

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.10>

УДК: 621.396.677.81

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗВЕРТЫВАЕМОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С РАЗРЕЖЕННОЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В.В. Головин, Ю.Н. Тыщук

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Статья поступила в редакцию 16 ноября 2022 г.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования характеристик космической параболической зеркальной с разворачиваемым рефлектором антенны. Представлена модель ферменной конструкции рефлектора, образованная двумя несимметричными параболическими сетями с натяжными тросами. Представлены три варианта разреженной структуры отражающей пленки рефлектора, отличающихся периодически повторяющимися гексагональными отверстиями с различными размерами. Проведено комплексное электродинамическое моделирование характеристик излучения параболической зеркальной антенны с разработанной моделью ферменной несущей конструкции и предложенными структурами отражающих пленок, позволяющих уменьшить массу рефлектора и повысить надежность работы антенной системы. Дана оценка частотных зависимостей характеристик вариантов исполнения модели параболической зеркальной антенны. Предложены рекомендации по использованию разреженных отражающих пленок для малых, средних и больших апертур разворачиваемых рефлекторов.

Ключевые слова: зеркальная антенна, ферменная конструкция рефлектора, космическая антенна, разворачиваемый рефлектор.

Автор для переписки: Тыщук Юрий Николаевич, y.tyschuk@gmail.com

Введение

В связи с активным развитием систем спутниковой связи, решающих различные телекоммуникационные задачи, используемые для навигационного, метеорологического обеспечения, для картографирования земной поверхности, исследований в Космосе и т.п., большое значение имеет разработка и внедрение антенных систем с высокой направленностью излучения. Одним из распространенных вариантов являются параболические зеркальные антенны с большими апертурами, выполняемыми на основе разворачиваемых каркасных несущих конструкций. В многочисленных научных публикациях рассмотрены многие аспекты построения таких антенных систем с точки зрения конфигурации несущей ферменной конструкции и структуры полотна рефлектора из различных отражающих материалов, а также с точки зрения формирования ячеек рефлектора на лицевых сегментах ферменных конструкций. При этом рассматриваются как прямофокусные, так и офсетные зеркала параболического и цилиндрически-параболического профиля, и т.п. Краткое изложение ранних разработок можно найти в [1].

Многообразие телекоммуникационных задач, решаемых с применением спутниковых каналов связи, определило широкую загруженность радиочастотного спектра [2]:

- УКВ (136–138 МГц, 144–146 МГц, 148–150 МГц, 240–270 МГц) – для организации мобильной спутниковой связи с низкой скоростью передачи данных, сбора метеоданных, для навигации, для военных систем связи;
- ДМВ (400–403 МГц, 432–438 МГц, 460–470 МГц) – мобильная связь, метеоданные, стандарты времени и частоты и др.;
- L-диапазон (1,2–1,8 ГГц, 1,67–1,71 ГГц) – для GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou, для поисково-спасательных спутников SARSAT/COSPAS, мобильной спутниковой службы;

— S-диапазон (2,025–2,3 ГГц, 2,5–2,67 ГГц) – военно-космическая связь, дистанционное зондирование, фиксированные (двухточечные) спутники связи и вещания.

При разработке для космических аппаратов зеркальных антенн с разворачиваемым рефлектором решается комплекс сложных вопросов, в том числе реализация структуры несущей ферменной конструкции и выбор структуры пленки отражающей поверхности рефлектора. Общим требованием при этом выступает ограниченный объем размещения и масса свернутой конструкции рефлектора, надежность конструкции и долговременность работы в агрессивной среде. Современные средства электродинамического моделирования позволяют дать комплексную оценку характеристик излучения зеркальных антенн с рефлекторами, реализованными на основе ферменных конструкций с различной архитектурой и отражающих поверхностей с различной структурой.

В данной статье представлены результаты исследования зеркальной антенны с рефлектором на основе двух ассиметричных кабельных сетей при покрытии отражающего профиля разреженной пленкой с различными параметрами отверстий, позволяющих облегчить конструкцию рефлектора в целом и снизить уязвимость отражающего слоя от космического мусора.

1. Анализ особенностей конструктивного исполнения разворачиваемых рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов

Сетчатые отражатели широко используются в космических антенных системах с большой апертурой, поскольку они легкие и могут быть компактно и легко упакованы. Их радиочастотная поверхность состоит из фасетной отражающей сетки. Она сформирована из переплетенных электропроводящих тонких проволок, изготовленных из позолоченного молибдена, обычно диаметром 0,03 мм. Эта сетка натянута на кабельную сеть, обычно изготовленную из жестких однонаправленных композитных нитей,

прикрепленных к каркасу. Таким образом, отражающая поверхность состоит только из гибких элементов и может быть легко сложена.

В [3] представлены несколько типов конфигурации кабельных сетей. На рис. 1а показан пример часто используемого «диаматического» рисунка. Он состоит из 6 секторов диска, где каждая граничная сторона разделена на 6 элементов. Другая сеть, образующая осесимметричный параболоид с равномерным натяжением, представлена на рис. 1б. Этот шаблон основан на треугольных гранях, но треугольники определенно не являются равносторонними и идентичными (элементы разной длины, как для геодезического купола). Другие распространенные конфигурации сети представлены на рис. 2.

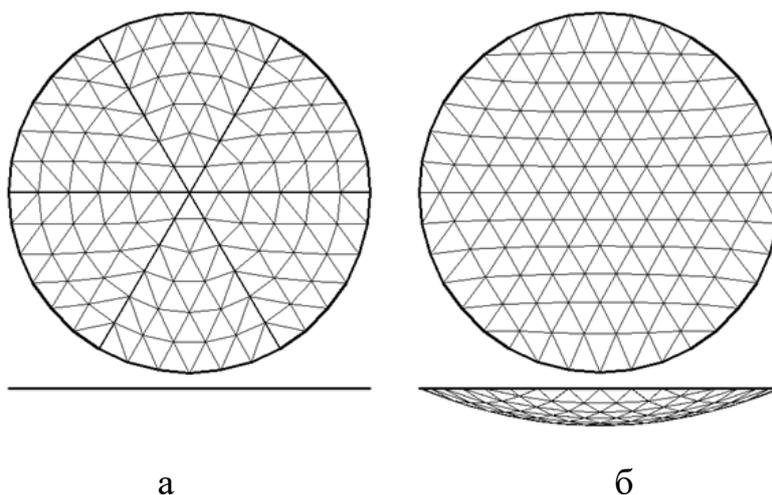


Рис. 1. Диаматическая сетка на осесимметричном параболоиде: а) исходная плоская сетка; б) вычисленная сетка

