

## ПОСТРОЕНИЕ БОРТОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева,  
П. А. Шмачилин, Т. А. Трофимова

**А**нтенно-фидерные устройства являются неотъемлемой частью бортовой радиолинии любого назначения. Представлен обзор бортовых антенных систем космических аппаратов как малого класса, так и больших. Приведены типы применяемых антенн, сверхвысокочастотных устройств, состав бортовых антенных систем, в зависимости от назначения радиолинии, и виды сверхвысокочастотных устройств для различных бортовых систем и комплексов на примере антенных систем малых космических аппаратов, спроектированных на базе космической платформы «Канопус-В» и серии больших космических аппаратов «Метеор-М». Рассматриваются факторы, влияющие на функционирование антенн на борту космических аппаратов. Показана возможность применения бортовых антенных решеток в составе антенных систем космических аппаратов с учетом состояния и тенденций дальнейшего развития бортовых антенно-фидерных устройств, приводятся существующие варианты оптимизации антенных решеток на основании проведенного анализа литературы. В частности, разработана электродинамическая модель антенной решетки сантиметрового диапазона для применения в составе бортовой высокоскоростной радиолинии перспективных космических аппаратов. Приведены полученные в ходе электродинамического моделирования: диаграмма направленности, коэффициент направленного действия и коэффициент эллиптичности антенной решетки. Проведена оценка полученных результатов.

**Ключевые слова:** космический аппарат, антенно-фидерное устройство, антенная система, антенные решетки, спиральная антенна, вибраторная антенна, рупорная антенна, диаграмма направленности.

### Введение

Обеспечение обмена информации 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].

Антенно-фидерные устройства (АФУ) входят в линию связи как активный элемент, параметры которого, безусловно, сказываются на передаваемом сообщении. От характеристик антенны зависит не только дальность действия линии связи «КА – Земля» и наоборот, но и такие весьма важные характеристики линии связи, как быстрота передачи информации, а также ее достоверность.

Как правило, на борту КА используются приемо-передающие антенны и сверхвысокочастотные (СВЧ) устройства, входящие в состав следующих систем [2 – 7]:

- телеметрической;
- телекомандной;
- навигационной;
- радиолинии передачи целевой информации (РЛЦИ);
- межспутниковой связи;
- специальных (например, КОСПАС-САРСАТ);
- научно-исследовательских и др.

Состав бортовых АФУ, в зависимости от назначения радиолинии, может включать в себя [8]:

- антенны;
- кабельную сеть;
- фильтры;
- делители мощности;
- устройства контроля мощности;
- антенные переключатели и т. д.

При разработке и проектировании бортовых АФУ КА необходимо учитывать следующие особенности [9 – 13]:

1. В формировании диаграммы направленности (ДН) 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. Следствие 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.

2. На поверхности КА заказчиком отводится определенное место для установки антенн. Зачастую этого отведенного места бывает недостаточно для установления того АФУ, которое полностью бы отвечало заданным требованиям. Поэтому приходится использовать выносные элементы (кронштейны, штанги) или другие типы антенн (ленточные, выдвижные).

3. Подвергаются механическим воздействиям (при старте, в процессе выведения и т. д.).

4. Подвергаются влиянию космического пространства (климатическое воздействие, радиация, вакуум и др.).

Указанные выше особенности усложняют работу бортовых АФУ, могут привести к нежелательным явлениям, искажающим характеристики антенн, и, безусловно, создают дополнительные требования в отношении конструкций и параметров класса бортовых антенн.

В настоящее время широкое применение в качестве бортовых антенн КА нашли вибраторные, спиральные, рупорные, зеркальные, микрополосковые и другие типы антенн [14 – 19].

Таким образом, бортовые АФУ являются неотъемлемой частью антенной системы (АС) КА любого класса (большие, средние и малые) и целевого назначения (метеорологического, дистанционного зондирования Земли, научно-исследовательских и др.).

Цель работы – обзор применяемых бортовых антенн и анализ их дальнейшего развития.

### Обзор применяемых бортовых антенн

Обзор применяемых бортовых антенн КА приведен на примере КА, разработанных в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (г. Москва) [20].

Малый КА «Канопус-В» № 1 входит в состав космического комплекса (КК) оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В», созданного по заказу Госкорпорации «Роскосмос» [21].

На рис. 1 приведены малые КА, разработанные на базе космической платформы «Канопус-В» [22 – 25].

КК «Ионозонд» предназначен для мониторинга геофизической обстановки путем измерения основных параметров процессов в верхней атмосфере, ионосфере, магнитосфере, солнечной активности и передачи полученных данных по радиоканалам на наземный комплекс приема, обработки и распространения космической информации для отечественных потребителей: Росгидромета, Госкорпорации «Роскосмос», МЧС России, Минцифры России, Минтранса и др. [26].

На рис. 2 приведены КА «Ионосфера» (а) и КА «Зонд» (б), входящие в состав КК «Ионозонд».

КА «Метеор-М» № 1 входит в состав КК гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М», созданного по заданию Госкорпорации «Роскосмос» и Росгидромета, предназначенного для оперативного получения информации в целях прогноза погоды, контроля озонового слоя и радиационной обстановки в около космическом пространстве, а также для мониторинга морской поверхности, включая ледовую обстановку [27, 28].

На рис. 3 приведен КА «Метеор-М» № 1.

В составе АС телекомандной системы (ТКС) КА, спроектированных на базе космической платформы «Канопус-В» № 1, широкое применение нашли вибраторные антенны, которые представлены на рис. 4 [3].

АС ТКС включает в себя:

- приемные антенны;
- передающие антенны;
- кабельную сеть;
- делители мощности.

