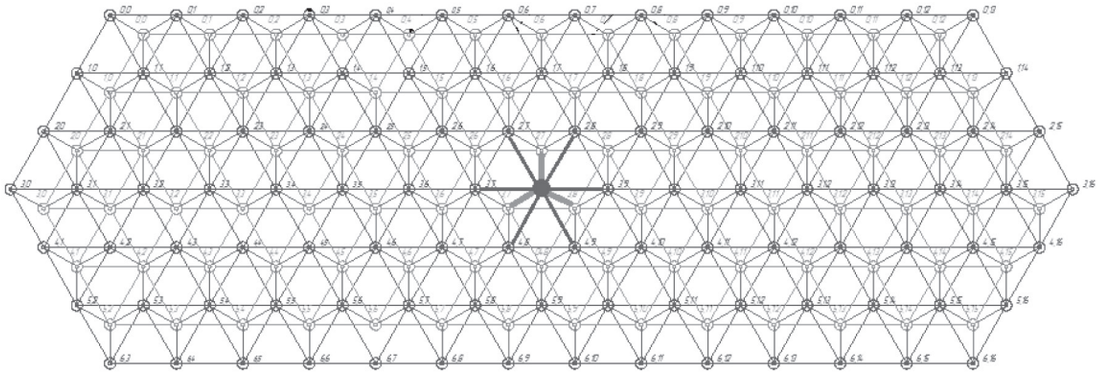

Рис. 2. Состав и структура ФСК ПМР

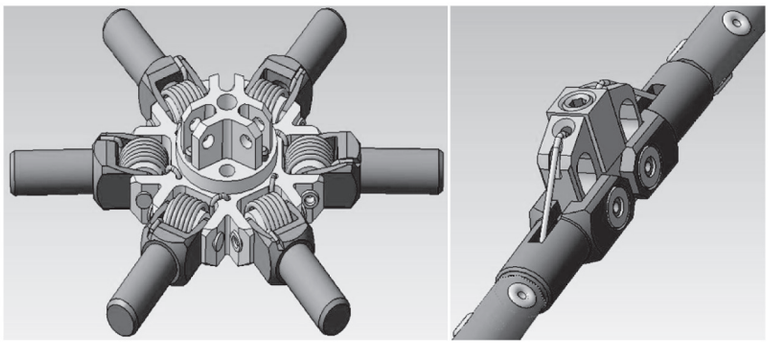

Рис. 3. Корпус в сборе и стержень складывающийся лицевой

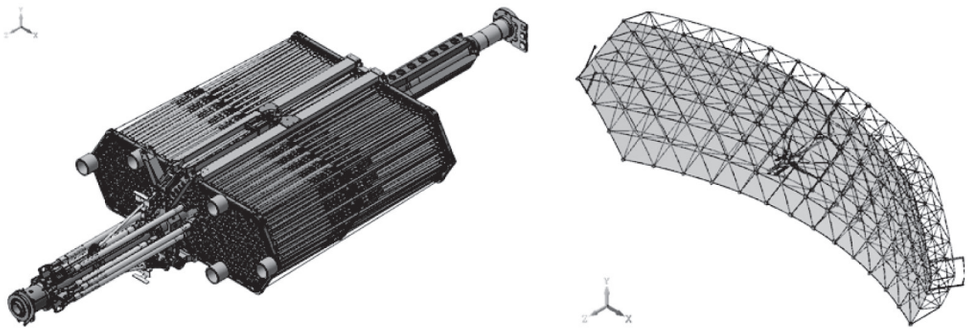

Рис. 4. Общий вид ПМР в свернутом и в развернутом положении (3D-модель в ПК КОМПАС)

4-2017.indd 24 12.12.2017 11:24:34

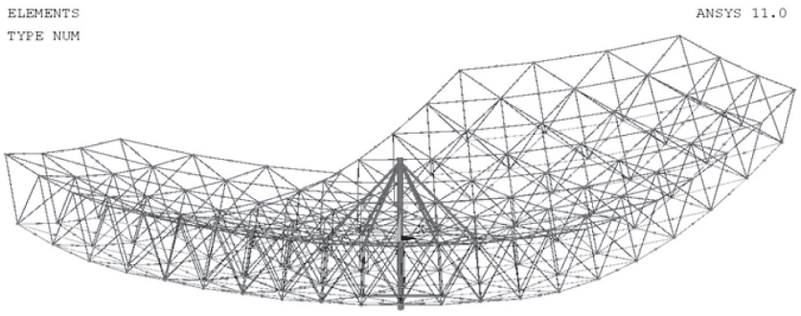

Рис. 5. Конечно-элементная модель рефлектора в ПК «ANSYS»

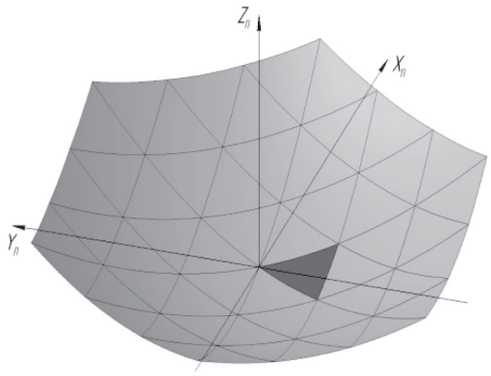

Рис. 6. Рефлектор и его фрагмент

Таблица 1

Результаты измерений СКО рефлектора от параболоида сравнения при длине стороны фрагмента ОП 800 мм

