

На правах рукописи



Гаджиев Эльчин Вахидович

УКВ АНТЕННЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре «Радиофизики, антенн и микроволновой техники» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: **Воскресенский Дмитрий Иванович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедры «Радиофизики, антенн и микроволновой техники» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета)

Официальные оппоненты: **Нечаев Евгений Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедры «Управления воздушным движением» Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУ ГА)

Русов Юрий Сергеевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Радиоэлектронных систем и устройств»
Московского государственного технического университета (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Ведущая организация: **АО «Московский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский радиотехнический институт» г. Москва (АО «МНИРТИ»)**

Защита состоится «6» декабря 2016 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института (125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4) и на сайте <http://www.mai.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д. 212.125.03, д.т.н., профессор

Сычёв М.И.

I. Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Обеспечение обмена информацией между космическим аппаратом (КА) и наземными пунктами управления является одной из главных задач. От качества и непрерывности сеансов связи КА с наземными службами зависит выполнение возложенной целевой задачи на КА.

К бортовым антенно-фидерным устройствам (АФУ) КА предъявляются весьма жёсткие требования в виду того, что данный класс антенн обладает спецификой, которая заключается: в определённом месте установки; во влиянии корпуса самого КА и целевой аппаратуры на характеристики направленности и согласования бортовой антенны (коэффициент стоячей волны (КСВ), диаграмма направленности (ДН), коэффициент усиления (КУ)); во влиянии космического пространства; во влиянии условий запуска КА; в уменьшении массогабаритных показателей.

Существенно изменились приоритеты в разработке самих КА. Видимое преимущество по ряду направлений космической деятельности получило создание малых КА по сравнению с крупногабаритными и тяжёлыми КА.

Активный процесс миниатюризации космической техники неизбежно привёл и к миниатюризации всех бортовых систем и комплексов КА, в том числе и бортовых АФУ.

Традиционно, в качестве бортовых АФУ КА используют различные типы антенн: спиральные, вибраторные, рупорные, волноводы и др. Однако при разработке антенной системы для малых КА необходимо учитывать следующие факторы.

Так как площадь поверхности КА предназначенной для установки всей бортовой целевой аппаратуры, в том числе и АФУ, как правило, составляет примерно от $0,01 \text{ м}^2$ до 1 м^2 (в зависимости от габаритов малого КА), то необходимо использовать такой тип антенн, который удачно размещался бы на такой поверхности.

Несмотря на современную тенденцию, которая заключается в использовании высокочастотных бортовых антенн (2,4 ГГц, 5 ГГц, 8,2 ГГц, 10 ГГц, 25,6 ГГц), в настоящий момент существует острая потребность в миниатюрных антеннах метрового и дециметрового диапазонов (145 МГц, 435 МГц), т.е. УКВ диапазон. Этот факт обусловлен тем, что ввиду доступности данного диапазона для потребителя (особенно при построении антенн для научных комплексов и систем, радиолобительских систем и т.д.), этот диапазон активно применяется как на борту малых КА, так и в наземных пунктах приёма.

В тоже время, помимо жёстких требований по массогабаритным характеристикам и требований к невыступающей конфигурации антенн малых КА, необходимо обеспечить приемлемые характеристики направленности и согласования (КСВ, ДН, КУ). Корпус КА оказывает влияние на ДН бортовой антенны вследствие эффекта дифракции, вызванного протеканием токов на поверхности КА, т.е. ухудшаются характеристики направленности бортовых антенн.

С учётом выше изложенного можно сформулировать основные цели и задачи диссертационной работы.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является изыскание путей построения, методики проектирования и расчёта малогабаритной, невыступающей антенной системы класса малых КА широкого профиля.

В соответствии с поставленной целью **в диссертационной работе были решены следующие задачи:**

- проведение аналитического обзора научно–технической литературы, посвящённой построению малогабаритной, невыступающей антенной системы для малых КА;
- исследование влияния корпуса носителя на характеристики направленности бортовых антенн;

- изучение параметров существующих и применяемых СВЧ-диэлектриков;
- изыскание путей построения миниатюрных УКВ микрополосковых антенн;
- поиск технических решений и разработки малогабаритных, бортовых УКВ микрополосковых антенн;
- разработка приближённой методики оценки влияния поверхности КА на характеристики направленности бортовых микрополосковых антенн;
- определение и исследование направленных свойств и частотных характеристик бортовых микрополосковых антенн;
- предложение технических решений и разработка бортовой, планарной, многодиапазонной микрополосковой антенны (метрового и дециметрового диапазонов) для построения антенной системы малых КА;
- экспериментальное исследование характеристик направленности бортовой микрополосковой антенны и проведение сравнительного анализа, полученного путём строгого численного электродинамического моделирования.