Разработанное АФУ ТКС обеспечивает (см. рис. 1) [29]:

- постоянное подключение двух штатно включенных приемников ТКС к обеим диаметрально расположенным на КА антеннам АФУ приемного канала;

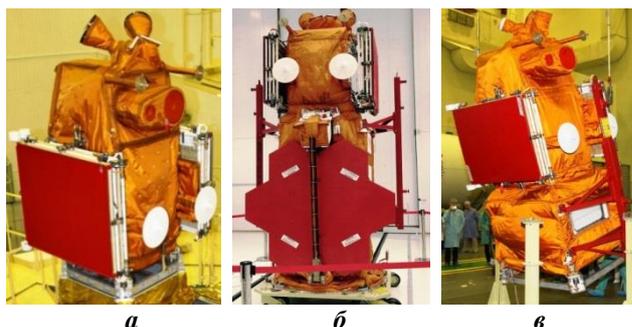


Рис. 1. Малые КА на базе платформы «Канопус-В»: а – КА «Канопус-В»; б – КА «Ломоносов»; в – «Канопус-В-ИК»

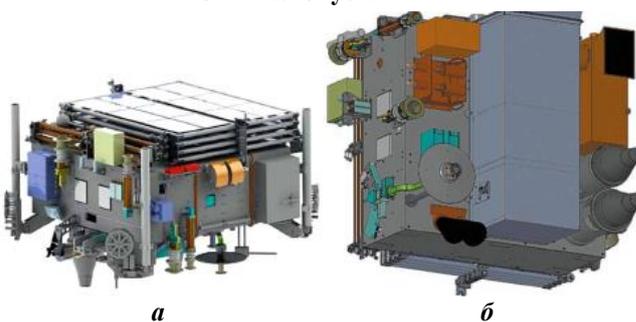


Рис. 2. Вид малых КА, входящих в состав КК «Ионозонд», в транспортном положении: а – КА «Ионосфера»; б – КА «Зонд»



Рис. 3. КА «Метеор-М» № 1 при выведении



Рис. 4. АФУ ТКС для КА, спроектированных на базе космической платформы «Канопус-В» (без кабельной сети)

– постоянное подключение основного и резервного передатчиков ТКС к обеим диаметрально расположенным на КА антеннам АФУ передающего канала при штатном включении одного из них.

На рис. 5 приведен состав АС КА «Ионосфера» [2, 30].

На рис. 6 приведен состав АС КА «Метеор-М» № 2-2 [31].

Комплект АФУ «КОСПАС-САРСАТ» предназначен для:

– приема сигналов от наземных аварийных радиобудиль международной системы «КОСПАС-САРСАТ», работающих в диапазоне частот 406,01 – 406,09 МГц;

– передачи сигналов на станциях приема и обработки информации на частотах  $1544 \pm 0,1$  МГц.

На рис. 7 представлены разработанные бортовые антенны [32].

На рис. 8 показано размещение выше рассмотренных антенн, входящих в АС КА «Метеор-М» № 2-2.

А на рис. 9 показано размещение других антенн АС КА серии «Метеор-М» [33].

Бортовая антенна бортового радиокomплекса системы сбора и передачи данных (БРК ССПД) 1 (рис. 9) представляет собой двухзаходную усеченную коническую антенну.

АФУ командно-измерительной системы (КИС) 2 (см. рис. 9) состоит из трех приемных и трех передающих антенн, работающих в СМ-диапазоне волн. Приемные и передающие антенны состоят из последовательно соединенных коаксиально-волноводных переходов, полосовых фильтров и цилиндрических рупоров, к которым присоединены поляризаторы, выполненные в виде пластин из металлокерамики. В комплект АФУ КИС входят также делитель, выполненный по схеме волноводного щелевого моста с установленными в нем четырьмя коаксиально-волноводными переходами, а также комплект кабелей.

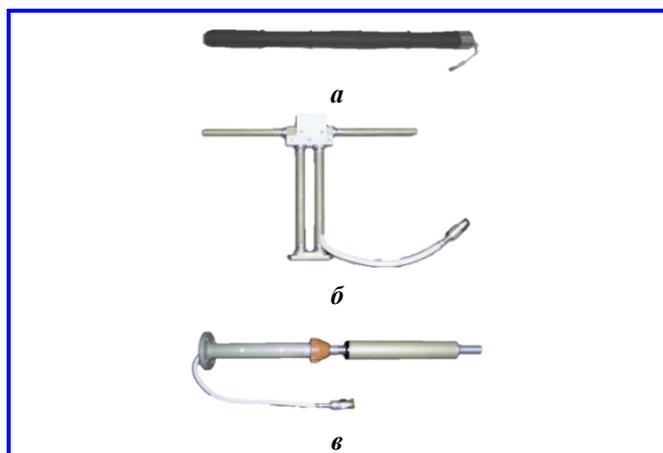


Рис. 5. АФУ малого КА «Ионосфера»: *а* – спиральная антенна; *б* – вибраторная антенна; *в* – штыревая антенна

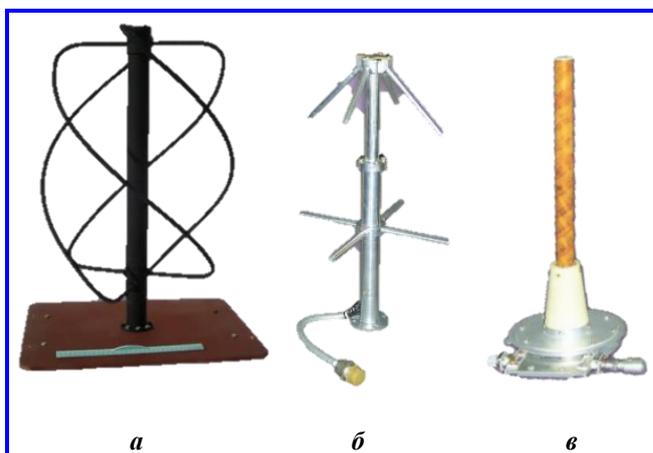


Рис. 6. АФУ КА «Метеор-М» № 2-2: *а* – четырехзаходная спиральная антенна; *б* – турникетная антенна; *в* – четырехзаходная спиральная антенна

