

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ ПРЕЦИЗИОННЫМИ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ

В. Б. Тайгин¹ ✉, А. В. Лопатин^{2,3}

¹ АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

³ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация

Представлен обзор конструкций зеркальных антенн космических аппаратов с твердотельными прецизионными размеростабильными рефлекторами. Изложена история эволюции технологии производства антенн для космических аппаратов. Сформулированы требования, предъявляемые к современным зеркальным антеннам космических аппаратов, предназначенными для передачи высокочастотных радиосигналов. Рассмотрены особенности использования композиционных материалов при изготовлении рефлекторов антенн в контексте их отражающих способностей. Приведена классификация зеркальных антенн. Изложены особенности размещения антенн на космическом аппарате. Рассмотрены различные конструкции рефлекторов современных антенн. Проанализированы различные способы обеспечения точности формы и жесткости рефлекторов. Представлены различные варианты усиливающей конструкции, размещаемой на тыльной стороне рефлектора, такие как композитные рамы, ребра жесткости из сотовых панелей, изогридное подкрепление и другие варианты. Описан способ регулировки оболочки рефлектора для получения формы, близкой к идеальному параболоиду. Описаны антенны с контурной зоной обслуживания и диффракционные антенны. Рассмотрены антенные сборки, размещаемые на космических аппаратах, и их преимущества. Подставлен обзор инженерных анализов, проводимых на этапе проектирования антенн. Рассмотрены типы испытаний, с помощью которых проверяется работоспособность антенн космических аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат, зеркальная антенна, офсетная антенна, осесимметричная антенна, композиционный материал, инженерный анализ, наземная экспериментальная обработка.

Введение

Зеркальные рефлекторные антенны широко применяются в различных космических телекоммуникационных системах. Основные преимущества рефлекторных антенн обусловлены высоким коэффициентом усиления, широкой полосой пропускания частот, наряду с простой и надежной конструкцией и относительно невысокой стоимостью [1].

По оптической схеме исполнения различают офсетные и осесимметричные зеркальные ан-

тенны. Эти антенны могут быть однозеркальными или двухзеркальными. В качестве главного отражателя наиболее часто применяется параболоид вращения. Помимо параболоида в этих антеннах используются модифицированные формы, позволяющие получать контурные диаграммы направленности антенны.

Применение антенны в составе полезной нагрузки космического аппарата накладывает на нее определенные требования. Основным из них является требование к точности формы поверхности рефлектора. Отклонения от теоретической формы рефлектора влечет за собой снижение коэффициента усиления сигнала. Для высокоэффективной антенны космического аппарата допустимое сни-

✉ taygin@iss-reshetnev.ru

жение этого коэффициента не должно превышать 0,15 дБ (потери в уровне сигнала не более 3,5 %). Для обеспечения такой малой величины потерь среднеквадратическое отклонение от теоретической формы рефлектора не должно превышать $0,015\lambda$, где λ – длина волны [22]. Поскольку для космических систем телекоммуникаций имеется устойчивая тенденция повышения частотного диапазона, то требования по среднеквадратическому отклонению от теоретической формы отражающей поверхности постоянно ужесточаются. Так для рабочей частоты антенны 40 Гц это значение не должно превышать 0,1 мм.

Еще одним требованием, предъявляемым к антенне, является ее малый вес и габариты. Это требование продиктовано высокой стоимостью вывода массы на орбиту и ограниченным объемом пространства под обтекателем ракеты-носителя. Значение удельной массы для современного рефлектора должно быть меньше, чем $2,2 \text{ кг/м}^2$.

Следующее требование связано с сохранением формы рефлектора в процессе эксплуатации космического аппарата на орбите. Главным негативным фактором является постоянное изменение теплового потока при движении аппарата, вызывающее изменения температуры в конструкции рефлектора.

Важным требованием является способность материала рефлектора обеспечивать коэффициент отражения радиоволн не менее 0,98. С уменьшением значения этого коэффициента потери от поглощения энергии будут возрастать, а эффективность антенны ухудшаться.

В настоящее время многие мировые производители космической техники, такие как: TAS (Франция), AASC (США), HPS GmbH (Германия), INVENT GmbH (Германия), АО «ИСС» (Россия) работают над совершенствованием конструкций зеркальных антенн. В силу этого большой интерес представляет исследование тенденций развития твердотельных космических антенн.

В статье выполнен обзор конструкций современных твердотельных прецизионных размеростабильных рефлекторов антенн космических аппаратов. Проведен анализ достоинств и недостатков существующих конструкций, методов их анализа и испытаний. Предложены пути совершенствования конструкции твердотельных рефлекторов.

1. Материалы зеркальных антенн космических аппаратов

Первые космические аппараты связи, запущенные в 1960-х, 1970-х годах, такие, например, как Echo 1, Telstar, Syncom III, Early Bird были оснащены простыми антеннами типа «штырь» и работали в низкочастотных диапазонах. В конце 1970-х и 1980-х годах произошли значительные изменения

в антеннах спутниковой связи. Началось освоение высокочастотных диапазонов излучения радиоволн, таких как С- и Ku-диапазонов. Космические аппараты стали оснащать зеркальными антеннами, как наиболее эффективными конструкциями для передачи сигнала в заданном направлении [20].

Первые космические зеркальные антенны изготавливались из металлических сплавов, чаще всего алюминиевых. На рис. 1 представлены примеры таких антенн, произведенных в АО «ИСС». Рефлекторы этих антенн изготавливались холодной штамповкой из листового металла с последующим усилением оболочки ребрами жесткости. Ребра, как правило, соединялись с оболочкой при помощи заклепок.



Рис. 1. Металлические зеркальные антенны космических аппаратов

Космические аппараты в прошлом имели герметичное исполнение, при котором активные приборы размещались в гермоконтейнере. Антенны, используемые на таких космических аппаратах, располагались на ферме, закрепленной на гермоконтейнере. В этом же контейнере устанавливались волноводы и пассивные приборы фидерного тракта (рис. 2).



