

УДК 621.396.6

Построение миниатюрной антенной системы малых и сверхмалых космических аппаратов

Генералов А.Г., Гаджиев Э.В.*

*Научно-исследовательский институт электромеханики,
ул. Панфилова, 11, Истра, Московская область, 143502, Россия*

**e-mail: [gadzhiev_elchin@mail.ru](mailto:gadzhiyev_elchin@mail.ru)*

Аннотация

В настоящее время наблюдается активный процесс миниатюризации всей космической техники, включая и бортовые системы и комплексы. Бортовые антенно–фидерные устройства также затронул процесс миниатюризации. Учитывая специфику бортовых антенн, появляется актуальная, современная задача по разработке малогабаритной, не выступающей, надёжной, простой и высокотехнологичной антенной системы малых космических аппаратов. Особенно остро ощущается потребность в миниатюрных УКВ бортовых антеннах. Показано преимущество применения микрополосковых (печатных) антенн, изготовленных с помощью печатных технологий, для решения задачи по проектированию малогабаритной, не выступающей бортовой антенной системы малых космических аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат, антенная система, микрополосковые (печатные) антенны, коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

Введение

На сегодняшний день существенно изменились приоритеты в разработке КА. Видимое преимущество по ряду направлений космической деятельности получило создание малых КА по сравнению с крупногабаритными и тяжёлыми КА [1–6].

Данная тенденция особенно заметна при анализе количества запусков за последние несколько десятилетий, приведенных на рисунке 1 [7].

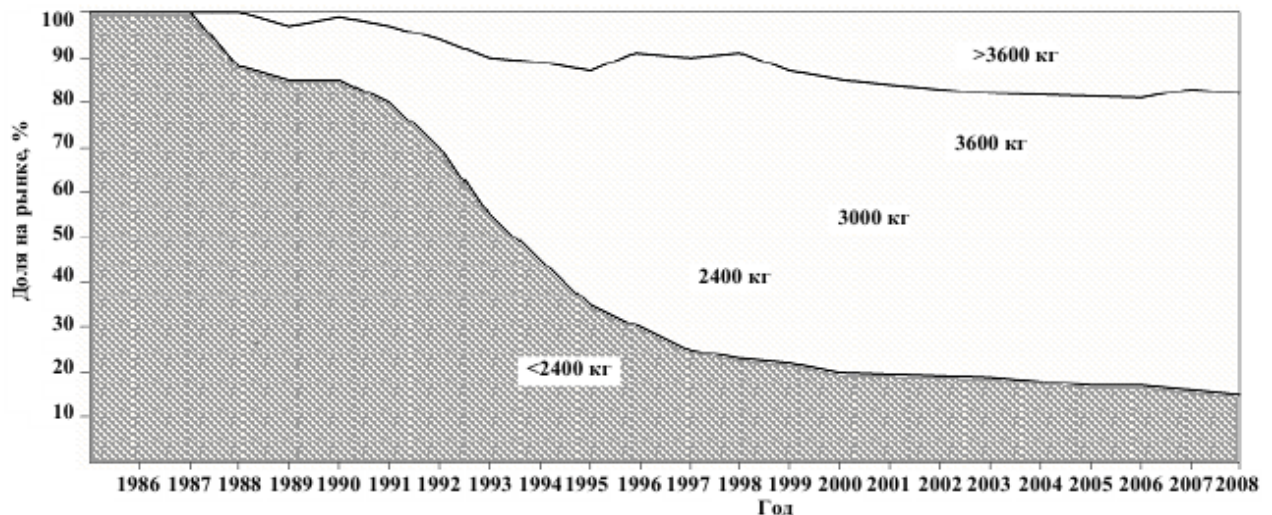


Рисунок 1 – Доля запущенных больших КА по годам

Как видно (см. рис. 1), доля запущенных больших и тяжёлых КА, начиная с середины 90-х годов, резко падает, а, соответственно, малых КА растёт.

В настоящее время этот процесс ускоряется значительно быстрее и, как показывает практика, на один запущенный большой КА приходится четыре–пять малых КА.

Малые КА — узкоспециализированные аппараты. Они, как правило, обладают негерметичным корпусом, на них используются компактные, не раскрываемые

солнечные батареи, а также многофункциональная целевая аппаратура и минимальное количество резервирующих элементов. Для их производства применяются инновационные материалы и достижения микроэлектроники. Благодаря всему вышеперечисленному такие аппараты имеют небольшие размеры и массу [8].