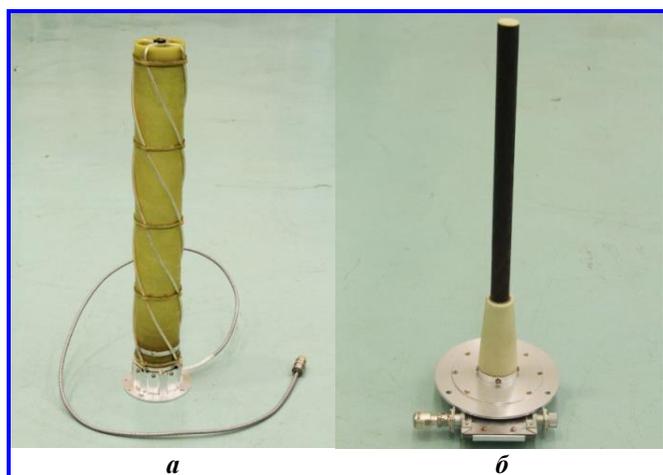


Рис. 7. Фото бортовых антенн для аппаратуры «КОСПАС-САРСАТ»: *а* – приемная антенна; *б* – передающая антенна

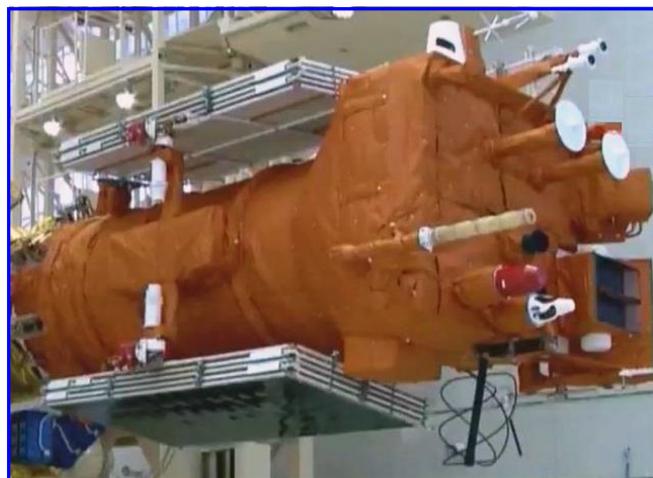
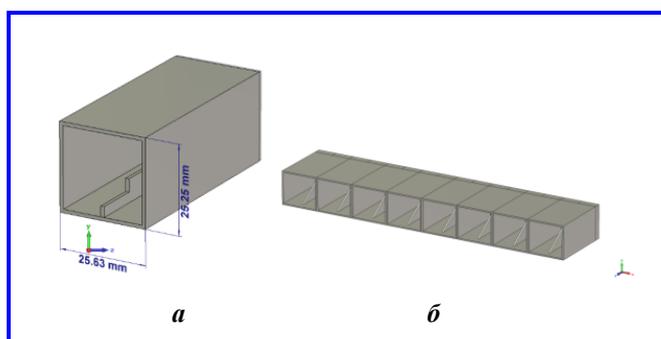


Рис. 8. Фото КА «Метеор-М» № 2-2



**Рис. 9. Общий вид КА «Метеор-М» № 2:  
1 – БРК ССПД; 2 – АФУ КИС; 3 – АФУ-1 и АФУ-2  
бортовой информационной системы СМ-диапазона**



**Рис. 10. Электродинамическая модель антенной  
решетки: а – излучатель; б – антенная решетка**

АФУ-1 бортовой информационной системы (БИС-М) СМ-диапазона и АФУ-2 БИС-М СМ-диапазона 3 (см. рис. 9). Антенна, выполненная по двухзеркальной схеме, представляет собой совокупность большого зеркала специальной формы, малого зеркала, облучателя в виде волновода круглого сечения и поляризатора.

В составе РЛЦИ КА серии «Канопус-В» также нашла применение приведенная выше АФУ БИС-М (см. рис. 1).

### Применение бортовых антенных решеток

В работах [33 – 37] определены следующие перспективные направления дальнейшего развития бортовых АФУ КА:

- применение совмещения АФУ, то есть использование одной и той же антенны для разных радиотехнических систем (например, для близких диапазонов);

- применение АФУ с лучшими энергетическими параметрами (например, с более высоким коэффи-

циентом усиления для РЛЦИ по сравнению с применяемыми аналогами);

- миниатюризация АФУ с учетом применения в составе АС класса малых КА.

Построению многофункциональных бортовых антенных систем уделено большое внимание в литературе [38 – 42]. Интегрированные радиоэлектронные комплексы позволяют решить ряд задач, таких, как многоцелевая работа радиолокационных станций (РЛС), расширение информационной емкости каналов в системах связи, снижение массогабаритных параметров и т. д. Однако для их практической реализации необходимы широкополосные или многодиапазонные антенные решетки. Построение многофункциональных антенных решеток является перспективным направлением в авиации, так как позволяет уменьшить значительное число применяемых на борту антенн и объединить информационные потоки от РЛС, навигационной системы, метеорологической системы, GPS и т. д. Сближение рабочих диапазонов частот существенно упрощает задачу построения интегрированной антенной системы. Совмещенные антенные решетки с близкими рабочими диапазонами широко используются в мобильных системах связи и спутникового телевидения [43 – 45].

Целесообразно применить аналогичный подход и в космической технике, совмещая функции различных радиотехнических систем или объединяя антенны одной радиосистемы в антенную решетку, тем самым расширяя ее функциональные возможности. В работе [46] предложен вариант такой антенной решетки. Авторы работы отмечают большие габариты распределительной системы.

В статье [47] показана возможность создания возбуждителя меньших размеров на основе отрезка несимметричной полосковой линии. Применение такой распределительной системы позволяет получить общие габариты –  $500 \times 80 \times 25$  мм. Одним из возможных путей минимизации продольного габаритного размера является использование комбинированных замедляющих систем [48], позволяющее уменьшить длину излучателя на 40% при допустимом изменении его частотных и поляризационных характеристик. В работе [49] приведена модель антенной решетки из малогабаритных волноводных излучателей, показанная на рис. 10. Ее общие габариты составляют –  $280 \times 50 \times 25$  мм.