Рис. 2. Антенны на космическом аппарате герметичного исполнения

Металлические рефлекторы имели невысокие показатели точности отражающей поверхности и размерной стабильности при тепловом воздействии. Но ввиду невысоких (по современным меркам) требований они были вполне приемлемы для своего времени и полностью выполняли поставленную задачу.

Появление композиционных материалов позволило значительно улучшить характеристики рефлекторов антенн космических аппаратов. Использование композиционных материалов привело к значительному снижению массы рефлекторов, дало возможность сделать их более точными и размеростабильными. Это позволило освоить высокие частотные диапазоны излучения радиосигналов. Впервые композитный рефлектор антенны диаметром 3,7 м был установлена на космическом аппарате Voyager, исследующим дальний космос [21]. Рефлектор этого космического аппарата показан на рис. 3.



Рис. 3. Композитный рефлектор антенны космического аппарата Voyager

Наиболее часто для изготовления рефлекторов космических антенн используются углепластики. Такое использование обусловлено высокими механическими характеристиками и низким коэффициентом линейного температурного расширения углепластика.

Антенные рефлекторы космических аппаратов должны эффективно отражать радиосигнал. Способностью отражать радиоволны обладают материалы с высокой электропроводностью. Углеродное волокно проводит электрический ток, однако обладает малой электропроводностью. Углепластик является анизотропным материалом по электропроводным свойствам. В работах [3; 4] выполнены исследования радиоотражающих свойств различных углепластиков.

Все чаще для изготовления рефлектора применяется триаксиальная углеродная ткань (рис. 4). Благодаря своим армирующим свойствам ее возможно укладывать в один слой и, тем самым, снижать массу рефлектора. В работах [5; 6] проведено компьютерное моделирование динамики

высокочастотного электромагнитного поля в элементарной ячейке триаксиальной ткани (рис. 5). Определены оптимальные геометрические параметры ячейки для получения максимального коэффициента отражения на различных частотах.

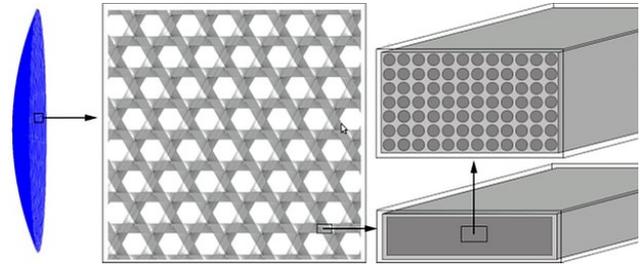


Рис. 4. Триаксиальная ткань

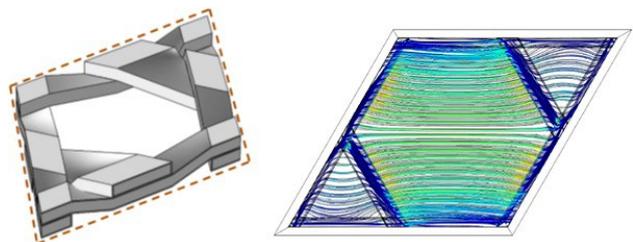


Рис. 5. Элементарная ячейка триаксиальной ткани и ее электродинамическая модель

Углепластик в исходном состоянии имеет приемлемый коэффициент отражения на частотах до 15 ГГц. Для использования его в более высокочастотных антеннах применяют радиоотражающие покрытия. В работе [6] описана технология нанесения радиоотражающего покрытия, обеспечивающего коэффициент отражения не менее 0,98 на частоте 24 ГГц. Данное покрытие наносится методом вакуумного напыления и состоит из трех тонких пленок: никрома (Ni-Cr) в качестве подслоя, отражающего алюминиевого (Al) слоя и оксида кремния (SiO₂) для защиты от коррозии.

2. Классификация зеркальных антенн космических аппаратов

По оптической схеме различают осесимметричные, офсетные и двухзеркальные антенны (рис. 6).

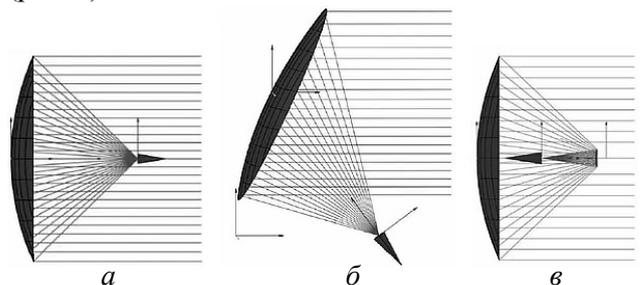


Рис. 6. Классификация зеркальных антенн: (а) осесимметричная антенна, (б) офсетная антенна, (в) двухзеркальная антенна

Осесимметричные антенны могут быть одно или двухзеркальными. Однозеркальные антенны, как правило, имеют простой легкий облучатель с одним питающим волноводом или кабелем. На современных космических аппаратах осесимметричные антенны чаще всего имеют двухзеркальное исполнение. Такая компоновка антенны позволяет использовать сложные многопортовые облучатели.

Осесимметричные зеркальные антенны состоят из рефлектора, облучателя и вторичного зеркала – контррефлектора. Эти антенны могут быть установлены на приводе системы наведения. Перенацеливание таких антенн возможно в неограниченном диапазоне углов. Недостатком осесимметричных зеркальных антенн является наличие препятствия на пути прохождения радиоволн. Это препятствие создается облучателем или вторичным зеркалом и системой их крепления.

Офсетные антенны часто размещают на телекоммуникационных космических аппаратах. Они могут иметь однозеркальное или двухзеркальное исполнение по схеме Грегори. Преимущество офсетных антенн состоит в отсутствии препятствия в прохождении радиосигнала элементами собственной конструкции. По способу компоновки офсетные антенны могут иметь собственную объединяющую конструкцию – корпус антенны, или использовать для этого корпус космического аппарата. Антенны, смонтированные на корпусе, иногда называют антеннами со сложным механическим интерфейсом. Их, как правило, размещают на боковых панелях корпуса космического аппарата. При этом облучатель антенны закрепляется неподвижно, а рефлектор устанавливается на приводе раскрытия и наведения. Вариант компоновки офсетных антенн на телекоммуникационном космическом аппарате приведен на рис. 7.

