

УДК 621.396.6

Применение спиральных антенн для бортовых систем и комплексов

Генералов А.Г.*, Гаджиев Э.В., Салихова М.Р.***

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

**e-mail: otd24@niiem.ru*

***e-mail: gadzhiev_elchin@mail.ru*

Статья поступила 07.04.2019

Аннотация

В настоящее время наблюдается активный процесс освоения космического пространства. Антенно–фидерные устройства составляют неотъемлемую часть космических аппаратов любого класса и целевого назначения. В работе рассмотрено применение класса спиральных антенн в качестве бортовых антенн космических аппаратов. Показаны разработанные спиральные антенны различных бортовых систем и комплексов.

Ключевые слова: космический аппарат, антенная система, антенно–фидерное устройство спиральные антенны; коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

Введение

Человечество начало осваивать космическое пространство с 1957 года, когда СССР вывел первый искусственный спутник Земли. С того момента уже прошло

более полувека и освоение космоса шагнуло далеко вперед. На сегодняшний день уже невозможно представить современное технологическое общество без использования сведений и данных с метеорологических, связных, навигационных, телекоммуникационных, дистанционного зондирования Земли, научных, прикладных исследований и других спутниковых систем и комплексов. При этом очевидно, что развитие космической индустрии продолжится активными темпами и в дальнейшем, причём всё больше и больше стран вступают в клуб «космических держав».

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 [1].

Бортовые антенно-фидерные устройства (АФУ) составляют неотъемлемую часть КА как по их типу (малые или большие), так и по целевой задаче.

Традиционно, в качестве бортовых АФУ КА используют различные типы антенн: вибраторные, штыревые, рупорные, зеркальные, печатные и др. [2–5], в том числе и антенные решётки [6–10].

Целью данной работы является разработка бортовых антенн различных систем и комплексов с применением класса спиральных антенн.

Бортовые антенные системы

Широкое применение находят и класс спиральных антенн [11–15]. Антенна представляет собой намотанную из провода цилиндрическую спираль 1 длиной

несколько λ , один конец которой свободен, а другой соединяется с внутренним проводником коаксиальной линии 2, как показано на рис. 1.

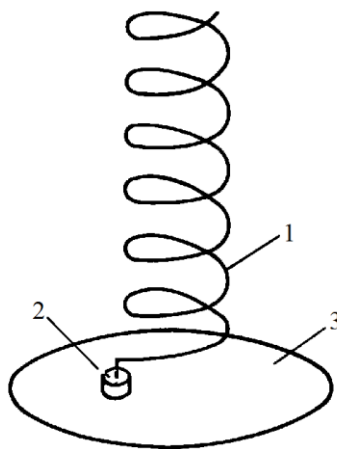


Рисунок 1 – Спиральная антенна

А внешний проводник коаксиальной линии присоединяется к металлическому диску (экрану) 3, служащему для ослабления обратного излучения антенны.

Классификация спиральных антенн ведётся по типу намотки спиралей на регулярные и нерегулярные, а по числу заходов и способу их намотки одно- и многозаходные с односторонней или многосторонней намоткой.

В ряде случаев для увеличения жёсткости конструкции намотка спирали осуществляется на диэлектрическом каркасе, что необходимо для класса бортовых антенн с учётом их специфики [16], что также приводит к дополнительному замедлению фазовой скорости волны в антенне.

Характерны следующие виды форм диаграммы направленности (ДН) цилиндрической спиральной антенны [11].

1. Если диаметр спирали $D < 0,2\lambda$, то в ней преобладает волна типа T_0 , характеризующаяся изменением фазы тока в пределах 360° на протяжении нескольких витков; амплитуда волны вдоль спирали постоянна, а фазовая скорость

$v_{\phi}=c$. За счёт отражения волны T_0 от конца спирали в ней устанавливается режим стоячей волны, излучение вдоль оси спирали отсутствует, и максимум излучения антенны получается в поперечной плоскости спирали. Ближайший тип волны T_1 при этом имеет весьма малую амплитуду и вклад этой волны в общее поле излучения незначителен.

2. Если диаметр спирали $0,25\lambda < D < 0,45\lambda$, то в антенне преобладает волна T_1 , а максимум излучения направлен вдоль оси спирали. Возникающая при этом в спирали волна низшего типа T_0 , а также волны высших типов T_n при $n > 1$, быстро затухают по длине спирали (их вклад в ДН невелик).