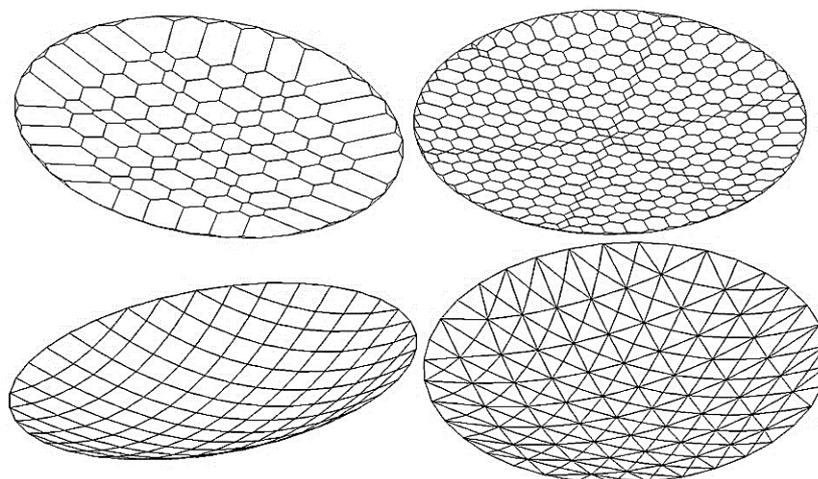


Рис. 2. Различные расчетные конфигурации сети

Можно выделить два основных концептуальных подхода формирования профиля рефлектора. Первый основан на разделении параболической поверхности на сегменты, поддерживаемые радиальными ребрами или радиальными кабелями, прикрепленными к внешнему кольцу (отражатели зонтичного типа). Вторая стратегия предусматривает разделение поверхности на плоские грани, образованные кабельной сеткой и натянутые с помощью внеплоскостных сил, приложенных в каждом узле соединения. Эта концепция натяжной фермы была разработана компанией Miura [4].

Разработано несколько больших развертываемых антенн, использующих концепцию натяжной фермы таких, как космический радиотелескоп Halca или отражатель AstroMesh (рис. 3).

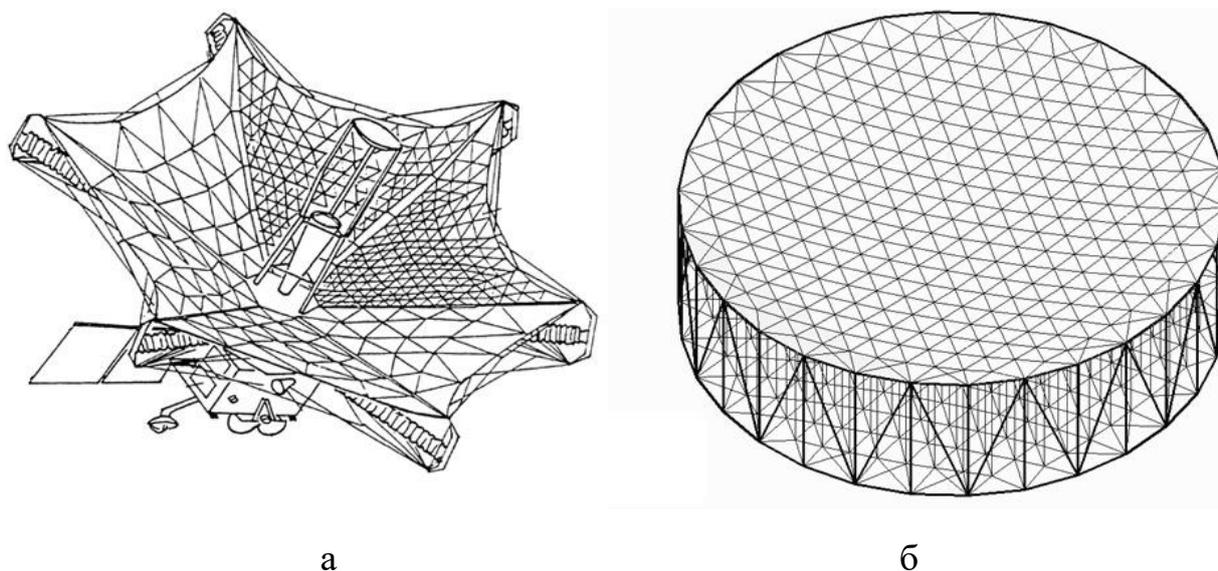


Рис. 3. Антенны с натяжной фермой: а) *Halca*; б) *AstroMesh*

В [5] рассмотрена конструкция ферменного модуля космической системы с отражателем диаметром 12 м и фокусным расстоянием 12 м. Ключевым элементом рамки отражателя является повторяющийся объемный элемент – тетраэдр (рис. 4). При этом соединения тетраэдров выполнены таким образом, что их вершины расположены на лицевой и задней поверхностях, поочередно меняя свое верхнее и нижнее направления. В результате образуется объемная ферменная конструкция, построенная в виде двух поверхностей.

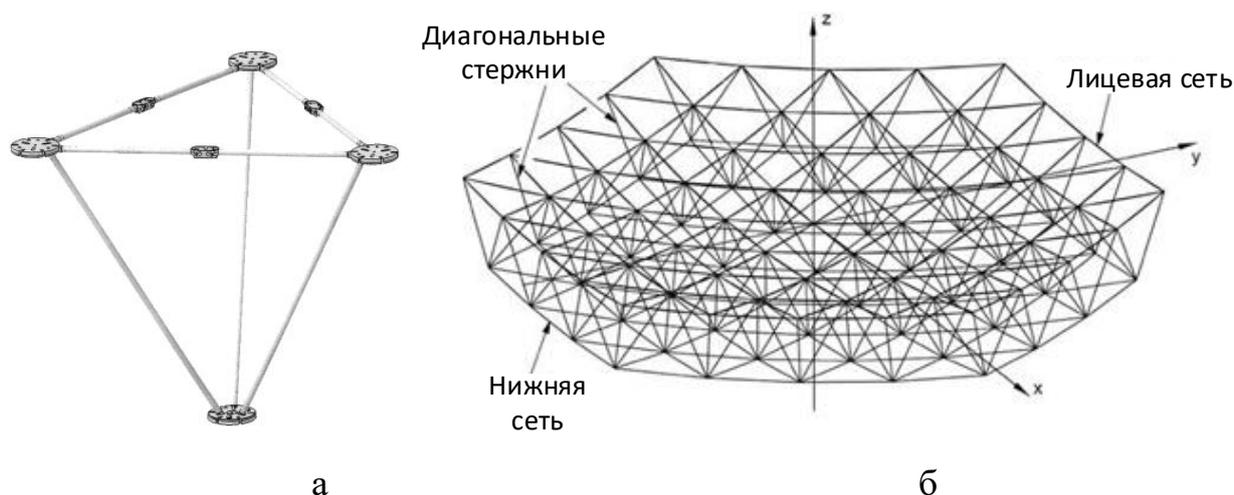


Рис. 4. Структурный модуль (а) и сеть ферменной конструкции (б)

Концепция натяжной фермы может быть основана на двух кабельных сетях: «лицевой» (связанной с отражающей поверхностью), соединенной натяжными стяжками с зеркальной «задней» той же формы (рис. 5). Связи позволяют формировать синкластические формы, обеспечивая равновесие натяжения в обеих сетках [3].