Номер эксперимента	Параметры параболоида сравнения					Примечания
	F	X_0	Y_0	Z_0	СКО	
1	2000	0	0	0	3,139	Без оттяжек. Измерения индикатором часового типа Holex
	1929	0	0	0	2,773	
	2851	12,7	228,9	11,1	1,871	
2	2000	0	0	0	2,279	1 оттяжка. Измерения индикатором часового типа Holex
	1964	0	0	0	2,154	
	2552	–3,8	150,6	7,5	1,616	
3	2000	0	0	0	1,920	4 оттяжки. Измерения индикатором часового типа Holex
	1966	0	0	0	1,790	
	2398	–6,9	115,2	6,1	1,340	
4	2000	0	60	–0,45	4,386	Без оттяжек. Измерения лазерным трекером Leica AT960
	1881	0	60	–0,45	2,804	
	3496	–26,2	399,2	13,6	1,130	
5	2000	0	60	–0,45	2,182	4 оттяжки. Измерения лазерным трекером Leica AT960
	1958	0	60	–0,45	1,307	
	2265	–23,1	124,8	2,00	0,852	

4-2017.indd 25 12.12.2017 11:24:34

Рис. 7. Лазерный трекер Leica AT960

(1) имеют большее СКО поверхности от теоретического параболоида.

$$\sigma = 0{,}0161 d^2/F\ , \qquad (1)$$

где d – сторона треугольной ячейки; F – фокусное расстояние.

Проведены исследования с целью выявления влияния дополнительных оттяжек на значение СКО фрагмента ОП сетеполотна от поверхности теоретического параболоида. Натурному обмеру подвергался фрагмент рефлектора как с прежней длиной стороны 800 мм (рис. 6), так и с длиной стороны 600 мм. Для уменьшения СКО поверхности, трубки, образующие треугольный фрагмент рефлектора, изогнуты таким образом, чтобы радиус их кривизны совпадал с местным радиусом кривизны теоретического параболоида.

Для проведения исследования изготовлен экспериментальный стенд, разработана методика проведения натурного эксперимента. В центр ячейки сетеполотна вводилось от одной до четырёх оттяжек, которые притягивали сетеполотно к поверхности теоретического параболоида. Измерение формы поверхности сетеполотна проводилось двумя способами: индикатором часового типа Holex и лазерным трекером Leica AT960 (рис. 7).

Разработаны расчётные программы, позволяющие обрабатывать результаты измерений и определять СКО рефлектора от параболоида сравнения, а также строить картограммы отклонений поверхности рефлектора от поверхности параболоида сравнения.

В результате проведения измерений индикатором часового типа Holex установлено, что поверхность отклонений имеет ярко выраженную "подушкообразную" форму. Этот эффект известен и описан, в частности, в [1].

Идеальной с точки зрения минимизации СКО была бы плоская поверхность отклонений, и, чтобы ее добиться, были введены оттяжки. По данным обмеров индикатором часового типа Holex уменьшение СКО составляет приблизительно 25%. По данным измерений лазерным трекером Leica AT960, с последующей обработкой по разработанной методике, уменьшение СКО составляет приблизительно 55%.

В результате измерений и их обработки получены следующие результаты:

– для рефлектора с фокусным расстоянием 2,0 м и длиной стороны фрагмента ОП 800 мм без оттяжек СКО поверхности составляет 3,2...4,4 мм, с оттяжками минимально достигнутое СКО ОП от теоретического параболоида составляет 1,2 мм;

– для рефлектора с фокусным расстоянием 2,0 м и длиной стороны фрагмента ОП 600 мм без оттяжек СКО составляет 1,4 мм, с оттяжками минимально достигнутое СКО ОП $\approx$0,9 мм.

Достигнутое значение СКО ОП при погрешности $\lambda/20$ (λ – длина волны) соответствует применению таких конструкций на частотах до 20 ГГц.

Заключение

Несмотря на достигнутые значительные успехи в области проектирования самораскрывающихся конструкций [2], важной остается задача обеспечения плавного и надежного развертывания крупногабаритных конструкций, прежде всего ферменного типа, состоящих из десятков, сотен и даже тысяч взаимосвязанных между собой шарнирами элементов, при гарантированном обеспечении их последующего функционирования, с точки зрения критерия надежности.

Реализованные разработки и проведенные исследования способов снижения СКО ОП рефлекторов на основе ФСК подтверждают возможность их применения в антенной технике в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн.

Литература

1. Гряник, М. В. Развёртываемые зеркальные антенны зонтичного типа. Москва / М.В. Гряник. – Радио и связь, 1987. – 72 с.

2. Зимин, В. Н. Механика трансформируемых структурных космических конструкций / В.Н. Зимин // Вестник самарского университет. Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4 (54). – С. 105–114.

4-2017.indd 26 12.12.2017 11:24:35