

Наговицын А.В., Вознюк В.В., Наговицына А.Н. Технологические основы создания...

10. *Polonchik O.L., Artyushkin A.B., Nechay A.A.* Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli na baze sputnikov so stabilizatsiey vrashcheniya // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2017. Vyp. 1. S. 35–41.

11. *Svinarchuk A.A., Kalinichenko S.V., Nechay A.A.* Ispol'zovanie graficheskogo protsessora dlya uskoreniya raspredelennykh vychisleniy pri prognoze ekstremal'nykh znacheniy temperatury vozdukha // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2017. Vyp. 4. S. 33–38.

DOI: 10.25586/RNU.V9I187.19.01.P.055

УДК 621.396.67

А.В. Наговицын, В.В. Вознюк, А.Н. Наговицына

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ АНТЕНН  
ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ  
ОРБИТАЛЬНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Предметом рассмотрения являются предложения по новому концептуальному подходу к технологии создания крупногабаритных космических трансформируемых антенн надувного типа с возможностью оперативной коррекции текущих деформаций конструкции антенного полотна на основе юстировки эталонными излучениями с наземных пунктов коррекции.

*Ключевые слова:* технология создания, крупногабаритная космическая трансформируемая антенна, надувная конструкция, композитные и синтетические материалы, адаптивная фазированная антенная решетка, юстировка.

A.V. Nagovitsyn, V.V. Voznyuk, A.N. Nagovitsyna

TECHNOLOGICAL BASIS FOR THE CREATION  
OF THE TRANSFORMABLE ANTENNAS  
OF THE SPACE BASED RADIO SYSTEMS

The subject of consideration are proposals for a new conceptual approach to the technology of creating large-size space based transformable inflatable type antennas with the possibility of operational correction of the current deformation of the antenna web design based on the alignment of reference radiation from the ground correction points.

*Keywords:* technology of creation, large-size space transformable antenna, inflatable structure, composite and synthetic materials, adaptive phased array antenna, alignment.

*Введение*

Бортовые антенны являются неотъемлемой частью современных космических радиотехнических комплексов орбитального базирования. По мере возрастания количества и сложности целевых задач применение космических антенн потребовало увеличения площади апертуры антенны. Понятно, что в условиях жестких массогабаритных огра-

ничений на целевую нагрузку космических аппаратов (КА) цельные антенны жесткой конструкции не могли иметь большие геометрические размеры. Для преодоления этих ограничений было предложено создание трансформируемых (развертываемых) космических антенн. Перед установкой на КА такие бортовые антенны тем или иным образом складываются в компактное стартовое положение. К ним в сложенном состоянии при этом предъявляются те же жесткие требования к массе и занимаемому объему, и одновременно они должны обладать высокой надежностью развертывания и сохранять свои технические характеристики в процессе эксплуатации. В развернутом состоянии в условиях космоса к таким антеннам предъявляют в первую очередь высокие требования по жесткости, обусловленные необходимостью выдерживания заданной ориентации антенны и обеспечения высокой точности рабочей поверхности рефлектора [4].

Таким образом, исследования в области развития технологий создания крупногабаритных антенн для космических комплексов являются актуальными.

#### *Технологические основы создания крупногабаритных трансформируемых антенн*

В настоящее время разрабатываемые космические антенны могут быть классифицированы по способу развертывания и конструктивному решению [2].

По способу развертывания антенны делятся на механические, центробежные, пневматические, пиротехнические, электростатические и комбинированные.

*Механические конструкции* соединены в единую механическую схему, развертывание которой производится за счет энергии пружин или деформированных упругих элементов.

*Центробежные системы*, раскрытие и поддержание формы которых осуществляются за счет центробежных сил, возникающих при вращении конструкции вокруг центра масс.

*Пневматические конструкции*, раскрытие которых, а также сохранение формы происходит за счет избыточного внутреннего давления.

*Пиротехнические конструкции* развертываются в результате взрыва небольшого заряда или группы зарядов.

