

МИНИАТЮРНЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ CUBESAT

А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев

АО «Научно-исследовательский институт электромеханики»
Российская Федерация, 143502, Московская область, г. Истра, ул. Панфилова, 11
E-mail: otd24@niiem.ru

В настоящее время наблюдается активный процесс миниатюризации всей космической техники, включая бортовые системы и комплексы. Бортовые антенно-фидерные устройства также затронул процесс миниатюризации. Учитывая специфику бортовых антенн, появляется актуальная, современная задача по разработке малогабаритной, невыступающей, надёжной, простой и высокотехнологичной антенной системы малых космических аппаратов.

Цель данной статьи заключается в возможности показать преимущества применения микрополосковых (печатных) антенн, изготовленных с помощью печатных технологий, для решения задачи по проектированию малогабаритной, невыступающей бортовой антенной системы малых космических аппаратов. Данный тип антенн обладает малой массой и объёмом, низкой стоимостью, простой и надёжной конструкцией и т. д.

Рассмотрен вариант построения бортовой антенной системы для применения на сверхмалом космическом аппарате CubeSat. Представлены основные типы конструкции данных космических аппаратов.

Предложены и подробно представлены конструкция разработанной антенны и применяемый материал в качестве диэлектрика подложки. Подобный подход позволил уменьшить габариты бортовой антенны в 2–2,5 раза по сравнению с существующими аналогами.

С помощью системы автоматизированного проектирования было осуществлено электродинамическое моделирование. Показаны результаты разработки модели микрополосковой (печатной) антенны дециметрового диапазона с помощью метода конечных элементов. Получены и оценены основные параметры модели, такие как коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности и усиление. Также показано влияние корпуса сверхмалого космического аппарата CubeSat на указанные параметры.

Затем осуществлено макетирование бортовой микрополосковой (печатной) антенны. Измерения проводились с помощью метода эталонной антенны в АО «НИИЭМ». Результаты измерения коэффициента стоячей волны, диаграммы направленности и усиления приведены в статье. Показано хорошее совпадение результатов, полученных в ходе моделирования и макетирования.

Таким образом, предложена и разработана малогабаритная, невыступающая бортовая антенна дециметрового диапазона для сверхмалого космического аппарата CubeSat.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая антенна, микрополосковая антенна, коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

Siberian Journal of Science and Technology. 2018, Vol. 19, No. 2, P. 259–270

MINIATURE ANTENNAS FOR CUBERSAT

A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev

JSC “Research Institute for Electromechanics”
11, Panfilova Str., Istra, 143502, Russian Federation
E-mail: otd24@niiem.ru

At present, there is an active process of miniaturization of whole space technology, including on-board equipment. On-board antenna-feeder devices also considered the process of miniaturization. Considering number of features of on-board antennas, there is an actual, modern task of developing a small-sized, low-profile, reliable, simple and high-tech antenna system of small spacecrafts.

The purpose of this paper is to show the advantage of using microstrip antennas designed by printing technology in solving the problem of design small-sized, low-profile on-board antenna systems for small spacecrafts. These types of antenna have a low mass, volume, cost of the production, simplicity of construction etc.

The variant of design on-board antenna system of CubeSat is considered. The main types of the construction of these spacecraft are presented.

The design of the antenna and the material used as dielectric substrate is proposed and presented. Such an approach allowed reducing the size of the onboard antenna in 2–2.5 times in comparison with existing analogues.

With the using of computer aided design electrostatics simulation was held. The results of design of model of an UHF-band on-board microstrip antenna using finite element method are shows. The basic model parameters such as voltage standing-wave ratio, radiation pattern, and gain during the simulation were obtained and evaluated. Also the influence of case of CubeSat to these parameters is shows.

Then designed the layout of the antenna is presented. The measurements were carried out using the method of the reference antenna in the JSC “НИИМ”. The results of measurement of voltage standing-wave ratio, radiation pattern and gain are given in this paper. The good agreement between the results obtained during simulation and prototyping are presented.

Thus, in this article a small-sized, low-profile UHF-band on-board antenna for CubeSat is proposed and developed.

Keywords: spacecraft, on-board antenna, microstrip antenna, voltage standing-wave ratio, radiation pattern, gain.

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-259–270

Введение. В настоящее время наблюдается активная тенденция по разработке и введению в эксплуатацию малых космических аппаратов (КА) вместо больших КА.

Малые КА обладают рядом преимуществ перед другими классами КА:

- сравнительно малый срок разработки (от трёх до пяти лет вместо пяти-десяти лет);

- удешевление вывода на орбиту за счёт кластерных или попутных запусков;

- возможность оперативного и скрытного запуска из любой точки земного шара с помощью ракетносителя подземного, воздушного базирования при высокой оперативности подготовки к запуску [1];

- технологичность создания, отвечающая стратегии сокращения расходов и риска [2; 3];

- возможность быстрой модификации для решения широкого круга задач с различным целевым назначением;

- снижение степени влияния спутниковой платформы на работу полезной нагрузки из-за меньшего собственного гравитационного, электромагнитного и газового (внешняя собственная атмосфера) фона;

- экономическая эффективность целевого использования на высотах функционирования до 1000 км и особенно на высотах 200–500 км, на которых срок активного существования других классов КА, например тяжёлых КА, без применения соответствующих средств коррекции орбиты достаточно мал;

- возможность утилизации в случае выхода из строя за счёт полного или частичного сгорания КА в верхних слоях атмосферы, т. е. простой способ утилизации объекта, что, в свою очередь, ведёт к уменьшению космического мусора на орбите и околоземного пространства [4];

- ценовая привлекательность.

Например, при запуске ракетносителя «Союз-2.1а» 14 июля 2017 г. с космодрома Байконур были выведены одновременно 73 малых отечественных и зарубежных КА: КА «Канопус-В-ИК», КА «Искра-МАИ-85» и др. [5], а на рис. 1 представлено их размещение на ракетносителе.

Таким образом, появился новый класс КА – малые КА, классификация которых приведена в табл. 1.

Миниатюризация космической техники привела и к миниатюризации бортовой антенной системы [6].

Таблица 1

Классификация класса малых КА по стартовой массе

№ п/п	Класс КА	Масса КА, кг
1	Фемто-	До 0,1
2	Пико-	От 0,1 до 1
3	Нано-	От 1 до 10
4	Микро-	От 10 до 100
5	Мини-	От 100 до 500
6	Малый	От 500 до 1000

В настоящий момент, учитывая всё вышесказанное, существует острая потребность в малогабаритных, невыступающих антеннах для класса малых КА [7; 8].

Целью данной статьи является разработка малогабаритной, невыступающей антенной системы для класса сверхмалых КА CubeSat.