Методы исследований

При исследовании использовались как вычислительные методы электродинамики и теории антенн и устройств СВЧ на ЭВМ, так и известные общие методы решения волновых уравнений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен алгоритм оценки влияния корпуса малого КА на характеристики направленности бортовой антенны малого КА;
- определены требования к характеристикам направленности, согласованию, частотным свойствам и массогабаритным параметрам, конструкции, применяемым материалам вследствие воздействия космического пространства, механического и климатического

воздействия, обусловленных также спецификой запуска и эксплуатации бортовых антенн малых КА;

- предложен ряд бортовых, многочастотных, с круговой поляризацией, высокотехнологичных микрополосковых антенн для малых КА.

Практическая значимость результатов работы

1. Разработана и запатентована УКВ микрополосковая антенна, обладающая в 2–2,5 раза меньшими габаритами по сравнению с применяемыми антеннами на борту КА.
2. Предложена УКВ микрополосковая антенна круговой поляризации, обладающая более простым способом получения круговой поляризации по сравнению с применяемыми антеннами на борту КА.
3. Предложена многодиапазонная микрополосковая антенна в планарном исполнении, позволяющая уменьшить занимаемый объём.

Реализация и внедрение результатов работы

Основные результаты диссертационной работы использованы и внедрены в ОКР АО «Научно-исследовательского института электромеханики» (АО «НИИЭМ»), а также внедрены в учебный процесс кафедры 406 МАИ (НИУ). Акты о внедрении приведены в приложении к диссертации.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием общеизвестных методов решения волновых уравнений, а также совпадением полученных результатов с экспериментально измеренными характеристиками.

Апробация результатов работы

Результаты доложены и опубликованы в 30 тезисах научно–технических конференций, в том числе десяти международных, двух всероссийских и одиннадцати молодёжных.

Публикации

По основным результатам выполненных исследований опубликовано 30 тезисов научно–технических конференций, тринадцать научных статей, три патента.

Основные положения, выносимые на защиту

- Предложена конструкция малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА с использованием малогабаритных УКВ микрополосковых антенн, соответствующих предъявляемым требованиям к антенной системе малых КА.
- Разработан алгоритм нахождения изменений характеристик направленности слабонаправленных бортовых антенн от явления дифракции на поверхности малого КА, позволяющий на начальной стадии проектирования определить необходимые антенные устройства.
- Созданы миниатюрные УКВ микрополосковые антенны, применяемые в системе связи, метеонаблюдения, в научных задачах и др., позволяющие уменьшить в 2–2,5 раза габариты по сравнению с применяемыми бортовыми антеннами на борту при тех же характеристиках.

Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста. Список литературы включает 165 наименований на 15 страницах. Работа содержит 87 рисунков и 16 таблиц.

Личный вклад

Все представленные в диссертации результаты исследований и экспериментальные данные получены лично автором либо при его непосредственном участии.

II. Краткое содержание работы

Введение

Во введении показано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведена структура диссертации, апробация результатов и результатов внедрения.

Глава 1. Состояние и перспективы развития бортовых АФУ КА

В первой главе проведён обзор состояния и тенденций развития бортовых антенных систем КА. Показана активная тенденция миниатюризации космической техники, которая привела к появлению нового класса КА – малых КА. Представлена классификация малых КА. Приведён обзор отечественных и зарубежных малых КА. Выявлена необходимость создания бортовых антенн для малых КА, а именно построение малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА. Показана специфика класса бортовых антенн КА. Рассмотрены применяемые в настоящее время варианты построения бортовых антенных систем, а именно с помощью применения конструктивных решений, применения печатных технологий при проектировании антенн, применения различных типов антенн. Сформулированы требования к характеристикам направленности (ширина ДН $\pm 180^\circ$ в случае неориентированного полёта КА и $\pm 60^\circ$ в случае ориентированного полёта КА, КУ не менее минус 1 дБ в рабочем секторе углов, излучение поля с линейной и круговой поляризацией), согласованию (для связных антенн КСВ не более 1,35; для передающих, приёмных, антенн научных комплексов и систем КСВ не более 2), частотным характеристикам (одночастотные (метровый, дециметровый диапазоны) или многочастотные (метровый и дециметровый диапазоны) с узкой (3%) и/или широкой (10%) полосой рабочих частот), а также массогабаритным показателям (не более 10×10 см для сверхмалых КА (стартовой массой менее 10 кг, например, КА «CubeSat») и не более 30×30 см для малых КА (стартовой массой от 10 кг до 500 кг)) бортовых антенн малых КА.

Глава 2. Особенности построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА

Во второй главе диссертации рассмотрены и представлены особенности построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА с учётом сформулированных требований к конструкции и материалам бортовых антенн по механическому, температурному воздействиям, а также к воздействию космического пространства.

Для построения антенной системы малых КА предложено применение микрополосковых антенн (МПА) в качестве бортовых антенн.

Предложен способ миниатюризации УКВ МПА, позволяющий уменьшить в 2–2,5 раза габариты антенны по сравнению с существующими аналогами за счёт введения в конструкцию антенны короткозамыкателя и применения диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости и низким значением тангенса диэлектрических потерь, сохраняя допустимые характеристики направленности. В качестве такого диэлектрика выбран ФЛАН (фольгированный листовой арилокс наполненный).