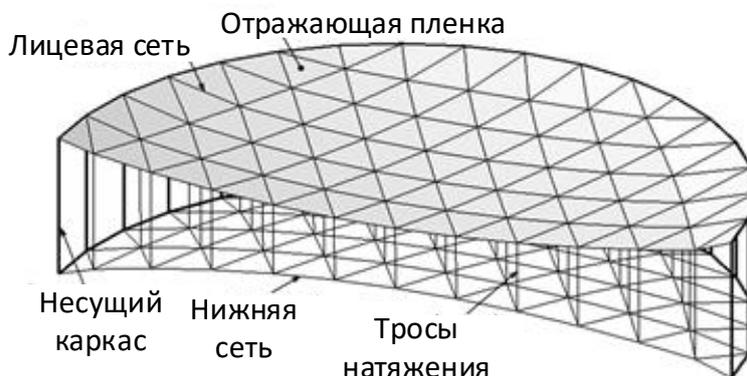


Рис. 5. Передняя и задняя кабельные сети с натяжными тросами

Антенные конструкции с кабельной сеткой, как показано на рис. 5, являются одним из видов гибких натяжных конструкций, характеризующихся сильными геометрическими нелинейностями. Форма конструкций кабельной сетки может быть достигнута путем предварительного напряжения кабелей. Таким образом, конструкция для определения формы, которая направлена на достижение равновесных натяжений в кабелях для удовлетворения требуемой формы отражателя, очень практична для построения антенн-отражателей с кабельной сеткой [6]. Существует два аспекта требований к конструкции

определения формы антенн с кабельной сеткой. С одной стороны, поскольку форма отражателя с кабельной сеткой напрямую определяет электромагнитные характеристики, должны быть выполнены требования к точности поверхности отражателя [7]. С другой стороны, поскольку на орбитальные антенны с кабельной сеткой влияет изменяющаяся во времени тепловая среда, стабильность формы поверхности зависит от равномерности натяжения кабелей. Поэтому в последние годы актуальной темой становится разработка конструкции антенн с кабельной сеткой, которая учитывает как требования к точности поверхности, так и равномерность натяжения кабеля [8]. Чтобы улучшить равномерность натяжения, С. Мортеролле предложил итеративный метод определения формы, основанный на методе плотности силы (*FDM*) [8]. С помощью этого метода натяжение кабелей передней и задней сеток было спроектировано таким образом, чтобы оно было полностью равномерным в предположении, что две кабельные сетки были симметричными, как показано на рис. 6а.



Рис. 6. Симметричная (а) и асимметричная (б) кабельные сети

Полагалось, что кабельная сеть с равномерным распределением натяжения представляет собой конфигурацию минимальной длины, которую обычно называют конфигурацией «геотензоида». Полученная конфигурация кабельной сети в [8] желательна с механической точки зрения, и это наиболее стабильная конфигурация, поскольку она соответствует конфигурации с минимальной потенциальной энергией. Поэтому среди существующих методов определения формы метод проектирования с равномерным натяжением (конфигурация минимальной длины) в [8] является очень желательным, но он применим только в предположении, что передняя и задняя кабельные сетки были симметричными с одинаковой формой, как показано на рис. 6а.

В практической инженерии уложенный объем антенны с кабельной сеткой должен быть небольшим, чтобы приспособиться к ограниченной мощности ракет-носителей. Для уменьшения уложенного объема одним из популярных методов является уменьшение высоты задней кабельной сетки, как показано на рис. 6б.

Для формирования профиля отражающей пленки форм задающая конструкция (SGS) ферменного отражателя состоит из жестких элементов каркаса поверхности (узлов и стержней) и гибкой конструкции, которая находится внутри треугольных граней, аппроксимирующей освещенную поверхность рефлектора. Гнездо из трикотажной сетчатой ткани имеет форму плоского треугольника, аналогичного треугольнику $M_1M_2M_3$ на рис. 7. В [5] рассмотрены три варианта формирования ячейки профиля поверхности: без SGS (рис. 7а), с SGS, выполненными из гибких элементов, сходящихся в одной точке (рис. 7б), и с SGS, выполненными из гибких элементов, совпадающих с медианами фасеток (рис. 7в).

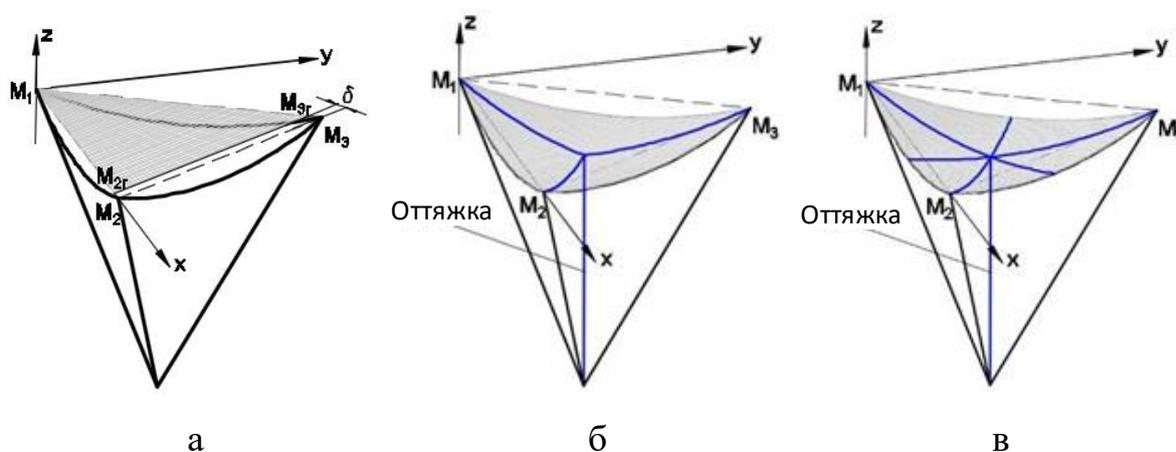


Рис. 7. Базовый профиль ячейки рефлектора (а) и варианты реализации SGS-структур (б, в)

2. Постановка задачи исследования

Параболическая зеркальная антенна разрабатывается на диапазон частот 1,2–2,5 ГГц, в котором спутниковые зеркальные антенны находят широкое применение.

Объектом исследования является зеркало с ферменной конструкцией.

Предметом исследования являются отражающие поверхности, выполненные на основе решетчатых отражающих пленок.

Так как многократное моделирование конструкций параболических зеркал диаметром 5 и более метров затруднительно, то для выявления требуемых закономерностей без ущерба полноте исследований моделирование будет выполнено для параболического зеркала диаметром 0,83 м.

В качестве облучателя рассматривается полуволновый симметричный вибратор, расположенный над дисковым рефлектором на высоте четверти длины волны.

Для каждой расчетной длины волны задается своя длина плеч полуволнового вибратора.

Вопрос разработки рабочей конструкции облучателя является отдельной научно-исследовательской задачей.

Модель облучателя показана на рис. 8а.

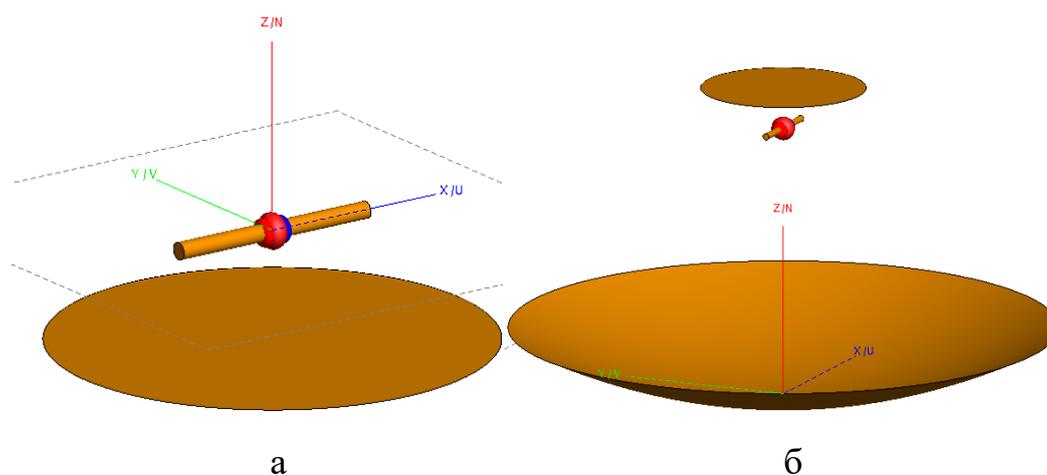


Рис. 8. Полуволновый симметричный вибратор, расположенный над экраном (а), и исходная модель параболического зеркала с облучателем (б)

Для каждой расчетной частоты при моделировании зеркальной антенны выбиралась соответствующая длина плеч полуволнового вибратора.