Основные проблемы. CubeSat – формат сверхмалых КА для исследования космоса. КА CubeSat обычно имеют объём до 1 литра и массу, не превышающую 1,33 кг. Относительная лёгкость создания и небольшая стоимость сделала такие спутники доступными для массового производства. В табл. 2 приведены характеристики данного класса сверхмалых КА.

Таблица 2

Размеры и вес сверхмалых КА CubeSat

Обозначение	Размеры	Вес
1U	100×100×113,5 мм	До 1,33 кг
2U	100×100×226,5 мм	До 2,67 кг
3U	100×100×340,5 мм	До 4 кг
4U	100×100×533,5 мм	До 5,33 кг
5U	100×100×665,5 мм	До 6,67 кг
6U	100×200×340,5 мм	До 8 кг

На рис. 2 и 3 представлены примеры конструкций КА CubeSat [9; 10].

Традиционно в качестве бортовых АФУ КА используются различные типы антенн: спиральные, вибраторные, рупорные, щелевые, зеркальные, открытый конец волновода и др. [11].

Так как площадь поверхности КА, предназначенная для установки АФУ, например, для КА типа CubeSat, составляет не более 10×10 см (табл. 2), то необходимо использовать такой тип антенны, который удачно размещался бы на поверхности. В свою очередь, необходимо также обеспечить приемлемые электрические характеристики антенной системы малого КА [12].



Рис. 1. Ракетноситель «Союз-2.1а» с малыми КА (дата запуска – 14.07.2017 г.)

Fig. 1. The rocket carrier “Soyuz-2.1 a” with small spacecrafts (launch date 14.07.2017)

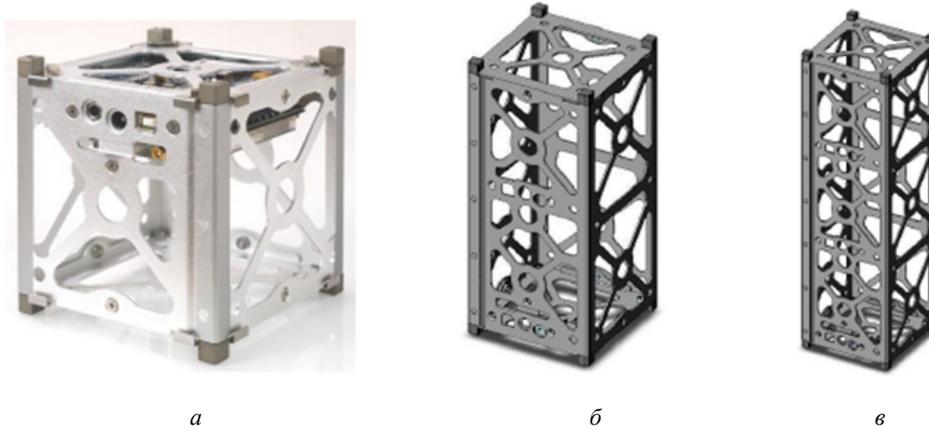


Рис. 2. Каркасная конструкция КА CubeSat:
a – размером 1U; *б* – размером 2U; *в* – размером 3U

Fig. 2. The frame construction of CubeSat 1U, 2U, 3U

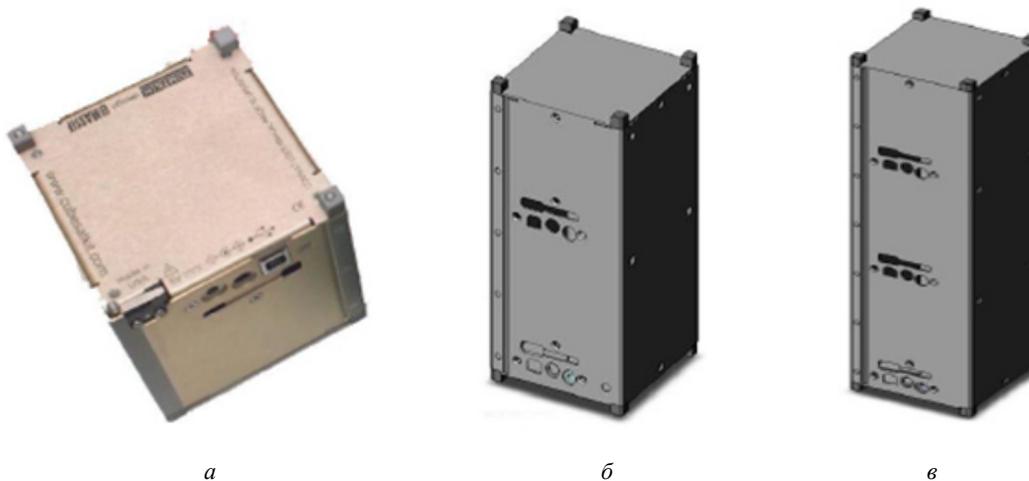


Рис. 3. Конструкция КА CubeSat с применением сплошных стенок:
a – размером 1U; *б* – размером 2U; *в* – размером 3 U

Fig. 3. The construction of CubeSat 1U, 2U, 3U with using of solid walls

Вариант построения миниатюрной бортовой антенной системы КА CubeSat. Проведен анализ научно-технической литературы по изысканию путей построения малогабаритной, невыступающей антенной системы для класса малых КА [13–16].

В ходе обзора был сделан выбор в пользу микрополосковых (печатных) антенн (МПА) [17].

МПА, как правило, представляют собой многослойные конструкции, состоящие из проводящей подложки, одного или нескольких слоёв диэлектрика и помещённых на них плоских проводящих излучающих элементов, как показано на рис. 4 [18; 19].

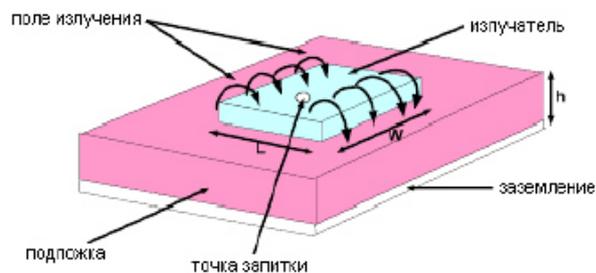


Рис. 4. Структура МПА

Fig. 4. Structure of microstrip antenna

МПА способны излучать энергию с линейной, круговой и эллиптической поляризацией, допускают удобные конструктивные решения для обеспечения одно-, двух- и многочастотных режимов, позволяют легко объединить несколько излучателей в антенную решётку и разместить их на поверхности сложной формы. Также МПА обладают высокими аэродинамическими, механическими и температурными характеристиками.

Данный тип антенн обладает рядом неоспоримых преимуществ для построения указанной антенной системы малых КА, а именно:

- малогабаритной, невыступающей конструкции;
- обеспечивают заданные требования к бортовым антеннам, составляющим антенную систему малых КА [12];
- высокой технологичностью благодаря применению печатных технологий при изготовлении [20];
- 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.

Результаты моделирования. При моделировании бортовых антенн сверхмалого КА CubeSat был применён метод конечных элементов [21].

Как правило, для осуществления связи с бортом применяются частоты 435–438 МГц любительского УКВ-диапазона спутниковой связи. Бортовая антенная система включает в себя и навигационную антенну (ГЛОНАСС, GPS).

В работах [22; 23] предложены и подробно представлены конструкция разработанной антенны и применяемые материалы в качестве диэлектрика подложки. Подобный подход позволил уменьшить габариты бортовой антенны в 2–2,5 раза по сравнению с существующими аналогами.

На рис. 5 представлены исследуемые электродинамические модели связанной бортовой антенны сверхмалого КА.

Как видно на рис. 5, моделирование осуществлялось на поверхности КА трёх форматов (1U, 2U и 3U), так как это наиболее используемые в настоящий момент форматы сверхмалого КА CubeSat. Габариты модели составили 59×59 мм, толщина – 8 мм, материал диэлектрика – ФЛАН-10 ($\epsilon = 10$; $\text{tg } \delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$). При построении данной модели также был использован предложенный ранее способ миниатюризации УКВ МПА [23].

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента стоячей волны (КСВ) модели антенны от частоты.

Как видно, влияние габаритов корпуса КА на КСВ бортовой антенны незначительное. С увеличением габаритов наблюдается смещение частоты вправо по частотной оси. Однако благодаря хорошему согласованию за счёт подбора места расположения питающего штыря (точки возбуждения) [24], на рабочих частотах 435–438 МГц КСВ минимален (рис. 6), что соответствует предъявляемым требованиям по согласованию к бортовым антеннам малых КА [12].

На рис. 7 представлены диаграммы направленности (ДН) модели антенны, где видно, что в пределах рабочих углов $\pm 60^\circ$, согласно предъявляемому требованию к ДН антенн малых КА [12], изменение габаритов самого КА незначительно влияет на ширину и форму ДН бортовой МПА и составляет менее 1 дБ (рис. 7).

На рис. 8 показан коэффициент усиления (КУ) модели антенны.

Видно, что в пределах рабочих углов $\pm 60^\circ$, согласно предъявляемому требованию к КУ антенн малых КА [12], изменение габаритов самого КА незначительно влияет на КУ бортовой МПА и составляет менее 0,5 дБ (рис. 8).

Результаты моделирования бортовой связанной МПА сверхмалого КА CubeSat сведены в табл. 3.

Разработанная МПА излучает линейную поляризацию. Данный выбор сделан из следующих соображений. При приёме на круговую поляризацию в случае неориентированного полёта приём с противоположной поляризацией невозможен. А антенна с линейной поляризацией даёт ослабление сигнала только 3 дБ. Также предложенная антенна может быть использована не только как связанная, но и в качестве телеметрической и телекомандной.

Таким образом, разработана малогабаритная, невыступающая, связанная бортовая МПА сверхмалого КА CubeSat с приемлемыми характеристиками направленности [25].

Экспериментальное исследование. Измерение характеристик направленности бортовых МПА проводилось на территории антенного полигона АО «НИИЭМ» в полубезэховой камере [26].

В ходе измерений использовано следующее оборудование:

- измерительная антенна П6-23А (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 рис. 9 представлена измерительная установка для проведения измерений с применением метода эталонной антенны [27].

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 рис. 10.

На рис. 11 представлена зависимость КСВ исследуемой антенны от частоты. На рис. 12 приведены ДН антенны.

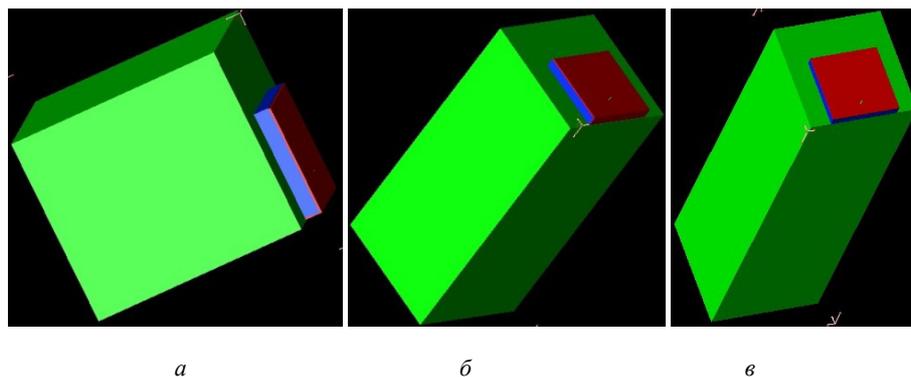


Рис. 5. Модели бортовой связанной МПА сверхмалого КА CubeSat:
а – формата 1U; б – формата 2U; в – формата 3U