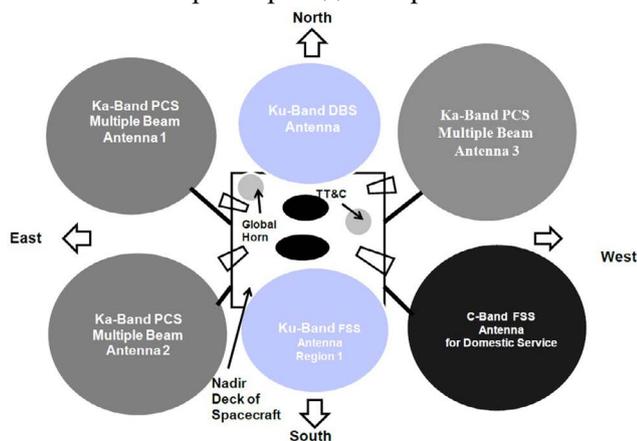


Рис. 7. Размещение офсетных антенн на космическом аппарате

Офсетные антенны имеют небольшие углы перенацеливания. Это связано с тем, что рефлектор вращается независимо от облучателя и при

больших углах поворота происходит расфокусирование антенны. На рис. 8 показан вариант размещения двух офсетных антенн на боковой панели космического аппарата «Благовест» (АО «ИСС»).

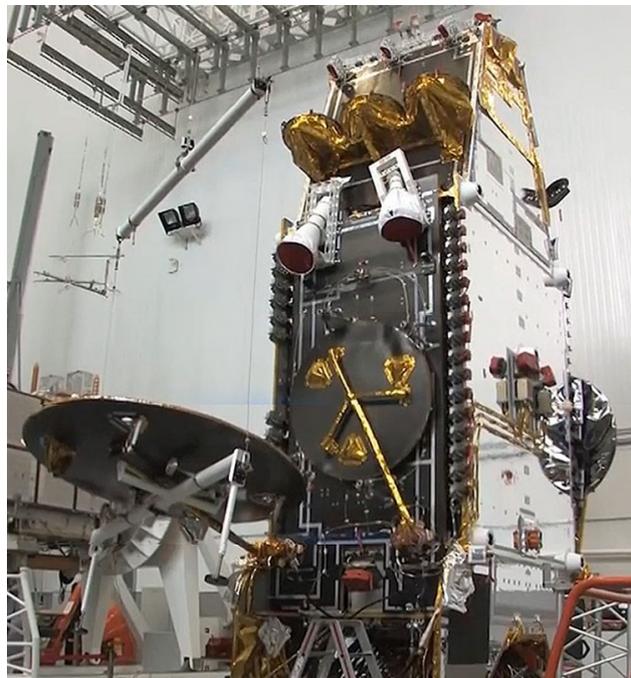


Рис. 8. Размещение офсетных антенн на боковой панели космического аппарата

На этапе выведения этого космического аппарата на орбиту рефлекторы фиксируются в транспортировочном положении замками зачекочки. После вывода аппарата на орбиту они переводятся в рабочее положение с помощью штанги привода.

3. Варианты конструктивного исполнения рефлекторов офсетных антенн

Распространенной конструкцией офсетного рефлектора является трехслойная оболочка, состоящая из тонких углепластиковых обшивок заполнителя в виде алюминиевых сот. На рис. 9 представлен пример такого рефлектора производства Thales Alenia Space (TAS)



Рис. 9. Трехслойный сотовый рефлектор производства TAS со штангой

Жесткость и, как следствие, точность рефлектора обеспечиваются толщиной заполнителя

и упругими параметрами материала обшивок. Штанга, закрепленная с тыльной стороны рефлектора, соединяет его с приводом раскрытия. Отличительной особенностью этого рефлектора является то, что многие металлические элементы спроектированы с помощью топологической оптимизации и изготовлены с применением аддитивных технологий. Топологическая оптимизация позволяет эффективно распределять материал в заданном объеме для достижения требуемых прочностных характеристик деталей рефлектора. Это дает возможность снизить массу деталей при сохранении достаточной прочности [8].

На рис. 10 представлен новый рефлектор TAS диаметром 2,6 м.

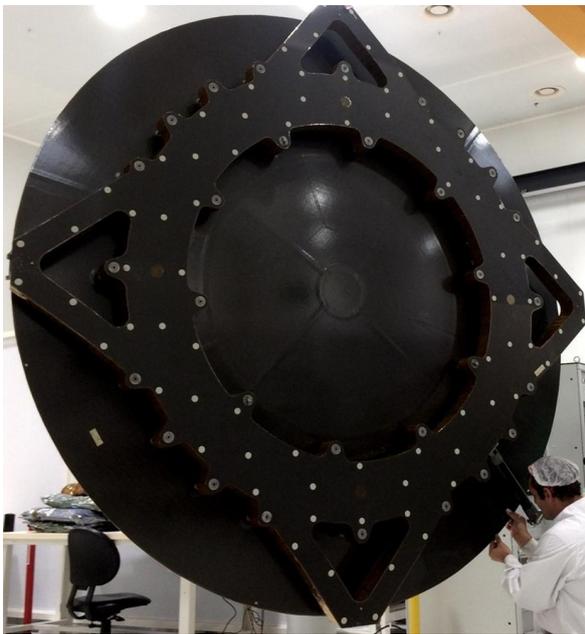


Рис. 10. Трехслойный сотовый рефлектор производства TAS с подкрепляющей силовой конструкцией

В качестве силовой опоры используется композитная трехслойная панель. Панель содержит металлические вставки для крепления к оболочке рефлектора. Такое решение позволяет разгрузить оболочку и дает возможность сделать ее более тонкой. Подкрепляющая силовая конструкция обеспечивает также коррекцию формы рефлектора. Для крепления к приводу раскрытия имеется небольшая штанга, которая крепится к панели. Узлы для зачековки организованы на самой панели в виде треугольных выступов. Рефлектор обладает высокой геометрической стабильностью. Это позволяет использовать его в Ku, Ka частотных диапазонах. Конструкция рефлектора будет использована как стандартная в космических платформах Spacebus NEO [9].