Для построения на практике такой бортовой антенной системы рассмотрен вариант разработки бортовых МПА для малого КА «Ионосфера» вместо уже разработанной антенной системы, составленной из спиральной, вибраторной и штыревой антенн.

Глава 3. Методика приближённого расчёта характеристик направленности бортовой МПА малых КА

При проектировании бортовой антенной системы КА неизбежно возникают трудности с размещением антенн так, чтобы их электродинамическое взаимодействие друг с другом и с участками поверхности объекта, на котором они расположены, были минимальным. На практике, в большинстве своём случае, данная электродинамическая задача не может быть решена строго, потому что на поверхности КА расположено большое

количество целевой аппаратуры различной формы и конфигурации, а также сам КА обладает достаточно сложной геометрической формой.

На раннем этапе проектирования антенной системы КА, а именно при выборе типа применяемой антенны и её месторасположения на поверхности КА, важно иметь ориентировочные данные об ожидаемых электрических параметрах бортовой антенны, поэтому порой оказывается достаточным приближённое (упрощённое) определение электрических параметров антенны.

Путём применения известных методов электродинамики в диссертации были получена структура электромагнитного поля.

Для приближённого решения данной дифракционной задачи можно заменить поверхность КА сферой. При электрически малых размерах КА и сферы $(2\pi/\lambda) \times r_{сферы} \sim 1$. Такая аппроксимация мало влияет на характеристики направленности. В тоже время для сферической поверхности функция Грина хорошо известна. Такая аппроксимация позволяет рассчитать ДН, разрабатываемой антенны, приведённой на рисунке 3.1

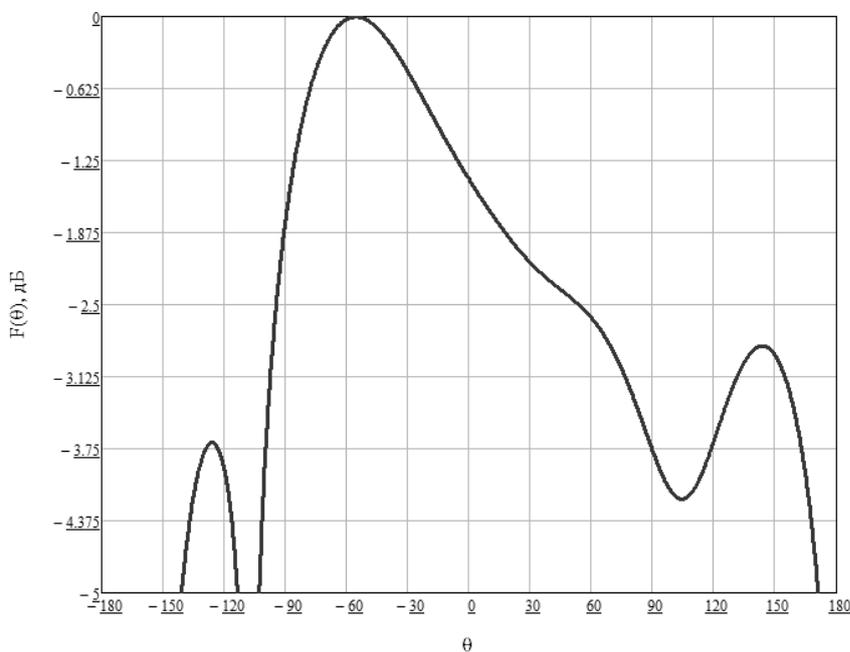


Рисунок 3.1 – ДН антенны в плоскости E (в угломестной плоскости)

Определение компонент векторов напряженности электрического и магнитного поля осуществляется в диссертации путём решения волновых уравнений в сферической системе координат для рассматриваемого случая.

Вспомогательные потенциальные функции, через которые выражаются компоненты электрического и магнитного поля, приведены ниже.

$$\left. \begin{aligned}
 U &= \sum_n \sum_m \left(A_{mn} \sqrt{kr} H^2 \left(\nu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\nu_{mn}}^m (\cos \theta) (\sin(m\phi)) + \right. \\
 &\quad \left. + B_{mn} \sqrt{kr} H^2 \left(\nu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\nu_{mn}}^m (\cos \theta) (\cos(m\phi)) \right) \\
 V &= \left(\bar{A}_{mn} \sqrt{kr} H^2 \left(\mu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\mu_{mn}}^m (\cos \theta) (\sin(m\phi)) + \right. \\
 &\quad \left. + \bar{B}_{mn} \sqrt{kr} H^2 \left(\mu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\mu_{mn}}^m (\cos \theta) (\cos(m\phi)) \right) \\
 &\text{при } r > R.
 \end{aligned} \right\}$$

где $A_{mn}, \bar{A}_{mn}, B_{mn}, \bar{B}_{mn}$ – комплексные амплитуды системы собственных волн.

