

---

УДК 621.396.67

## **Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенно-фидерных систем космических аппаратов**

**Гаджиев Э.В.**

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

*e-mail: [otd24@niem.ru](mailto:otd24@niem.ru)*

### **Аннотация**

В данной работе представлен обзор современного состояния и проблем развития бортовых антенных систем космических аппаратов. Показан активный процесс миниатюризации самих аппаратов и антенных систем. Рассмотрены пути решения задачи по построению малогабаритных, невыступающих, простых, надёжных и высокотехнологичных бортовых антенн малых космических аппаратов. Предложен вариант применения печатных технологий для решения данной задачи. На практике рассмотрен вариант разработки антенной системы, состоящей из микрополосковых (печатных) антенн, для малого космического аппарата «Ионосфера». Полученные результаты удовлетворяют заданным требованиям на разработку антенной системы малого космического аппарата «Ионосфера».

**Ключевые слова:** космический аппарат, антенно-фидерное устройство, бортовые антенны, печатные технологии, спиральные антенны, микрополосковые (печатные)

антенны, диаграмма направленности, коэффициент стоячей волны, коэффициент усиления.

## Введение

В настоящий момент наблюдается интенсивное развитие радиоэлектроники бортовых систем. Расширение и усложнение круга задач, решаемых современной электроникой, постоянно растущие требования, приводящие к возникновению и необходимости решения конструкторских задач, привели к возникновению ряда проблем бортовых антенно-фидерных устройств (АФУ) космических аппаратов (КА).

Возникает вопрос по решению проблемы **синтеза антенных систем**, так как построение антенн по заданным требованиям является основной задачей любой разработки. Данную проблему можно условно разделить на две части — *теоретическую (математическую)*, включающую в себя *решение внешней задачи* — определение токов (полей) по заданным характеристикам направленности и *решение внутренней задачи* — определение элементов конструкции антенны, устройства возбуждения, распределительных систем и т. д. и *практическую (конструкторско-технологическую)*. В качестве потенциального решения данной проблемы можно рассматривать вариант с использованием современной базы на микроэлектронике, т.е. с помощью внедрения нанотехнологий.

Практическое построение антенных систем приводит к возникновению **конструкторско-технологическим проблемам антенностроения**. Данная проблема включает в себя обширный круг вопросов конструирования, технологии

изготовления, метрологического обеспечения с учетом размещения, эксплуатации создаваемой антенной системы. При решении этой проблемы должны быть учтены ограничения, накладываемые располагаемой элементной базой, технологией, допустимой стоимостью и т. д.

При разработке АФУ порой возникает вопрос **автоматизации проектирования, производства и измерений антенных систем**. Актуальность данной проблемы заключается в существенном сокращении сроков создания новой аппаратуры, расширении круга решаемых задач, приближении используемых расчетных моделей к реальным объектам и уменьшению трудовых затрат. Широкое применение современных ЭВМ при проектировании антенн, и развитие в последние годы, численные методы решения электродинамических задач позволяют в ряде случаев существенно повысить точность расчета антенн и тем самым устранить экспериментальные исследования и доработку аппаратуры, увеличивавшие сроки её создания на длительный период.

Дальнейшее улучшение характеристик радиосистем с современными антенными системами (разрешающей способности, быстродействия, пропускной способности, помехозащищенности, дальности действия и др.) возможно при совершенствовании методов обработки (пространственно-временной в общем случае) сигнала, излучаемого и принимаемого антенной, т.е. проблему **антенн с обработкой сигнала** можно кратко сформулировать как изыскание путей оптимального построения пространственно–временной обработки сигнала в антенне при заданных требованиях к системе и располагаемой элементной базе.

Проблема **метрологического обеспечения** разработок, производства и эксплуатации антенных систем требует значительных затрат и включает разработку прямых и косвенных методов измерения характеристик антенн различных классов, создание поколения измерительной аппаратуры соответствующих диапазонов волн, функциональных возможностей, повышенной производительности и точности измерений. Возникает необходимость создания минимума эталонов антенн, образцовых мер, аттестации естественных источников излучения для контроля характеристик. Развитие методов измерения характеристик антенн по полю в раскрыве, в промежуточной и дальней зоне вызывает необходимость разработки безэховых камер, коллиматоров, специализированных измерительных комплексов и антенных полигонов.

**Конструкторско-технологические проблемы** современного антенностроения приобретают принципиальное значение. Одной из важных задач в этой области является стандартизация существующей и разрабатываемой элементных баз.