Аналогичное конструктивное решение использует в своих рефлекторах фирма Agiane Group (рис. 11). В работе [10] отмечается, что такое ис-

полнение позволяет снизить на 40 % стоимость и время изготовления рефлектора.



Рис. 11. Трехслойный сотовый рефлектор производства Agiane Group

Многие производители космической техники используют в качестве опорной конструкции рефлектора раму из полых композитных труб прямоугольного сечения. Пример такой конструкции показан на рис. 12.

Достоинством такой опорной конструкции является ее большая жесткость. Однако такие рамы имеют множество фитингов различной конфигурации, для формования которых требуется дополнительная оснастка. Это приводит к увеличению стоимости изготовления рефлектора. Для сокращения сроков изготовления и производственных затрат в работе [11] предложено использовать конструкции, создаваемые на основе модульной архитектуры и стандартных деталей.



Рис. 12. Рефлектор с композитной рамой

Еще одним распространенным вариантом усиления оболочки рефлектора является закрепление на тыльной стороне ребер жесткости в виде сотовых панелей (рис. 13). Конструкция этого рефлектора, как отмечается в работе [12], имеет хорошие показатели по удельной массе и стоимости изготовления.

Для уменьшения температурных деформаций трехслойных рефлекторов используют углепластиковые соты [23]. Коэффициент линейного

термического расширения материала заполнителя совместим с аналогичным коэффициентом углеродного пластика обшивок. В силу этого конструкция рефлектора менее подвержена температурным деформациям. Такое решение также позволяет снижать массу рефлектора вследствие меньшей удельной массы сотового заполнителя. На рис. 14 представлен рефлектор фирмы INVENT GmbH, в котором оболочка рефлектора и ребра имеют композитный сотовый наполнитель.



Рис. 13. Рефлектор с ребрами из сотовых панелей

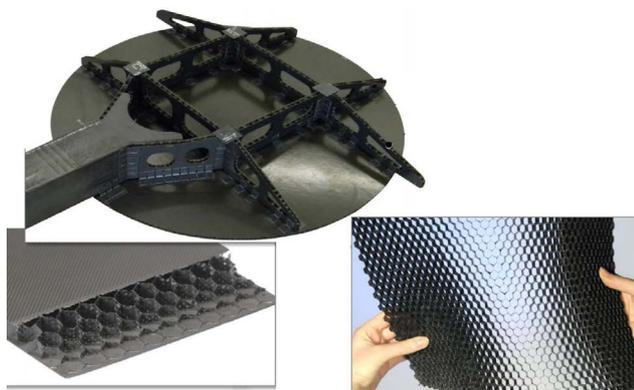


Рис. 14. Рефлектор с композитным сотовым наполнителем

На рис. 15 представлены варианты ребрения тыльной стороны рефлекторов производства EADS CASA Espacio [25]. Ребра подкрепления образуют прямоугольную сетку. Края ребер выступают за габариты рефлектора. В них расположены узлы зачековки.



Рис. 15. Рефлектор производства EADS CASA Espacio

4. Контурные антенны

Контурные антенны широко применяются в ретрансляторах современных космических аппаратов. Они позволяют эффективно распределять радиосигнал над территорией с наибольшим количеством потребителей и не расходовать полезную мощность на незаселенные участки Земли. Основой таких антенн является офсетная схема. Форма рефлектора синтезируется по заданной зоне обслуживания в специальной программе. На рис. 16 представлены различные рефлекторы антенн с контурной зоной обслуживания [1].

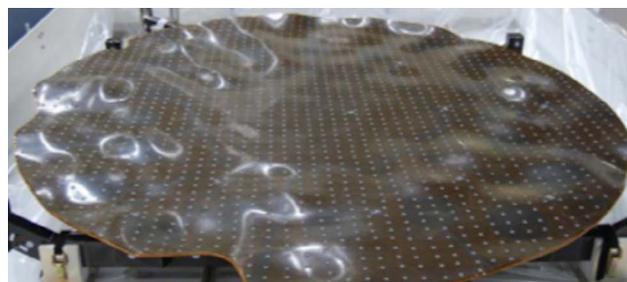


Рис. 16. Рефлекторы антенн с контурной зоной обслуживания

5. Рефлекторы с дихроичной структурой

Для компактного размещения рефлекторов на космических аппаратах и получения двух независимых диаграмм направленности были разработаны дихроичные рефлекторы [22]. Схема и внешний вид такой антенны представлен на рис. 17.

Особенность этой конструкции заключается в размещении рефлектора из диэлектрического материала с нанесенным на него рисунком в виде параллельных линий-проводников над другим рефлектором из углеродного пластика. В такой антенне устанавливают два независимых облучателя с линейными поляризациями. При этом поляризации должны быть ортогональны друг к другу. Один

сигнал будет беспрепятственно проходить сквозь верхний рефлектор и отражаться от нижнего, а второй сигнал будет отражаться сразу от верхнего рефлектора. Таким образом, две независимых антенны занимают пространство, как занимала бы одна антенна. Однако у такой схемы имеется ряд недостатков, в связи с которыми она не получила широкого распространения. К этим недостаткам относятся большие потери сигнала в диэлектрике, работа каждой из антенн только с одной линейной поляризацией, невозможность использовать круговую поляризацию и узкая полоса частот работы антенны.



Рис. 17. Рефлектор с дихроичной структурой

6. Антенные сборки

Для сокращения пространства, занимаемого антеннами на корпусе космического аппарата, их объединяют в так называемые антенные блоки. На рис. 18 изображен антенный блок, расположенный на корпусе космического аппарата «Ямал-300К» производства АО «ИСС».