*Электростатические конструкции*, где поддержание формы происходит за счет электростатических (или магнитных) сил.

*Комбинированные антенны* раскрываются за счет комбинации действий перечисленных способов развертывания.

По конструктивному решению космические антенны можно разделить на ферменные, вантовые, сборные, секторные, надувные и зонтичные.

*Ферменные антенны* имеют пространственный складной каркас, состоящий из шарнирно соединенных стержней.

*Вантовые антенны* состоят из силового кольца, сетеполотна и системы вантовых растяжек.

*Сборные антенны* собирают из отдельных панелей и ферм.

*Секторные антенны* состоят из механически соединенных панелей и ферм.

*Надувные антенны* формируются из отдельных надувных частей, к которым крепятся отражающие поверхности и другие радиоэлектронные компоненты.

*Зонтичные антенны* имеют конструкцию, подобную дождевому зонту.

Наговицын А.В., Вознюк В.В., Наговицына А.Н. Технологические основы создания...

Все конструкции космических антенн заметно отличаются по способам их развертывания:

- изготовление цельной конструкции антенны в развернутом виде на Земле и вывод ее на орбиту уже в готовом виде;
- изготовление конструкции антенны в свернутом виде на Земле и вывод ее на орбиту в сложенном виде с последующим развертыванием в автоматическом или ручном режиме;
- сборка антенны на орбите из доставленных с Земли готовых элементов или их полуфабрикатов;
- создание антенн в орбитальных условиях из доставленного туда сырья.

Проведенный анализ существующих способов развертывания конструкций крупногабаритных космических антенн позволяет предъявить следующие основные требования:

- конструкция антенны должна обладать минимальным стартовым весом, иметь компактную укладку и характеризоваться небольшим отношением массы конструкции к площади раскрытия апертуры (зеркала);
- конструкция антенны должна быть простой и при этом обеспечивать высокую надежность развертывания антенны в условиях космоса;
- конструкция антенны должна обеспечивать требуемые значения жесткости конструкции и точности формы зеркала, а также поддерживать геометрические размеры в процессе эксплуатации, которые могут меняться за счет различного рода внешних воздействий (приливные силы, силы аэродинамического сопротивления и давления солнечного излучения, влияние магнитного и гравитационного полей Земли) и внутренних нагрузок (температурные напряжения, внутреннее давление, внутренние центробежные силы, нагрузки в связи с перемещением масс по поверхности и объему конструкции и т.д.) [4; 6];
- конструкция антенны должна обладать достаточной прочностью, способной противостоять вредоносному воздействию космической радиации и мусора [1; 5; 7].

Механические конструкции позволяют осуществлять развертывание в космосе достаточно жестких и точных каркасов для антенных сооружений, и поэтому большая часть космических антенн ранее создавалась на основе данной технологии. Однако такие антенны получаются очень массивными, а технология их изготовления и сборки на орбите довольно сложна [3].

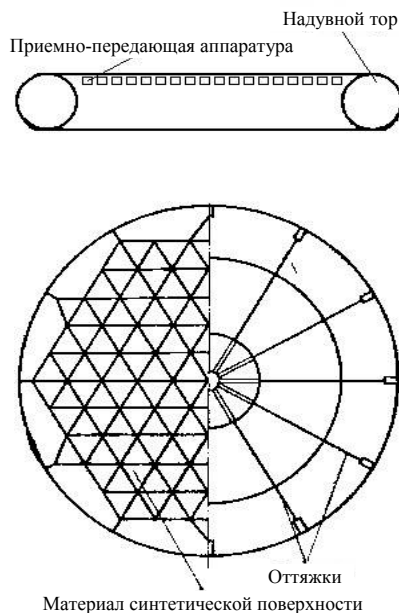
#### *Предложения по созданию крупногабаритных трансформируемых антенн для радиотехнических комплексов орбитального базирования*

Анализ технологий создания космических антенн других типов конструкций показал, что все они также имеют свои преимущества и недостатки. Тенденция замещения металлов на другие инновационные композитные и синтетические материалы и способы формирования из них сложных топологических форм определили надувную конструкцию каркаса фазированной антенной решетки с возможностью адаптации фазовых распределений, в зависимости от происходящих топологических деформаций, наиболее приемлемым на данный момент времени и ближайшую перспективу вариантом построения антенны космического базирования большой апертуры [4].