$$\left. \begin{aligned}
 U &= \sum_n \sum_m \left(C_{mn} \sqrt{kr} J \left(\nu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\nu_{mn}}^m (\cos \theta) (\sin(m\phi)) + \right. \\
 &\quad \left. + D_{mn} \sqrt{kr} J \left(\nu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\nu_{mn}}^m (\cos \theta) (\cos(m\phi)) \right) \\
 V &= \left(\bar{C}_{mn} \sqrt{kr} J \left(\mu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\mu_{mn}}^m (\cos \theta) (\sin(m\phi)) + \right. \\
 &\quad \left. + \bar{D}_{mn} \sqrt{kr} J \left(\mu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\mu_{mn}}^m (\cos \theta) (\cos(m\phi)) \right) \\
 &\text{при } r > R.
 \end{aligned} \right\}$$

где $C_{mn}, \bar{C}_{mn}, D_{mn}, \bar{D}_{mn}$ – комплексные амплитуды системы собственных волн.

В диссертации приводится решение задачи об излучении антенны, размещаемой на выпуклой поверхности КА, и рассматривается влияние формы этой поверхности на характеристики направленности.

Таким образом, полученные результаты позволяют на ранней стадии определить основные характеристики бортовых антенн малых КА.

Глава 4. Моделирование антенной системы класса малых КА

В четвёртой главе диссертации проведено исследование характеристик направленности, согласования и энергетических характеристик (КСВ, ДН, КУ) трёх типов конструкции МПА, представленных на рисунке 4.1, где 1 – излучатель, 2 – подложка, 3 – короткозамыкатель, 4 – точка возбуждения.

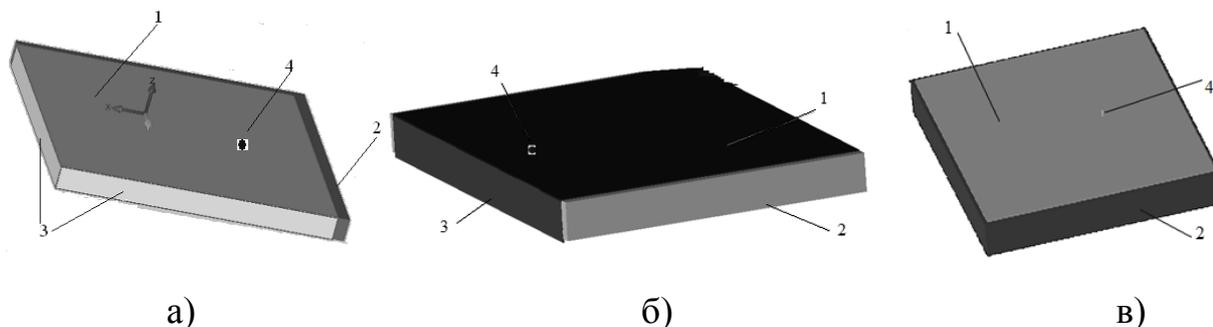


Рисунок 4.1 – Варианты конструкций бортовых антенн: а) модель МПА 137 МГц; б) модель МПА 150 МГц; в) модель МПА 400 МГц

Предложенные конструкции бортовых МПА разработаны для перспективного применения в составе УКВ антенной системы малого КА «Ионосфера». В диссертационной работе приведены результаты электродинамического моделирования приведенных конструкций МПА (см. рис. 4.1) согласования, ДН, КУ, которые соответствуют предъявляемым требованиям к бортовым антеннам малых КА по характеристикам направленности, согласованию и др. (см. гл. 1).

Для построения многодиапазонной, миниатюрной, планарной, бортовой УКВ МПА предложен вариант применения конструкции антенны с одним короткозамыкателем (см. рис. 4.1б)), а также с отношением сторон излучателя в

пределах 0,5...1. При этом такая конструкция антенны позволяет получить приемлемые характеристики направленности.

На рисунке 4.2 в качестве примера представлена зависимость КСВ такой МПА от частоты.

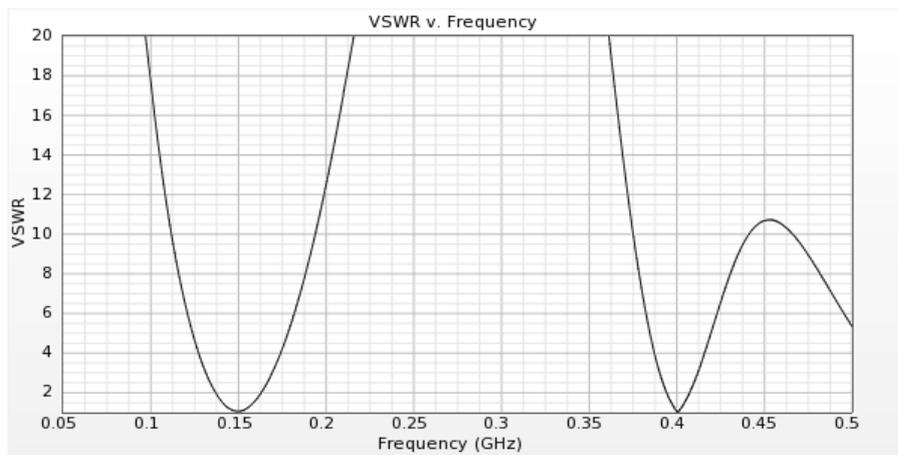


Рисунок 4.2 – КСВ модели МПА 150/400 МГц от частоты

Таким образом, по сравнению с существующей антенной системой малого КА «Ионосфера» (см. гл. 2) получена малогабаритная, невыступающая УКВ антенная система, состоящая из МПА.

