

# Электродинамика и антенные системы

УДК 621.396.67

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК

### КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Овчинникова Елена Викторовна**

доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)<sup>1</sup>.

Email: oea8888@gmail.com.

**Фам Ван Винь**

аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)<sup>1</sup>.

Email: phamvinh1609@gmail.com.

**Кондратьева Светлана Геннадьевна**

доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)<sup>1</sup>.

**Генералов Александр Георгиевич**

начальник лаборатории АО «Научно-исследовательский институт электромеханики»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Адрес: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

<sup>2</sup>Адрес: 143502, Московская обл., г. Истра, ул. Панфилова, 11.

<sup>3</sup>Адрес: 109028, Москва, Большой Трёхсвятительский пер., 2/1.

<sup>4</sup>Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.

**Гаджиев Эльчин Вахидович**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт электромеханики»<sup>2</sup>.

E-mail: otd24@niiem.ru.

**Васильев Олег Викторович**

начальник отдела АО «Московский ордена трудового красного знамени научно-исследовательский радиотехнический институт (МНИРТИ)»<sup>3</sup>.

**Калинин Тимур Валерьевич**

доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского<sup>4</sup>.

Email: timurkalinin@yandex.ru.

**Васильев Владимир Дмитриевич**

курсант, Военно-космическая академия имени А. Ф.Можайского<sup>4</sup>.

*Аннотация:* В данной работе подробно представлены и рассмотрены особенности построения бортовых антенных решёток. Показана специфика их проектирования, функционирования и установки на борту космических аппаратов. Определены основные дестабилизирующие факторы, влияющие на характеристики антенной системы и её конструктивное исполнение. Рассмотрены различные технологии практической реализации антенн. Разработана модель антенной решётки из рупорных излучателей с волноводной распределительной системой. Рассмотрены различные способы управления лучом с учётом особенностей работы на борту космического аппарата. Определены перспективные направления построения антенных систем с широкоугольным электрическим и электромеханическим сканированием. Представлены результаты численного электродинамического моделирования волноводно-рупорной антенной решётки. Определены параметры и основные характеристики антенной решётки. Рассмотрены различные конструкции волноводных поляризаторов, отмечены их достоинства и недостатки.

*Ключевые слова:* антенны систем спутниковой связи, космический аппарат, антенная решётка, антенно-фидерное устройство, бортовая антенна.

### Введение

Обмен информацией между космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), метеорологического, военного,

исследовательского назначения или другими КА и Землёй является одной из главных задач. 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 и её достоверность. Для примера приведём такую характеристику антенн, как ширина полосы рабочих частот.

Без применения АФУ на КА невозможно было бы осуществлять полёты с благополучной посадкой в заданном районе в условиях плохой видимости, невозможно было бы успешно исследовать космическое пространство и т. д. АФУ, образно говоря, исполняют роль «глаз и ушей» тех КА, на которых они установлены [1].

Прежде чем рассматривать вопросы построения бортовых АФУ для КА любого класса и целевого назначения, необходимо отметить ряд отличий бортовых антенн, устанавливаемых на КА, от наземных антенн и бортовых антенн, устанавливаемых на других мобильных носителях, т. е. необходимо определить специфику антенных систем КА.

Цель работы – описание особенностей работы антенных систем на борту КА и поиск технических решений, обеспечивающих их функционирование.

### **Специфика бортовых АФУ КА**

Специфика бортовых АФУ КА заключается в ряде особенностей, которые необходимо учитывать при их разработке [2]. При разработке и проектировании бортовых антенных решёток (АР) КА необходимо учитывать следующие особенности:

– на поверхности КА заказчиком отводится определённое место для установки антенн. Зачастую этого отведённого места бывает недостаточно для установления той АР, которая полностью бы отвечала заданным требованиям. Поэтому приходится использовать выносные элементы (кронштейны, штанги). Порой, в некоторых случаях, допускается даже ухудшение параметров;

– при 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. Вследствие явления интерференции получается суммарное электромагнитное поле. Влияние корпуса КА необходимо всегда принимать во внимание;

– специфичность работы АР КА, а именно то, что им приходится работать с электронными приборами, рассчитанными на выполнение определённых функций в условиях наличия ионизации, резких перепадов давления, температуры, ударных нагрузок, вибрации, и т. д.;

– наличие вибрационных нагрузок приводит к необходимости детальной проработки конструкции АФУ, обеспечивающей требуемые характеристики направленности и заданную надёжность;

– изменение положения КА в пространстве определяет способы управления лучом и требуемый сектор сканирования.

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

Также необходимо обеспечить высокую прочность конструкции антенны. Бортовые антенны, устанавливаемые на КА, подвергаются ряду серьёзных воздействий, способных привести к потере работоспособности. Это обусловлено способом выведения КА на целевую (рабочую) орбиту [3]. Своё влияние оказывает и космическое пространство.

Учитывая вышесказанное, можно определить основные виды нагрузок, которым подвергаются бортовые АФУ КА, а также сфор-

мулировать требования к применяемым материалам и конструкции бортовых антенн КА.

### Условия работы бортовых антенн КА

Вследствие внешних факторов при выведении КА на орбиту, показанном на рис. 1, нагрузки при старте ракеты-носителя (РН) делятся на несколько категорий, обусловленных разными этапами полёта.

После вертикального старта РН выходит на криволинейный участок траектории полёта, обеспечивающий постепенное уменьшение угла наклона её оси по отношению к местному горизонту. Для уменьшения потерь скорости РН от аэродинамического сопротивления, желательно как можно более быстрое прохождение ею плотных слоёв атмосферы и приближение её траектории полёта к горизонтальной только после выхода из этих слоёв. В плотных слоях атмосферы РН, как правило, движется по траектории, близкой к траектории с нулевой подъёмной силой, что обеспечивает снижение нагрузок, вызываемых аэродинамическими силами при больших углах атаки, на её корпус. Поэтому целесообразно рассмотреть механические воздействия на конструкцию бортовых антенн [4, 5].

Бортовые АФУ подвергаются разным механическим воздействиям, которые возникают в следующих случаях:

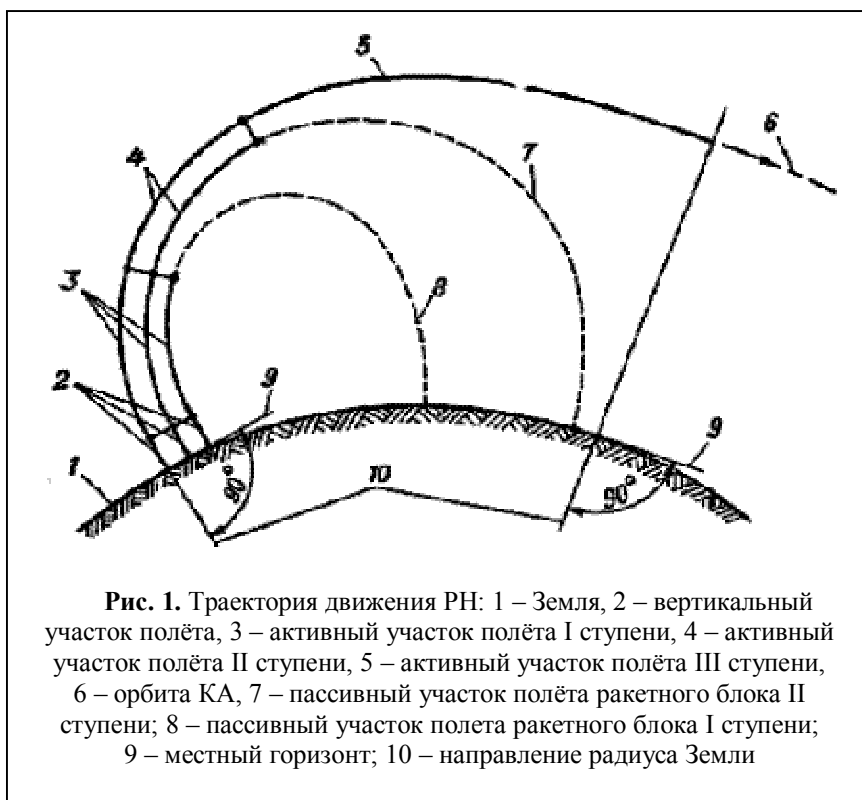
- при старте РН с КА;
- во время выведения КА на целевую орбиту с помощью РН;
- в момент отделения КА от РН после вывода на целевую орбиту.

Квазистатическая нагрузка создаётся при ускорении, проходит через весь КА и может присутствовать на протяжении нескольких

моментов. К ней относится, например, вибрация (преходящий компонент), однако её частный компонент отличается от естественной частоты КА и, следовательно, не вызывает существенного ускорения по всему КА. Максимум нагрузки возникает на уровне сверхзвуковой неустойчивости и при выключении основного двигателя, а не в момент отрыва. Непосредственно перед выключением двигателя уровень тяги удерживается на максимуме, в то время как масса топлива РН становится минимальной, благодаря чему ускорение КА достигает максимума. Квазистатические нагрузки критически важны для основных несущих элементов конструкции, таких как центральная камера ракетного двигателя.

Синусоидальная вибрация представляет собой набор низкочастотных преходящих вибраций, возникающих во время взлёта. Любой КА имеет резонансную частоту, способную повлиять на состояние КА и усилить вибрационное воздействие.

Акустический шум достигает предела в точке отрыва от Земли в момент, когда уровень шума, отражённого от стартовой площадки, и



**Рис. 1.** Траектория движения РН: 1 – Земля, 2 – вертикальный участок полёта, 3 – активный участок полёта I ступени, 4 – активный участок полёта II ступени, 5 – активный участок полёта III ступени, 6 – орбита КА, 7 – пассивный участок полёта ракетного блока II ступени; 8 – пассивный участок полёта ракетного блока I ступени; 9 – местный горизонт; 10 – направление радиуса Земли

давление окружающего воздуха доходят до максимума. Для оценки распределения спектра используются октавные (удвоенные) поддиапазоны частот. Ускорение акустического шума может оказаться важнейшим фактором, определяющим компоновку лёгких конструкций с большой площадью и малым весом, таких, как антенные рефлекторы типа «тарелок», солнечные батареи и боковые панели КА, которые не имеют дополнительной нагрузки по массе.

Испытания на случайную вибрацию позволяют убедиться разработчикам в том, что на относительно поздних этапах акустических испытаний или испытаний на случайную вибрацию интегрированного КА не будут выявлены никакие проблемы.

Ударные нагрузки возникают в интерфейсе КА после отделения разгонного блока и сброса обтекателя. Ускорение на данном этапе крайне высокое. Однако оно влияет лишь на жёстко закреплённые элементы, резонансные частоты которых близки к частотам источников ударов.

Энергия высокочастотной ударной нагрузки быстро затухает при удалении от источника ударов и в структурных соединениях между источником ударов и отвечающими на нагрузку элементами.

Учитывая приведённые выше виды механических воздействий, возникает необходимость

в формировании определённых требований по жёсткости конструкции бортовых антенн.

Во время движения КА на орбите по заданной траектории происходит климатическое воздействие. Это воздействие обусловлено особенностью движения КА. Примеры траекторий движения КА приведены на рис. 2.

Как правило, во время движения КА по заданной траектории он оказывается либо в тени, которая создается самой Землёй, либо подвергается воздействию Солнца. Причём такое явление наблюдается во время всего срока активного существования КА и носит циклический характер.

Отсюда следует, что весь КА, и в том числе бортовая антенная система, подвергаются воздействию как повышенной температуры в случае нахождения КА на освещённой траектории движения, так и пониженной температуры в случае нахождения в теневой части траектории движения КА.

Учитывая вышесказанное, возникает необходимость в формировании определённых требований к температуростойкости применяемых материалов в конструкции бортовых АФУ.

Помимо перечисленных выше механических и температурных воздействий, бортовые АФУ КА подвергаются воздействию космического пространства, а именно наличию высокого вакуума (фактического отсутствия атмосферного давления); радиации; метеороидов; метеоритной пыли; космического мусора и т. д.

Таким образом, возникает необходимость в формировании определённых требований к применяемым материалам, кабелям и конструкции бортовых антенн КА из-за вредного влияния космического пространства, например, влияние радиации, эффекта сублимации и т. д.

### Волноводные АР

Рассмотренные выше дестабилизирующие факторы приводят к повышению требований к тактико-техническим характери-



Рис. 2. Траектории движения КА по целевой орбите



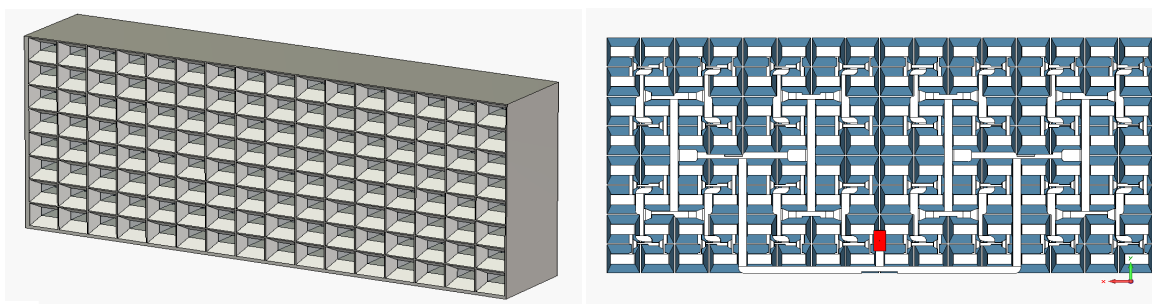


Рис. 3. Модель антенного полотна и распределительной системы приёмной АР спутникового телевидения, работающей в диапазоне частот 10,70–12,75 ГГц

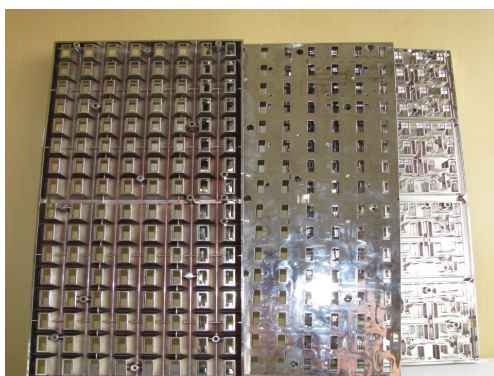


Рис. 4. Фотография антенного полотна и распределительной системы приёмной АР спутникового телевидения, выполненной по технологии гальванопластики

кам антенных систем. Конструкции АФУ КА должны обеспечивать высокую надёжность в сочетании с простотой реализации и малыми массогабаритными параметрами. Последнее требование относится, прежде всего, к глубине АФУ, т.к. размеры апертуры определяются энергетическими требованиями. Кроме того, в системах спутниковой связи применяются сигналы с круговой поляризацией. При этом все элементы АФУ должны обладать высокой электрической и механической прочностью, включая и распределительные системы. Поэтому элементы фидерного тракта целесообразно выполнять на волноводах, обладающих высокой прочностью и малыми потерями. Перспективным способом практической реализации рупорно-волноводного АФУ является применение технологии гальванопластики для изготовления компактных рупорных антенно-фидерных систем и совмещения их в одной апертуре [6–9]. Такие антенные системы уже были изготовлены

для работы в режиме приёма на частотах 10,7–12,75 ГГц. Фотография и модель антенной системы показаны на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

На рис. 5–7 показаны характеристики такой решётки.

Антенны, устанавливаемые на подвижном

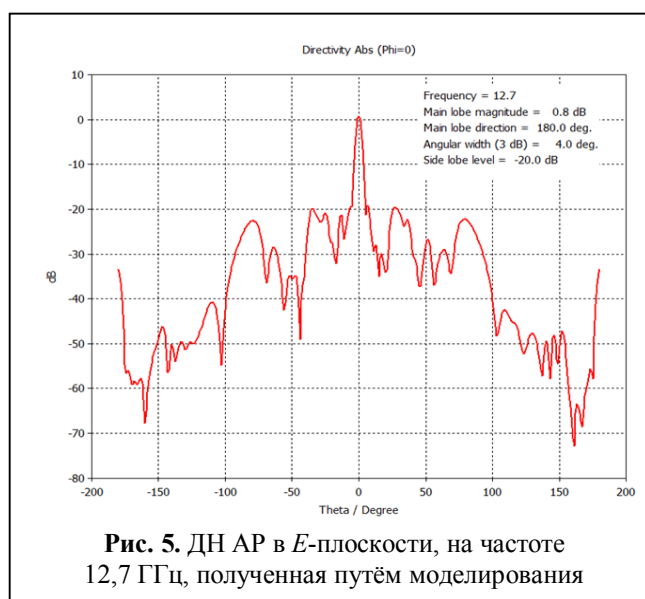


Рис. 5. ДН АР в *E*-плоскости, на частоте 12,7 ГГц, полученная путём моделирования

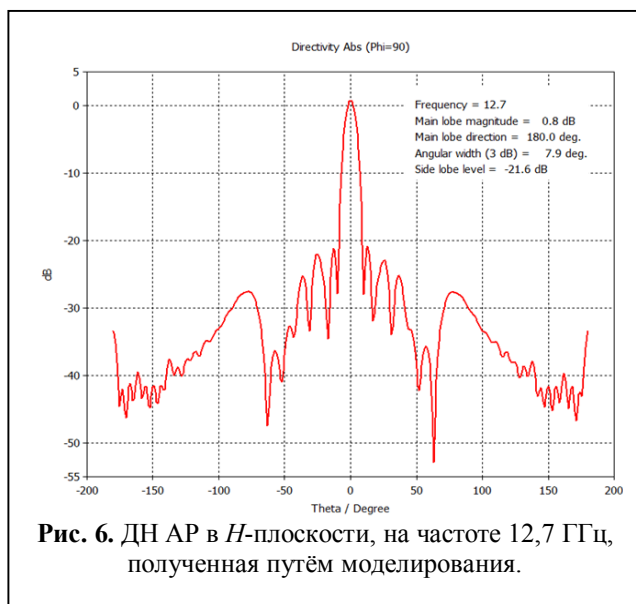


Рис. 6. ДН АР в  $H$ -плоскости, на частоте 12,7 ГГц, полученная путём моделирования.

объекте, должны обеспечивать устойчивый приём и передачу сигнала при изменении ракурса объекта. Поэтому на борту КА необходимо обеспечивать возможность широкоугольного сканирования. Применение конформных антенных систем позволяет осуществлять широкоугольное сканирование, но для его реализации необходимо коммутировать излучающий раскрыв, а также управлять амплитудой, фазой и поляризацией [10]. Кроме того, конформная антенная система имеет большие габариты и избыточное число элементов. В настоящее время используются антенные системы с механическим сканированием,

они существенно дешевле аналогичных активных фазированных антенных решёток (АФАР) и более предпочтительны в системах с круговой поляризацией. Перспективным направлением является разработка антенных систем с широкоугольным механическим или электромеханическим сканированием [11–13]. Однако при установке сканирующих антенных систем на КА необходимо учитывать влияние поворотных устройств на режим работы КА. Возможность осуществления широкоугольного сканирования с плоской апертурой позволяет существенно уменьшить массогабаритные характеристики и количество управляемых элементов в АР. Также перспективным направлением является применение цифровых активных фазированных антенных решёток (ЦАФАР) [14–16] в системах спутниковой связи.

#### Волноводные поляризаторы

Для преобразования используются поляризационные секции на основе круглых или квадратных волноводов. Поляризаторы на основе квадратных волноводов проще в изготовлении и расчёте, т. к. неоднородности, благодаря которым возникает фазовый сдвиг  $90^\circ$  между ортогональными составляющими поля, размещаются в ортогональных плоскостях декартовой системы координат. В настоящее время

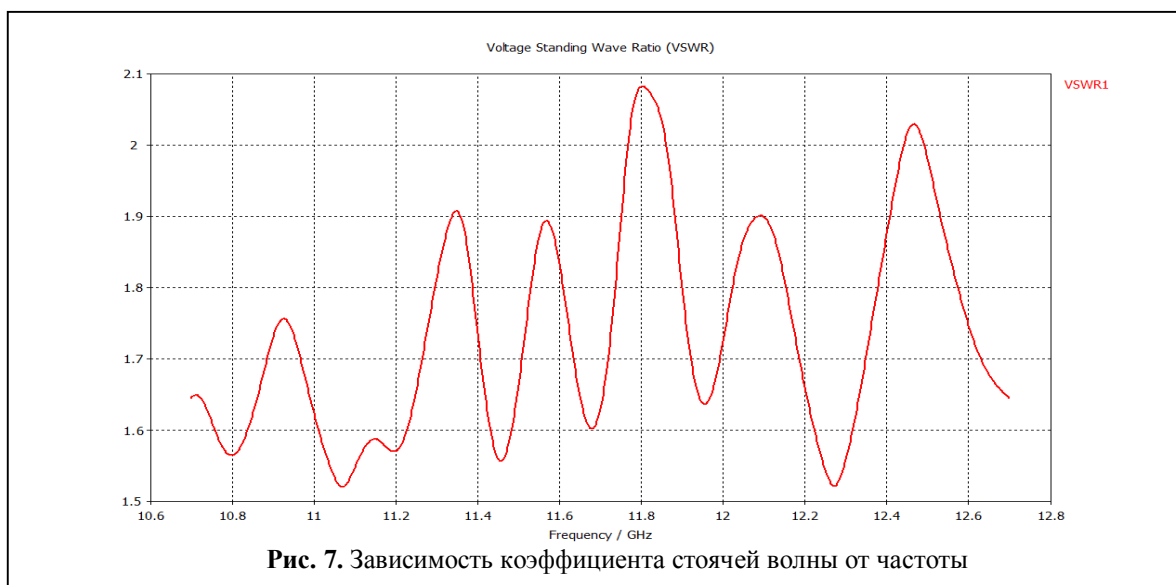


Рис. 7. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты

для построения поляризаторов на квадратном волноводе широко применяются различные комбинации тонких диафрагм, расположенных на двух противоположных стенках волновода или отрезки гофрированных волноводов. Однако для возбуждения таких поляризационных секций требуется поворачивать питающий волновод на  $45^\circ$ , а также применять согласующие переходы, что конструктивно не всегда удобно [17–19]. Аналогичные конструкции поляризаторов на квадратном волноводе приведены в пособии [20]. Здесь рассмотрены поляризаторы на квадратном волноводе с металлическими и диэлектрическими вставками.

Известна конструкция поляризатора на квадратном волноводе, в которой питающий волновод не поворачивается относительно поляризационной секции [21]. Поляризатор выполнен на Т-образном переходе, соединяющем регулярный прямоугольный волновод с квадратной поляризационной секцией. Такая конструкция разработана с целью повышения электрической прочности и имеет большие габариты, чем конструкции, рассмотренные выше.

Известен волноводный поляризатор [22], содержащий первый отрезок круглого волновода, соединённый коническим переходом со вторым отрезком круглого волновода, имеющим больший диаметр, в каждом из которых размещены фазосдвигающие элементы в виде двух рядов емкостных металлических стержней, установленных диаметрально противоположно и в общей продольной плоскости, и две пары металлических гребней, одна из которых установлена диаметрально противоположно в первом отрезке круглого волновода в плоскости, ортогональной общей продольной плоскости, а вторая пара металлических гребней установлена диаметрально противоположно во втором отрезке круглого волновода в общей продольной плоскости и в них установлены емкостные металлические стержни.

Недостатком этого волноводного поляризатора является сложность изготовления, потому что он состоит из множества элементов, кото-

рые должны быть строго рассчитаны и установлены в расчётных местах, что является непростой технической задачей. Подстроечных элементов нет, и поэтому характеристики зависят от расчёта и точности установки. Из-за наличия резонансных элементов волноводный поляризатор имеет узкую частотную полосу. Характеристики (коэффициент эллиптичности  $< 0,92$ , коэффициент бегущей волны  $< 0,8$ , полоса пропускания  $< 8\%$ ) получаются неудовлетворительными.

Для расширения рабочей полосы в таких поляризаторах применяются различные законы размещения диафрагм или гофров. Существенное расширение рабочей полосы достигается применением волноводов и гофров сложной формы [23–28].

Известны различные конструкции волноводных поляризаторов на прямоугольных и квадратных волноводах с применением волноводов со сложной формой поперечного сечения [29].

Аналогичные конструкции волноводов приведены в статьях [30, 31], однако, такие конструкции узкополосны. Рабочая полоса не превышает единиц процентов.

Известны конструкции диафрагменных поляризаторов на квадратном волноводе, рассмотренные в работе [32]. Данный класс устройств применяется в бортовых и наземных станциях космической связи для преобразования линейно поляризованных волн в волны круговой поляризации и обратно. Во многом конструкция поляризатора аналогична конструкции, приведённой в статье [19]. Отличие её состоит в более оптимальном, с точки зрения расширения рабочей полосы, выборе закона, по которому меняется высота гребней замедляющей структуры в диафрагме. Поляризатор обеспечивает дифференциальный фазовый сдвиг с точностью  $1,2^\circ$  в выделенных диапазонах, при КСВ  $< 1,038$ . В расширенном частотном диапазоне с коэффициентом перекрытия 1,29 погрешность реализации дифференциального фазового сдвига не превышает  $1,5^\circ$  при КСВ  $< 1,045$ . Однако эти характеристики ре-

лизуются с помощью замедляющей структуры, состоящей из 20 элементов.

Более простым по своей конструкции является волноводный поляризатор, описанный в патенте [33]. Он содержит отрезок волновода, выполненный в виде усечённой пирамиды, и два клина, с помощью которых образован переход от квадратного сечения к  $T$ -образному. Клинья выполнены с основанием  $0,2 \lambda \times 0,7 \lambda$  и высотой, равной высоте отрезка волновода, где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве. Введены две группы настроечных элементов, причём каждая группа состоит их трёх элементов и расположена по осевым линиям широких стенок волноводов, образующих  $T$ -образное сечение. Первый элемент отстоит от торца  $T$ -образного сечения на расстоянии  $\lambda_{\text{ср}}/4$ , а последующие – на расстоянии  $\lambda_{\text{ср}}/8$  друг от друга, где  $\lambda_{\text{ср}}$  – средняя длина волны в волноводе. Поляризатор обеспечивает коэффициент эллиптичности, равный 0,98, коэффициент бегущей волны, равный 0,95, полосу пропускания 18% и упрощение конструкции. Однако конструкция имеет сравнительно большие габариты и требует подстройки параметров.

### Заключение

Рассмотрены особенности установки и функционирования антенных систем на борту КА. Определены требования к конструкциям АФУ и устройствам управления лучом. Рассмотрены различные варианты построения антенных систем с широкоугольным электрическим и электромеханическим сканированием. Показана необходимость перехода к активным антенным системам с цифровым формированием и управлением лучом. Рассмотрены различные конструкции волноводных поляризаторов.

### Литература

1. Пригода Б.А., Кокунько В.С. Антенны летательных аппаратов. М. : Воениздат, 1964 г. 120 с.
2. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Особенности бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов // Сборник тезисов научно-технического семинара «Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных

аппаратов» — Истра : ОАО «НИИЭМ». 2013. С. 55–58.

3. Салмин В.В., Петрухина К.В. Методика проектно-баллистической оптимизации и моделирование процесса перевода космического аппарата с эллиптической орбиты на геостационарную орбиту // Сборник трудов XVII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. 2015.

4. Фортескью П., Суайнерда Г., Старка Д. Разработка систем космических аппаратов. М. : Альпина Паблишер, 2015. 765 с.

5. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х книгах. Книга 2. М. : Техносфера, 2015. 488 с.

6. Овчинникова Е.В. Бортовые фазированные антенные решётки СВЧ-диапазона / под редакцией Воскресенского Д.И. М. : Изд-во МАИ, 2016. 164 с.

7. Васильев О.В., Фам Ван Винь, Овчинникова Е.В., Гиголо А.И., Лисицкий В.В. Антенные решетки систем спутникового телевидения (обзор) // «Антенны». 2016. №4. С. 22–33.

8. Фам Ван Винь, Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В. Широкополосные антенны систем спутникового телевидения // Труды 27-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2017). 10–16 сентября 2017. Севастополь.

9. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Фам Ван Винь, Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А. Двухдиапазонная рупорная антенная решетка системы спутникового телевидения // Антенны. №3. 2018. С. 8–18.

10. Воскресенский Д. И., Пономарев Л. И., Филиппов В.С. Выпуклые сканирующие антенны. М. : Советское радио, 1978. 304 с.

11. Milroy W.W. Antenna array configuration employing continuous transverse stub elements : пат. США. № US5349363; опубли. 20.09.1994.

12. Milroy W.W. Continuous transverse stub element devises and method of making same : пат. США. № US5266961; опубли. 30.11.1993.

13. Овчинникова Е.В. Широкополосные антенные решетки с широким сектором обзора : дисс. ... докт. техн. наук. М., МАИ. 2017.

14. Липатов А.А., Федорова Т.М., Скорик Е.Т. Комплексное использование геостационарного спутника подвижной связи нового поколения Thuraya // Материалы 11-й Международной крымской микроволновой конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (CriMiCo-2001), 10–14 сентября 2001.

15. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки в системах спутниковой связи // Первая миля. Last mile (приложение к журналу "Электроника: наука, технология, бизнес"). 2008. № 4. С. 10–15. № 5. С. 16–20.



16. Arne F.J. SANTANA. Smart Antenna Terminal // DLR-Workshop "Aktive Antennen". Bonn-Oberkassel. 22–23 November. 2005.

17. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. М.: Энергия, 1973. 440 с.

18. Al-Hariri M.B., Olver A.D., Clarricoats P.J.B. Low-attenuation properties of corrugated rectangular waveguide // Electron. Lett. 1974. Vol. 10. Pp. 304–305.

19. Bryant G.H. Propagation in corrugate Field Theory Design of Square Waveguide [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/3129452\\_Field\\_Theory\\_Design\\_of\\_Square\\_Waveguide\\_Iris\\_Polarizers](https://www.researchgate.net/publication/3129452_Field_Theory_Design_of_Square_Waveguide_Iris_Polarizers) [дата обращения 03.04.2018].

20. Simmons A.J. Phase shift by periodic loading of waveguide and its application to broad-band circular polarization // IRE Trans. Microwave Theory Tech. 1955. No. 6. Pp. 18–21.

21. Соловьянова И.П., Наймушин М.П., Шабунин С.Н. Методические указания к лабораторным работам 3, 4 по курсам «Электродинамика и распространение радиоволн» и «Электромагнитные поля и волны». Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУУПИ, 2006. 37 с.

22. Антоненко В.М., Верлявский И.З., Васильев Д.В., Сидоренко А.Д., Черепанов В.П. Волноводный поляризатор: авт. свид. СССР. № SU1798839A1, опубл. 28.02.1993. Бюл. № 8.

23. Модель А.М., Антоненко В.М., Берлявский В.З. Волноводный поляризатор: авт. свид. СССР. № 1793496; опубл. 07.02.1993.

24. Rebollar J. Broad-band corrugated polarisers using different kinds of corrugations // IEEE AP-S Int. Symp.: digest. Vancouver, 1985. Pp. 639–642.

25. Virone G., Tascone R., Baralis M. et al. A novel design tool for waveguide polarizers // IEEE

Trans. Microwave Theory Tech. 2005. No. 3. Pp. 888–894.

26. Virone G., Tascone R., Peverini O.A. et al. Combined-phase-shift waveguide polarizer // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2008. No. 8. Pp. 509–511.

27. Tucholke U., Arndt F., Wriedt T. Field theory design of square waveguide iris polarizers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1986. No. 1. Pp. 156–160.

28. Liu Y., Li F., Li X., He H. Design and optimization of wide and dual band waveguide polarizer // Global Symp. Millimeter Waves: symp. proc. Nanjing, 2008. Pp. 384–386.

29. Rebollar J.M., Frutos J. Dual-band compact square waveguide corrugated polarizer // IEEE AP-S Int. Symp.: symp. digest. Orlando, 1999. Pp. 962–965.

30. Рудь Л.А., Шпаценко К.С. Электродинамическая модель и характеристики поляризаторов на отрезках квадратного волновода с диагонально расположенными квадратными выступами // Радиофизика и электроника. 2012. Т. 3(17), № 1. С. 3–10.

31. Toyama N. A cross-shaped horn and a square waveguide polarizer for a circularly polarized shaped beam antenna for a broadcasting satellite // IEEE MTT-S Int. Symp.: symp. digest. Washington, 1980. Pp. 299–301.

32. Levy R. The relationship between dual mode cavity crosscoupling and waveguide polarizers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1995. No. 11. Pp. 2614–2620.

33. Мануилов М.Б. Электродинамический анализ конечных волноводных антенных решеток, частотно-селективных и распределительных устройств на гребневых и прямоугольных волноводах: дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Ростов-на-Дону, 2007.

34. Беляев В.В., Богданов Ю.Н., Маюнов А.Т. Волноводный поляризатор: пат. РФ. № 2298862, заявл. 13.07.2005, опубл. 10.05.2007.

Поступила 26 июня 2018 г.

English

## PECULIARITIES OF CONSTRUCTING SPACE VEHICLE-BORN ANTENNA ARRAYS

**Elena Viktorovna Ovchinnikova** – Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University)<sup>1</sup>. *E-mail*: oea8888@gmail.com.

**Fam Van Vin** – Graduate Student; Moscow Aviation Institute (National Research University)<sup>1</sup>. *E-mail*: phamvinh1609@gmail.com.

**Svetlana Gennadyevna Kondratyeva** – Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University)<sup>1</sup>.

**Alexander Georgiyevich Generalov** – Laboratory Head, Joint-Stock Company "Research Institute of Electrical Engineering"<sup>2</sup>.

**Elchin Vakhidovich Gadzhiyev** – Candidate of Technical Sciences; Leading Researcher, Joint-Stock Company "Research Institute of Electrical Engineering"<sup>2</sup>. *E-mail*: otd24@niem.ru.

**Oleg Viktorovich Vasilyev** – Department Head, Joint-Stock Company “Moscow Research Radio Engineering Institute of the Order of the Red Banner of Labour (MREI)”<sup>3</sup>.

**Timur Valeryevich Kalinin** – Associate Professor, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky<sup>4</sup>. *E-mail*: timurkalinin@yandex.ru.

**Vladimir Dmitrievich Vasilyev** – Cadet, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>*Address*: Russia, 125993, Moscow, A-80, GSP-3, Volokolamskoe sh., 4.

<sup>2</sup>*Address*: Russia, 143502, Mos. Region, Istra, Panfilov St., 11.

<sup>3</sup>*Address*: Russia, 109028, Moscow, Bolshoy Trekhsvyatitsky Per., 2/1.

<sup>4</sup>*Address*: Russia, 197198, St. Petersburg, Zhdanovskaya St., 13.

*Abstract*: Data exchange between all-purpose space vehicles and Earth is one of the main tasks. Antenna-feeder devices constitute an active component in the communication line the parameters of which, certainly, affect the transmitted message. The specifics of the space vehicle-borne antenna-feeder devices consist in a number of features which need to be considered in their development, namely: start conditions (vibration, impacts, etc.), destabilizing space factors (a high vacuum, radiation, temperature drops, etc.), effects of space vehicle body on the power parameters, the limited space for mounting antenna system, etc. All above listed factors are considered in this paper. Having analyzed and having made up some requirements to the design and the applied materials of vehicle-borne antennas, the paper considers the features of constructing the vehicle-borne antenna arrays. For example, it is offered to use the electrotyping technology for production of compact horn antenna-feeder systems and their combination in one aperture. Simulation results of the specified antenna arrays are given in this paper. A few thoughts on further development of the antenna array category are given. Then the ways of constructing the existing waveguide polarizers are examined. Their advantages and shortcomings are shown. Thus, this paper reviews the installation and operational features of space vehicle-borne antenna systems; requirements to designs of antenna-feeder devices and beam positioners are defined; various options of constructing antenna systems with wide-angle electric and electromechanical scanning are examined; the necessity to switch to active antenna systems with digital beam forming and control is shown; various designs of the waveguide polarizers are considered.

*Keywords*: antennas of satellite communication systems, space vehicle, antenna array, antenna-feeder device, on-board antenna.

### References

1. Prigoda B.A., Kokunko V.S. Airborne antennas. M. : Voenizdat, 1964. 120 p.
2. Bocharov V.S., Generalov A.G., Gadzhiyev E.V. Features of space vehicle-borne antenna-feeder devices. The collection of theses of scientific and technical seminar "Development trends of airborne antenna-feeder devices". Istra : JSC NIEM. 2013. Pp. 55–58.
3. Salmin V.V., Petrukhina K.V. Methods of project-oriented ballistic optimization and process modeling of space vehicle repositioning from the elliptic orbit into the geo-based orbit. Proceedings of the XVII All-Russian seminar on traffic control and navigation of airborne vehicles. Scientific Editor Balakin V.L. 2015.
4. Fortescue P., Swinerd G., Stark Jh. Spacecraft Systems Engineering. M. : Alpina Publisher, 2015. 765 p.
5. Belous A.I., Solodukha V. A., Shvedov S.V. The space electronics. In 2 books. Book 2. M. : Teknosfera, 2015. 488 p.
6. Ovchinnikova E.V. Vehicle-borne phased antenna arrays of microwave spectrum. Ed. by Voskresensky D.I. M. : MAI publishing house, 2016. 164 p.
7. Vasilyev O.V., Fam Van Vin, Ovchinnikova E.V., Gigolo A.I., Lissitsky V.V. Satellite television system antenna arrays (review) // Journal Antennas. 2016. No. 4. Pp. 22–33.
8. Fam Van Vin, Shmachilin P.A., Kondratyeva S.G., Gadzhiyev E.V. Satellite television system broadband antennas. Proceedings of the 27th International Crimean Conference "Microwave equipment and telecommunication technologies" (Krymiko 2017). September 10–16, 2017. Sevastopol.
9. Voskresenskiy D.I., Ovchinnikova E.V., Fam Van Vin, Kondratyeva S.G., Shmachilin P.A. Dual-band horn antenna array of satellite television system // Journal Antennas. 2018. No. 3.
10. Voskresensky D.I., Ponomarev L.I., Filippov V.S. The conformal scanning antennas. M. : Sov. radio, 1978.
11. Milroy W.W. Antenna array configuration employing continuous transverse stub elements. Patent USA. No. US5349363; Published 20.09.1994.
12. Milroy W.W. Continuous transverse stub element devises and method of making same : pat. USA. No. US5266961; Publ. 30.11.1993.

13. *Ovchinnikova E.V.* Broadband antenna arrays with wide field of view. Thesis for a degree of the Doctor of Engineering. Moscow: MAI, 2017.
14. *Lipatov A.A., Fedorova T.M., Skorik E.T.* Multipurpose use of the new generation Thuraya mobile communication geostationary satellite / Proceedings of the 11th International Crimean Microwave Conference "Microwave Equipment and Telecommunication Technologies" (CriMiCo 2001). September 10–14, 2001.
15. *Slyusar V.I.* Digital antenna arrays in satellite communication systems. The first mile. Last mile (Application to the journal "Electronics: Science, Technology, Business"). 2008. No. 4. Pp. 10–15. № 5. Pp. 16–20.
16. *Jacob A.F.* SANTANA. Smart Antenna Terminal // DLR-Workshop "Aktive Antennen". Bonn-Oberkassel. 2005. 22–23 November.
17. *Zhuk M.S., Molochkov Yu.B.* The engineering of lensed, scanning, wide-range antennas and feeder devices. Moscow : Energiya, 1973.
18. *Al-Hariri M.B., Olver A.D., Clarricoats P.J.B.* Low-attenuation properties of corrugated rectangular waveguide // Electron. Lett. 1974. Vol. 10. Pp. 304–305.
19. *Bryant G.H.* Propagation in corrugate Field Theory Design of Square Waveguide [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/3129452\\_Field\\_Theory\\_Design\\_of\\_Square\\_Waveguide\\_Iris\\_Polarizers](https://www.researchgate.net/publication/3129452_Field_Theory_Design_of_Square_Waveguide_Iris_Polarizers) [accessed 03.04. 2018].
20. *Simmons A.J.* Phase shift by periodic loading of waveguide and its application to broad-band circular polarization // IRE Trans. Microwave Theory Tech. 1955. No. 6. Pp. 18–21.
21. *Solovyanova I.P., Naimushin M.P., Shabunin S.N.* Guidelines for laboratory work 3, 4 courses "Electrodynamics and propagation of radio waves" and "Electromagnetic fields and waves". Yekaterinburg : UGTU-UIP, 2006. 37 p.
22. *Antonenko V.M., Verlyavskij I.Z., Vasil'ev D.V., Sidorenko A.D., Cherepanov V.P.* Waveguide polarizer : pat. USSR. No. SU1798839A1; publ. 28.02.1993.
23. *Model A.M., Antonenko V.M., Berlyavskiy V.Z.* Waveguide polarizer : pat. USSR. No. 1793496; publ. 07.02.1993.
24. *Rebollar J.* Broad-band corrugated polarisers using different kinds of corrugations // IEEE AP-S Int. Symp.: digest. Vancouver, 1985. Pp. 639–642.
25. *Virone G., Tascone R., Baralis M.* et al. A novel design tool for waveguide polarizers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2005. No. 3. Pp. 888–894.
26. *Virone G., Tascone R., Peverini O.A.* et al. Combined-phase-shift waveguide polarizer // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2008. No. 8. Pp. 509–511.
27. *Tucholke U., Arndt F., Wriedt T.* Field theory design of square waveguide iris polarizers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1986. No. 1. Pp. 156–160.
28. *Liu Y., Li F., Li X., He H.* Design and optimization of wide and dual band waveguide polarizer // Global Symp. Millimeter Waves: symp. proc. Nanjing, 2008. Pp. 384–386.
29. *Rebollar J.M., Frutos J.* Dual-band compact square waveguide corrugated polarizer // IEEE AP-S Int. Symp. : symp. digest. Orlando, 1999. Pp. 962–965.
30. *Rud L.A., Shpachenko K.S.* Electrodynamical model and features of polarizers in segments of a square waveguide with diagonally located square projections. // Radiophysics and Electronics. 2012. T. 3 (17), No. 1. Pp. 3–10.
31. *Toyama N.* A cross-shaped horn and a square waveguide polarizer for a circularly polarized shaped antenna for N. broadcasting // IEEE MTT-S Int. Symp. : symp. digest. Washington, 1980. Pp. 299–301.
32. *Levy R.* The relationship between dual mode cavity crosscoupling and waveguide polarizers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1995. T. 43, No. 11. Pp. 2614–2620.
33. *Manuilov M.B.* Electrodynamical analysis of finite waveguide antenna arrays, frequency-selective and distributing devices in ridged and rectangular waveguides. Thesis for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Rostov-on-Don, 2007
34. *Belyaev V.V., Bogdanov Yu.N., Mayunov A.T.* Waveguide polarizer : pat. RU. № 2298862; publ. 10.05.2007.