На рис. 9 показаны диаграммы направленности (ДН) облучателя в E - и H -плоскостях на частоте 1,2 ГГц.

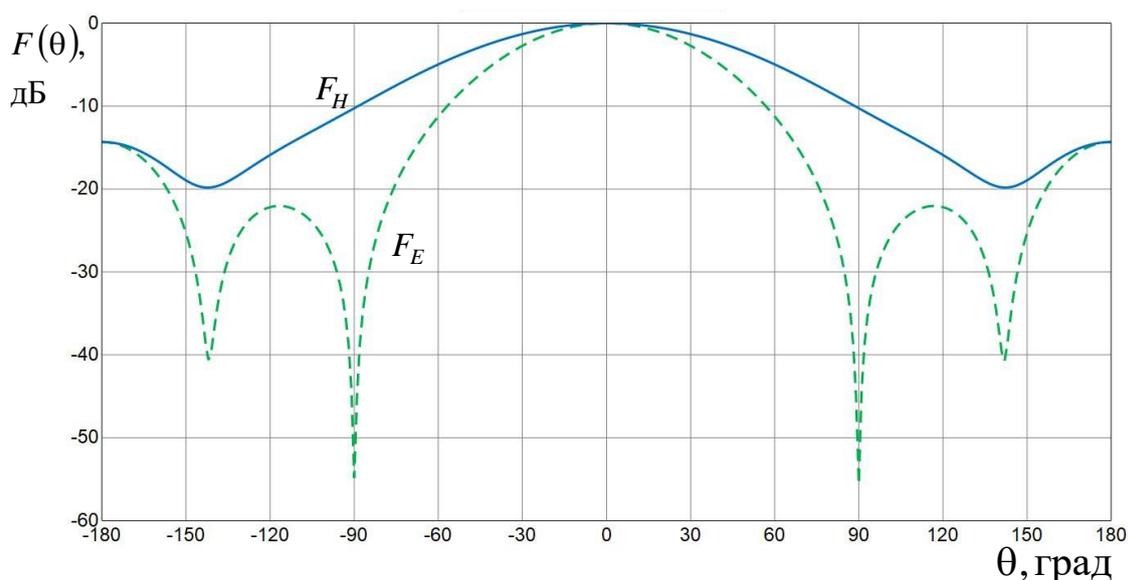


Рис. 9. ДН облучателя в E - и H -плоскостях на частоте 1,2 ГГц

ДН облучателя сформированы так, чтобы на разных частотах обеспечивать одинаковое по форме амплитудное распределение поля в раскрытии параболического рефлектора.

На рис. 10 показаны две параболические поверхности, на основе которых будет сформирована ферменная конструкция зеркальной антенны, профили которых определялись с учетом рекомендаций [8, 9].

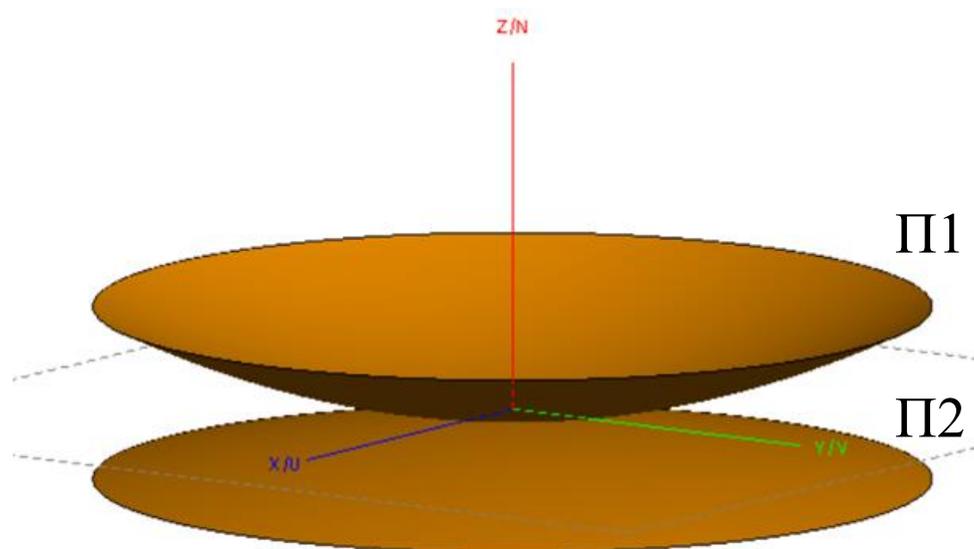


Рис. 10. Две параболические поверхности, на основе которых будет сформирована ферменная конструкция зеркальной антенны

Характеристики параболических поверхностей показаны в табл. 1.

Таблица 1. Геометрические поверхности параболических поверхностей

Поверхность	Диаметр, см	Фокусное расстояние, см
П1	83	41,5
П2	83	103,75

На основе поверхностей П1 и П2 получены сетчатые структуры П3, показанные на рис. 11.

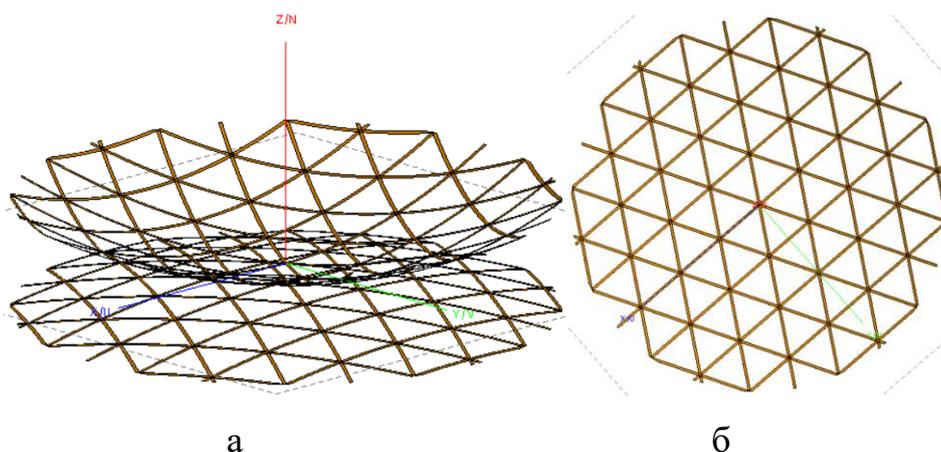


Рис. 11. Сетчатые структуры П3 с параболическими профилями поверхностей (П1, П2): вид сбоку (а) и сверху (б)

В результате, на основе поверхностей П3 получена модель ферменной конструкции параболической антенны (рис. 12).