Для сверхмалого КА «CubeSat» проведена разработка бортовой, связной УКВ МПА, представленной на рисунке 4.3.

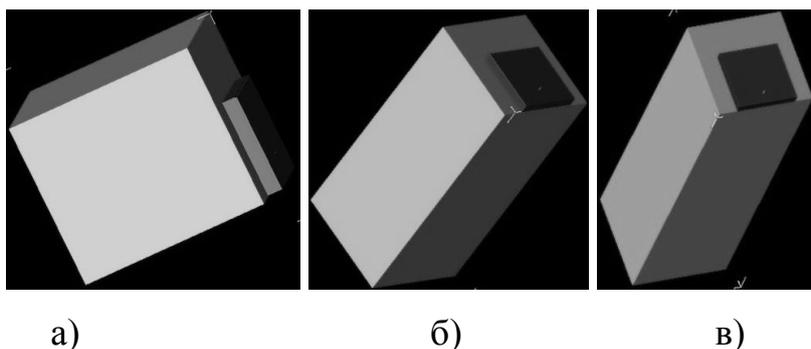
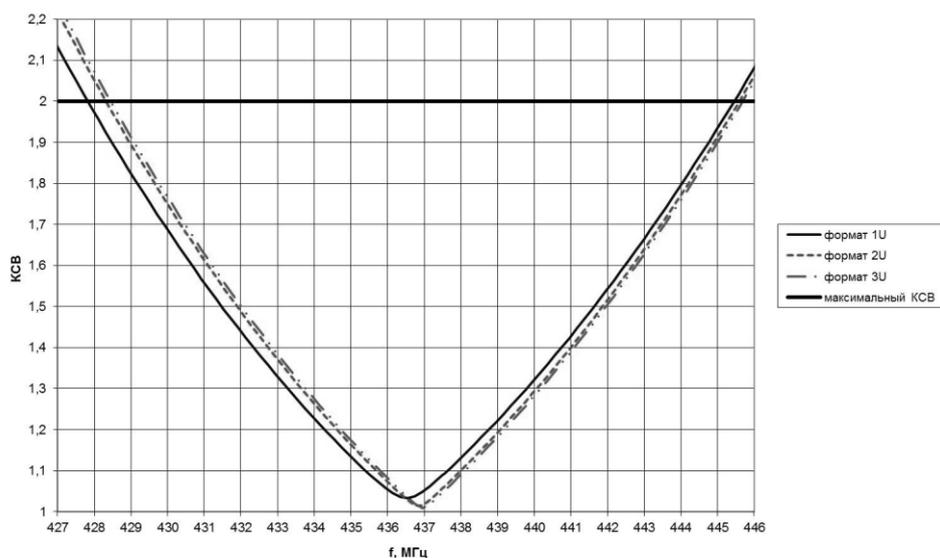


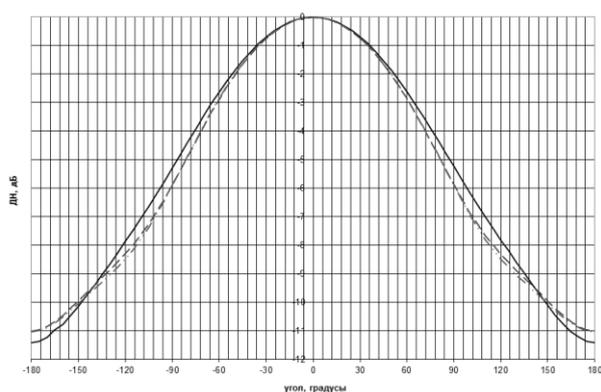
Рисунок 4.3 – Модели бортовой связной МПА сверхмалого КА «CubeSat»:

а) формата 1 U; б) формата 2 U; в) формата 3 U

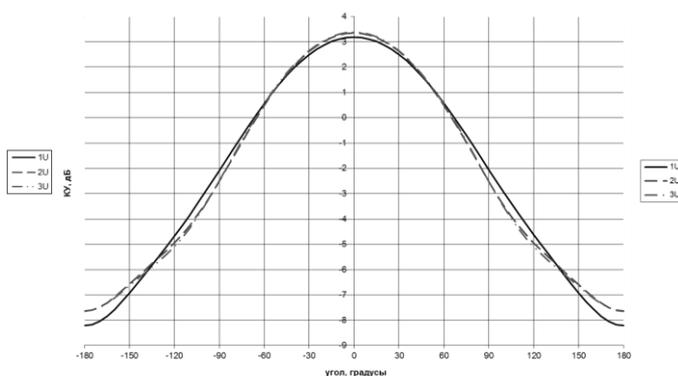
Для относительно малых размеров КА на рисунке 4.4 приведены исследования основных характеристик для сверхмалого КА «CubeSat» форматов 1 U, 2 U и 3 U.



а)



б)



в)

Рисунок 4.3 – Характеристики направленности бортовой МПА сверхмалого КА «CubeSat»: а) KCB; б) ДН; в) КУ

Результаты подтверждают возможность получения необходимых характеристик в случае применения МПА в качестве бортовых антенн малых КА, что иллюстрируется приведёнными рисунками (см. рис. 4.3 а)-в)).

В заключение четвёртой главы приводятся результаты экспериментального исследования образцов бортовых МПА для малого КА «Ионосфера» и сверхмалого КА «CubeSat», представленные на рисунке 4.4.

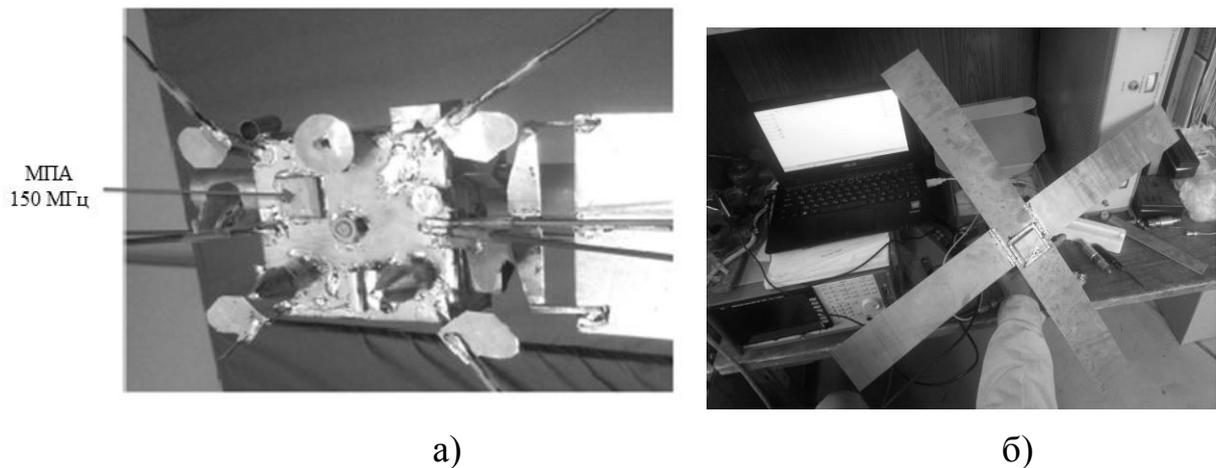


Рисунок 4.4 – Бортовые УКВ МПА: а) малый КА «Ионосфера» в масштабе 1×10 ; б) сверхмалый «CubeSat» КА формата 1U в масштабе 1×1

На рисунках 4.5 и 4.6 приведены результаты экспериментального исследования характеристик направленности исследуемых образцов бортовых МПА соответственно, где 1 – приём на горизонтальную поляризацию эталонной антенны; 2 – приём на вертикальную поляризацию эталонной антенны.