На рис. 11 приведены пространственные диаграммы направленности.

А на рис. 12 и 13 приведены зависимости коэффициента эллиптичности  $k_z$  элемента в составе антенной решетки от пространственной угловой координаты и зависимость коэффициента направленного действия (КНД) от частоты.

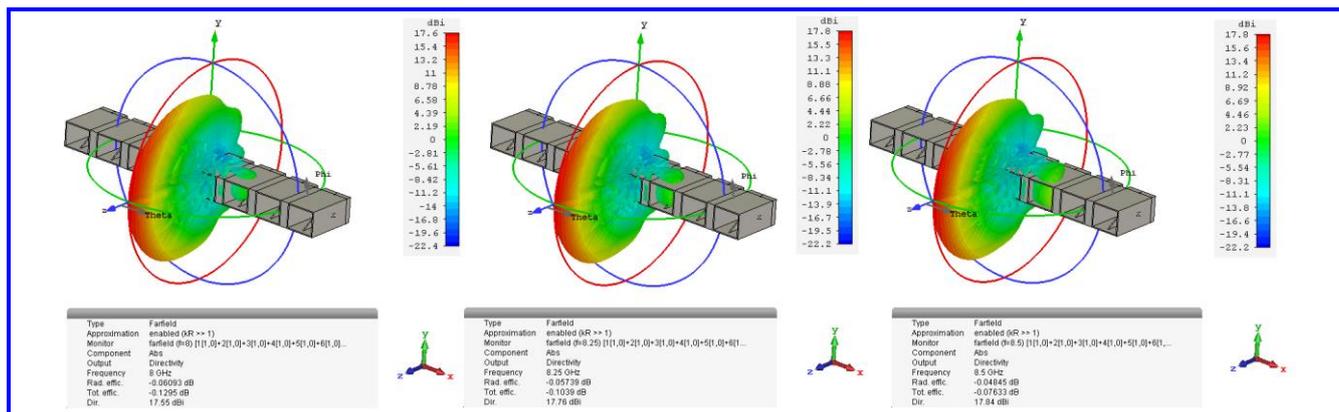


Рис. 11. Пространственные диаграммы направленности антенной решетки из поляризаторов с линейной перегородкой

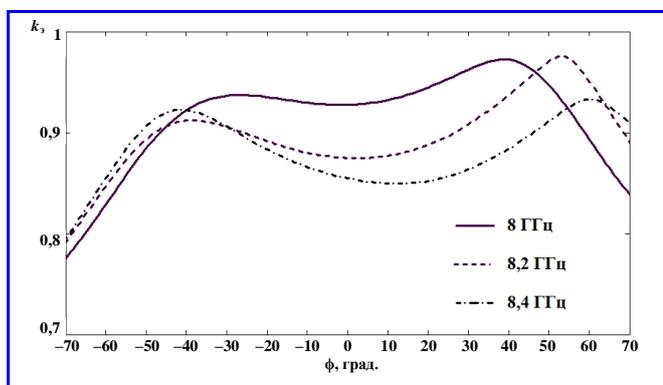


Рис. 12. Зависимости коэффициента эллиптичности  $k_e$  от угловой координаты в угломерной плоскости

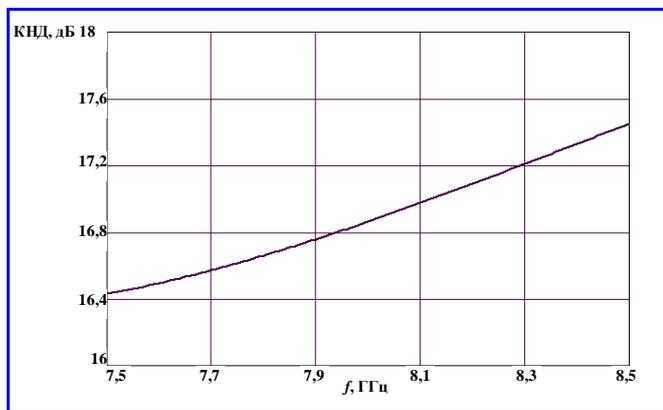


Рис. 13. Зависимость КНД от частоты

Из полученных результатов (см. рис. 12 и 13) видно, что разработанная антенная решетка обладает коэффициентом усиления не ниже 15 дБ в рабочей полосе частот и коэффициентом эллиптичности не ниже 0,7 в секторе углов  $\pm 70^\circ$ .

### Заключение

Таким образом, определены основные функции и сформулированы требования к информационным системам малых КА. Описаны антенны различных

радиосистем, устанавливаемых на малых КА, и приведены рабочие диапазоны частот. Отмечены особенности функционирования антенн на борту КА: влияние ударов и вибрации, климатическое воздействие, влияние радиации и др. Перечисленные дестабилизирующие факторы приводят к усложнению конструкции антенн. Рассмотрены различные антенные системы, установленные на КА «Канопус-В», «Ломоносов», «Канопус-В-ИК», «Метеор-М», «Ионосфера», «Зонд» и др. Составлен обзор применяемых бортовых антенн КА. Показана необходимость разработки интегрированных бортовых радиоэлектронных комплексов. Приведен обзор технических решений, позволяющих модернизировать антенную систему РЛЦИ, уменьшить ее габариты и расширить функциональные возможности, путем перехода к антенной решетке [50].

### Литература

1. Пригода Б. А. Антенны летательных аппаратов / Б. А. Пригода, В. С. Кокунько. – Москва : Воениздат, 1964. – 120 с.
2. Бочаров В. С. Антенная система космического аппарата «Ионосфера» / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 131. – № 6. – С. 11 – 14.
3. Бочаров В. С. Результаты летных испытаний антенно-фидерных устройств телекомандной системы КА «Канопус-В» № 1 и Белорусского КА и пути усовершенствования их характеристик / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 4 (16). – С. 5 – 12.
4. Бочаров В. С. Варианты построения бортовых антенн для зондирования поверхности из космоса / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Антенны. – 2015. – № 4 (215). – С. 3 – 8.
5. Бортовая антенна для построения систем связи и межспутниковой связи / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Иосифьяновские чтения 2017 : Тезисы докладов конференции, Истра, 26 октября 2017 года. – Истра : Научно-исследовательский институт электромеханики, 2017. – С. 262 – 265.