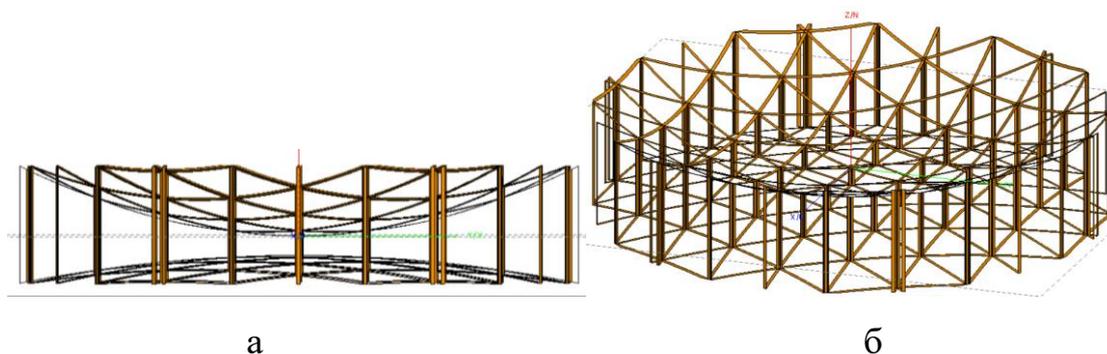


Рис. 12. Внешний вид модели ферменной несущей конструкции параболической зеркальной антенны: виды с боку (а, б)

Проанализируем влияние разработанной модели ферменной конструкции рефлектора на электродинамические характеристики антенны.

На рис. 13 показана модель ферменной конструкции с облучателем антенны, а также показана трехмерная нормированная диаграмма направленности на основной поляризации на частоте 1,2 ГГц.

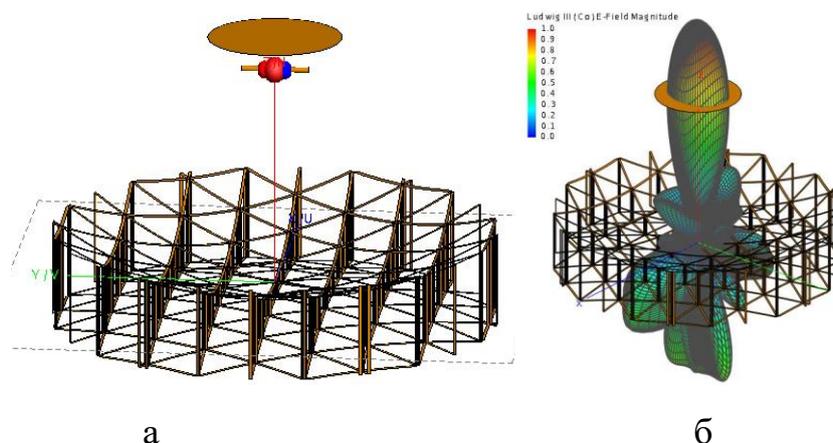


Рис. 13. Модель ферменной конструкции с облучателем антенны (а), трехмерная нормированная ДН на основной поляризации на частоте 1,2 ГГц (б)

На рис. 14 показаны ДН ферменной конструкции на частоте 2,3 ГГц в Е-и Н-плоскостях. На рис. 15 показана ДН в Е-плоскости на основной и кросс-поляризации на частоте 2,3 ГГц.

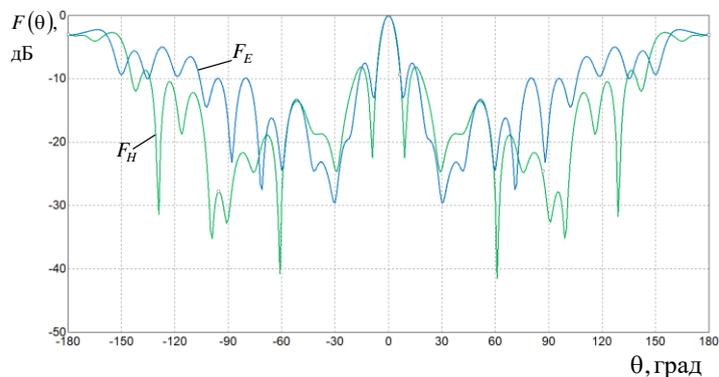


Рис. 14. ДН ферменной конструкции в Е-и Н-плоскостях на частоте 2,3 ГГц

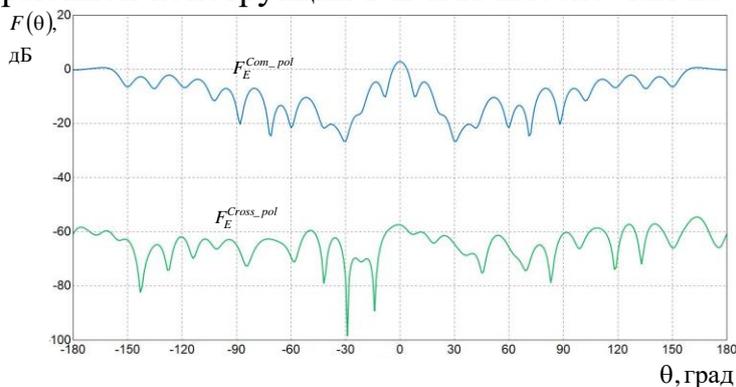


Рис. 15. ДН ПЗ в Е-плоскости на основной и кросс-поляризации на частоте 2,3 ГГц

Установлено, что ферменная конструкция в диапазоне частот 1,2–2,3 ГГц обеспечивает коэффициент защитного действия (КЗД) 2–5 дБ. При этом разработанная конструкция не ухудшает поляризационную структуру поля излучения, формируемую облучателем.

3. Исследование характеристик излучения зеркальной антенны с пленкой рефлектора с разреженной структурой волокна

Рассмотрены три варианта выполнения пленки рефлектора проектируемой антенны в виде полотна с разреженной и с плотной сеткой волокна, образующего поверхность рефлектора, показанные на рис. 16.

Пленка рефлектора Тип-1 (рис. 16а) характеризуется размерами сторон гексагональных отверстий 0,9 см и период повторения отверстий 1,8 см.

Пленка рефлектора Тип-2 (рис. 16б) характеризуется гибридной сетчатой структурой с гексагональными отверстиями, которые имеют размер стороны 0,87 / 0,6 см и период повторения 1,15 см.

Пленка рефлектора Тип-3 (рис. 16в) характеризуется гибридной сетчатой структурой с гексагональными отверстиями, которые имеют размер стороны 1,15 / 1,45 см и период повторения 1,15 см.