В [9] приведена классификация класса малых КА, которая ведётся по стартовой массе КА.

Малые КА обладают рядом преимуществ перед другими классами [10–13]:

- сравнительно малым сроком разработки (от трёх до пяти лет вместо 5–10 лет);
- удешевлением вывода на орбиту за счёт кластерных или попутных запусков;
- ценовая привлекательность и др.

Таким образом, благодаря ряду неоспоримых преимуществ, класс малых КА стремительно стал «завоевывать» космический сектор. Об этом свидетельствуют ряд успешно реализованных проектов по разработке и эксплуатации малых КА [14].

Целью данной работы является разработка миниатюрных антенн метрового и дециметрового диапазонов (УКВ) для построения бортовой антенной системы малых (стартовой массой от 100 до 500 кг) и сверхмалых (стартовой массой менее 10 кг) КА, обладающей невыступающей, малогабаритной конфигурацией.

Способы построения бортовых антенных систем КА

В настоящий момент существует несколько традиционных подходов к построению бортовой антенной системы КА.

Применение различных типов излучателей. В настоящий момент широкое применение в качестве бортовых антенн нашли спиральные антенны; вибраторные антенны; штыревые антенны; рупорные антенны; зеркальные антенны и др. [15, 16].

На рисунке 2 представлены бортовые антенны КА [17, 18].



Рис. 2. Бортовые антенны КА:

а) вибраторная антенна; б) спиральная антенна; в) рупорная антенна

Применение конструктивных решений. Для размещения бортовых АФУ на поверхности КА используют выносные элементы (штанги, кронштейны и т.д.) для вынесения антенн за пределы КА. Данный приём активно используется как на больших КА, так и на малых КА, например, как показано на рисунке 3.

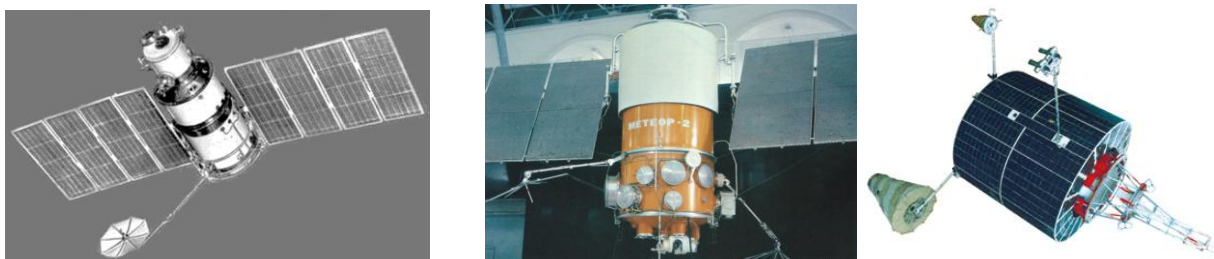


Рис. 3. Варианты применения выносных элементов:

а) КА «Метеор–1»; б) КА «Метеор–2»; в) КА «Стерх»

В некоторых случаях удастся разместить все бортовые антенны КА в едином исполнении, например, в виде антенной стойки, представленная на рисунке 4, которая была реализована на КА «Метеор».

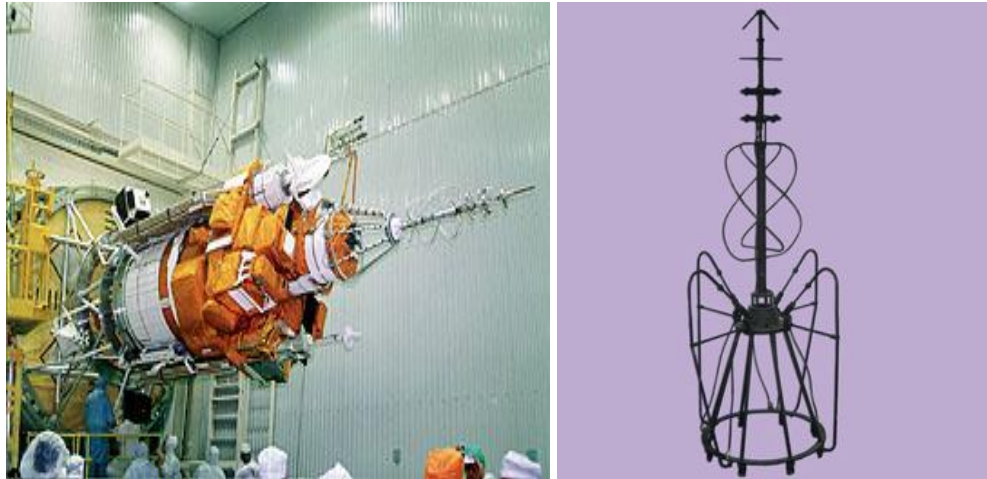


Рис. 4. Вариант построения антенной стойки:

а) в составе КА серии «Метеор»; б) общий вид антенной стойки

На рис. 4б) в едином исполнении представлены разные типы антенн. Комплекс представляет собой конструкцию, совмещающую в себе (сверху вниз): вибраторную турникетную антенну дециметрового диапазона бортовой телеметрической системы, рамочную директорную антенну дециметрового диапазона бортовой телевизионной системы, самофазированную четырёхзаходную спиральную антенну метрового диапазона и вибраторные антенны метрового диапазона радиоканалов бортовой командной системы и системы контроля орбиты. Рабочие частоты от 40 МГц до 600 МГц.

В работе [19] приведены результаты моделирования варианта использования солнечных батарей и гравитационной штанги в качестве бортовых антенн КА, т.е. предложен вариант использования в качестве бортовых антенн различных частей КА.

Применение печатных технологий. Стремительное развитие технологий производства интегральных схем привело к возможности построения ряда антенн с помощью применения печатных (планарных) технологий. Необходимо отметить ряд преимуществ, которыми обладают антенны, выполненные с помощью печатной технологии: высокая повторяемость размеров при серийном производстве; точность изготовления; малые масса и габариты; компланарная конструкция; технологичность; низкая стоимость при серийном выпуске и т.д.

Печатные технологии применяются при изготовлении спиральных антенн, микрополосковых антенн, фрактальных антенн, антенна Вивальди и др.

На рисунке 5 представлены бортовые антенны, выполненные с применением печатных технологий.

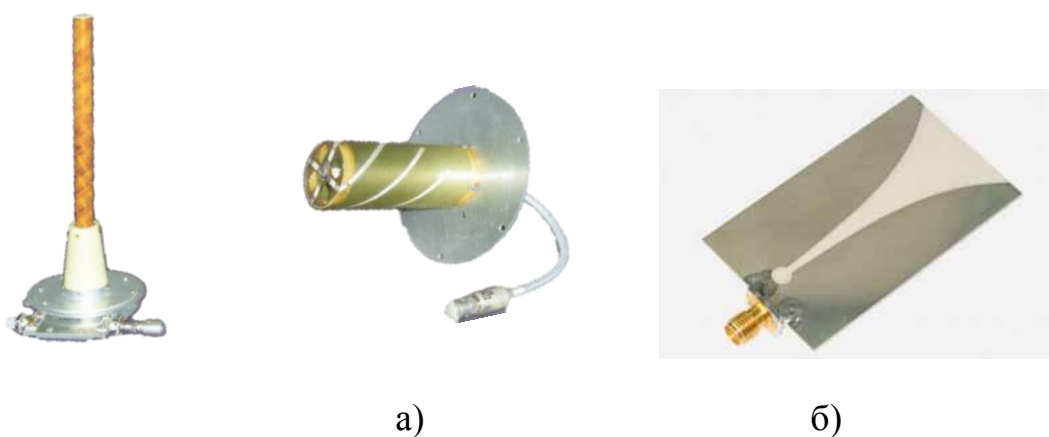


Рис. 5. Бортовые антенны, выполненные по печатным технологиям: а) спиральные антенны; б) излучатель Вивальди

Вариант построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малого и сверхмалого КА

Учитывая специфику бортовых АФУ КА, а также процесс миниатюризации всей космической техники, в настоящий момент возникает современная, актуальная

задача по разработке малогабаритной, невыступающей, надёжной, простой и в тоже время высокотехнологичной антенной системы малых и сверхмалых КА.

Рассмотрим применимость представленных ранее способов построения антенной системы КА относительно построения бортовой антенной системы малых и сверхмалых КА.

Конструктивное решение поставленной задачи несёт за собой ряд трудностей, которые заключаются в следующем.

Применение выносных элементов на борту КА приводит к возможности нераскрытия этих элементов, что в свою очередь способствует к не выведению бортовой антенны в рабочее положение. Тем самым есть вероятность невыполнения целевой задачи АФУ. Все это ведёт к снижению надёжности.