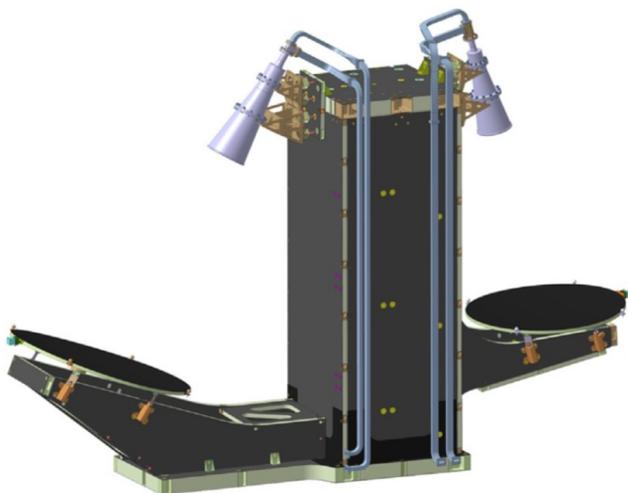


Рис. 18. Антенный блок космического аппарата «Ямал-300К»

На рис. 19 представлен блок антенн производства AASC [16]. Антенны имеют двухзеркальное исполнение и являются многолучевыми.



Рис. 19. Блок двухзеркальных антенн

Сборка их трех офсетных антенн [24], размещенных на общем основании, показана на рис. 20.



Рис. 20. Антенны на общем основании

На рис. 21 представлена конструкция и схема многолучевой двухзеркальной офсетной антенны производства HPS GmbH [13]. Главное и вторичное зеркало имеет трехслойную сотовую конструкцию. Главное зеркало зафиксировано на основании антенны при помощи цилиндрической композитной оболочки. Вторичное зеркало смонтировано на ферме из композитных труб. Облучатель состоит из нескольких рупорных излучателей и закреплен на основании антенны.

Компактный вариант размещения антенн в виде единой сборки описан в работе [77]. Сборка антенн и опорная конструкция для нее представлены на рис. 22. Здесь в качестве опорной конструкции используется стержневая ферма с промежуточными сотовыми панелями. Особенность данной сборки заключается в том, что рефлекторы антенн установлены на механизмы наведения с линейными приводами. На верхнем ярусе опорной конструкции установлены датчики ориентации космического аппарата. Такое решение позволяет существенно повысить точность наведения антенн в заданную зону обслуживания.

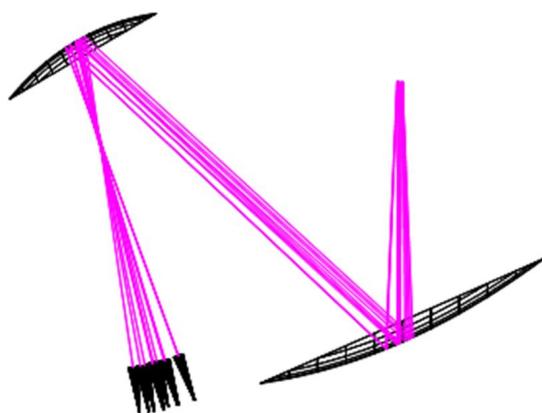


Рис. 21. Многолучевая офсетная антенна

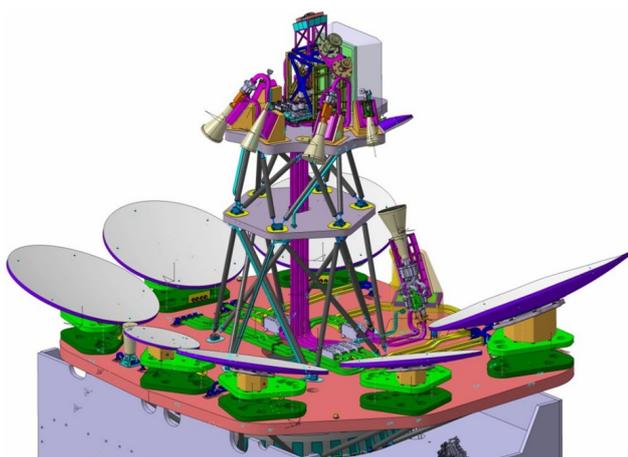


Рис. 22. Антенный модуль TAS-I

7. Осесимметричные антенны

Осесимметричная антенна производства INVENT GmbH [23] представлена на рис. 23. Рефлектор этой антенны имеет трехслойную сотовую конструкцию с композитными обшивками и наполнителем из алюминиевых сот. Такая кон-

струкция широко используется для осесимметричных антенн небольшого диаметра. При увеличении диаметра апертуры более 1 метра в процессе формования разнородных материалов в конструкции возникает напряженное состояние, приводящее к деформации рефлектора после снятия его с оправки (рис. 24) [15].

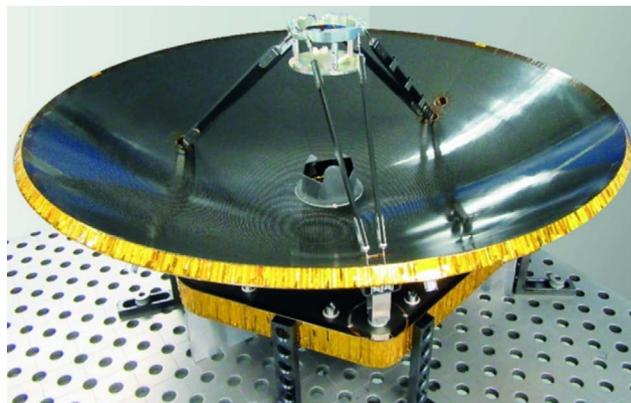


Рис. 23. Осесимметричная зеркальная антенна

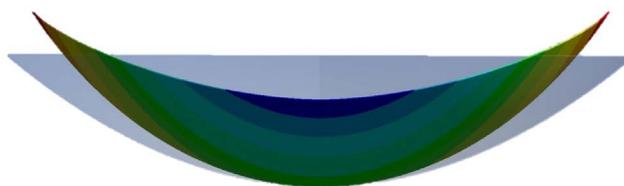


Рис. 24. Искаженная форма рефлектора после формования

Одним из способов уменьшения деформации рефлектора состоит в усилении его оболочки жестким ободом. Этот обод располагается у апертуры рефлектора. На рис. 25 представлена антенна производства фирмы AASC [16].