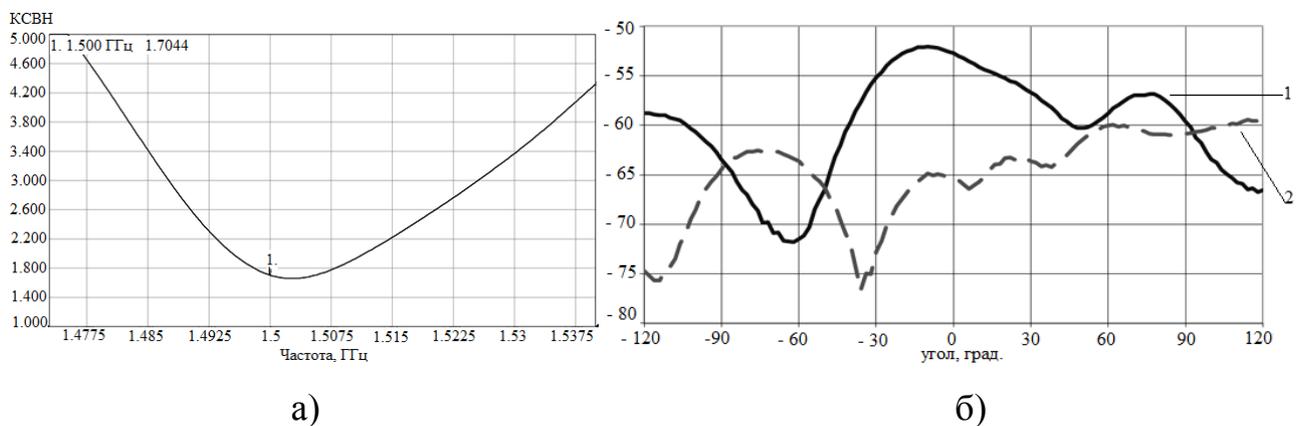
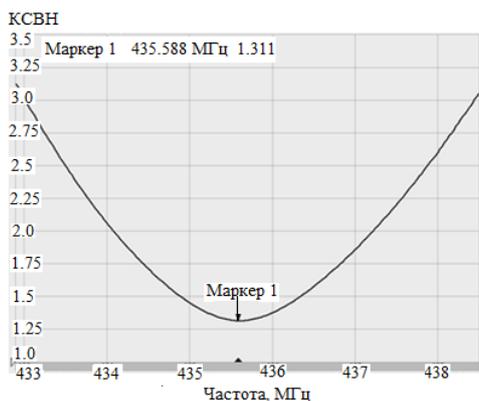
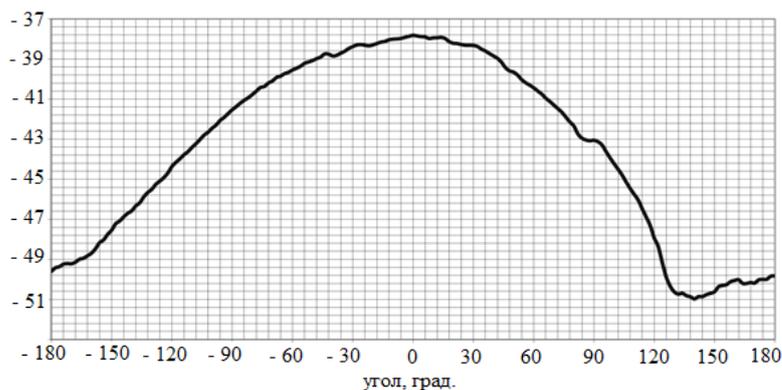


Рисунок 4.5 – Результаты экспериментального измерения бортовой МПА КА «Ионосфера»: а) зависимость КСВ от частоты б) ненормированная ДН при $\varphi=0^\circ$



а)



б)

Рисунок 4.6 – Результаты экспериментального измерения бортовой МПА сверхмалого КА «CubeSat» формата 1U: а) зависимость КСВН от частоты; б) ненормированная ДН при $\varphi=0^\circ$

Сравнение расчётной и экспериментально измеренной ДН сверхмалого КА «CubeSat» приведено на рисунке 4.7

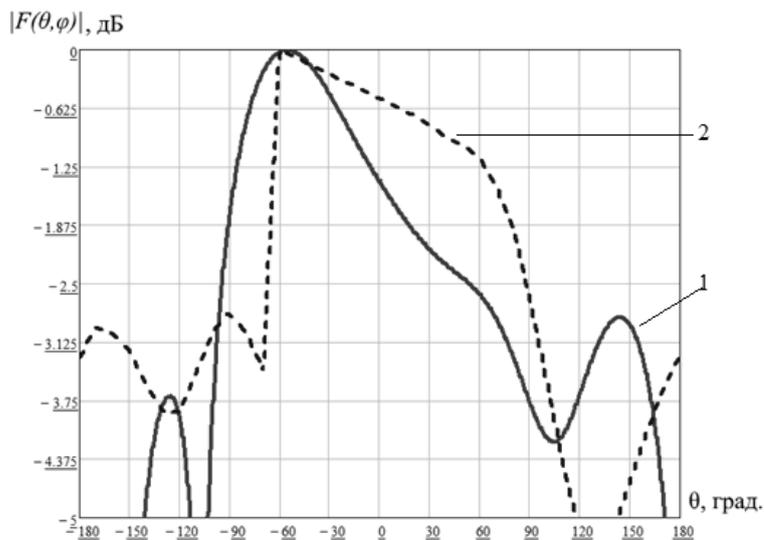


Рисунок 4.13 – Сравнение ДН бортовой МПА:
1 – теоретическая ДН; 2 – экспериментальная ДН

Имеет место хорошее совпадение численного и натурального эксперимента в области главного максимума, что в свою очередь подтверждает применимость предложенной методики приближённого расчёта характеристик направленности бортовых МПА малых КА для учёта влияния корпуса носителя на характеристики направленности данного класса антенн.

Основные результаты и выводы

В диссертационной работе предложена и разработана малогабаритная, невыступающая антенная система для класса малых КА. В том числе получены следующие результаты:

1. Определены требования к характеристикам направленности (КСВ, ДН, КУ, поляризационные свойства), согласованию, частотным характеристикам, массогабаритным и конструктивным параметрам антенн нового, развивающего класса малых КА.

2. Предложены малогабаритные, планарной конструкции, одночастотные, многочастотные, с линейной и круговой поляризацией УКВ МПА для класса малых КА, позволяющие заменить существующие бортовые антенны КА с целью снижения их массогабаритных параметров.