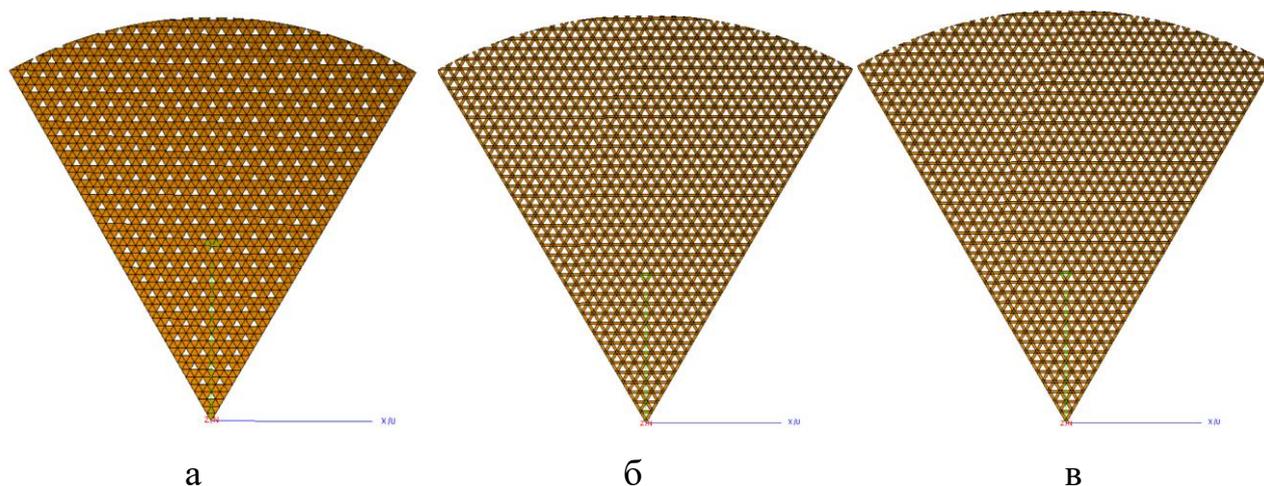


Рис. 16. Образцы сегментов пленки рефлектора: Тип-1 (а), Тип-2 (б), Тип-3 (в)

На рис. 17 показаны разработанные модели конструкции параболической зеркальной антенны с пленками рефлектора Тип-1 и Тип-2, выполненного на основе ферменной структуры, показанной на рис. 12.

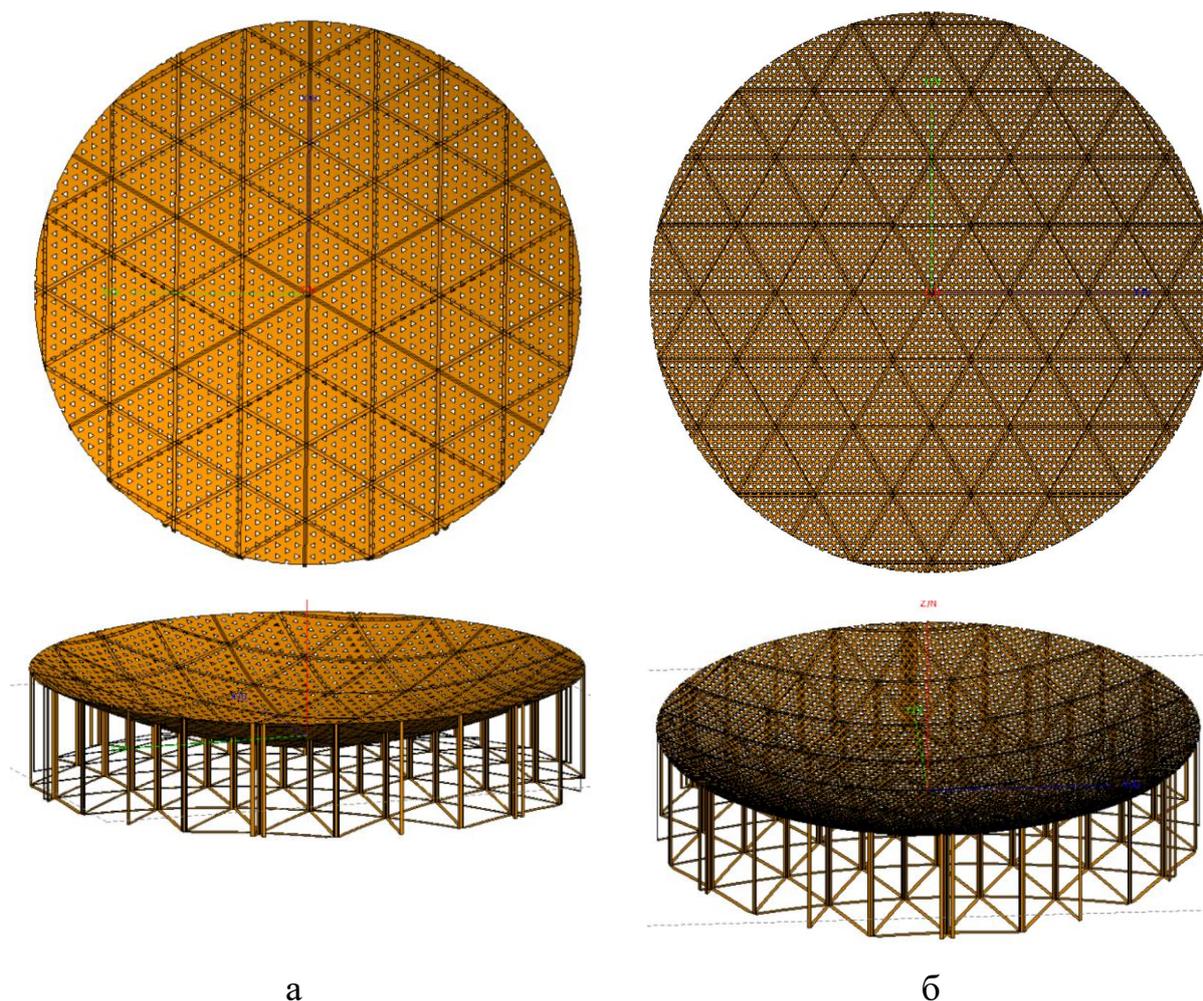


Рис. 17. Модели конструкции параболической зеркальной антенны с полотном рефлектора Тип-1 (а) и Тип-2 (б)

На рис. 18 показаны ДН параболической антенны с рефлектором Тип-1 на частоте 2,5 ГГц, рассчитанные в главных сечениях – в E - и H -плоскостях. На рис. 19 показаны ДН параболической антенны с рефлектором Тип-2 на частоте 2,5 ГГц. На рис. 20 показаны ДН параболической антенны с рефлектором Тип-3 на частоте 2,5 ГГц.

Частотные зависимости ширины главного лепестка ДН в E - и H -плоскости для антенны с рефлекторами Тип-1 – Тип-3 показаны на рис. 21.