Под проблемой **электромагнитной совместимости антенн (ЭМС)** различных радиотехнических средств подразумевается обеспечение таких условий работы и антенных характеристик, при которых не возникают нежелательные электромагнитные связи, нарушающие работу этих и других радиосистем, обеспечивается функционирование радиосистем с требуемым качеством.

И, несомненно, важной проблемой АФУ является **минимизация стоимости проектирования производства и эксплуатации антенных систем**. Более подробно указанные выше проблемы рассмотрены в работе [1].

Целью данной работы является анализ возможных путей построения оптимальных антенных систем для малых КА.

### **Современное состояние и проблемы развития бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов.**

Помимо описанных выше проблем антенной техники существует еще одна важная проблема, связанная со следующим фактором.

С середины 90-х годов XX века существенно изменились приоритеты в разработке КА. Видимое преимущество по ряду направлений космической деятельности получило создание малых КА по сравнению с крупногабаритными и тяжелыми КА. В результате начавшегося и интенсивно продолжающегося процесса миниатюризации КА удалось снизить массы некоторых больших и тяжелых КА и создать новые аппараты аналогичного назначения с массой в несколько сотен килограмм [2–4].

Малые КА обладают рядом преимуществ перед тяжелыми КА:

- технологичностью создания малых КА, отвечающей стратегии сокращения расходов и риска;
- возможностью быстрой модификации для решения широкого круга задач с различным целевым назначением;

- сравнительно малым сроком разработки малых КА;
- удешевлением вывода на орбиту за счет кластерных или попутных запусков;
- снижением степени влияния спутниковой платформы на работу полезной нагрузки из-за меньшего собственного гравитационного, электромагнитного и газового (внешняя собственная атмосфера) фона;
- возможностью быстрой модификации для решения широкого круга задач с различным целевым назначением.

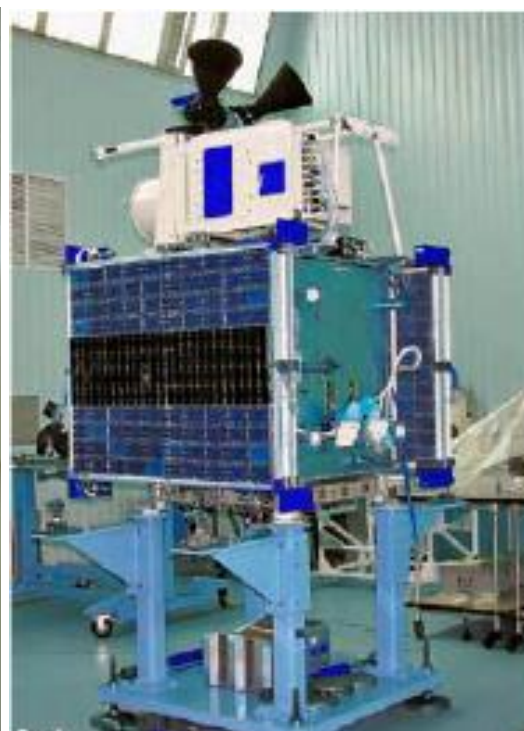
Создание МКА позволяет чаще проводить запуски, притом:

- расширить возможности участия в проектах молодых ученых, студенческой молодежи и широкой научно-технической общественности;
- ускорить использование полученных научно-технических результатов.

На сегодняшний день уже разработаны и запущены ряд таких малых КА. ОАО «Научно-исследовательский институт электромеханики» город Истра Московской области (ОАО «НИИЭМ» г. Истра) принял активное участие в разработке и запуске таких аппаратов, как КА «Татьяна–Университетский–2», Белорусский КА (БКА), КА «Канопус–В» №1, представленных на рисунке 1, а также в ряде разрабатываемых в настоящее время КА «Михайло Ломоносов», КА «Ионосфера» и др.



а



б



в

Рисунок 1. Малые КА: а – КА «Михайло Ломоносов», б – КА «Канопус–В»  
№1, в – КА «Университетский–Татьяна–2».

Также активно в этом направлении работают и ряд других отечественных предприятий: ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева (КА «МиР», КА «Гонец Д1», КА «Можаец» и др.), ФГУП Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина (МКА-ФКИ и др.) и т.д. [5–7].