3. Предложено использование материала ФЛАН (фольгированного СВЧ-диэлектрика), удовлетворяющего условиям длительного воздействия повышенной и пониженной температуры, циклических температурных ударов, механического воздействия, радиации, т.е. дестабилизирующим факторам космического пространства.

4. Решена задача о влиянии корпуса носителя на характеристики направленности бортовых антенн малых КА путём аппроксимации поверхности носителя сферой, найти приближённое влияние корпуса малого КА на характеристики направленности бортовой антенны. Для этого проведено решение волновых уравнений в сферической системе координат для слабонаправленных бортовых антенн малых КА. Определено поле излучения антенны с учётом явления дифракции на носителе относительно малых размеров сферы (kr) и построены характеристики направленности.

5. Выполнено электродинамическое моделирование предложенных малогабаритных, планарной конструкции, одночастотных, многочастотных, с линейной и круговой поляризацией УКВ МПА для малых КА с помощью САПР.

6. Обеспечены требования к бортовым антеннам малых КА по характеристикам направленности (КСВ, ДН, КУ, поляризационные свойства), согласованию, частотным характеристикам, массогабаритным и конструктивным параметрам.

7. Показано выполнение обеспечения требований к характеристикам направленности (КСВ, ДН, КУ, поляризационные свойства), согласованию, частотным характеристикам, массогабаритным и конструктивным параметрам, предъявляемых к бортовым антеннам класса малых КА.

8. Проведено исследование предлагаемых УКВ МПА с применением аттестованных и поверенных приборов и методики измерений и испытаний космической продукции двойного назначения на территории антенного полигона АО «НИИЭМ» в безэховой камере. Полученные в ходе измерений характеристики бортовых антенн малых КА приведены в работе.

9. Проведено сравнение результатов численного расчёта, электродинамического моделирования и эксперимента предлагаемых антенн для класса малых КА, которое подтвердило достоверность полученных результатов.

10. Основные результаты работы доложены и обсуждены на десяти международных, двух всероссийских и одиннадцати молодёжных конференциях, опубликованы в тринадцати российских журналах, рекомендованных ВАК; запатентованы и получены один патент на изобретение и два патента на полезную модель. Результаты диссертационной работы внедрены в разработках АО «НИИЭМ», а также в учебный процесс кафедры 406 МАИ (НИУ). Акты внедрения прилагаются.

Основные публикации по теме диссертации.

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Антенная система космического аппарата «Ионосфера». Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 131. № 6. С. 11–14.

2. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны дециметрового диапазона для применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 65.
3. Гаджиев Э.В. Моделирование бортовых антенн СВЧ космических аппаратов // Антенны. 2013. № 9 (196). С. 65–68.
4. Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенно–фидерных систем космических аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 76.
5. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка макета микрополосковой антенны метрового диапазона для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 4 (16). С. 20–27.
6. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Выбор диэлектрика подложки микрополосковой антенны при построении миниатюрной антенны // Антенны. 2014. № 12 (211). С. 38–44.
7. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка модели двухчастотной микрополосковой антенны для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 141. С. 23–26.
8. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюризация антенной системы космического аппарата «Ионосфера» // Антенны. 2015. № 3 (214). С. 32–38.
9. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Моделирование бортовых микрополосковых антенн // Антенны. 2016. № 7 (227). С. 10–22.
10. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В. Методика приближённого расчёта характеристик направленности бортовой микрополосковой антенны малых космических аппаратов // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 15–27.

Патенты:

11. Патент на полезную модель № 152427 от 16.09.2014 г. Микрополосковая антенна метрового диапазона с круговой поляризацией.
12. Патент на изобретение № 2583334 от 16.09.2014 г. Способ создания микрополосковых антенн метрового диапазона и устройство, реализующее этот способ.
13. Патент на полезную модель № 162204 от 07.09.2015 г. Многодиапазонная микрополосковая антенна.

В других изданиях:

14. Bocharov V.S., Generalov A.G., Gadzhiev E.V. Design of microstrip antennas for dual-frequency on-board transmitter 'МАУАК 150/400' // IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo). 23rd International Crimean Conference. 2013.
15. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенных систем малых космических аппаратов // Материалы VI Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». МИ ВлГУ. 2014.
16. Vladimir Bocharov, Alexander Generalov, Elchin Gadzhiev. Application of printing technologies to design on-board antenna systems of spacecrafts // 40th COSPAR Scientific Assembly. 2014.
17. Гаджиев Э.В., Кондратьева С.Г., Овчинникова Е.В. Математическое моделирование бортовых антенн космических аппаратов с учётом дифракции // XLII Международная молодёжная конференция «Гагаринские чтения». МАИ. 2016.
18. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Построение миниатюрной антенной системы малых и сверхмалых космических аппаратов // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». АО «Российские космические системы». 2016.
19. Гаджиев Э.В. Миниатюрные УКВ микрополосковые антенны // VII Молодёжная научно-техническая конференция «Инновационный арсенал молодёжи». КБ «Арсенал». 2016.

Множительный центр МАИ (НИУ)

Заказ от « ___ » _____ 2016 г. Тираж ___ экз.