Перспективность надувных конструкций космических антенн обусловлена прежде всего компактностью укладки и небольшими отношениями массы конструкции

к реализуемой площади апертуры, которые сегодня оцениваются в диапазоне от 0,15 до 0,25 кг/м<sup>2</sup>. Оболочка надувной конструкции и ее внутренняя часть собраны в складки, которые представляют собой своеобразный «запас кинематической изменчивости» формы оболочки. Нагруженные внутренним избыточным давлением, эти оболочки способны выворачиваться относительно пояса своего закрепления, что позволяет организовать управляемый процесс ее развертывания из контейнера.

Предлагаемая надувная конструкция космической антенны может быть выполнена в виде надувного тора, к которому с внутренней стороны крепится вспомогательная поверхность, изготовленная из синтетической ткани (рис.), предназначенная для размещения элементов антенной решетки. Обе поверхности при этом образуют замкнутый объем, создание в котором избыточного давления обеспечивает натяжение поверхностей и формирование заданной топологии конструкции. Вспомогательная поверхность крепится к тору с помощью системы тросовых оттяжек. На плоскости вспомогательной поверхности с использованием металлизированных нитей (металлизированной пленки) формируются фидеры и облучатели спиралевидно-конусной или плоской формы, которые образуют адаптивную фазированную антенную решетку (АФАР).



Надувная конструкция космической антенны

Для поддержания геометрических размеров и уменьшения температурных деформаций рассматриваемой конструкции в качестве шивного материала можно использовать кварцевую нить. Кроме того, для снижения влияния солнечного излучения на внешней поверхности всей конструкции необходимо предусмотреть покрытие светоотражающим материалом (фольгированной пленкой).

Основным недостатком надувных космических конструкций для создания антенн является уязвимость к нарушению их герметичности в связи с воздействием твердых

Наговицын А.В., Вознюк В.В., Наговицына А.Н. Технологические основы создания...

частиц, обладающих высокой кинетической энергией. Нарушение герметичности приводит к потере формы несущей конструкции антенны и в конечном итоге к невозможности выполнения ею своих функций. Для исключения такой возможности в надувной конструкции описываемой космической антенны предлагается применять новые технологии при изготовлении синтетического материала, которые предполагают использование трех воздушных оболочек, покрытых чередующимися слоями из керамической ткани, полиуретановой пены и кевлара. Керамический материал (Nextel) включается между слоями пены толщиной до 10 см. Такая конструкция обеспечивает защиту в том числе и от ударов микрометеоритов.

Кевларовое покрытие представляет собой оболочку, напоминающую ковер, и обеспечивает при этом необходимую герметичность. Такие покрытия создаются под воздействием высокой температуры и давления и обеспечивают высокий уровень герметичности и стойкости к внешним неблагоприятным факторам.

Полимерные материалы сначала приваривают друг к другу, а затем их сшивают прочной нитью. Сшивание проводится с контролем прочности нити, толщины иглы и т.д. Кроме того, после раскрытия антенного поля во внутренности надувных конструкций предполагается внесение вспенивающихся и самозатвердевающих материалов, которые на начальном и последующих этапах эксплуатации обеспечивают герметичность и жесткость несущего каркаса надувной конструкции.