Применение антенной стойки не всегда может решить поставленную задачу, так как достаточно сложно разместить все бортовые антенны КА в едином конструктивном исполнении, что в свою очередь снижает надёжность и повышает сложность конструкции АФУ КА.

Вариант применения различных частей космического аппарата в качестве бортовых антенн в основном может закрыть вопрос по разработке низкочастотных бортовых АФУ (20 МГц).

Фрактальные антенны обладают достаточно сложной конструкцией и требуют определённых итераций при их производстве. Всё это приводит к усложнению конструкции и снижению надёжности.

Рассмотренные другие типы антенн также имеют свои недостатки в части выступающей конструкции и т.д.

Учитывая все вышесказанное, возник интерес к применению микрополосковых антенн (МПА) в качестве бортовых антенн для построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА [20]. Данный тип антенн обладает рядом неоспоримых преимуществ для построения указанной антенной системы малых КА, а именно:

- малогабаритной, невыступающей конструкцией;
- высокой технологичностью благодаря применению печатных технологий при изготовлении;
- простой конструкцией из-за минимального количества элементов, входящих в конструкцию самой антенны, что в свою очередь повышает надёжность;
- возможностью быстрого изготовления при серийном производстве благодаря простой конструкции, повторяемости характеристик и т.д.;
- низкой стоимости благодаря малой металлоёмкости и возможности быстрого изготовления.

МПА нашли широкое применение в бортовых навигационных (ГЛОНАСС, GPS, GLOBALSTAR) системах, системах связи, а также в различных наземных устройствах (навигаторы, мобильные телефоны и т.д.) [21–26].

Способы миниатюризации МПА

Как правило, широко представлен класс МПА с рабочей частотой от 1,6 ГГц и выше, в отличие от низкочастотных (менее 1 ГГц). Это обусловлено необходимостью миниатюризации таких антенн.

В ходе анализа научно–технической литературы выявлены следующие способы построения миниатюрных МПА [27–32]:

- за счёт увеличения диэлектрической проницаемости;
- за счёт увеличения толщины применяемого диэлектрика;
- использование многосвязных структур;
- формирование в металлизации антенного элемента вырезов (щелей);
- применение продольной свёртки топологии антенны;
- использование многослойной структуры диэлектрика.

Однако представленные выше способы имеют ряд недостатков: с увеличением значения диэлектрической проницаемости подложки растёт добротность антенны, а, следовательно, сужается полоса рабочих частот; увеличение толщины антенны несёт за собой конструктивные сложности размещения на поверхности КА и увеличение массогабаритных показателей; сложность применения из-за многослойности структуры подложки, необходимости согласования волнового сопротивления между слоями; сложностью изготовления и т.д.

Учитывая всё выше сказанное, предложен вариант применения антенны с закороченной конструкцией и с использованием металлизированного диэлектрика диэлектрической проницаемостью ϵ в пределах от 8 до 16 и тангенсом угла диэлектрических потерь $tg\delta$ от 10^{-3} до 10^{-5} [33]. Данный способ позволяет разрабатывать МПА УКВ диапазона, обладающие более простой и надёжной конструкцией, а также габаритами в 2–2,5 раза меньше по сравнению с существующими аналогами [34].

В качестве материала диэлектрика подложки выбор сделан в пользу применения фольгированного листового арилокса наполненного (ФЛАН), основные характеристики которого приведены в таблице 1 [35].

Таблица 1. Основные характеристики ФЛАН

| Характеристики материала | Обозначение материала | | | | | |
|---|-----------------------|----------|----------|----------|---------|---------|
| | ФЛАН-2,8 | ФЛАН-3,8 | ФЛАН-5 | ФЛАН-7,2 | ФЛАН-10 | ФЛАН-16 |
| Диэлектрическая проницаемость ϵ | 2,8±0,1 | 3,8±0,1 | 5,0±0,2 | 7,2±0,3 | 10±0,5 | 16±0,8 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ | 0,0015 | 0,0012 | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 |
| Плотность без фольги, г/см ³ | 1,2±0,1 | 1,8±0,1 | 1,55±0,1 | 1,85±0,1 | 2,1±0,1 | 2,6±0,1 |

Моделирование бортовой антенной системы малых и сверхмалых КА

Рассмотрим построение антенной системы сверхмалого КА, например «CubeSat».