Рис. 25. Антенна с апертурным ободом

Рефлектор этой антенны усилен ободом, расположенным с тыльной стороны оболочки у ее

внешней кромки. Обод обеспечивает стабильность формы и повышает общую жесткость рефлектора.

В работе [15] описан способ регулировки формы поверхности рефлектора осесимметричной антенны. Такой способ позволяет устранить погрешности, возникающие при изготовлении рефлектора. На рис. 26 представлена антенна производства АО «ИСС», рефлектор которой содержит апертурный обод с системой регулировки.

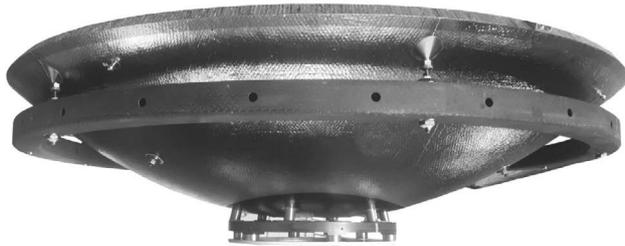


Рис. 26. Антенна с апертурным ободом и системой регулировки

Обод представляет собой полукольцевую оболочку прямоугольного сечения из углепластика. Обод соединен с тыльной оболочкой трехслойного рефлектора при помощи восьми регулировочных узлов.

При помощи системы регулировки возможно получить очень малые отклонения формы рефлектора. Среднеквадратическое отклонение формы этого рефлектора от теоретического профиля составляет 0,045 мм. Рефлектор с такими малыми отклонениями работоспособен до частоты 100 Гц.

Еще одним примером высокоточного рефлектора является конструкция, состоящая из двух тонких композитных оболочек [17]. Антенна с таким рефлектором, изготовленная в АО «ИСС», представлена на рис. 27.



Рис. 27. Антенна, состоящая из двух тонких композитных оболочек

Рефлектор этой антенны обладает высокой точностью отражающей поверхности и небольшой массой. Удельная масса представленного рефлектора составляет 0,8 кг/м². Это позволяет отнести его к классу ультралегких рефлекторов. Аналогичная антенна, изготовленная фирмой AASC [16], представлена на рис. 28.



Рис. 28. Антенна производства фирмы AASC

В работах [18; 19] предложен осесимметричный рефлектор с изогридным подкреплением. Один из вариантов такого рефлектора производства МГТУ им. Н. Э. Баумана представлен на рис. 29.



Рис. 29. Рефлектор с изогридным подкреплением

Использование подкрепления в этой конструкции позволило уменьшить погонную массу по сравнению с погонной массой трехслойных конструкций и уменьшить ее температурные деформации.

8. Инженерные анализы антенн космических аппаратов

На этапе проектирования антенн проводят различные инженерные анализы, по результатам которых дают заключение о возможности установки конструкции на космический аппарат.

Тепловой анализ проводят с целью определения температурных полей в антенне для наилучших условий эксплуатации космического аппарата на орбите. Данные, полученные в ходе этого анализа, используются для определения температурных деформаций и для проверки теплостойкости материалов.

Анализ стойкости антенны к воздействию ионизирующих излучений космического пространства проводят для оценки радиационной стойкости материалов в течение срока активного существования космического аппарата. При необходимости материалы подвергают испытаниям на радиационную стойкость.

Механический анализ антенны включает формирование конечно-элементной модели антенны с учетом упругих свойств материалов, определение собственных частот и форм колебаний, расчет прочности антенны от действия квазистатических нагрузок, вибрационных и акустических нагрузок.

На рис. 30 показан пример первой формы колебаний рефлектора в транспортировочном положении. Отметим, что частота первого тона колебаний конструкции рефлектора должна быть не ниже 45 Гц в транспортировочном положении и не ниже 1,5 Гц в рабочем положении антенны.

Механическому анализу предшествует назначение требований в виде случаев нагружения, граничных условий, допустимых деформации и т. д. Эти требования определяются исходя из условий расположения антенны на космическом аппарате, частотного диапазона антенны, условий выведения и особенностей орбиты.

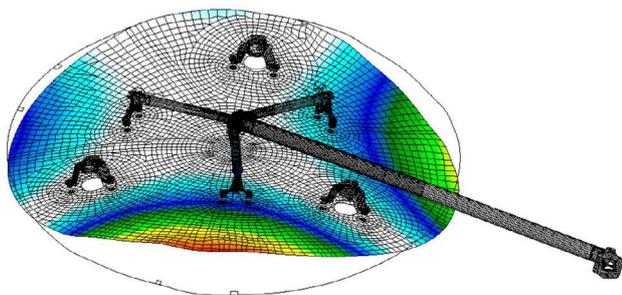


Рис. 30. Первая форма колебаний рефлектора в транспортировочном положении

9. Испытания антенн

Для проверки правильности заложенных решений в конструкцию антенны, а также верификации инженерных анализов проводят цикл наземной экспериментальной отработки антенн.

Радиотехнические испытания антенны проводят для подтверждения соответствия радиотехнических характеристик антенн требованиям технического задания.

Вибрационные испытания подтверждают способность антенны выдерживать синусоидаль-

ную и случайную вибрацию. Для проведения данного теста используют различные вибростенды (рис. 31).



Рис. 31. Антенна на вертикальном вибростенде

Акустические испытания проводят для определения стойкости антенны к акустическим нагрузкам на этапе выведения космического аппарата на орбиту. Этот вид испытания проводят в акустической камере.

Термоциклические испытания выявляют возможные дефекты при изготовлении антенны, а также способность ее выдерживать перепады температур космоса. Для испытаний используют термобарокамеру.

Испытания на температурные деформации проводят в термобарокамере с установленным внутри лазерным дальномером, который регистрирует перемещения в конструкции.