3. Если диаметр спирали $D > 0,45\lambda$ в собственной волне T_n определяющей является вторая азимутальная пространственная гармоника (волна T_2), и ДН приобретает коническую (воронкообразную) форму, где угол раскрыва «воронки» зависит от относительного диаметра спирали.

На рисунке 2 представлены рассмотренные варианты ДН спиральных антенн в зависимости от отношения диаметра спирали и длины волны.

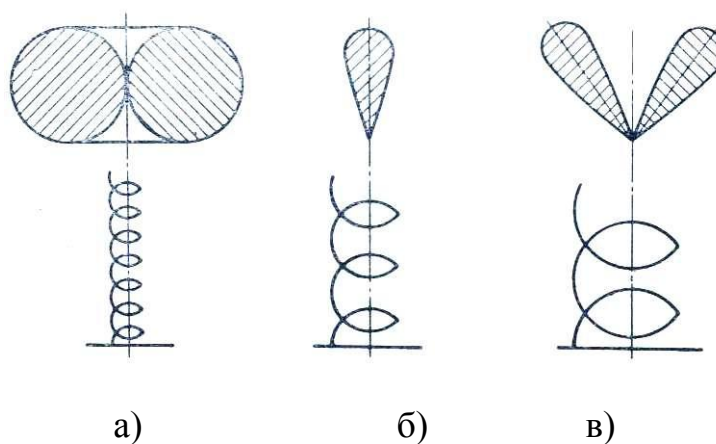


Рисунок 2 – Режимы излучения цилиндрической спиральных антенн:

- а) поперечное излучение при $D < 0,2\lambda$; б) осевое излучение при $0,25\lambda < D < 0,45\lambda$;
в) излучение ДН с воронкообразной формой при $D > 0,45\lambda$

Режим осевого излучения ($0,25\lambda < D < 0,45\lambda$), когда длина провода витка спирали равна рабочей длине волны $L \approx \lambda$, является основным режимом работы спиральных антенн.

АО «НИИЭМ» имеет более чем 55-летний опыт в разработке и изготовлении КА, а также отдельных бортовых служебных систем. За это время было разработано, изготовлено и успешно запущено более 35 КА метеорологического и научного назначения. В настоящее время АО «НИИЭМ» входит в состав АО «Корпорация «ВНИИЭМ» – ведущего российского производителя КА дистанционного зондирования Земли и активно участвует в создаваемых предприятием, как малых КА, так и больших КА (в том числе по созданию антенно-фидерных систем) [3].

Спиральные антенны бортовых систем и комплексов КА

Для передачи данных с бортовой аппаратуры научной информации в составе радиолинии спутникового ионозонда «ЛАЭРТ» на рабочей частоте 137 МГц была разработана спиральная четырёхзаходная антенна, показанная на рисунке 3.



Рисунок 3 – Фото бортовой спиральной антенны

Антенна представляет собой резонансную, четырёхзаходную, полувитковую спираль, излучатели которой последовательно запитаны с фазовым сдвигом 90° , что обеспечивает излучение антенной поля с поляризацией близкой к круговой.

Направление намотки излучателей обеспечивает правостороннюю поляризацию. Излучающие части спирали (витки) выполнены в виде изогнутых медных трубок. Длины витков близки к $\lambda/2$. Питание витков спирали происходит с помощью коаксиальных кабелей, проходящих внутри двух соседних витков спирали и обеспечивающих питание двух пар противоположных витков спирали, что позволяет получить широкополосное симметрирование токов, питающих витки спирали. Фазовый сдвиг токов в кабелях 90° , что и обеспечивает питание излучающих элементов спирали фазовым сдвигом $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$.

Разработанная спиральная антенна входит в состав антенной системы малого КА «Ионосфера», размещение которой показано на рисунке 4 [17].