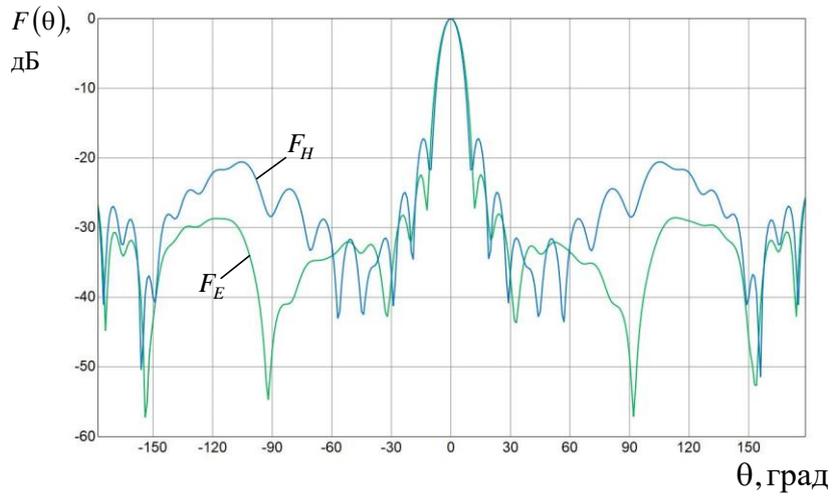


Рис. 18. ДН параболической антенны с рефлектором Тип-1 на частоте 2,5 ГГц

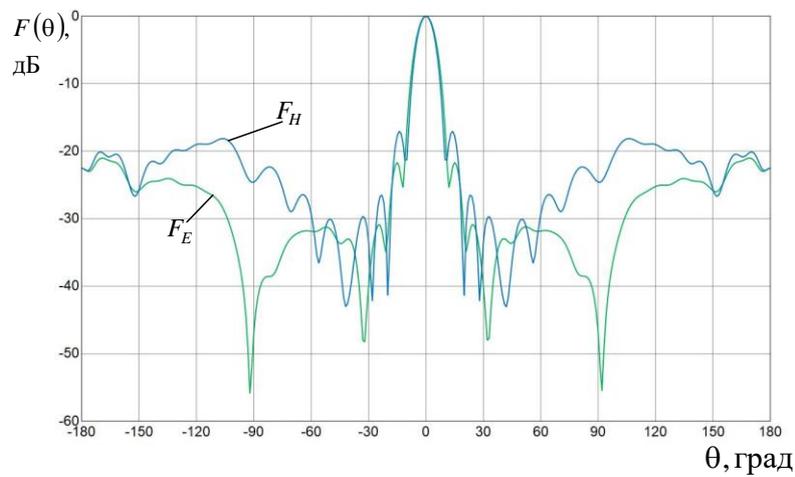


Рис. 19. ДН параболической антенны с рефлектором Тип-2 на частоте 2,5 ГГц

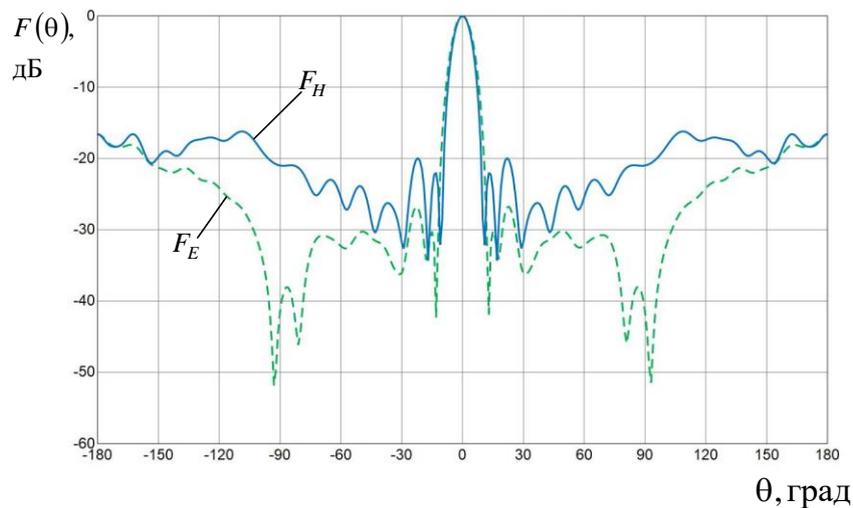


Рис. 20. ДН параболической антенны с рефлектором Тип-3 на частоте 2,5 ГГц

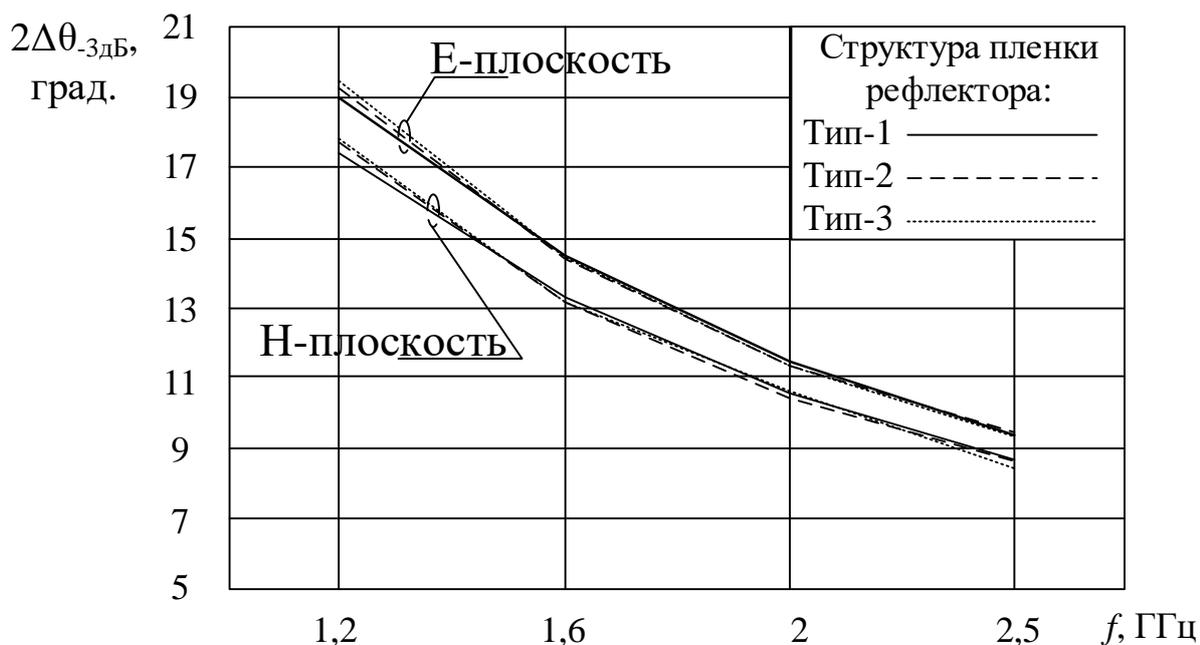


Рис. 21. Частотные зависимости ширины главного лепестка ДН зеркальной антенны с полотном рефлектора Тип-1 – Тип-3

На рис. 22 показаны частотные зависимости коэффициента усиления параболической зеркальной антенны с полотном рефлектора Тип-1 – Тип-3.