Следующим недостатком надувной конструкции является то, что для наполнения антенны воздухом необходимо использовать довольно громоздкое оборудование, включающее сложную систему клапанов давления. Это часто приводило к нерациональному использованию объема надуваемой оболочки за счет включения в ее состав компонентов, предназначенных для наполнения ее газом, а также к увеличению энергетических затрат на надув. Решение данной проблемы может заключаться в использовании возгоняющего порошка (бензойной кислоты) – особого химического соединения, которое переходит из твердого состояния в газообразное при низком давлении. Кроме того, использование избыточного количества возгоняющегося порошка обеспечит в течение достаточно долгого времени постепенное восполнение потери газа в надувной конструкции.

В целях обеспечения температурных режимов работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космической антенны передатчики, приемники, фазовращатели и другие радиоэлектронные компоненты необходимо разместить в непосредственной близости с излучателем на антенном поле. Кроме того, уязвимая РЭА, сигнальные линии, линии питания будут защищены синтетическим материалом, специально разработанным с использованием новых технологий.

Космическую антенну надувной конструкции целесообразно выполнить в виде адаптивной фазированной антенной решетки. Выбор такой конструкции обусловлен, с одной стороны, возможностью управлять лучом (лучами) АФАР, а с другой – возможностью обеспечения высокого уровня сфазированности антенных элементов даже в условиях, возникающих в процессе эксплуатации деформаций конструкции антенны на основе оперативной юстировки с заданного перечня наземных эталонных излучателей с высокоточной навигационной привязкой. Такой вариант юстировки позволяет не предъявлять высоких требований к точностным параметрам конструкции антенны при ее развертывании и эксплуатации в условиях космического пространства.

Основная идея юстировки заключается в том, что, независимо от складывающихся на текущий момент времени деформаций антенного полотна, подстройка фаз элементарных излучателей космической антенны осуществляется на основе анализа уровня сфазированности этих элементов относительно эталонных излучений, заблаговременно размещенных на земле контрольно-юстировочных пунктов (пунктов коррекции) с известными координатами и параметрами. Пункты коррекции при этом могут представлять собой специальные сооружения с установленной в них приемо-передающей аппаратурой, формирующей эталонные сигналы со сложной структурой (с псевдослучайной перестройкой частоты), обеспечивающей скрытность и помехоустойчивость процесса юстировки. При этом направление с антенны на пункт коррекции может быть определено достаточно просто за счет использования навигационной информации с установленной на антенне навигационной аппаратуры. Сложный сигнал необходим для исключения перехвата и устранения воздействия помех на процесс юстировки антенны. Данный процесс осуществляется путем облучения плоским фронтом волны с известного направления (с направлений размещения пунктов коррекции) космической АФАР (с известными координатами и направлением ориентации антенны) и последующего анализа фаз принятых сигналов каждым облучателем с дальнейшей оценкой массива фазовых коррекций и их учетом для устранения влияния текущих деформаций антенного полотна на сфазированность рабочих лучей. Плоский фронт волны, необходимый для точной юстировки, достигается за счет большого удаления источника юстировочного сигнала от крупногабаритной космической АФАР.

#### *Заключение*

Таким образом, предложен новый концептуальный подход к технологии создания крупногабаритных космических трансформируемых антенн надувного типа с возможностью оперативной коррекции текущих деформаций конструкции антенного полотна на основе юстировки эталонными излучениями с наземных пунктов коррекции. Данная технология позволит преодолеть сложившиеся жесткие ограничения на массу и габариты конструкции антенн большой апертуры, а также обойти высокие требования к точности формы антенного зеркала, что, несомненно, является одним из возможных решений актуальной задачи создания крупногабаритных антенн космических комплексов различного целевого назначения.