Заключение

В статье выполнен анализ конструкторских решений зеркальных антенн космических аппаратов с твердотельными прецизионными размеростабильными рефлекторами. Рассмотрены требования, накладываемые на передающие высокочастотные радиосигналы зеркальные антенны. Показано, что применение композиционных материалов в конструкциях твердотельных рефлекторов должно осуществляться с учетом их отражающих способностей. Изложены особенности размещения антенн на космических аппаратах. Проанализированы способы обеспечения точности рабочей поверхности рефлекторов и жесткости их конструкций. Описаны антенны с контурной зоной обслуживания и диффракционные антенны. Рассмотрены конструкции антенных сборок, размещаемых на современных космических аппаратах. Представлены виды инженерных анализов, выполняемых при проектировании ан-

тени. Рассмотрены типы испытаний, с помощью которых проверяется работоспособность антенн космических аппаратов. Представленный обзор позволяет отследить тенденции инженерных ре-

шений, с помощью которых в настоящее время осуществляется проектирование и изготовление антенн с твердотельными прецизионными размеростабильными рефлекторами.

Список литературы

- [1] Satish K. Sh., Sudhakar R., Lotfollah Sh. Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems. Theory and Design of Reflectors. 2013. vol. 1. 350 p.
- [2] Покрас А. М., Сомов А. М., Цуриков Г. Г. Антенны земных станций спутниковой связи. М. : Радио и связь, 1985. 288 с.
- [3] Galehdar A., Nicholson K., Rowe W., Ghorbani K. The conductivity of unidirectional and quasi isotropic carbon fiber composites // Microwave Conference (EuMC), European. 2010. pp. 882–885.
- [4] Artner G., Gentner Ph. K., Nicolics J., Mecklenbrauker Ch. F. Carbon Fiber Reinforced Polymer with Shredded Fibers: Quasi-Isotropic Material Properties and Antenna Performance // International Journal of Antennas and Propagation. 2017. vol. 2017. Article ID 6152651. 11 p. doi: 10.1155/2017/6152651.
- [5] Pontoppidan K., Viskum H.-H. Electrical properties of triaxially woven fabrics for reflector antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2003. vol. 2. pp. 774–777. doi: 10.1109/APS.2003.1219350.
- [6] Sedhed E. Electromagnetic Analysis of Reflector Antenna Surfaces // Master's Thesis. Department of Electrical and Information Technology Faculty of Engineering, LTH, Lund University. Lund, Sweden. 2015.
- [7] Михеев А. Е., Гирн А. В., Харламов В. А., Чернятина А. А., Хоменко И. И. Разработка технологии нанесения радиоотражающих покрытий // Вестник СибГАУ. 2013. no. 4 (50). С. 222–226.
- [8] 3D Systems – Direct Metal Printing at the Tipping Point? [Электронный ресурс]. URL: additivemanufacturing.com/2016/08/29/3d-systems-direct-metal-printing-at-the-tipping-point/ (дата обращения 07.02.2021).
- [9] New Thales Alenia Space antenna reflector is qualified [Электронный ресурс]. URL: www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/new-thales-alenia-space-antenna-reflector-qualified (дата обращения 07.02.2021).
- [10] ArianeGroup applying launch cost reduction targets to satellite components [Электронный ресурс]. URL: spacenews.com/arianegroup-applying-launch-cost-reduction-targets-to-satellite-components/ (дата обращения 07.02.2021).
- [11] Ultra-Light Reflector for Ka-band Applications [Электронный ресурс]. URL: artes.esa.int/projects/ulrka (дата обращения 07.02.2021).
- [12] Reflector antennas [Электронный ресурс]. URL: www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/ (дата обращения 07.02.2021).
- [13] Q/V band Feeder Link Antenna [Электронный ресурс]. URL: artes.esa.int/projects/flant (дата обращения 07.02.2021).
- [14] Reflektor-antennen [Электронный ресурс]. URL: www.hps-gmbh.com/portfolio/subsystems/antennas/ (дата обращения 07.02.2021).
- [15] 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.
- [16] Spacecraft Antenna Reflectors [Электронный ресурс]. URL: www.aascworld.com/portfolio/antenna-reflectors/ (дата обращения 07.02.2021).
- [17] 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.
- [18] Резник С. В., Просунцов П. В., Новиков А. Д. Перспективы повышения размерной стабильности и весовой эффективности рефлекторов зеркальных космических антенн из композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 1 (694). С. 71–83.
- [19] Resnik S. V., Novikov A. D. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors // MATEC Web of Conferences. 2017. vol. 92. P. 01012. doi: 10.1051/mateconf/20179201012.
- [20] Sudhakar R. Advanced Antenna Technologies for Satellite Communications Payloads // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. vol. 63. P. 1. doi: 10.1109/TAP.2015.2391283.
- [21] Images of Voyager [Электронный ресурс]. URL: voyager.jpl.nasa.gov/galleries/images-of-voyager/ (дата обращения 07.02.2021).
- [22] Baunge M., Ekstrom H., Ingvarson P., Petersson M. A new concept for dual gridded reflectors // Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona. 2010. pp. 1–5.
- [23] Invent. Space [Электронный ресурс]. URL: www.invent-gmbh.de/en/raumfahrt/ (дата обращения 07.02.2021).

- [24] Palacin B., Fonseca N. J. G., Romier M., Contreres R., Angevain J.-Ch., Toso G., Mangenot C. Multibeam antennas for very high throughput satellites in Europe: Technologies and trends // 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris. 2017. pp. 2413–2417. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928493.
- [25] Areval F. Ka-band high performance reflectors for broadband services // 32nd ESA Workshop on Antennas for Space Applications. Noordwijk, Netherlands. 2010.

THE REVIEW OF DESIGNS OF MIRROR SPACECRAFT ANTENNAS WITH SOLID HIGH PRECISION SIZE STABLE REFLECTOR

V. B. Taygin¹, A. V. Lopatin^{2,3}

¹ JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies SB RAS,
Krasnoyarsk, Russian Federation

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

The article provides an overview of designs of reflector antennas for spacecraft with solid-state precision dimensionally stable reflectors. The requirements for modern reflector antennas of spacecraft intended for the transmission of high-frequency radio signals are formulated. The features of using composite materials in manufacture of antenna reflectors in the context of their reflective capabilities are considered. The classification of reflector antennas is given. Features of the placement of antennas on a spacecraft are outlined. Multiple designs of reflectors of modern antennas are considered. Various ways of ensuring accuracy of shape and rigidity of reflectors are analyzed. Designs of antennas with a contoured service area and dichroic antennas are described. Antenna assemblies which are placed on a spacecraft and their advantages are considered. An overview of the engineering analyzes carried out during the antenna design phase is provided. The types of tests used to check the performance of spacecraft antennas are considered.