6. Миниатюрные антенны для малых космических аппаратов Cubesat / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Сибирский журнал науки и технологий. – 2018. – Т. 19. – № 2. – С. 259 – 270. – DOI : 10.31772/2587-6066-2018-19-2-259-270.
7. Антенная система для бортовой аппаратуры КОС-ПАС-САРСАТ / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Радиотехника. – 2018. – № 8. – С. 204 – 211. – DOI : 10.18127/j00338486-201808-38.
8. Воскресенский Д. И. Устройства СВЧ и Антенны : [учебник] / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов [и др.]; под ред. Д. И. Воскресенского. – Изд. 4-е, испр. и доп. – Москва : Радиотехника, 2016. – 560 с.
9. Особенности бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов : Материалы научно-технического семинара, Истра, 25 сентября 2013 года. – Истра : Научно-исследовательский институт электромеханики, 2013. – С. 55 – 58.
10. Бейкер Р. Введение в теорию виброиспытаний / Ричард Бейкер. – 1994. – 44 с.
11. Беляков И. Т. Основы космической технологии / И. Т. Беляков, Ю. Д. Борисов. – Москва : Машиностроение, 1980. – 185 с.
12. Фортескью П. Разработка систем космических аппаратов / П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Старка. – Москва : Альпина Паблишер, 2015. – 765 с.
13. Белоус А. И. Космическая электроника. В 2-х книгах. Книга 2 / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – Москва : Техносфера, 2015. – 488 с.
14. Миниатюрные бортовые антенны / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2017. – Т. 159. – № 4. – С. 31 – 41.
15. Application of spiral antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, A. Zhukov [et al.] // Proceedings – 5th International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT-MIPT 2018. – Moscow, 2018. – P. 91 – 93. – DOI : 10.1109/EnT-MIPT.2018.00027.
16. Применение рупорной антенны в качестве бортовой антенны радиолинии передачи целевой информации / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2019. – Т. 173. – № 6. – С. 41 – 50.
17. Применение спиральных антенн для бортовых систем и комплексов / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев, М. Р. Салихов // Труды МАИ. – 2019. – № 106. – С. 7. – URL : <http://trudymai.ru/published.php?ID=105685>.
18. Application of dipole antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, M. Salikhov [et al.] // 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT 2019. – Dolgoprudny, 2019. – P. 9030543. – DOI : 10.1109/EnT47717.2019.9030543.
19. Application of horn antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Ovchinnikova, N. D. To, S. Kondrat'eva [et al.] // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2020. – Dolgoprudny, 2020. – P. 9431308. – DOI : 10.1109/EnT50437.2020.9431308.
20. Космические аппараты и комплексы // АО «Корпорация «ВНИИЭМ» : [сайт]. – 2021. – URL : [http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=category&id=37:spaceprograms&Itemid=62&layout=default](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=category&id=37:spaceprograms&Itemid=62&layout=default).
21. Гаджиев Э. В. Конструкции малых космических аппаратов / Э. В. Гаджиев, А. В. Заграева // Космические системы, Москва, 27 апреля 2021 года. – Москва : Перо, 2021. – С. 32 – 33.
22. КА «Канопус-В» № 1 – первый российский малый космический аппарат высокодетального дистанционного зондирования Земли нового поколения / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2017. – Т. 156. – № 1. – С. 10 – 20.
23. Научный космический аппарат «Ломоносов» / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2017. – Т. 161. – С. 28 – 44.
24. История создания космического комплекса «Канопус-В» и Белорусского космического комплекса / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2019. – Т. 169. – № 2. – С. 39 – 44.
25. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК». – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 130 с.
26. Космический комплекс «Ионозонд» / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2019. – Т. 170. – № 3. – С. 40 – 48.
27. Запуск первого российского метеорологического КА нового поколения «Метеор-М» № 1 – начало воссоздания Отечественной метеорологической орбитальной группировки / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2018. – Т. 165. – № 4. – С. 46 – 60.
28. Космический аппарат «Метеор-М» № 2 / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2018. – Т. 166. – № 5. – С. 36 – 48.
29. Антенно-фидерное устройство телекомандной системы космических аппаратов на базе платформы «Канопус-В» / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». – Москва: АО «Российские космические системы», 2018. – С. 444 – 449.
30. Применение антенного изделия при проектировании бортовых антенно-фидерных устройств / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев, М. Р. Салихов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2020. – Т. 174. – № 1. – С. 43 – 51.