Для обеспечения связи на борту сверхмалый КА «CubeSat» используется любительский диапазон спутниковой связи 435–438 МГц.

На рисунке 6 представлена разрабатываемая модель МПА дециметрового диапазона для работы в любительском диапазоне спутниковой связи (435–438 МГц).

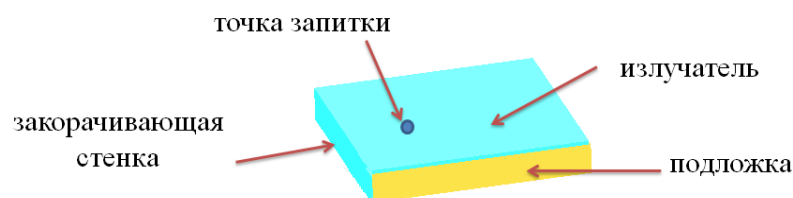


Рис. 7. Модель бортовой МПА

В ходе моделирования был выбран ФЛАН со значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon=10$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,0015$. Габариты

МПА антенны составили 59×59 мм при толщине подложки 8 мм. В работе [36] приведены полученные характеристики исследуемой модели антенны такие, как коэффициент стоячей волны (КСВ), ДН, коэффициент усиления (КУ).

На рисунке 8 представлен общий вид УКВ антенной системы малого КА «Ионосфера» [37].

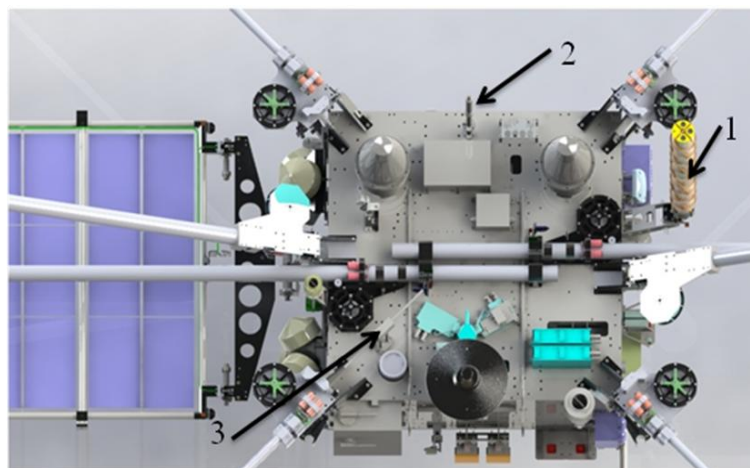


Рис. 8. Объемная модель малого КА «Ионосфера»:

1 – спиральная антенна (рабочая частота 137 МГц), 2 – штыревая антенна (рабочая частота 150 МГц), 3 – вибраторная антенна (рабочая частота 400 МГц)

В работе [38] представлены результаты моделирования бортовой антенной системы малого КА «Ионосфера» с применением миниатюрных УКВ МПА, как показано на рисунке 9.

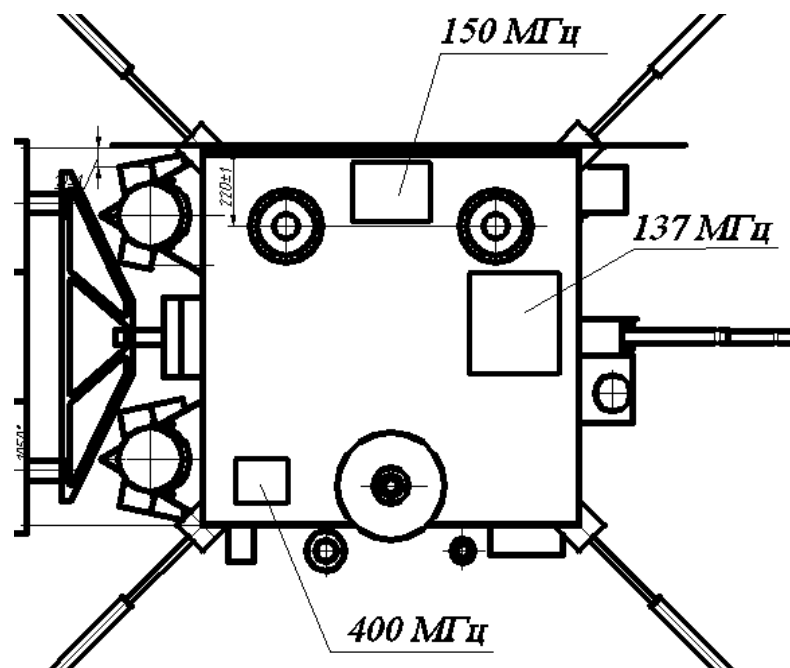


Рис. 9. Антенная система малого КА «Ионосфера», составленная из миниатюрных УКВ МПА

В ходе моделирования был также использован предложенный способ миниатюризации УКВ МПА [33], а также построены и исследованы модели МПА на рабочих частотах 137 МГц, 150 МГц и 400 МГц.