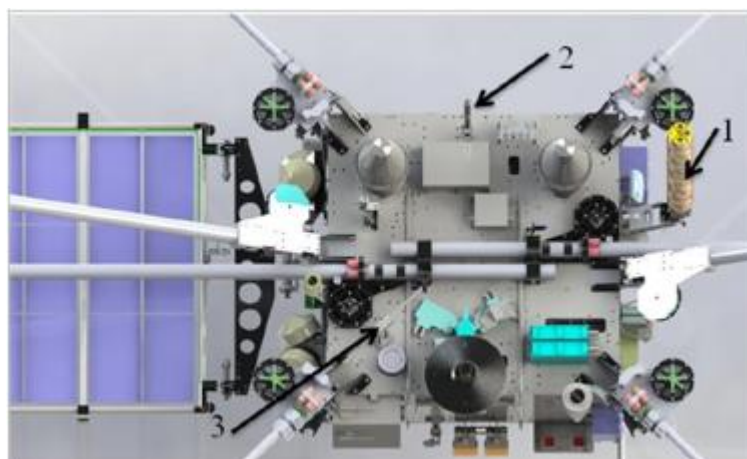


Рисунок 4 – Объёмная модель малого КА «Ионосфера» № 1, № 2:

1 – спиральная антенна, 2 – штыревая антенна, 3 – вибраторная антенна

Более подробно характеристики и структура бортовой спиральной антенны, а также малого КА «Ионосфера» представлены в работе [18].

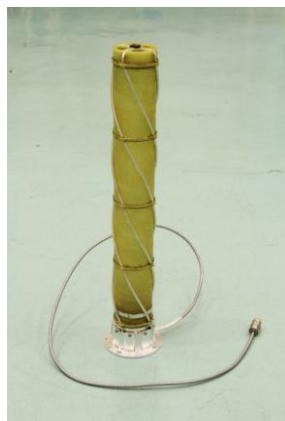
Для перспективного применения в составе АФУ телекомандной системы (ТКС) малых КА на базе космической платформы «Канопус-В» предложен вариант спиральной антенны, представленной на рисунке 5 [19–22].



Рисунок 5 – Фото спиральной антенны дециметрового диапазона
для класса малых КА

Данная антенна предложена как один из вариантов для построения АФУ ТКС. Стоит отметить ряд преимуществ данного варианта: при больших углах лучше коэффициента эллиптичности; конструкция данной антенны не требует обязательного наличия экрана по сравнению с применяемым аналогом в виде турникетной антенны [23].

На рисунке 6 представлены бортовые спиральные антенны класса больших КА серии «Метеор» [23–27].



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Фото бортовых спиральных антенн: а) приёмной антенны бортовой аппаратуры КОСПАС–САРСАТ; б) передающая антенна аппаратуры метеонаблюдения; в) передающая антенна аппаратуры метеонаблюдения

В качестве приёмной антенны дециметрового диапазона (406 МГц) радиоканала сигналов бедствия от аварийных радиобуёв на КА предложен вариант

применения четырёхзаходной одновитковой спиральной антенны с круговой поляризации правого направления вращения (см. рис. 6а)) [28].

Спиральная антенна (см. рис. 6б)) предназначена для передачи метеорологической информации низкого разрешения на рабочей частоте 137 МГц и входит в состав бортовой информационной системы метрового диапазона больших КА серии «Метеор–М».

Спиральная антенна (см. рис. 6в) предназначена для передачи метеорологической информации на рабочей частоте 465 МГц.

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 и спиральных антенн.

Далее рассмотрим разработанные спиральные антенны с применением печатных технологий.

В качестве передающей антенны радиоканала КА – наземные приёмные станции (КА–НПС) дециметрового диапазона (1544 МГц) предложен вариант применения четырёхзаходной спиральной антенны с круговой поляризацией левого направления вращения [28]. Излучатель и запитывающее устройство антенны выполнены по печатной технологии [29].

Внешний вид антенны показан на рисунке 7.



Рисунок 7 – Фото передающей антенны бортовой аппаратуры КОСПАС–САРСАТ

На рисунке 8 представлена антенна дециметрового диапазона (1700 МГц) бортового информационного комплекса КА «Метеор-М».



Рисунок 8 – Фото передающей спиральной антенны

Представленная спиральная антенна (см. рис. 8) также была применена на борту малого КА «Университетский–Татьяна-2», что отражено на рисунке 9 [30–32].