Тенденция перехода от больших КА к малым КА наблюдается не только в разработках отечественных предприятий, но также и у зарубежных фирм. Об этом свидетельствовали представленные в 2013 году макеты КА на 50-ом международном авиационно-космическом салоне Paris Air Show 2013, проходивший в пригороде Ле Бурже французской столицы, в работе которого также приняли участие и специалисты ОАО «НИИЭМ». Европейским космическим агентством (European Space Agency) был представлен ряд малых КА:

- swarm (magnetic field mission);
- proba–V (minisatellite tracking global vegetation growth);
- cryosat (ice mission); goce (gravity mission);
- alphasat (largest telecommunications satellite);
- smos (water mission);
- ALPHABUS (solution for the high-power sitcom market) и др.

Таким образом, наблюдается активный процесс перехода от разработок и внедрения малых КА вместо больших и тяжёлых КА, т.е. происходит процесс *миниатюризации КА*, что в свою очередь приводит и к *миниатюризации бортовой аппаратуры КА*, в том числе и *бортовых АФУ*.



Но прежде чем рассматривать способы миниатюризации бортовых АФУ КА, необходимо отметить особенности данного типа антенн, которые необходимо учитывать при их разработке для дальнейшей успешной эксплуатации в составе бортовой аппаратуры КА.

Одной из главных особенностей АФУ КА является то, что, как правило, на поверхности КА заказчиком отводится определенное место для установки антенн. Зачастую этого отведенного места бывает не достаточно для установления того АФУ, которое полностью бы отвечало заданным требованиям. Поэтому необходимо учитывать влияние других частей и элементов космического аппарата на параметры антенны (коэффициент стоячей волны (КСВ), диаграмма направленности (ДН), коэффициент усиления (КУ) и т.д.).

Другую особенность АФУ КА можно выделить при рассмотрении механизма возбуждения антенн. Стоит обратить внимание, что в формировании диаграммы направленности участвует не только собственно антенна, но и часть проводящей поверхности КА. По проводящей поверхности корпуса КА текут поверхностные токи, наводимые электромагнитными полями, создаваемыми самой антенной. Эти высокочастотные токи создают в пространстве, окружающем КА, электромагнитные поля, которые можно назвать вторичными. Вторичные поля взаимодействуют с полями антенн. Вследствие явления интерференции получается суммарное электромагнитное поле. Влияние корпуса КА необходимо всегда принимать во внимание. Это влияние является одним из основных факторов, определяющих специфику работы антенн КА.

Ещё одна особенность АФУ КА заключается в специфичности работы антенн КА, а именно, что им приходится работать с электронными приборами, рассчитанными на выполнения определённых функций в условиях наличия ионизации, резких перепадов давления, температуры, перегрузки, вибрация и т.д. [8, 9]. Всё это усложняет работу антенн, может привести к нежелательным явлениям, искажающим характеристики антенн, и, безусловно, создаёт дополнительные требования в отношении конструкции и параметров антенн КА.

Учитывая выше приведённые особенности бортовых АФУ КА и наблюдаемую тенденцию к переходу от больших КА к малым КА, возникает *актуальная задача по созданию малогабаритных, невыступающих бортовых АФУ КА, т.е. устранению недостатков в отношении массогабаритных характеристик и выступающей конфигурации, создание простых, надёжных и высокотехнологичных антенн широкого назначения.* При этом необходимо обеспечить высокие показатели надёжности, эффективности работы антенных систем.

Рассмотрим возможные пути (варианты) решения данной задачи.

**Применение выносных элементов.** Для улучшения расположения антенны на поверхности КА применяются выносные элементы (кронштейны, штанги, выдвижные элементы и т.д.), т.е. после выведения КА на заданную целевую орбиту, осуществляется с помощью указанных выносных элементов обеспечение работоспособного расположения антенн относительно корпуса КА. Данный способ размещения бортовых антенн широко применяется на различных КА. Однако

применение таких элементов несет в себе риск не раскрытия, отказа выносных элементов, что недопустимо для космической техники в связи ее дороговизной.

Другим способ решения задачи является **применение печатных технологий** при разработке бортовых антенн.

### **Применение печатных технологий при разработке бортовых антенных систем космических аппаратов**

Спиральные антенны активно используются в качестве бортовых АФУ КА благодаря тому, что обладают подходящей ДН для различных требований, возможностью выбора конструктива при проектировании и т.д. Спиральные антенны представляют собой спираль из излучателей (от одного до четырёх). Применение печатной технологии при изготовлении спиральных антенн, представленных на рисунке 2 и 3, позволяет уменьшить объем и массу антенны при сохранении её электрических параметров [10].

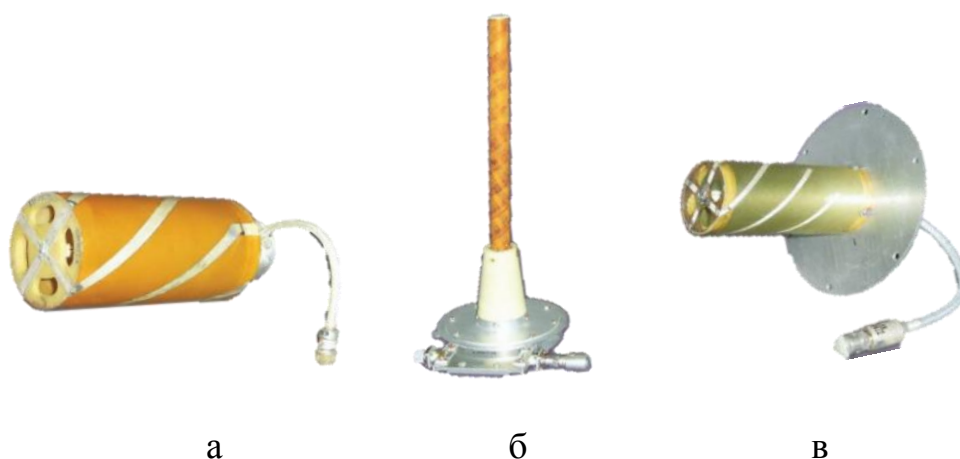


Рисунок 2. Спиральные антенны, изготовленные с применением печатной технологии: а – антенна дециметрового диапазона телеметрической бортовой системы КА «Метеор»; б – антенна дециметрового диапазона бортового

информационного комплекса КА «Метеор – М»; в – антенна БАСН для приёма сигналов со спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS.

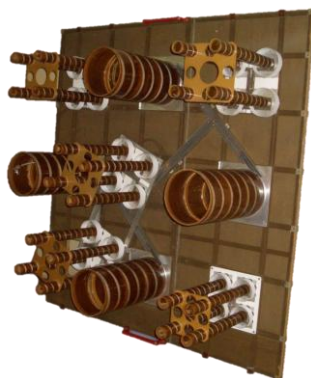


Рисунок 3. Антенная решётка геостационарного КА «Электро».

Стремительное развитие технологий производства интегральных схем привело к появлению нового вида антенн – микрополосковых (печатных) антенн (МПА).

МПА, представленная на рисунке 4, представляют собой многослойные конструкции, состоящие из проводящей подложки, одного или нескольких слоев диэлектрика и помещённых на них плоских проводящих излучающих элементов.

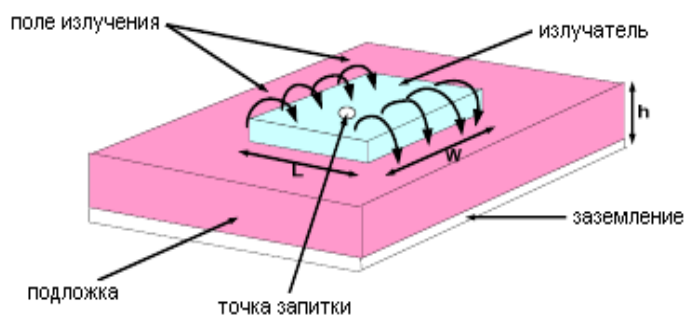


Рисунок 4. Структура МПА.

В некоторых случаях подложка может частично или полностью отсутствовать, а излучающие элементы могут быть помещены между диэлектрическими слоями.

Основными преимуществами МПА перед антеннами других типов являются их высокие технологичность, низкая стоимость, малые металлоёмкость, габаритные размеры и масса. Такие антенны могут быть выполнены с высокой точностью, поскольку для их изготовления может быть использовано прецизионное оборудование, применяемое для производства печатных плат [11]. Также излучающие элементы МПА могут быть функционально размещены с линией питания, устройствами симметрирования и согласования сопротивлений, которые выполняются в этом случае на основе полосковых линий различных типов.

Таким образом, в ходе поиска решения задачи по разработке малогабаритных, невыступающих антенных систем малых КА, возник интерес к применению МПА. Для практического применения МПА рассмотрен вариант создания новой антенной системы КА «Ионосфера».

#### **Антенная система космического аппарата «Ионосфера»**

КА «Ионосфера» создается в ОАО «Корпорации «ВНИИЭМ» по заказу Федерального космического агентства с целью получения регулярной и достоверной информации с помощью измерений космическими средствами характеристик и параметров процессов, явлений в ионосфере, верхних слоях атмосферы, околоземного космического пространства и магнитосферы.

КА «Ионосфера» входит в состав космического комплекса «Ионозонд», представленного на рисунке 5, который состоит из четырех КА «Ионосфера» и одного КА «Зонд» [12].

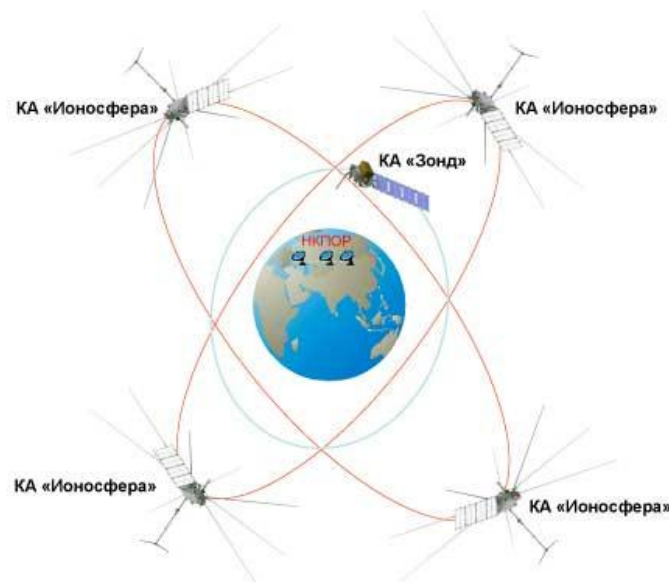


Рисунок 5. Орбитальная группировка КК «Ионозонд».

Для КА «Ионосфера» №1, №2 коллективом лаборатории АФУ ОАО «НИИЭМ» была разработана антенная система, включающая в себя четырехзаходную спиральную антенну (рабочая частота 137 МГц), штыревую антенну (рабочая частота 150 МГц) и вибраторную антенну (рабочая частота 400 МГц). Более подробная информация по техническим характеристикам КА «Ионосфера» и разработанной антенной системе приведена в работе [13].

Таким образом, поставлена задача по разработке новой антенной системы КА «Ионосфера», состоящей из МПА.

### **Разработка моделей микрополосковых антенн для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера»**

В ходе анализа литературы по МПА, были оценены и рассчитаны габариты МПА на соответствующие рабочие частоты [14, 15]. Также был проведен анализ по выбору оптимального типа диэлектрика, применяемого при проектировании МПА.

Выбор был сделан в пользу фольгированного СВЧ диэлектрика фольгированного листового арилокса наполненного (ФЛАН), который соответствует требованиям, предъявляемым к материалам, работающим в условиях космоса.

В ходе разработки также применялись методы электродинамического моделирования для оценки таких параметров антенн, как ДН, КУ, КСВ и т.д. Основные результаты представлены в работах [16–18].

Таким образом, были получены следующие результаты:

- КСВ на входах моделей МПА 150 МГц и МПА 400 МГц — 1,1;
- диаграмма направленности моделей МПА 150 МГц и МПА 400 МГц имеют преимущественное направление на центр Земли в пределах  $0^\circ \dots 45^\circ$  от надира и  $0^\circ \dots 360^\circ$  по азимуту;
- коэффициент усиления модели МПА 150 МГц по мощности в направлении центра Земли 1 дБ, а в направлении  $0^\circ \dots 45^\circ$  — не менее 0 дБ;
- коэффициент усиления модели МПА 400 МГц по мощности в направлении центра Земли 5 дБ, а в направлении  $0^\circ \dots 45^\circ$  — не менее 2 дБ.

Актуальность решаемой задачи по построению антенной системы из МПА для малого КА «Ионосфера» заключается ещё и в том, что предложенный вариант МПА позволяет уменьшить их габариты, при проектировании данного типа антенн для работы в дециметровом и метровом диапазонах. Решение найдено путём выбора

оптимального диэлектрика с подходящими параметрами и конструктивных особенностей разрабатываемых антенн, которые описаны в указанных выше работах.

На сегодняшний день ведутся работы по формированию всей антенной системы КА «Ионосфера», оценки влияния бортовой аппаратуры на основные параметры АФУ, а также поиск оптимального месторасположения антенн на поверхности КА.

### **Заключение**

1. В настоящий момент наблюдается активный процесс по миниатюризации в космической индустрии, вызванный явными преимуществами применения малых КА.

2. Процесс миниатюризации самих КА неизбежно несёт процесс миниатюризации и бортовой аппаратуры, в том числе и бортовых АФУ КА.

3. В виду ряда особенностей бортовых АФУ КА, а именно ограниченное место установки на поверхности корпуса КА, возникает задача по созданию малогабаритных, невыступающих бортовых антенн, способных устранить данный недостаток.

4. Предлагается использовать в качестве бортовых АФУ КА микрополосковые (печатные) антенны, что позволит:

- ✓ повысить надежность АФУ КА;



✓ повысить степень защищенности АФУ КА на орбите от воздействия таких факторов как космический мусор, частицы и пыль благодаря отсутствию выступающих элементов;

✓ улучшить массогабаритные показатели в сторону уменьшения массы АФУ и, следовательно, самого КА;

✓ более эффективно использовать площадь поверхности КА;

✓ уменьшить затраты на производство АФУ КА.

5. Для практического применения рассмотрен вариант создания антенной системы КА «Ионосфера», состоящей из микрополосковых (печатных) антенн. Полученные, в ходе моделирования, результаты удовлетворяют предъявляемым требованиям.

### **Библиографический список**

1. Проблемы антенной техники / Под ред. Л.Д. Бахраха, Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1989. 368 с.
2. Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение. «Вопросы электромеханики». Труды ВНИИЭМ. 2005. Т. 102. С. 12–27.
3. 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. Сборник статей МФТИ. 2009. Т.1. №3. С. 14–22.

4. Гершензон В., Карпенко С. Малые спутники – провокация или перспективное направление? Экология и жизнь. 2011. 12 (121). С. 51–57.
5. Зимин И.И., Валов М.В., Яковлев А.В., Галочкин С.А. Малый космический аппарат «Михайло Решетнев». Результаты работы. Труды МАИ. 2013. № 65, <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35908>
6. “Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнёва, <http://www.iss-reshetnev.ru>
7. НПО имени С.А. Лавочкина, <http://www.laspace.ru>
8. Пригода Б.А., Кокунько В.С. Антенны летательных аппаратов. М.: Воениздат.1964. 120 с.
9. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Особенности бортовых антенно–фидерных устройств космических аппаратов. Научно-технический семинар «Перспективы развития антенно-фидерных устройств космических аппаратов» ОАО «НИИЭМ» г. Истра 25 сентября 2013 г. Истра: ОАО «НИИЭМ». С. 55–58.
10. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Антенно-фидерные устройства в разработках ОАО «НИИЭМ», г. Истра Московской области. 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2013) 8–13 сентября 2013 г., Севастополь, Украина: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер. 2013. С. 46–47.
11. Виноградов А.Ю., Кабетов Р.В., Сомов А.М. Устройства СВЧ и малогабаритные антенны. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Горячая линия – Телеком. 2012. 440 с.

12. Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна

[http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=469:-lr&catid=37:spaceprograms&Itemid=62](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=469:-lr&catid=37:spaceprograms&Itemid=62) (дата обращения 02.04.2014).

13. 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.

14. Панченко Б.А., Нефёдов Е.И. Микрополосковые антенны. – М.: Радио и связь, 1986. 144 с.

15. Нефёдов Е.И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. — М.: Издательский центр «Академия», 2010. 320 с.

16. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны дециметрового диапазона для применения на КА «Ионосфера». Труды МАИ. 2013. №65,

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35852>

17. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка модели микрополосковой антенны дециметрового диапазона для перспективного применения на КА «Ионосфера». Научно-практическая конференция молодых учёных и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2013» 16–18 апреля 2013 года. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». С. 87–88.

18. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка модели микрополосковой антенны метрового диапазона (150 МГц) для перспективного применения на КА «Ионосфера». Труды международной научно-технической конференции «Научно-технические проблемы построения систем и комплексов землеобзора, дозора и управления и комплексов с беспилотными летательными аппаратами»: в 2 т. – М.: ОАО «Концерн «Вега». 2013. Т.2. С. 78–85.