Полученные результаты удовлетворяют требованиям к бортовой антенной системе КА «Ионосфера».

Экспериментальное исследование

Измерение характеристик направленности бортовых МПА проводилось на территории антенного полигона АО «НИИЭМ» в полубезэховой камере.

В ходе измерений использовано следующее оборудование:

- измерительная антенна Пб–23А (эталонная);
- измеритель КСВ и затухания «Обзор 304/1» фирмы «ПЛАНАР» г. Челябинск;

- координатно–поворотное устройство;
- технологические кабели;
- программное обеспечение для антенных измерений.

Измерения характеристик направленности проводились в соответствии с программой и методикой для космической продукции двойного назначения.

На рисунке 10 представлена измерительная установка для проведения измерений с применением метода эталонной антенны [39].



Рис. 10. Фото измерительной установки

Изменение положения модели КА меняется с помощью координатно-поворотного устройства в пределах полного телесного угла.

МПА 435 МГц в масштабе 1×1 была размещена на корпусе КА, как показано на рисунке 11.



Рис. 11. Фото антенного макета сверхмалого КА «CubeSat» формата 1U с МПА 435 МГц

На рисунке 12 и 13 соответственно представлена зависимость КСВ исследуемой антенны от частоты и ДН макета.

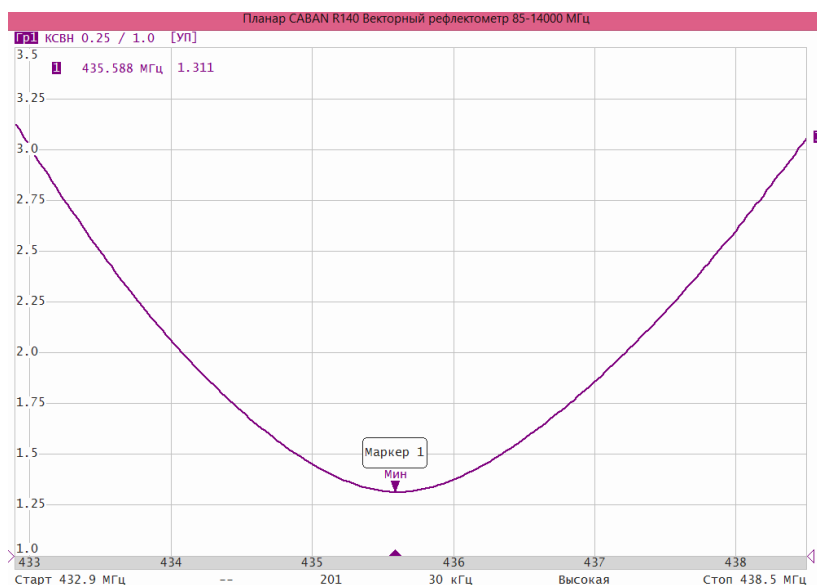


Рис. 12. КСВ МПА 435 МГц сверхмалого КА «CubeSat» формата 1U от частоты



Рис. 13. Ненормированная ДН макета МПА КА «CubeSat»

На рисунке 14 представлен макет бортовой антенны для малого КА «Ионосфера» [40]. При разработке макета применён метод подобия. На рисунке представлен макет МПА в масштабе 1×10 , а, соответственно методу подобия, рабочая частота в 10 раз больше, т.е. 1,5 ГГц в данном случае [41].



Рис.14. Макет МПА для КА «Ионосфера»

На рисунках 15 и 16 представлены характеристики исследуемой антенны.