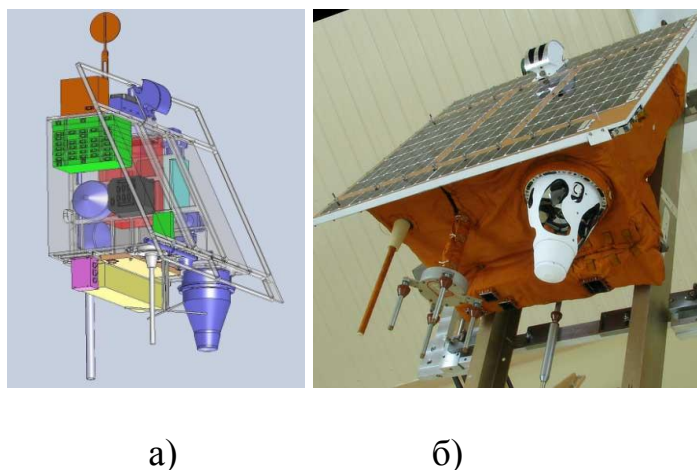


Рисунок 9 – Размещение спиральных антенна борту КА «Университетский–Татьяна-2»: а) объёмная модель; б) фото малого КА «Университетский–Татьяна-2»

На рисунке 10 показано размещение рассмотренных ранее бортовых спиральных антенн КА серии «Метеор–М».

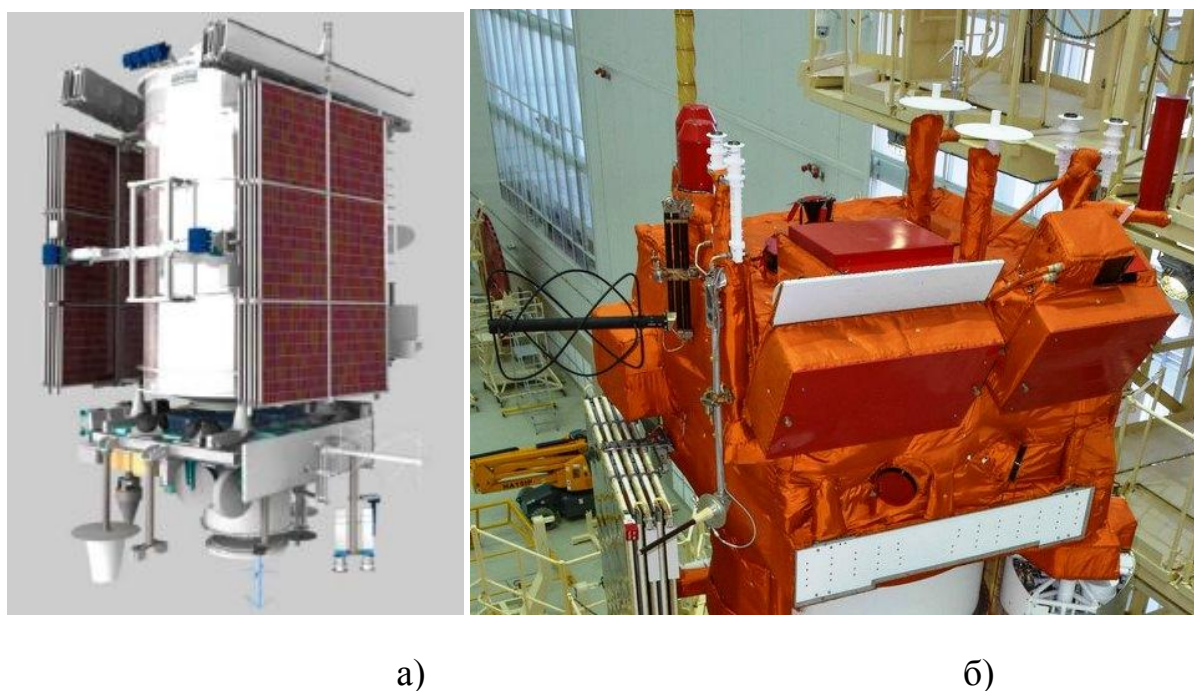


Рисунок 10 – Размещение спиральных антенна на борту КА серии «Метеор–М»: а) объёмная модель КА «Метеор – М» № 1; б) фото КА «Метеор – М» № 2–1

А на рисунке 11 представлены другие варианты спиральных антенн, выполненных с помощью печатных технологий.