#### *Литература*

1. Гвамичава А.С., Кошелев В.А. Строительство в космосе. М.: Знание, 1984. 64 с.
2. Лопатин А.В., Рутковская М.А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн // Вестник СГАУ им. М.Ф. Решетнева. 2015. Ч. 1, вып. 2. С. 58.
3. Мельников В.М., Матюшенко И.Н., Чернова Н.А., Харлов Б.Н. Проблемы создания в космосе крупногабаритных конструкций // Труды МАИ. 2014. Вып. 78. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy> (дата обращения: 20.04.2017).
4. Мешковский В.Е. Тепловой режим ферменного рефлектора трансформируемой крупногабаритной космической антенны // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machinrocket/852.html> (дата обращения: 20.04.2017).
5. Райкунов Г.Г., Комков В.А., Мельников В.М., Харлов Б.Н. Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции. М.: Физматлит, 2009. 447 с.

6. *Тимаков С.Н.* Исследование динамики управляемого углового движения космического пленочного рефлектора: с двойным вращением // Международная конференция по крупногабаритным космическим конструкциям НПО «Энергия»: сборник материалов. Н. Новгород, 1993. С. 37–38.
7. *Ширяев В.П.* Саморазворачивающиеся и сворачивающиеся пленочные конструкции // Международная конференция по крупногабаритным космическим конструкциям НПО «Энергия»: сборник материалов. Н. Новгород, 1993. С. 12–13.

### Literatura

1. *Gvamichava A.S., Koshelev B.A.* Stroitel'stvo v kosmose. M.: Znanie, 1984. 64 s.
2. *Lopatin A.V., Rutkovskaya M.A.* Obzor konstruktсий sovremennykh transformiruemyykh kosmicheskikh antenn // Vestnik SGAU im. M.F. Reshetneva. 2015. Ch. 1, vyp. 2. S. 58.
3. *Mel'nikov V.M., Matyushenko I.N., Chernova N.A., Kharlov B.N.* Problemy sozdaniya v kosmose krupnogabaritnykh konstruktсий // Trudy MAI. 2014. Vyp. 78. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy> (data obrashcheniya: 20.04.2017).
4. *Meshkovskiy V.E.* Teplovooy rezhim fermennogo reflektora transformiruemoy krupnogabaritnoy kosmicheskoy antennoy // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. 2013. Vyp. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machinrocket/852.html> (data obrashcheniya: 20.04.2017).
5. *Raykunov G.G., Komkov V.A., Mel'nikov V.M., Kharlov B.N.* Tsentrobezhnnye beskarkasnye krupnogabaritnye kosmicheskie konstruktсии. M.: Fizmatlit, 2009. 447 s.
6. *Тимаков С.Н.* Issledovanie dinamiki upravlyaemogo ugloвого dvizheniya kosmicheskogo plenochnogo reflektora: s dvoynym vrashcheniem // Mezhdunarodnaya konferentsiya po krupnogabaritnym kosmicheskim konstruktсиyam NPO "Energiya": sbornik materialov. N. Novgorod, 1993. S. 37–38.
7. *Shiryayev V.P.* Samorazvorachivayushchiesya i svorachivayushchiesya plenochnye konstruktсий // Mezhdunarodnaya konferentsiya po krupnogabaritnym kosmicheskim konstruktсиyam NPO "Energiya": sbornik materialov. N. Novgorod, 1993. S. 12–13.

DOI: 10.25586/RNUV9187.19.01.P.061

УДК 519.8

### Э.А. Меликов

#### КОНЦЕПЦИЯ РАЗРАБОТКИ ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

В качестве объекта моделирования рассматривается установка каталитического риформинга. Сложность функционирования этой установки определяется многоступенчатыми реакционными процессами, происходящими в реакторном блоке. Невозможность учета некоторых важных качественных и режимных параметров реакторного блока затрудняет моделирование и управление данным процессом. Степень неопределенности, которая возникает при принятии решения в процессе управления риформингом, приводит к необходимости разработки его логико-лингвистической модели и алгоритма управления. Применение разработанной размытой модели и алгоритма оптимизации рассматриваемого технологического процесса обеспечивает оптимальные технологические режимы установки риформинга.

*Ключевые слова:* каталитический риформинг, логико-лингвистическая модель, реакторный блок, алгоритм оптимизации, функция принадлежности, технологический процесс.