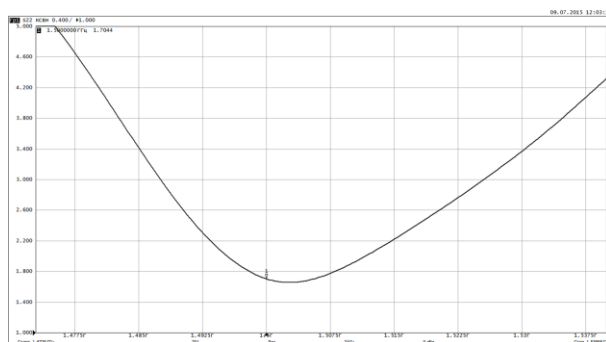


Рис. 15. КСВ макета МПА для КА «Ионосфера»

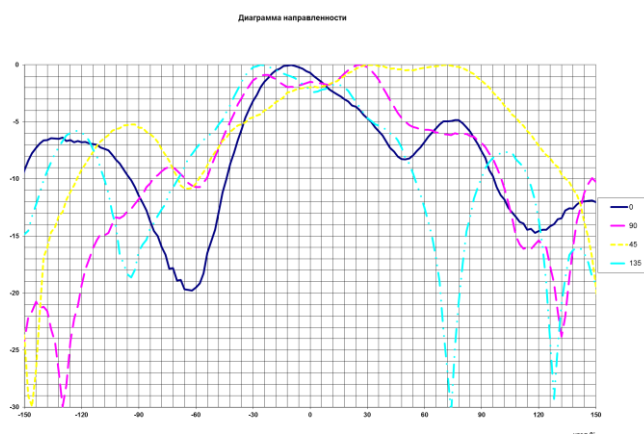


Рис. 16. Нормированная ДН макета МПА для КА «Ионосфера»

Заключение

В данной работе представлен вариант построения миниатюрной, малогабаритной, невыступающей УКВ антенной системы сверхмалых (стартовой массой менее 10 кг) и малых (стартовой массой от 100 кг до 500 кг) КА.

Разработанный и предложенный способ миниатюризации микрополосковых (печатных) антенн позволяет уменьшить габариты антенны в 2–2,5 раза по сравнению с существующими аналогами.

Данный способ миниатюризации не ухудшает характеристики направленности антенны (коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности, коэффициент усиления).

Выше перечисленные факторы позволяют расширить область применения микрополосковых (печатных) антенн УКВ диапазона в качестве бортовых антенн сверхмалых и малых КА.

Библиографический список

1. Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2005. Т. 102. С. 12 - 27.
2. Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А., Казинский Н.В., Кондранин Т.В., Негодяев С.С. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // Труды Московского физико-технического института. 2009. Т. 1. № 3. С. 14 - 22.
3. Гершензон В., Карпенко С. Малые спутники – провокация или перспективное направление? // Экология и жизнь. 2011. № 12 (121). С. 51 – 57.
4. Овчинников М.Ю. Малые мира сего // Компьютерра. 2007. № 15. С. 37 – 43.
5. Волков С.Н., Макриденко Л.А., Ходненко В.П. Малые космические аппараты НПП ВНИИЭМ. От концепции до воплощения в «металле» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2011. Т. 121. № 2. С. 3 – 8.
6. Макриденко Л.А., Шустов Б.М. Перспективные спутники ВНИИЭМ – новая ступень в развитии орбитальной космической техники // Российский космос. 2011. № 2 (62). С. 20 – 25.

7. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Ходненко В.П., Золотой С.А. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2010. Т. 114. № 1. С. 15 - 26.
8. Зинченко О.Н. Малые оптические спутники ДЗЗ // Ракурс. 2011. URL: http://www.racurs.ru/www_download/articles/Micro_Satellites.pdf
9. Лукьященко В.И., Саульский В.К., Шучев В.А. и др. Международные тенденции создания и эксплуатации малых космических аппаратов // III Международная конференция - выставка «Малые спутники, новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке», Королёв, Московская область, 27–31 мая, 2002. Кн. 1. С. 332 - 348.
10. Пичурин Ю.Г. Анализ состояния работ по МКА наблюдения и возможностей использования их в интересах мониторинга природной среды // Труды НИИ космических систем. 2000. URL: http://www.edurus.ru/edunauka/politika/255113.htm#.WvSTT_mFPIU
11. Минаев И.В. Особенности создания космической техники в современных условиях. Часть 1. Общие положения // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2010. Т. 118. № 5. С. 29 – 22.
12. Минаев И.В. Особенности создания космической техники в современных условиях. Часть 2. Концептуальные основы анализа рисков // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 127. № 2. С. 15 – 20.
13. Кириченко Д.В., Половников В.И. Низкоорбитальная космическая система наблюдения за космическим мусором на базе группировки малых космических аппаратов // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 3. С. 19 - 22.