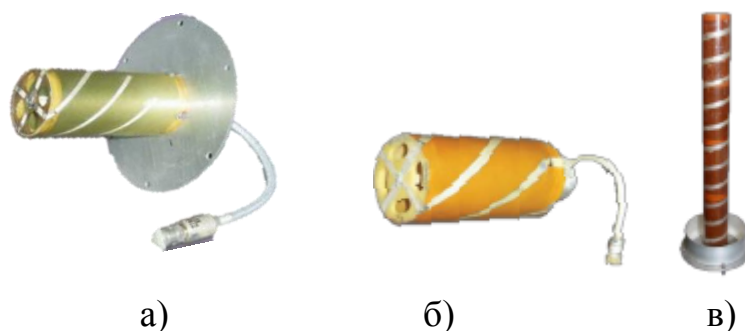


Рисунок 11 – Фото спиральных антенн, выполненных по печатной технологии:
а) бортовая антенна спутниковой навигации; б) бортовая антенна телеметрической бортовой системы; в) измерительная антенна

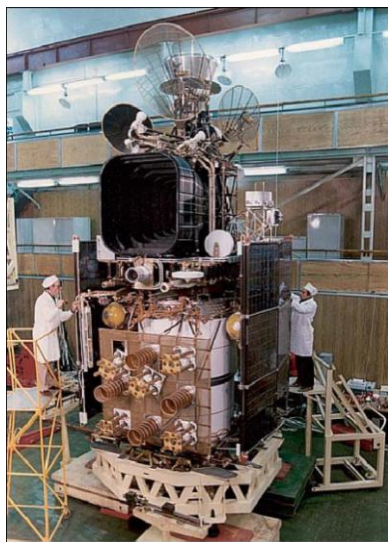
Для построения системы межспутниковой связи предложен вариант спиральной антенны, представленной на рисунке 12 [33].



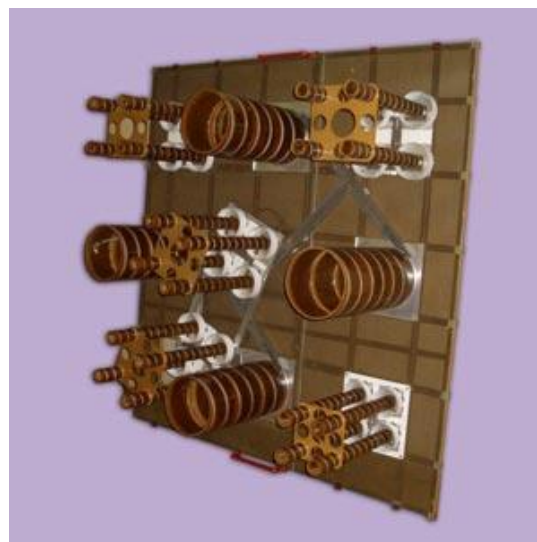
Рисунок 12 – Фото лабораторного макета бортовой спиральной антенны дециметрового диапазона межспутниковой связи

Также нашли применения спиральные антенны и как излучатели антенных решёток.

На рисунке 13 представлено АФУ геостационарного КА «Электро». Устройство представляет собой группу антенных решёток дециметрового диапазона, расположенных на углепластиковой раме [34, 35].



а)



б)

Рисунок 13 – Размещение антенной решётки из спиральных излучателей на борту КА «Электро»: а) фото КА «Электро»; б) фото антенной решётки

Антенные решётки содержат от четырёх до восьми спиральных излучателей из фольгированного стеклотекстолита, запитка которых осуществлена микрополосковыми линиями, формируются ДН шириной около 18° у четырёхэлементных решёток и $(18 \times 9)^\circ$ у восьмиэлементной решётки. Они имеют эллиптическую поляризацию правого вращения. Высота излучателей – 500 мм, габариты рамы – 1700×1700 мм. Масса АФУ – 25 кг.

Заключение

В данной работе представлен и описан принцип построения класса спиральных антенн.

Подробно представлены разработанные и успешно применяемые в составе различных бортовых систем и комплексов как в составе больших, так и малых КА [36].