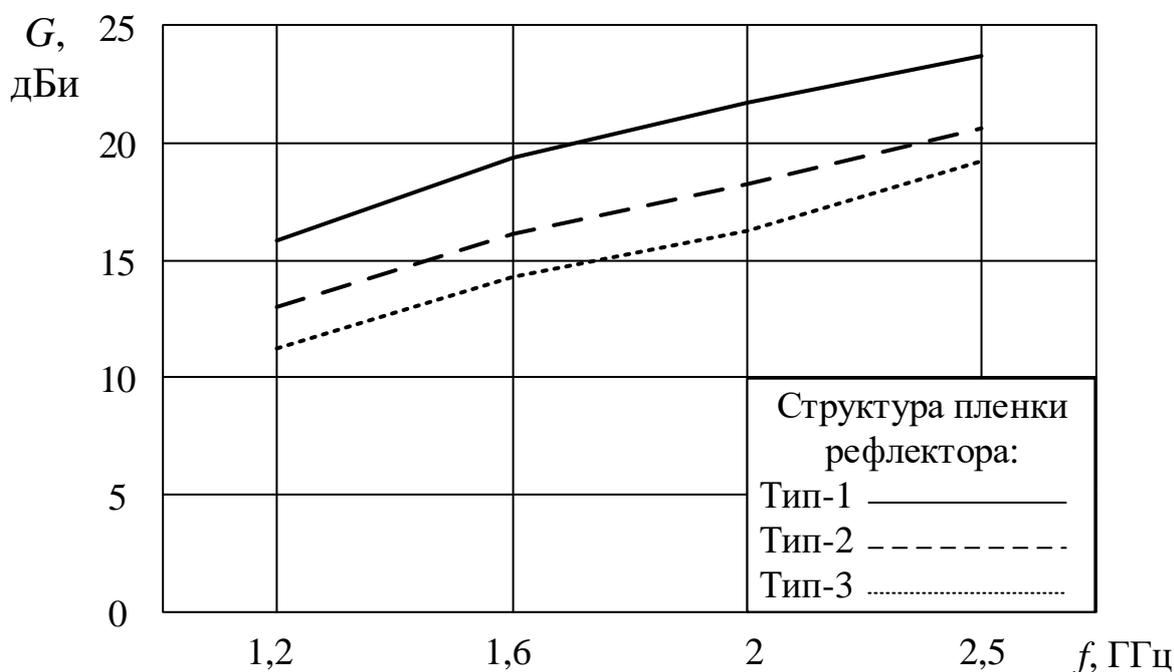


Рис. 22. Частотная зависимость коэффициента усиления зеркальной антенны с полотном рефлектора Тип-1 – Тип-3

На основании результатов моделирования, заполнены таблицы 2–4.

Таблица 2. Сравнительный анализ характеристик разработанных зеркальных антенн на частоте 1,2 ГГц

Тип полотна рефлектора	Уровень побочного излучения в <i>E</i> -плоскости	Уровень побочного излучения в <i>H</i> -плоскости	Коэффициент защитного действия, дБ	Коэффициент усиления, дБ
Тип-1	-17	-14	17	15,9
Тип-2	-11,5	-11	11,5	13,1
Тип-3	-9	-9	9	11,3

Таблица 3. Сравнительный анализ характеристик разработанных зеркальных антенн на частоте 2 ГГц

Тип полотна рефлектора	Уровень побочного излучения в <i>E</i> -плоскости	Уровень побочного излучения в <i>H</i> -плоскости	Коэффициент защитного действия, дБ	Коэффициент усиления, дБ
Тип-1	-20	-16,5	22	21,7
Тип-2	-18	-15	19	18,4
Тип-3	-13	-12	16	16,3

Таблица 4. Сравнительный анализ характеристик разработанных зеркальных антенн на частоте 2,5 ГГц

Тип полотна рефлектора	Уровень побочного излучения в <i>E</i> -плоскости	Уровень побочного излучения в <i>H</i> -плоскости	Коэффициент защитного действия, дБ	Коэффициент усиления, дБ
Тип-1	-22	-18	27	23,7
Тип-2	-21	-18	22	20,8
Тип-3	-18	-17	18	19,2

Проанализированы три типа отражающих рефлекторов (Тип-1, Тип-2, Тип-3), которые отличаются размерами просветов и периодом их следования. Для трех рефлекторов ширина главного лепестка ДН в диапазоне частот изменяется практически одинаково. Рефлектор Тип 1 в диапазоне частот характеризуется ДН с наименьшими уровнями побочного излучения и максимальным КЗД, и КУ. Рефлектор Тип 2, в сравнении с рефлектором Тип 1, имеет более высокий уровень побочного излучения и меньший коэффициент усиления. Рефлектор

Типа 3 характеризуется низким уровнем КЗД на частотах 1,2–1,6 ГГц, но на частотах 2–2,5 ГГц уровень побочного излучения, КЗД и КУ принимают лучшие значения: побочное излучение уменьшается, КЗД и КУ относительно большие.

Практическая значимость разработанных структур пленок рефлекторов отражена в таблице 5.

Таблица 5. Рекомендации по применению структурированных пленок рефлекторов

Тип пленки рефлектора	Достоинства	Недостатки	Рекомендации
Тип-1	Наибольший коэффициент усиления и КЗД, наименьший уровень побочного излучения	Максимальная масса и плотность поверхности	Применение в зеркальных антеннах с диаметром апертуры до 5 м
Тип-2	По сравнению с рефлектором Тип1 – меньшая масса	По сравнению с рефлектором Тип1 – ниже КУ и КЗД	Применение в зеркальных антеннах с диаметром апертуры 5–10 м
Тип-3	Минимальная масса. На частотах 2–2,5 ГГц снижается уровень боковых лепестков, улучшается значение коэффициента усиления.	Наименьшее значение КЗД, КУ, наибольшее побочное излучение	Применение в зеркальных антеннах с диаметром апертуры более 10 м

Заключение

Разработаны и исследованы модели ферменной несущей конструкции космической зеркальной антенны.

Разработаны три типа разреженного отражающего полотна рефлектора параболической зеркальной антенны. Исследованы частотные характеристики зеркальной антенны с разработанными отражающими полотнами.

Дана оценка снижения коэффициента усиления при разрежении структуры отражающего полотна рефлектора и показано, что разреженные структуры отражающих поверхностей могут эффективно использоваться в S-диапазоне.

Даны рекомендации по использованию отдельных типов отражающих полотен для малых, средних и больших апертур зеркальных антенн.

Финансирование: Оставить пустым если финансирование отсутствует.

Литература

1. Roederer A.G., Rahmat-Samii Y. Unfurlable Satellite Antennas: A Review. *Annales des Telecommun.* 1989. V.44. № 9/10. P.475-488.
2. Space Acquisitions. Space Communication Bands [Web]. *AcqNotes. Program Management Tool for Aerospace.* Дата обращения: 28.10.2022. URL: <https://acqnotes.com/acqnote/careerfields/space-communication-bands>
3. Morterolle S., Maurin B., Quirant J., Dupuy Ch. Numerical form-finding of geotensoid tension truss for mesh reflector. *Acta Astronautica.* 2012. №76. P.154-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.02.025>
4. Miura K., Miyazaki Y. Concept of the tension truss antenna. *AIAA Journal.* 1990. V.28. №6. P.1098-1104. <https://doi.org/10.2514/3.25172>
5. Meshkovsky V., Sdobnikov A., Churilin S., Kisanov Y. Numerical investigations of shape of the reflecting surface made of knitted mesh fabric being pulled on the curvilinear frame. *EPJ Web of Conferences EPPS2019.* 2019. 25 p. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922101031>
6. Li T., Deng H., Lin Z., Wang Z. Form-finding methods for deployable mesh reflector antenna. *Chinese Journal of Aeronautics.* 2013. V.26. №5. P.1276-1282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2013.04.062>

7. Agrawal P.K., Anderson M.S., Card M.F. Preliminary design of large reflectors with flat facets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1981. V.29. №4. P.688-694. <https://doi.org/10.1109/TAP.1981.1142631>
8. Yang G., Yang D., Zhang Y., Du J. Form-finding design of cable-mesh reflector antennas with minimal length configuration. *Aerospace Science and Technology*. 2016. 20 p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2016.11.010>
9. Zhang Y., Duan B., Li T. A controlled deployment method for flexible deployable space antennas. *Acta Astronautica*. 2012. V.81. №1. P.19-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.05.033>

Для цитирования:

Головин В.В., Тыщук Ю.Н. Исследование характеристик разворачиваемой космической зеркальной антенны с разреженной отражающей поверхностью. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2023. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.10>