Fig. 5. Models of on-board connected microstrip antenna of CubeSat 1 U, 2U, 3U

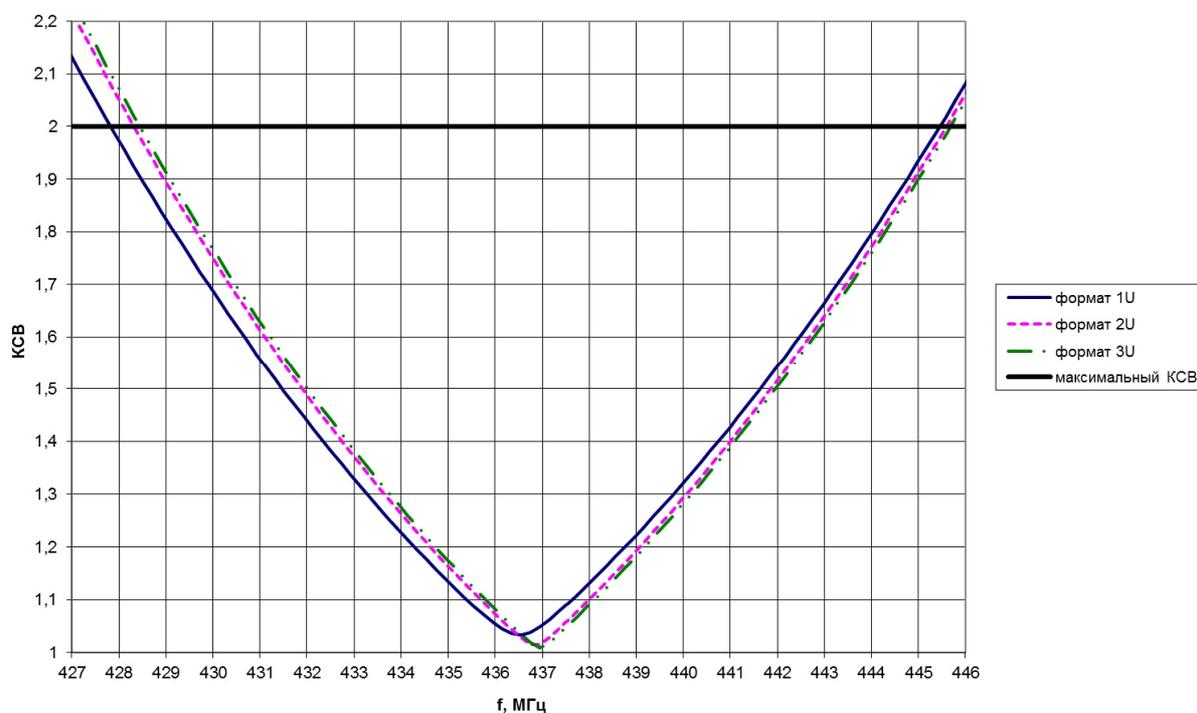


Рис. 6. КСВ модели бортовой связанной МПА сверхмалого КА CubeSat

Fig. 6. VSWR of model of on-board connected microstrip antenna of CubeSat

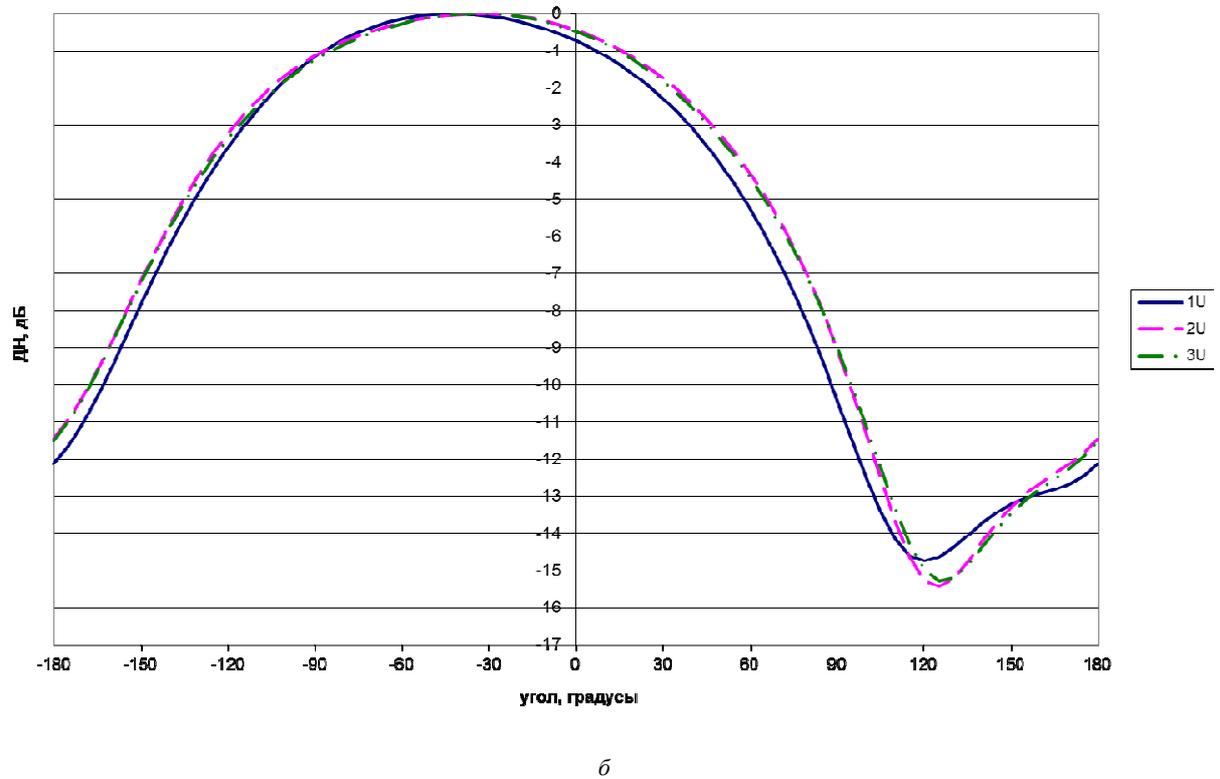
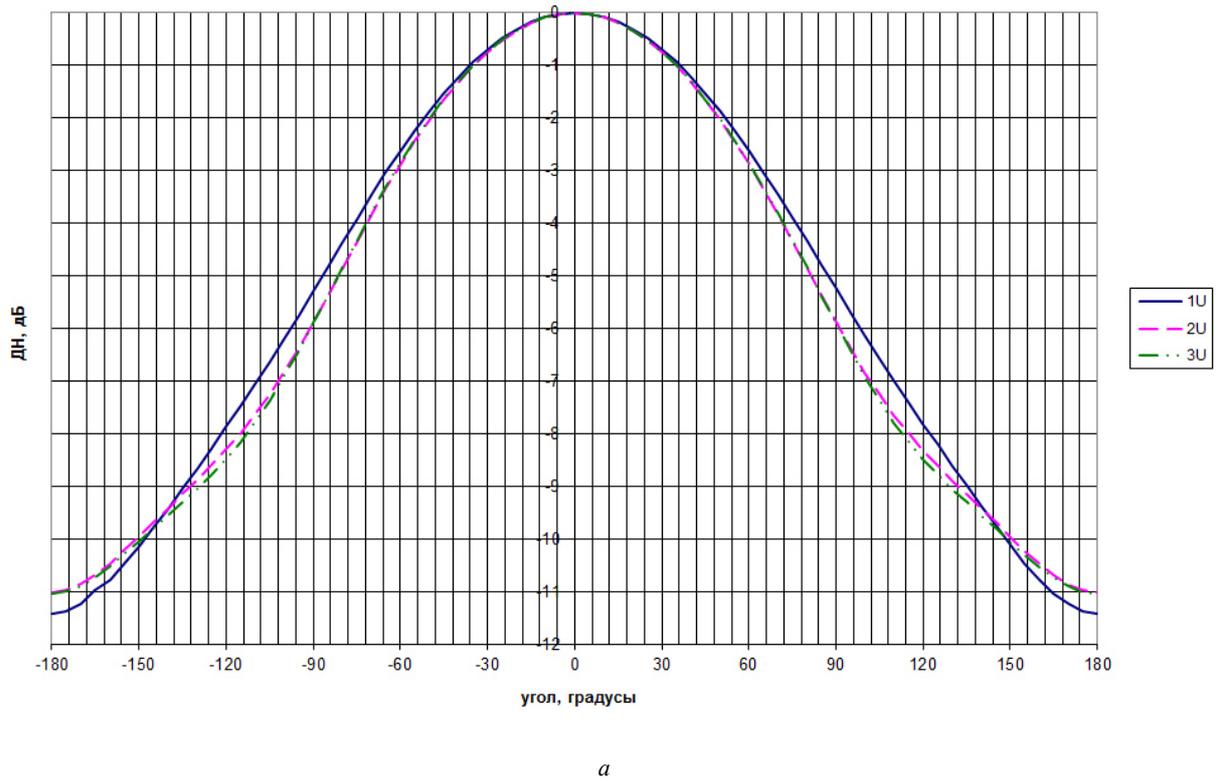
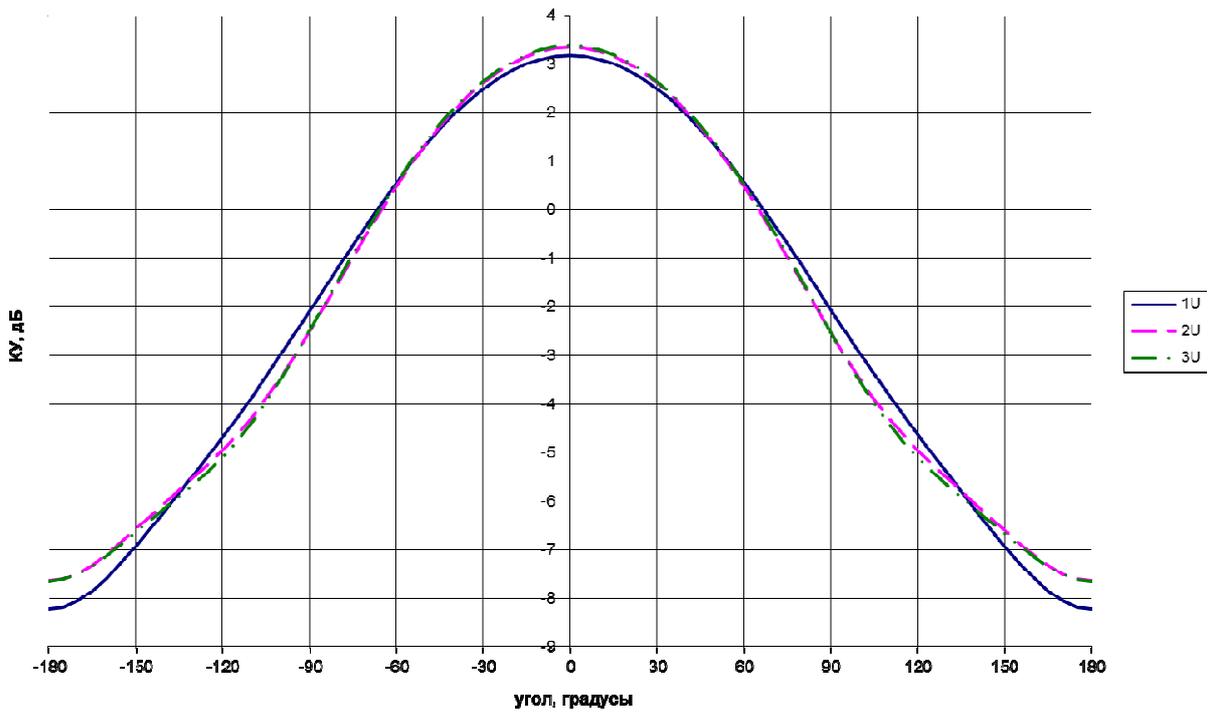
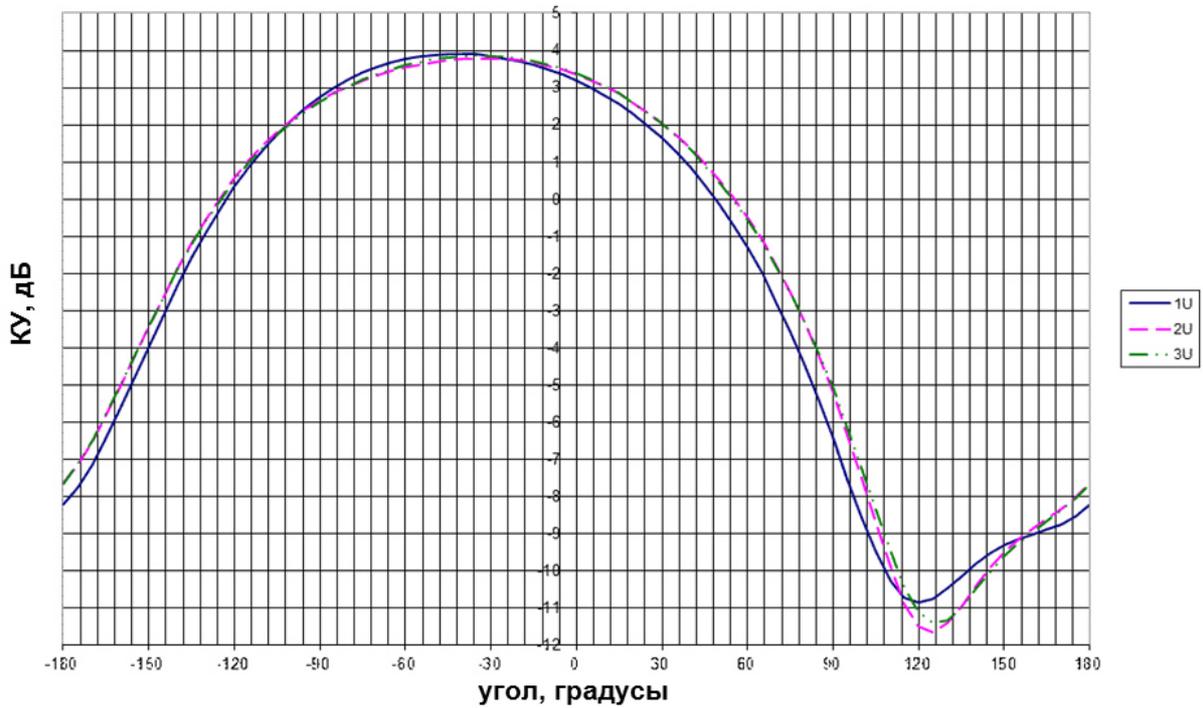


Рис. 7. ДН модели бортовой связанной МПА сверхмалого КА CubeSat:
a – при $\varphi = 0^\circ$; *б* – при $\varphi = 90^\circ$

Fig. 7. Radiation pattern of model of on-board connected microstrip antenna of CubeSat:
a – under $\varphi = 0^\circ$; *b* – under $\varphi = 90^\circ$



a



б

Рис. 8. КУ модели бортовой связанной МПА сверхмалого КА CubeSat:
a – при $\varphi = 0^\circ$; *б* – при $\varphi = 90^\circ$

Fig. 8. Gain of model of on-board connected microstrip antenna of CubeSat :
a – under $\varphi = 0^\circ$; *b* – under $\varphi = 90^\circ$

Результаты моделирования МПА сверхмалого КА CubeSat

Параметры оценки	Предъявляемые требования			Полученный результат		
	1U	2U	3U	1U	2U	3U
Габариты, см	Не более 10×10×1			Не более 5,9×5,9×0,8		
Частотный диапазон, МГц	435–437 МГц			435–437 МГц		
КСВ	Не более 2			Не более 1,1		
Рабочая полоса частот, МГц	Не менее 3			18	17	25
ДН	Полусфера			±180° по уровню -11 дБ		
КУ, дБ	В рабочем секторе углов			+3,3 дБ в направлении максимума излучения и +0,5 дБ в секторе углов ±60°		



Рис. 9. Фото измерительной установки

Fig. 9. The photo of the measuring system



Рис. 10. Фото антенного макета сверхмалого КА CubeSat формата 1U с МПА 435 МГц

Fig. 10. The photo of the antenna layout

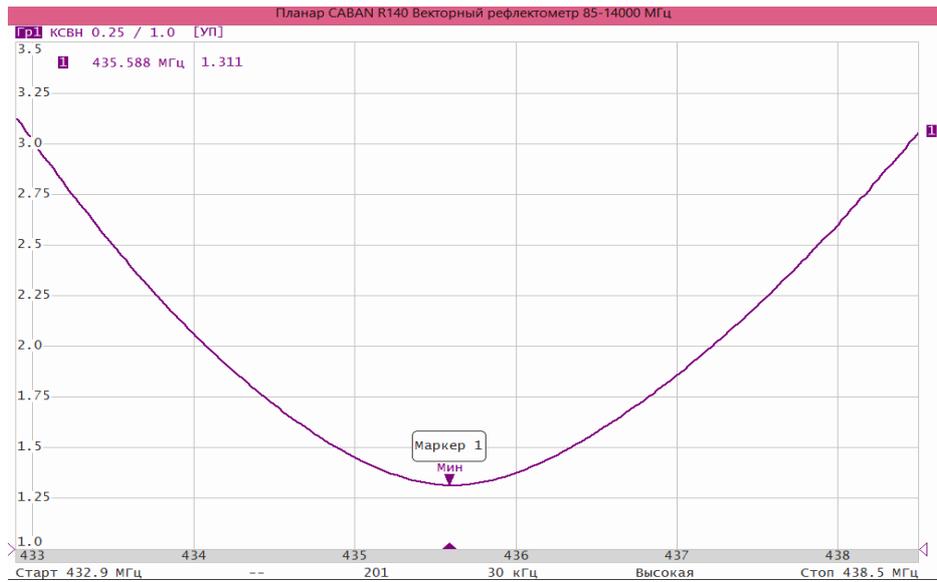


Рис. 11. Зависимость КСВ МПА 435 МГц сверхмалого КА CubeSat формата 1U от частоты

Fig. 11. VSWR of 435 MHz microstrip antenna of CubeSat 1U

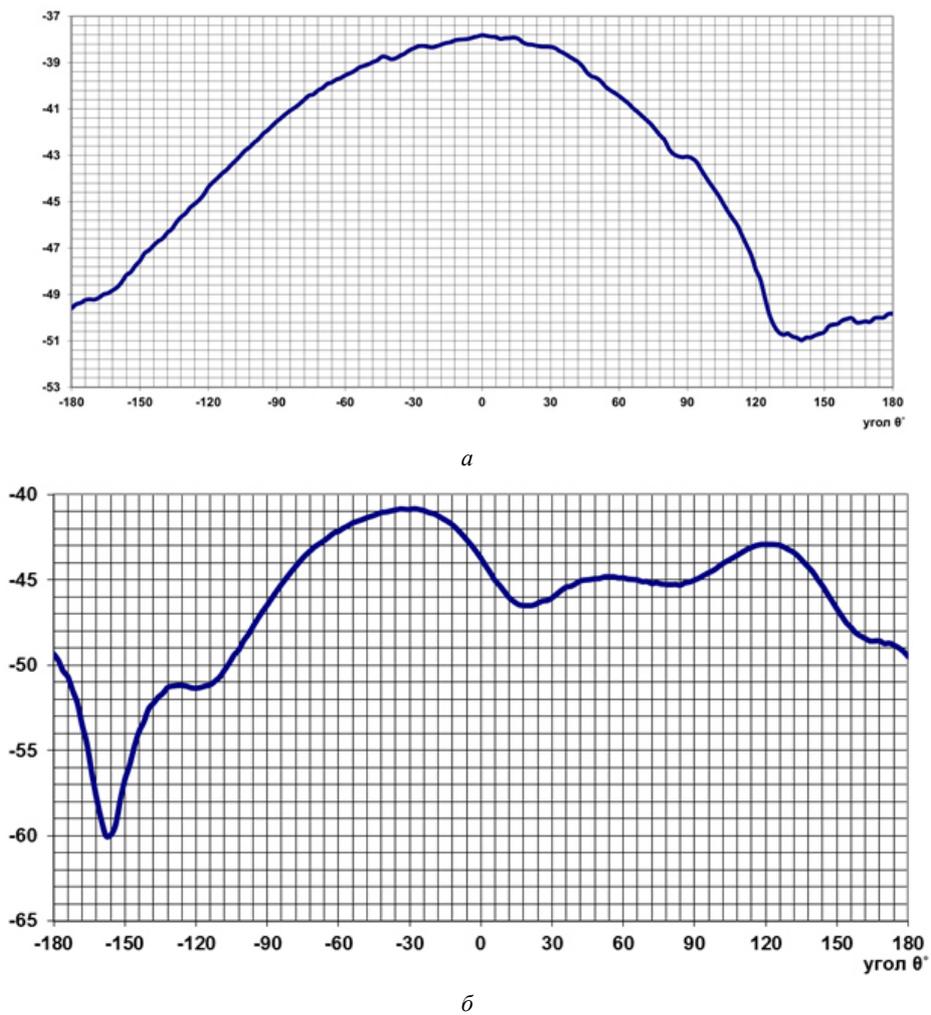


Рис. 12. Ненормированная ДН бортовой МПА сверхмалого КА CubeSat формата 1U:
 $a - \varphi = 0^\circ$; $b - \varphi = 90^\circ$

Fig.12. The non-normalized radiation pattern of 435 MHz microstrip antenna of CubeSat 1U:
 $a - \varphi = 0^\circ$; $b - \varphi = 90^\circ$

Из представленных результатов (рис. 12) видно, что измеренные ДН антенны имеют искажённый (изрезанный) вид, что в свою очередь вызвано влиянием корпуса сверхмалого КА CubeSat формата 1U, размещённых вокруг бортовой антенны элементов конструкции малого КА (см. рис. 10), а также конструктивными особенностями самой МПА.

В ходе экспериментального исследования были получены следующие значения КУ бортовой МПА 435 МГц сверхмалого КА CubeSat:

- КУ = 3,2 дБ в направлении максимума излучения;
- КУ = 0,5 дБ в рабочем секторе углов $\pm 60^\circ$.

Заключение. Разработанная антенна (см. рис. 10) предназначена для применения в качестве вспомогательной связной антенны, которая размещается вместе с навигационной антенной на одной стороне сверхмалого КА CubeSat благодаря малым габаритам. Основная связная антенна располагается на противоположной стороне аппарата, направленной на Землю. Такое расположение бортовых антенн позволяет обеспечивать связь между КА и наземными пунктами приёма в случае неориентированного полёта.

Таким образом, в работе предложен вариант построения бортовой антенной системы сверхмалого КА типа CubeSat с помощью МПА. Представлены результаты электродинамического моделирования и натурального эксперимента. Показано хорошее совпадение результатов моделирования и эксперимента [28].

Библиографические ссылки

1. Пичурин Ю. Г. Анализ состояния работ по МКА наблюдения и возможностей использования их в интересах мониторинга природной среды // Труды НИИ космических систем. 2000.
2. Минаев И. В. Особенности создания космической техники в современных условиях. Ч. 1. Общие положения. Вопросы электромеханики // Труды НПП ВНИИЭМ. 2010. Т. 118, № 5. С. 29–22.
3. Минаев И. В. Особенности создания космической техники в современных условиях. Ч. 2. Концептуальные основы анализа рисков. Вопросы электромеханики // Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 127, № 2. С. 15–20.
4. 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.
5. Государственная корпорация по космической деятельности РОСКОСМОС. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/23687/> (дата обращения: 31.10.2017).
6. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Миниатюризация бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов // Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов : сб. тезисов научно-технического семинара. Истра : ОАО «НИИЭМ», 2013. С. 51–54.
7. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенных систем малых космических аппаратов // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Научный совет РАН по распространению радиоволн. 2014. С. 114–118.
8. Гаджиев Э. В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенно-фидерных систем космических аппаратов [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2014. № 76. С. 13. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=50113> (дата обращения: 31.10.2017).
9. CubeSat Design Specification Rev. 12. California State Polytechnic University.
10. Leonard David. Cubesats: Tiny Spacecraft, Huge Payoffs. Space.com. 2004.
11. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Antenna-feeder devices in the development of OJSC 'НИИЭМ' // 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. Istra (Moscow region), 2013. P. 46–47.
12. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Проблемы построения антенной системы малых космических аппаратов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2016) : материалы 26-й Междунар. Крымской конф. : в 13 т. 2016. С. 1058–1064.
13. Варианты построения бортовых антенно-фидерных устройств для малых космических аппаратов / В. С. Бочаров [и др.] // Механика, управление и информатика. 2015. Т. 7, № 4 (57). С. 54–60.
14. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Антенны для малых космических аппаратов // Создание малых космических аппаратов. Актуальные проблемы и пути их решения : материалы круглого стола в рамках конференции «Иосифьяновские чтения». 2016. С. 190–197.
15. Варианты построения перспективных бортовых антенных систем космических аппаратов нано- и микроклассов / А. Г. Генералов [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2016) : материалы 26-й Междунар. Крымской конф. : в 13 т. 2016. С. 1051–1057.
16. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Построение миниатюрной антенной системы малых и сверхмалых КА // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий : сб. тр. VIII Всерос. науч.-техн. конф. М. : АО «РКС», 2016. С. 478–482.
17. Гаджиев Э. В. Возможность применения микрополосковых антенн на космических аппаратах // Инновации в авиации и космонавтике–2012 : сб. тезисов докладов Московской молодёжной науч.-практ. конф. М. : ООО «Принт-салон», 2012. С. 87–88.
18. Панченко Б. А., Нефёдов Е. И. Микрополосковые антенны. М. : Радио и связь, 1986. 144 с.
19. Вейцель А. В., Вейцель В. А., Татарников Д. В. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: высокоточные антенны // Специальные методы повышения точности позиционирования. М. : МАИ-ПРИНТ, 2010. 368 с.
20. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Application of printing technologies to design on-board

antenna systems of spacecrafts // 40th COSPAR Scientific Assembly. M. C0.3–0014-14.

21. Гаджиев Э. В. Моделирование бортовых антенн СВЧ космических аппаратов // Антенны. 2013. № 9 (196). С. 65–68.

22. 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.

23. Бочаров В. С., Генералов А. Г., Гаджиев Э. В. Способ создания микрополосковых антенн метрового диапазона и устройство, реализующее этот способ : пат. RUS 2583334 от 16.09.2014.

24. Моделирование бортовой микрополосковой антенны / Е. В. Овчинникова [и др.] // Антенны. 2016. № 7 (227). С. 10–22.

25. Гаджиев Э. В. Миниатюрные антенны для малых космических аппаратов CubeSat // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем : сб. тезисов науч.-техн. конф. молодых специалистов АО «ИСС». Железнодорожск, 2017. С. 27–29.

26. Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электромеханики» (АО «НИИ-ЭМ») [Электронный ресурс]. URL: http://niiem.ru/index.php?option=com_content&view=article&catid=8&id=120 (дата обращения: 31.10.2017).

27. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский [и др.]. М. : Радиотехника, 2008. 384 с.

28. Гаджиев Э. В. УКВ-антенны малых космических аппаратов : дис. ... канд. техн. наук. МАИ, 2016. С. 152.

References

1. Pichurin Yu. G. [Analysis of the status of small spacecrafts surveillance work and the possibilities of using them in the interests of monitoring the natural environment]. *Trudy NII kosmicheskikh sistem*. 2000 (In Russ.).

2. Minaev I. V. [Features of the creation of space technology in modern conditions. Part 1. General provisions.]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy NPP VNIEM*. 2010, Vol. 118, No 5. P. 29–22 (In Russ.).

3. Minaev I. V. [Features of the creation of space technology in modern conditions. Part 2. Conceptual framework for risk analysis]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*, 2012, Vol. 127, No 2, P. 15–20 (In Russ.).

4. Kirichenko D. V., Polovnikov V. I. [Low-orbital space system for monitoring space debris on the basis of a grouping of small spacecraft.]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2010, No 3, P. 19–22 (In Russ.).

5. *Gosudarstvennaya korporatsiya po kosmicheskoy deyatel'nosti ROSKOSMOS* [State Corporation for Space Activities, ROSKOSMOS]. Available at: <https://www.roscosmos.ru/23687/> (accessed 31.10.2017).

6. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. [Miniaturization of onboard antenna-feeder devices of spacecraft]. *Sbornik tezisev nauchno-tekhnicheskogo seminarina "Perspektivy razvitiya antenno-fidernykh ustroystv letatel'nykh apparatov"*. [Materials of scientific

and technical conference "Prospects of development of antenna-feeder devices of aircrafts"]. Istra, 2013, P. 51–54 (In Russ.).

7. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. [Ways of design small-size, low-profile onboard antenna systems of small spacecrafts]. *V sbornike: Radiofizicheskie metody v distantsionnom zondirovanii sred Nauchnyy sovet RAN po rasprostraneniyu radiovoln*. [Proceedings of scientific conference "Radiophysical methods in remote sensing environments"]. Murom, 2014, P. 114–118 (In Russ.).

8. Gadzhiev E. V. [Ways of design small-size, low-profile onboard antenna systems of small spacecrafts]. *Trudy MAI*. 2014, No. 76 (In Russ.). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=50113> (accessed 31.10.2017).

9. CubeSat Design Specification Rev. 12. California State Polytechnic University.

10. Leonard David. Cubesats: Tiny Spacecraft, Huge Payoffs. Space.com. 2004.

11. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Antenna-feeder devices in the development of OJSC 'NIEM', Istra (Moscow region). 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. 2013, P. 46–47.

12. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. [Design problems of antenna system small spacecrafts]. *26 Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya "SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii" (KryMiKo'2016) materialy konferentsii*. [Proceedings of the 26th International conference "Microwave & Telecommunication Technology"]. Sevastopol, 2016, P. 1058–1064 (In Russ.).

13. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V., Alekseeva N. S. [Variants of on-board antenna-feeder devices for small spacecraft]. *Mekhanika, upravlenie i informatika*. 2015, Vol. 7, No. 4 (57), P. 54–60 (In Russ.).

14. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. [Antennas for small spacecrafts]. *Materialy kruglogo stola "Sozдание malykh kosmicheskikh apparatov. Aktual'nye problemy i puti ikh resheniya" V ramkakh konferentsii "Iosifyanovskie chteniya"*. [Proceedings of roundtable discussion "Design of small spacecrafts. Actual problems and ways of solutions" within the conference "Iosifyanovskie reading"]. Istra, 2016, P. 190–197 (In Russ.).

15. Generalov A. G., Gadzhiev E. V., Pochtouk N. I., Russkin A. B., Tumanov M. V. [Design variants of perspective on-board antenna systems nano- and micro-spacecrafts]. *26 Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya "SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii" (KryMiKo'2016) materialy konferentsii*. [Proceedings of the 26th International conference "Microwave & Telecommunication Technology"]. Sevastopol, 2016, P. 1051–1057 (In Russ.).

16. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. [The construction of the miniature antenna system of small and micro-spacecraft]. *Sbornik trudov VIII Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroyeniya i informatsionnykh tekhnologiy"* [Proceedings of VIII International scientific-technical conference "Actual

problems of space-rocket instrument engineering and information technologies”]. Moscow, 2016, P. 478–482 (In Russ.).

17. Gadzhiev E. V. [The possibility of application of microstrip antennas on spacecraft]. *Sbornik tezisov dokladov Moskovskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Innovatsii v aviatsii i kosmonavtike–2012”*. [Proceedings of Moscow youth scientific-practical conference “Innovations in aviation and cosmonautics–2012”]. Moscow, 2012, P. 87–88 (In Russ.).

18. Panchenko B. A., Nefedov E. I. *Mikropoloskovye anteny* [Microstrip antennas]. Moscow, Radio i svyaz’ Publ., 1986, 144 p.

19. Veitzel A. V., Veitsel V. A., Tatarnikov D. V. *Apparatura vysokotochnogo pozitsionirovaniya po signalam global’nykh navigatsionnykh sputnikovyykh sistem: vysokotochnye anteny. Spetsial’nye metody povysheniya tochnosti pozitsionirovaniya* [Equipment of high-precision positioning signals of global navigation satellite systems: high-precision antennas. Special methods of increase of accuracy of positioning]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2010, 368 p.

20. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. Application of printing technologies to design on-board antenna systems of spacecrafts. 40th COSPAR Scientific Assembly. Moscow, C0.3–0014-14.

21. Gadzhiev E. V. [Simulation of on-board microwave antennas of spacecrafts]. *Antenny*. 2013, No. 9 (196), P. 65–68 (In Russ.).

22. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. [Selection of the dielectric substrate of microstrip antenna in the designing of a miniature antenna]. *Antenny*. 2014, No. 12 (211), P. 38–44 (In Russ.).

23. Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. *Sposob sozdaniya mikropoloskovykh antenn metrovogo diapazona i ustroystvo, realizuyushchee etot sposob*. [A method of creating a microstrip antenna meter range and device implementing this method]. Patent RF, No 2583334, 2014.

24. Ovchinnikova E. V., Kondratieva S. G., Bocharov V. S., Generalov A. G., Gadzhiev E. V. [Modeling on-board microstrip antenna]. *Antenny*. 2016, No. 7 (227), P. 10–22 (In Russ.).

25. Gadzhiev E. V. [Miniature antenna for CubeSat]. *Sbornik tezisov nauchno–tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov AO “ISS” “Razrabotka, proizvodstvo, ispytaniya i ekspluatatsiya kosmicheskikh apparatov i sistem”* [Materials of scientific–technical conference of young specialists of JSC “ISS” “Development, manufacture, testing and operation of spacecrafts and systems”]. Zheleznogorsk, 2017, P. 27–29 (In Russ.).

26. *Aksionernoe obshchestvo “Nauchno-issledovatel’skiy institut elektromekhaniki” (AO “NIIEM”)* [Joint-stock company “Research Institute for Electromechanics” (JSC “NIIEM”) (In Russ.). Available at: http://niiem.ru/index.php?option=com_content&view=article&catid=8&id=120 (accessed 31.10.2017).

27. Voskresenskiy D. I., Gostyukhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. *Ustroystva SVCh i anteny* [Microwave device and antenna]. Moscow, Radio-tekhnika Publ., 2008, 384 p.

28. Gadzhiev E. V. *UKV anteny malykh kosmicheskikh apparatov* [VHF antenna small satellites]. Moscow, MAI Publ., 2016, 152 p.