Библиографический список

1. Пригода Б.А., Кокунько В.С. Антенны летательных аппаратов. - М.: Воениздат, 1964. - 120 с.
2. 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>
3. 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.
4. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Папилов К.Б. Малогабаритные печатные антенны круговой поляризации // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 8. С. 1 - 27.
5. Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюрны бортовые антенны // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 159. № 4. С. 31 - 41.
6. Кондратьева С.Г. Многофункциональная бортовая антенная решетка интегрированного радиоэлектронного комплекса // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29560>
7. Ястребцова О.И. Условия отсутствия «ослепления» у микрополосковых антенных решеток // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87318>

8. 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>
9. Овчинникова Е.В., Соколов А.А. Двухдиапазонная антенная решётка с косеканской диаграммой направленности // Антенны. 2011. № 4. С. 14 - 20.
10. Измайлов А.А., Волков А.П. Низкопрофильная широкополосная антенная система с улучшенной формой диаграммы направленности на основе искусственного магнитного проводника конечного размера // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81101>
11. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарёв Л.И. Устройства СВЧ и антенны. - М.: Радиотехника, 2008. - 384 с.
12. Нефёдов Е.И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. - 320 с.
13. Kilgus C.C. Shaped-Conical Radiation Pattern Performance of the Backfire Qudrifillar Helix // IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1975, no. 23(3), pp. 392 - 397.
14. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. – М.: Радиотехника, 2009. - 720 с.
15. Виноградов А.Ю., Кабетов Р.В., Сомов А.М. Устройства СВЧ и малогабаритные антенны. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. - 440 с.
16. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Особенности бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов // Научно-технический семинар

- «Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов»: Тезисы докладов. - Истра: НИИЭМ, 2013. С. 55 - 58.
17. Захаренко А.Б., Федотов А.Ю., Морозов И.И., Чуянов Д.О. Выбор материала вибраторов антенны для космического ионозонда // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2016. Т. 154. № 5. С. 25 - 31.
18. 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.
19. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1. - М.: ВНИИЭМ, 2011. – 110 с.
20. Белорусский космический комплекс дистанционного зондирования Земли. – М.: НПП ВНИИЭМ, 2011. – 88 с.
21. Двуреченский В.Д., Телепнев П.П., Федотов А.Ю. Спиральные антенны радиотехнических систем космических аппаратов ДМ-диапазона волн // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 146. № 3. С. 24 - 29.
22. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Салихов Р.С., Ходненко В.П. КА «Канопус-В» № 1 – первый российский малый космический аппарат высокодетального дистанционного зондирования земли нового поколения // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 156. № 1. С. 2 - 11.
23. 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.

24. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 2. - М.: Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – 158 с.

25. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 2-1. - М.: Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. - 156 с.

26. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Чуркин А.Л., Ходненко В.П. Запуск первого российского метеорологического КА нового поколения "МЕТЕОР-М" № 1 - начало воссоздания отечественной метеорологической орбитальной группировки // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2018. Т. 165. № 4. С. 46 - 60.

27. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Салихов Р.С., Ходненко В.П. Космический аппарат "Метеор-М" № 2 // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2018. Т. 166. № 5. С. 36 - 48.

28. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Антенная система для бортовой аппаратуры КОСПАС–САРСАТ // Радиотехника. 2018. № 8. С. 204 - 211. DOI 10.18127/j00338486-201808-38.

29. 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.

30. Экспериментальный научно-исследовательский малый космический аппарат «Университетский – Татьяна-2»: справочные материалы. - М.: ВНИИЭМ, 2009. - 32 с.
31. 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.
32. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Кожевников В.А., Ходненко В.П. Малый космический аппарат "Университетский - Татьяна-2" // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 160. № 5. С. 45 - 54.
33. Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Бортовая антенна для построения систем связи и межспутниковой связи // Конференция «Иосифьяновские чтения–2017». Тезисы докладов. - Истра: НИИЭМ, 2017. С. 262 - 265.
34. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Ходненко В.П. История создания, задачи и особенности разработки геостационарного гидрометеорологического космического аппарата «ЭЛЕКТРО» № 1 // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2016. Т. 154. № 5. С. 43 - 50.
35. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Ходненко В.П. Итоги разработки и основные результаты лётных испытаний опытной эксплуатации КА "ЭЛЕКТРО" №1 // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2016. Т. 155. № 6. С. 39 - 46.
36. Гаджиев Э.В., Туманов М.В., Генералов А.Г. Применение спиральных антенн для бортовых систем и комплексов // 17-я Международная конференция «Авиация и

космонавтика – 2018». Тезисы докладов. (Москва, 19 – 23 ноября 2018). – М.: Люксор, 2018. С. 248 - 249.