14. Макриденко Л.А. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1. – М.: ВНИИЭМ, 2011. – 110 с.
15. Кондратьева С.Г. Многофункциональная бортовая антенная решетка интегрированного радиоэлектронного комплекса // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29560>
16. Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Крупноапертурный излучатель для многолучевой антенны спутниковой связи // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29552>
17. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Результаты лётных испытаний антенно-фидерных устройств телекомандной системы КА «Канопус–В» № 1 и Белорусского КА и пути усовершенствования их характеристик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 4 (16). С. 5 – 12.
18. Bocharov V.S., Generalov A.G., Gadzhiev E.V. Antenna–feeder devices in the development of OJSC 'НИЕМ' // 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, Istra, Moscow Region, 2013, pp. 46 – 47.
19. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Варианты построения бортовых антенн для зондирования поверхности из космоса // Антенны. 2015. № 4 (215). С. 3 – 8.
20. Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенных систем космических аппаратов // Труды МАИ. 2014. № 76. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=50113>

21. Овчинникова Е.В., Соколов А.А. Двухдиапазонная антенная решётка с косеканской диаграммой направленности // Антенны. 2011. № 4. С. 14 – 20.
22. Князев Н.Г., Ушко И.В., Сагач В.Е., Курдюмов О.А., Лопатко О.Е., Яскин Ю.С. Резонансная антенна. Патент РФ на изобретение № 2620195. Бюл. № 15, 19.02.2016.
23. Авдонин В.Ю., Бойко С.Н., Исаев А.В., Королев Ю.Н. Микрополосковая приемная активная антенна круговой поляризации. Патент на полезную модель № 116698. Бюл. № 15, 06.12.2011.
24. Жексенов М.А., Печурин В.А., Волченков А.С. Антенная решетка с печатными излучателями для БПЛА // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=25385&PAGEN_2=2
25. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А. Бортовые активные антенные решётки с цифровой обработкой сигнала. Перспективы развития // Труды 21-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 12-16 сентября 2011, С. 17 – 18.
26. Овчинникова Е.В., Рыбаков А.М. Печатная антенная решетка для бортовой радиолокационной станции сантиметрового диапазона // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29558>
27. Петров А.С. Оценка характеристик миниатюрных печатных антенн // Антенны. 2013. № 3 (190). С. 22 – 29.
28. Чебышев В.В. Микрополосковые антенны в многослойных средах. – М.: Радиотехника, 2007. - 160 с.

29. Бойко С.Н., Косякин С.В., Кухаренко А.С., Яскин Ю.С. Миниатюризация антенных модулей навигационной аппаратуры спутниковых навигационных систем // Антенны. 2013. № 12 (199). С. 38 – 43.
30. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Папилов К.Б. Малогабаритные печатные антенны круговой поляризации // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 8. С. 1 – 27.
31. Елизаров А.А., Закирова Э.А. Микрополосковая спиральная антенна с двусторонней круговой поляризацией. Патент на полезную модель № 133655. Бюл. № 29, 28.02.2013.
32. Нефёдов Е.И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. – М.: Академия, 2010. - 320 с.
33. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Способ создания микрополосковых антенн метрового диапазона и устройство, реализующее этот способ. Патент на изобретение № 2583334. Бюл. № 13, 16.09.2014.
34. Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюрны бортовые антенны // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 159. № 4. С. 31 - 41.
35. 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.
36. Гаджиев Э.В. Миниатюрные антенны для малых космических аппаратов «CubeSat» // IV научно-техническая конференция «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем» ИСС им Решетнёва. Тезисы докладов. (Красноярск, 23-25 августа 2017). - Красноярск: Изд-во «Sitall», 2017. С. 27 - 29.

37. Захаренко А.Б., Федотов А.Ю., Телепнёв П.П. Выбор высоты расположения экспериментальной установки для наземного натурального эксперимента с антенной космического ионозонда // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2016. Т. 155. № 6. С. 28 – 33.
38. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюризация антенной системы космического аппарата «Ионосфера» // Антенны. 2015. № 3 (214). С. 32 – 38.
39. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарёв Л.И. Устройства СВЧ и антенны. - М.: Радиотехника, 2008. – 384 с.
40. 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.
41. Пригода Б.А., Кокунько В.С. Антенны летательных аппаратов. - М.: Воениздат, 1964. - 120 с.