31. Антенная система космических аппаратов серии «Метеор-М» / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». – Москва: АО «Российские космические системы», 2018. – С. 459 – 464.
32. Антенная система для бортовой аппаратуры КО-СПАС–САРСАТ / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». – Москва : АО «Российские космические системы», 2018. – С. 449 – 459.
33. Перспективы развития бортовой антенной системы космических аппаратов серии «Метеор-М» / А. Б. Захаренко, А. Ю. Федотов, Э. В. Гаджиев [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 182. – № 3. – С. 19 – 23.
34. Построение совмещенных бортовых антенн / А. Б. Захаренко, А. Ю. Федотов, А. Г. Генералов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – Т. 169. – № 2. – С. 34 – 38.
35. К вопросу о построении остронаправленной перенацеливаемой бортовой антенны космических аппаратов / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2018. – Т. 164. – № 3. – С. 26 – 31.
36. Состояние и перспективы развития бортовых антенно-фидерных устройств радиолинии передачи целевой информации / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2018. – № 2 (30). – С. 44 – 52.
37. Антенные системы радиолинии передачи информации космических аппаратов. Состояние и перспективы развития / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин [и др.] // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 3. – С. 86 – 95. – DOI : 10.18127/j00338486-202103-09.
38. Пономарев Л. И. Сканирующие многочастотные совмещенные антенные решетки / Л. И. Пономарев, В. И. Степаненко. – Москва : Радиотехника, 2009. – 328 с.
39. Uniform amplitude excitation of radiating elements in array antenna pin-fed from radial waveguide / L. Pazin, Y. Leviatan // IEE Proc. – Microw. Antennas Propag. – 2001. – Vol. 148. – No. 6. – P. 413 – 417.
40. Voskresenskiy D. I. Synthesis of a circular antenna array on a conducting conical surface to attain omnidirectional pattern / D. I. Voskresenskiy, E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratieva // KpbiMuKo 2010 CriMiCo – 2010 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, Sevastopol, Crimea, 13 – 17 сентября 2010 года ; Sevastopol National Technical University ; Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, NTUU KPI, SRI of Telecommunications, NTUU KPI, Institute of Telecommunication Systems. – Sevastopol, 2010. – P. 546 – 547. – DOI : 10.1109/crmico.2010.5632710.
41. Двухдиапазонная антенная решетка с косекансной диаграммой направленности / Е. В. Овчинникова, А. А. Соколов // Антенны. – 2011. – № 4. – С. 14 – 19.
42. Ovchinnikova E. V. Experimental research of the dual-band array with cosecant-shape far-field pattern / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratieva, A. A. Sokolov // KpbiMuKo 2010 CriMiCo – 2010 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, Sevastopol, Crimea, 13 – 17 сентября 2010 года; Sevastopol National Technical University, Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, NTUU KPI, SRI of Telecommunications, NTUU KPI, Institute of Telecommunication Systems. – Sevastopol, 2010. – P. 544 – 545. – DOI : 10.1109/crmico.2010.5632708.
43. Двухдиапазонная рупорная антенная решетка системы спутникового телевидения / Д. И. Воскресенский, Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева [и др.] // Антенны. – 2018. – № 3. – С. 8 – 18.
44. Двухдиапазонная микрополосковая антенная решетка системы спутникового телевидения / Фам Ван Винь, Э. В. Гаджиев, О. В. Васильев [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2017. – № 6. – Т. 161. – № 6. – С. 12 – 16.
45. Двухдиапазонные антенные системы спутникового телевидения / Фам Ван Винь, Е. В. Овчинникова // Труды 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2018)). – Севастополь, 2018. – С. 570 – 574.
46. Спутниковая антенна с эллиптической поляризацией / В. Д. Двуреченский, П. П. Телепнев, А. Ю. Федотов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2013. – № 3. – Т. 134. – С. 27 – 30.
47. Линейная антенна с эллиптической поляризацией для космических аппаратов / В. Д. Двуреченский, П. П. Телепнев, А. Ю. Федотов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2017. – Т. 161. – № 6. – С. 17 – 19.
48. Моделирование линейной антенной решетки из излучателей на основе малогабаритного волноводного поляризатора с выступами и линейной перегородкой / Нгуен Динь То, Е. В. Овчинникова, Т. А. Трофимова [и др.] // 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы. – Москва : Перо, 2021. – С. 321 – 322.
49. Волноводная антенная решетка X-диапазона с эллиптической поляризацией / Е. В. Овчинникова, Э. В. Гаджиев, С. Г. Кондратьева [и др.] // Труды 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника

и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2021)). – Севастополь, 2021. – № 3. – С. 114 – 115.  
50. Особенности построения бортовых антенных решеток

космических аппаратов / Е. В. Овчинникова, В. В. Фам, С. Г. Кондратьева [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2018. – № 3 (31). – С. 66 – 76.

Поступила в редакцию 19.08.2021

**Елена Викторовна Овчинникова**, доктор технических наук, доцент,  
e-mail: oea8888@gmail.com, т. 8 (915) 323-40-36.

(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))).

**Светлана Геннадьевна Кондратьева**, кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: kondratieff89@ya.ru, т. 8 (915) 042-94-22.

(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ));

Российский университет дружбы народов (РУДН)).

**Павел Александрович Шмачилин**, кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: shmachilin@gmail.com, т. 8 (916) 586-44-32.

(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ));

Российский университет дружбы народов (РУДН)).

**Татьяна Александровна Трофимова**, старший преподаватель,  
e-mail: tatr.1001@yandex.ru, т. 8 (916) 436-35-79.

(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))).

## CONSTRUCTION OF ONBOARD ANTENNA ARRAYS OF SPACECRAFT

**E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratyeva,  
P. A. Shmachilin, T. A. Trofimova**

*Antenna-feeder devices are an integral part of the on-board radio link for any purpose. A review of on-board antenna systems of spacecraft of both small and large class is presented. The types of used antennas, microwave devices, components of on-board antenna systems, depending on the purpose of the radio link, and types of microwave devices for various on-board systems and complexes are described through the example of antenna systems of small spacecraft designed on the basis of the Canopus-V space platform and series of large spacecraft Meteor-M. Factors affecting the functioning of antennas on board spacecraft are considered. The possibility of using on-board antenna arrays as part of the antenna systems of spacecraft is demonstrated, considering the state and trends of further development of on-board antenna-feeder devices, existing options for optimizing antenna arrays are presented based on the analysis of the documentation. In particular, an electrodynamic model of a SHF antenna array has been developed for use as part of an on-board high-speed radio link of advanced spacecraft. The results obtained in the course of electrodynamic modeling are presented: directional pattern, directional action coefficient and ellipticity coefficient of antenna array. The evaluation of the obtained results is performed.*

**Key words:** spacecraft; antenna-feeder device; antenna system, antenna arrays, spiral antenna, dipole antenna, horn antenna, directional pattern.

### References

1. Prigoda B. A. Aerials of aircraft / B. A. Prigoda, V. S. Kokunko. – Moscow : Voenizdat, 1964. – 120 p.
2. Bocharov V. S. Antenna system of the Ionosphere spacecraft / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2012. – Vol. 131. – No. 6. – Pp. 11 – 14.
3. Bocharov V. S. Results of flight tests of antenna-feeder devices of Canopus-V No. 1 and Belarusian Satellite and ways to improve their characteristics / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Radio engineering and telecommunication systems. – 2014. – № 4 (16). – Pp. 5 – 12.
4. Bocharov V. S. Variants of design of onboard antennas for sensing the surface from space / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Antennas. – 2015. – № 4 (215). – Pp. 3 – 8.
5. On-board antenna for constructing communication systems and intersatellite communication systems / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Iosifyan readings 2017 : Abstracts of conference reports, Istra, October 26, 2017. – Istra : Research Institute of Electromechanics, 2017. – Pp. 262 – 265.
6. Miniature antennas for Cubesats / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Siberian Journal of Science and Technology. – 2018. – Vol. 19. – No. 2. – Pp. 259-270. – DOI : 10.31772/2587-6066-2018-19-2-259-270.
7. Antenna system for on-board equipment of KOS-PAS-SARSAT / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Radiotekhnika. – 2018. – No. 8. – Pp. 204 – 211. – DOI : 10.18127/j00338486-201808-38.

8. Voskresenskii D. I. Microwave devices and antennas: [Manual] / D. I. Voskresenskii, V. L. Gostiukhin, V. M. Maksimov [et al.]; edited by D. I. Voskresenskii. – 4<sup>th</sup> ed., revised and enlarged, Moscow: Radio Engineering, 2016. – 560 p.
9. Features of on-board antenna-feeder devices of spacecraft / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Prospects for the development of antenna-feeder devices of aircraft : Materials of a scientific and technical seminar, Istra, September 25, 2013. – Istra : Research Institute of Electromechanics, 2013. – Pp. 55 – 58.
10. Baker R. Introduction to the theory of vibration tests / Richard Baker. – 1994. – 44 p.
11. Belyakov I. T. Fundamentals of space technology / I. T. Belyakov, Yu. D. Borisov. – Moscow : Mashinostroenie, 1980. – 185 p.
12. Fortescue P. Development of systems of spacecraft/ P. Fortescue, G. Swaynerd, D. Stark. – Moscow : Alpina Publisher, 2015. – 765 p.
13. Belous A. I. Space electronics. In 2 books. Book 2 / A. I. Belous, V. A. Solodukha, S. V. Shvedov. – Moscow : Technosphere, 2015. – 488 p.
14. Miniature on-board antennas / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2017. – Vol. 159. – No. 4. – Pp. 31 – 41.
15. Application of spiral antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, A. Zhukov [et al.] // Proceedings – 5th International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT-MIPT 2018. – Moscow, 2018. – Pp. 91 – 93. – DOI : 10.1109/EnT-MIPT.2018.00027.
16. The use of a horn antenna as an on-board antenna of a mission data transmission radio link / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratieva, P. A. Shmachilin [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2019. – Vol. 173. – No. 6. – Pp. 41 – 50.
17. The use of helical antennas for on-board systems / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev, M. R. Salikhov // Proceedings of MAI. – 2019. – No. 106. – 7. – URL : <http://trudymai.ru/published.php?ID=105685>.
18. Application of dipole antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, M. Salikhov [et al.] // 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT 2019. – Dolgoprudny, 2019. – P. 9030543. – DOI : 10.1109/EnT47717.2019.9030543.
19. Application of horn antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Ovchinnikova, N. D. To, S. Kondrat'eva [et al.] // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2020. – Dolgoprudny, 2020. – P. 9431308. – DOI : 10.1109/EnT50437.2020.9431308.
20. Spacecraft and complexes // VNIIEEM Corporation JSC : [website]. – 2021. – URL : [http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=category&id=37:spaceprograms&Itemid=62&layout=default](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=category&id=37:spaceprograms&Itemid=62&layout=default).
21. Gadzhiev E. V. Designs of small spacecraft / E. V. Gadzhiev, A. V. Zagraeva // Space Systems, Moscow, April 27, 2021. – Moscow : Pero, 2021. – Pp. 32 – 33.
22. ‘Canopus-V’ No. 1 - the first Russian new generation small spacecraft for high resolution remote sensing of the Earth / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A.V. Gorbunov [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2017. – Vol. 156. – No. 1. – Pp. 10 – 20.
23. Scientific spacecraft ‘Lomonosov’ / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A.V. Gorbunov [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2017. – Vol. 161. – Pp. 28 – 44.
24. The history of creation of ‘Canopus-V’ space system and Belarusian space complex / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A.V. Gorbunov [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2019. – Vol. 169. – No. 2. – Pp. 39 – 44.
25. The space system for operational monitoring of technogenic and natural disasters ‘Canopus-V’ with ‘Canopus-V-IK’. - Moscow : VNIIEEM Corporation JSC, 2017. – 130 p.
26. The Ionozond space system / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A.V. Gorbunov [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2019. – Vol. 170. – No. 3. – Pp. 40 – 48.
27. Launch of the first Russian meteorological spacecraft of a new generation ‘Meteor-M’ No. 1 - the beginning of the restoration of the National meteorological orbital grouping / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A.V. Gorbunov [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2018. – Vol. 165. – No. 4. – Pp. 46 – 60.
28. Meteor-M No. 2 / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A.V. Gorbunov [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2018. – Vol. 166. – No. 5. – Pp. 36 – 48.
29. Antenna-feeder device of the telecommand system of spacecraft based on the Canopus-V platform / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference ‘Ac-

- tual problems of rocket and space instrumentation and information technologies'. -Moscow: Russian Space Systems JSC, 2018. – Pp. 444 – 449.
30. The use of an antenna product in the design of on-board antenna-feeder devices / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev, M. R. Salikhov // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – 2020. – Vol. 174. – No. 1. – Pp. 43 – 51.
31. Antenna system of Meteor-M series spacecraft / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference ‘Actual problems of rocket and space instrumentation and information technologies’. –Moscow : Russian Space Systems JSC, 2018. – Pp. 459 – 464.
32. Antenna system for onboard equipment of KOS-PAS-SARSAT / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference ‘Actual problems of rocket and space instrumentation and information technologies’. - Moscow : Russian Space Systems JSC, 2018. –Pp. 449 – 459.
33. Prospects for the development of the on-board antenna system of spacecraft of Meteor-M series / A. B. Zakharenko, A. Y. Fedotov, E. V. Gadzhiev [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – 2021. – Vol. 182. – No. 3. – Pp. 19 – 23.
34. Construction of combined on-board antennas / A. B. Zakharenko, A. Iu. Fedotov, A. G. Generalov [et al.] // Matters of electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2019. –Vol. 169. – No. 2. – Pp. 34 – 38.
35. To the matters of construction of narrow-beam re-directed onboard antenna of spacecraft / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – 2018. – Vol. 164. – No. 3. – Pp. 26 – 31.
36. The state and prospects of development of on-board antenna-feeder devices of the mission data transmission radio link / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Radio-technical and telecommunication systems. – 2018. – № 2 (30). – Pp. 44 - 52.
37. Antenna systems of the satellite radio data transmission link. State and prospects of development / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondrateva, P. A. Shmachilin [et al.] // Radio Engineering. - 2021. – Vol. 85. – No. 3. – Pp. 86 – 95. – DOI : 10.18127/j00338486-202103-09.
38. Ponomarev L. I. Scanning multi-frequency combined antenna arrays / L. I. Ponomarev, V. I. Stepanenko. – Moscow : Radio Engineering, 2009. – 328 p.
39. Uniform amplitude excitation of radiating elements in array antenna pin-fed from radial waveguide / L. Pazin, Y. Leviatan // IEE Proc. – Microw. Antennas Propag. – 2001. – Vol. 148. – No. 6. – P. 413 – 417.
40. Voskresenskiy D. I. Synthesis of a circular antenna array on a conducting conical surface to attain omnidirectional pattern / D. I. Voskresenskiy, E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratieva // Crimean Conference – 2010 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, Sevastopol, Crimea, 13 – 17 September 2010 ; Sevastopol National Technical University ; Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, NTUU KPI, SRI of Telecommunications, NTUU KPI, Institute of Telecommunication Systems. – Sevastopol, 2010. – P. 546 – 547. – DOI : 10.1109/crmico.2010.5632710.
41. A dual-band antenna array with a cosecant pattern / E. V. Ovchinnikova, A. A. Sokolov // Antennas. – 2011. – No. 4. – Pp. 14 – 19.
42. Ovchinnikova E. V. Experimental research of the dual-band array with cosecant-shape far-field pattern / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratieva, A. A. Sokolov // КрбиМуКо 2010 CriMiCo – 2010 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, Sevastopol, Crimea, 13 – 17 September 2010; Sevastopol National Technical University, Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, NTUU KPI, SRI of Telecommunications, NTUU KPI, Institute of Telecommunication Systems. – Sevastopol, 2010. – Pp. 544 – 545. – DOI : 10.1109/crmico.2010.5632708.
43. Dual-band horn antenna array of satellite television systems / D. I. Voskresenskii, E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondrateva [et al.] // Antennas. – 2018. – No. 3. – Pp. 8 – 18.
44. Dual-band microstrip antenna array of satellite television system / Pham Van Vinh, E. V. Gadzhiev, O. V. Vasiliev [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – 2017. – No. 6. – Vol. 161. – No. 6. – Pp. 12 – 16.
45. Dual-band antenna systems for satellite TV / Pham van Vinh, Ovchinnikova E. V. // Proceedings of the 28th International Crimean Conference ‘Microwave and Telecommunication Technology’ (Crimean Conference 2018)). – Sevastopol, 2018. – Pp. 570 – 574.
46. Satellite antenna with elliptical polarization / V. D. Dvurechenskii, P. P. Telepnev, A. Iu. Fedotov // Matters of Electromechanics, VNIIEM Proceedings. - Moscow : VNIIEM Corporation JSC , 2013. – No. 3. – Vol. 134. – Pp. 27 – 30.

47. Linear antenna with elliptical polarization for spacecraft / V. D. Dvurechenskii, P. P. Telepnev, A. Iu. Fedotov // Matters of electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – 2017. Т. 161. – No. 6. – Pp. 17 – 19.
48. Modeling of a linear antenna array of emitters based on the compact waveguide polarizer with projections and linear partition / Nguyen Dinh The, E. V. Ovchinnikova, T. A. Trofimova [et al.] // 20th International Conference ‘Aviation and Space’. Theses. - Moscow : Pero, 2021. – Pp. 321 – 322.
49. X-band waveguide antenna array with elliptical polarization / E. V. Ovchinnikova, E. V. Gadzhiev, S. G. Kondratieva [et al.] // Proceedings of the 30th International Crimean Conference ‘Microwave and Telecommunication Technologies’ (Crimean Conference 2021)). - Sevastopol, 2021. – No. 3. – Pp. 114 – 115.
50. Features of construction of onboard antenna arrays of spacecraft / E. V. Ovchinnikova, V. V. Pham, S. G. Kondratieva [et al.] // Radio engineering and telecommunication systems. – 2018. – № 3 (31). – Pp. 66 – 76.

**Elena Viktorovna Ovchinnikova**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
e-mail: oea8888@gmail.com, tel.: +7 (915) 323-40-36.

(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University))).

**Svetlana Gennadevna Kondrateva**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
e-mail: kondratieff89@ya.ru, tel.: +7 (915) 042-94-22.

(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University))).

(Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)).

**Pavel Aleksandrovich Shmachilin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
e-mail: shmachilin@gmail.com, tel.: +7 (916) 586-44-32.

(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University))).

(Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)).

**Tatiana Aleksandrovna Trofimova**, Senior Professor, e-mail: tatr.1001@yandex.ru,  
tel.: +7 (916) 436-35-79.

(Moscow Aviation Institute (MAI (National Research University))).