Keywords: spacecraft, reflector antenna, offset antenna, axisymmetric antenna, composite material, engineering analysis, ground-based experimental testing.

References

- [1] Satish K. Sh., Sudhakar R., Lotfollah Sh. Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems. Theory and Design of Reflectors, 2013, vol. 1, 350 p.
- [2] Pokras A. M., Somov A. M., Tsurikov G. G. *Antenny zemnyh stantsiy sputnikovoy svyazi* [Satellite antennas of earth communications]. Moscow, Radio i svyas', 1985, 288 p. (In Russian)
- [3] Galehdar A., Nicholson K., Rowe W., Ghorbani K. The conductivity of unidirectional and quasi isotropic carbon fiber composites // Microwave Conference (EuMC), European, 2010, pp. 882–885.
- [4] Artner G., Gentner Ph. K., Nicolics J., Mecklenbrauker Ch. F. Carbon Fiber Reinforced Polymer with Shredded Fibers: Quasi-Isotropic Material Properties and Antenna Performance // International Journal of Antennas and Propagation, 2017, vol. 2017, Article ID 6152651, 11 p. doi: 10.1155/2017/6152651.
- [5] Pontoppidan K., Viskum H.-H. Electrical properties of triaxially woven fabrics for reflector antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003, vol. 2, pp. 774–777. doi: 10.1109/APS.2003.1219350.
- [6] Sedhed E. Electromagnetic Analysis of Reflector Antenna Surfaces // Master's Thesis, Department of Electrical and Information Technology Faculty of Engineering, LTH, Lund University, Lund, Sweden, 2015.

- [7] Mikheev A. E., Girn A. V., Kharlamov V. A., Chernyatina A. A., Khomenko I. I. *Razrabotka tehnologii naneseniya radiootrazhayushego pokrytiya* [Development of technology for applying radio-reflective coatings] // *Vestnik SibSAU*, 2013, no. 4 (50), pp. 222–226. (In Russian)
- [8] 3D Systems – Direct Metal Printing at the Tipping Point? Available at: additivemanufacturing.com/2016/08/29/3d-systems-direct-metal-printing-at-the-tipping-point/ (accessed 07.02.2021).
- [9] New Thales Alenia Space antenna reflector is qualified. Available at: www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/new-thales-alenia-space-antenna-reflector-qualified (accessed 07.02.2021).
- [10] ArianeGroup applying launch cost reduction targets to satellite components. Available at: spacenews.com/arianegroup-applying-launch-cost-reduction-targets-to-satellite-components/ (accessed 07.02.2021).
- [11] Ultra-Light Reflector for Ka-band Applications. Available at: artes.esa.int/projects/ulrka (accessed 07.02.2021).
- [12] Reflector antennas. Available at: www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/ (accessed 07.02.2021).
- [13] Q/V band Feeder Link Antenna. Available at: artes.esa.int/projects/flant (accessed 07.02.2021).
- [14] Reflektor-antennen. Available at: www.hps-gmbh.com/portfolio/subsystems/antennas/ (accessed 07.02.2021).
- [15] Taygin V. B., Lopatin A. V. *Metod obespecheniya vysokoy tochnosti reflectorov zerkalnykh antenn kosmicheskikh apparatov* [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)
- [16] Spacecraft Antenna Reflectors. Available at: www.aascworld.com/portfolio/antenna-reflectors/ (accessed 07.02.2021).
- [17] Taygin V. B., Lopatin A. V. *Razrabotka zerkalnoy anteny kosmicheskogo apparata s ultrolegkim vysokotochnym razmerostabilnym reflectorom* [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)
- [18] Resnik S. V., Prosunov P. V., Novikov A. D. *Perspektivy povisheniya razmernoy stabilnosti i vesovoy effektivnosti reflectorov zerkalnykh kosmicheskikh antenn iz kompozitsionnykh materialov* [Prospects for increasing the dimensional stability and weight efficiency of reflectors of mirror space antennas made of composite materials]. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2018, no. 1 (694), pp. 71–83. (In Russian)
- [19] Resnik S. V., Novikov A. D. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors // *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 92, P. 01012. doi: 10.1051/mateconf/20179201012.
- [20] Sudhakar R. Advanced Antenna Technologies for Satellite Communications Payloads // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, P. 1. doi: 10.1109/TAP.2015.2391283.
- [21] Images of Voyager. Available at: voyager.jpl.nasa.gov/galleries/images-of-voyager/ (accessed 07.02.2021).
- [22] Baunge M., Ekstrom H., Ingvarson P., Petersson M. A new concept for dual gridded reflectors // *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, 2010*, pp. 1–5.
- [23] Invent. Space. Available at: www.invent-gmbh.de/en/raumfahrt/ (accessed 07.02.2021).
- [24] Palacin B., Fonseca N. J. G., Romier M., Contreres R., Angevain J.-Ch., Toso G., Mangenot C. Multibeam antennas for very high throughput satellites in Europe: Technologies and trends // *11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, 2017*, pp. 2413–2417. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928493.
- [25] Areval F. Ka-band high performance reflectors for broadband services // *32nd ESA Workshop on Antennas for Space Applications, Noordwijk, Netherlands, 2010*.

Сведения об авторах

Лопатин Александр Витальевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий СО РАН, заведующий кафедрой компьютерного моделирования Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Область научных интересов: анизотридные конструкции космического назначения, механика композитных материалов.

ORCID: 0000-0002-7393-8417

Тайгин Виталий Борисович – начальник сектора отдела разработки антенных систем и сборки полезных грузов космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва.