

6. Ильин, А. П. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии / А. П. Ильин, А. А. Громов. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002.

7. Синогина, Е. С. Изучение воспламенения горения высокоэнергетических материалов на основе бесхлорных окислителей : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Е. С. Синогина. Томск : ТГУ. 2006.

T. I. Gorbenko

ADJUSTMENT OF POWER PERFORMANCES OF PROPELLANT BASED ON AMMONIUM NITRATE

Thermodynamic analysis of power performances of compound solid propellant is given. The main emphasis is given on the ways of increasing the solid propellant efficiency based on ammonium nitrate and determination limits chemistry of high-power compounds can give. The influence of catalytic admixtures on the propellant ability to burn independently at atmospheric pressure is shown. The capabilities to increase the burning rate of propellant are considered.

Keywords: compound solid propellant, ammonium nitrate, ultra fine aluminum powder (Alex), steady-state burning rate, oxidizer superfluity coefficient.

УДК 621.385.6

Н. А. Тестоедов, И. В. Трифанов, И. В. Стерехов, Л. И. Оборина, Т. А. Трифанова

РАЗРАБОТКА АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ ДИАПАЗОНА КРАЙНЕ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ¹

Рассмотрены основные направления разработки антенно-фидерных устройств диапазона крайне высоких частот (КВЧ).

Ключевые слова: элементная база, антенно-фидерное устройство, система спутниковой связи, облучатель, диапазон частот, радиотехнические характеристики, электроиспытания.

Элементная база антенно-фидерных устройств (АФУ) КВЧ-диапазона может быть использована для создания устройств дефектоскопии и радиовидения, систем построения радиоизображений трехмерных объектов, устройств сверхвысокочастотной (СВЧ) диагностики плазмы, а также для производства и применения медицинской аппаратуры с использованием фокусировки в локальную область заданной формы, высокоразрешающих радиообъективов и других приборов контроля и обнаружения [1].

С освоением КВЧ-диапазона спутниковая связь получит огромный потенциал для широкого круга новых областей применения: подвижной персональной связи, широкополосного доступа к Интернету, мультимедийного широкого вещания, высокоскоростного обмена корпоративной информацией, определения местоположения абонентов мобильной связи. В каждом классе услуг спутниковая связь, работающая в КВЧ-диапазоне и в других уже освоенных диапазонах, будет способна обеспечить более высокое качество сервиса при сопоставимой стоимости по сравнению с наземными сетями. Высокое качество сервиса будет достигаться за счет широкополосности каналов, экономичности абонентских станций и простых пользовательских интерфейсов [2].

Это тенденция обусловлена явными преимуществами КВЧ-диапазона (30...300 ГГц). К ним относится более высокая разрешающая способность радиолокационных систем, более высокое быстродействие и большое количество каналов связи, возможность применения сверхширокополосных сигналов, меньшие габариты и масса аппаратуры [3].

По сравнению с оптическим, КВЧ-диапазон также имеет преимущества, такие как уверенное прохождение электромагнитного излучения в окнах прозрачности при любых погодных условиях. Наличие определенных полос поглощения миллиметровых волн в атмосфере позволит обеспечить электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств и скрытность связи между объектами в космосе [3].

Следует отметить, что мировая индустрия телекоммуникаций уже сегодня становится важнейшим фактором развития сетевой экономики как основы постиндустриального общества. Отечественная спутниковая связь, работающая в КВЧ-диапазоне, позволит расширить возможности интеграции России в мировые структуры сетевой экономики XXI в. и создать надежную единую систему спутниковой связи для решения различных задач [4].

¹ Работа выполнена при финансировании работ по гранту РНП 3172/11-09.

На некоторых частотах, совпадающих с полосами атмосферного поглощения электромагнитных колебаний КВЧ-диапазона, проявляются энергоинформационные взаимодействия между биологическими объектами различного уровня организации, например, диапазон $\lambda = 5$ мм очень удобен для медицинских и биологических исследований поверхностного типа. Установлено, что волны этой длины слабо проникают в человеческое тело и совершенно безопасны при небольших мощностях [3].

Использование КВЧ-диапазона для изучения вращательных и колебательно-вращательных спектров поглощения веществ открывает принципиально новые возможности изучения внутренней структуры материалов на молекулярном уровне. В настоящее время созданы новые приборы высокого разрешения (лучеводные, ЛОВ- и Фурье-спектрометры). В результате исследований в России и за рубежом изучены частотные характеристики комплексных диэлектрических постоянных многих веществ, например, полупроводниковых материалов, полярных и неполярных жидкостей. Определены и измерены константы молекул ряда веществ и коэффициенты молекулярного поглощения в чистых газах и газовых смесях [5]. С использованием измерительных и исследовательских комплексов, работающих в КВЧ-диапазоне, могут быть решены многие задачи при создании нанотехнологий.

Технологические достижения в области создания элементной базы КВЧ-диапазона будут определять уровень развития радиотехнических средств, возможности, глубину и содержание осваемого КВЧ-диапазона. Для выполнения совокупности требований необходимо проведение комплексных научно-исследовательских разработок (НИР) и опытно-конструкторских разработок (ОКР) для решения ряда сложных задач на всех этапах жизненного цикла изделий: научных исследований, конструкторских разработок, конструкторско-технологических решений, экспериментальных исследований, создания опытных технологий, стандартизации и внедрения систем, работающих в КВЧ-диапазоне.

В технологическом плане перспективные системы спутниковой связи будут характеризоваться следующими моментами:

- многообразием конфигурации спутниковых систем;
- многообразием применяемых радиоинтерфейсов;
- более широким использованием высокочастотных радиодиапазонов (Ки, Ка и др);
- развитием режимов коммутации и каналов;
- эффективной интеграцией с наземными подсистемами Интернета;
- переходом к современным стандартам обработки и распространения мультимедийной информации;
- применением широкой гаммы мобильных спутниковых терминалов, обеспечивающих доступ к услугам Интернета;
- унификацией и стандартизацией элементной базы в рамках телекоммуникационных стандартов.

Исходя из этого плана, должна создаваться элементная база радиотехнических систем, работающих в КВЧ-диапазоне.

Ключевыми свойствами перспективных систем спутниковой связи будут являться функциональные возможности и технические решения реализации высокоскорост-

ных услуг, которые обеспечат применение спутниковой связи в массовых сегментах рынка, где наибольшее значение имеют факторы глобальности услуг, конвергенции абонентских сервисов и мультимедийности информации [4].

Одной из важных технологий создания систем спутниковой связи, работающих в КВЧ-диапазоне, является создание и широкое применение совершенных антенно-фидерных устройств и бортовых комплексов, способных обеспечить скорость передачи информации на уровне 4...16 Гбит/с, генерировать десятки или даже сотни лучей, обладать высоким уровнем перенастраиваемости с обеспечением гибкого управления радиоресурсами (мощностью сигналов, каналов передачи и т. д.).

При создании высокоэффективных антенных систем одной из главных задач является разработка и создание антенно-волноводных устройств, так как они в значительной степени определяют энергетическую эффективность антенной системы в целом [4]. Основным требованием к электрическим характеристикам антенно-волноводных устройств является достижение наиболее низкого уровня потерь, заданного уровня развязки между входами антенно-волноводного устройства, а также коэффициента стоячей волны (КСВ) в требуемых пределах (1,05...1,15) [5].

В ранее используемых диапазонах частотные разделения сигналов совмещенных антенно-волноводных устройствах осуществлялись с помощью диплексеров, реализованных на основе волноводных фильтров нижних частот. Главным требованием при выборе подходящих конструкций фильтров нижних частот для многодиапазонных фидерных трактов является достижение возможности более низкого уровня вносимых потерь и требуемого уровня загораживания в заданном диапазоне, не менее 30 дБ. Установлено, что этим требованиям наилучшим образом отвечают вафельные волноводные фильтры [5]. Они имеют широкие полосы пропускания с хорошим согласованием и малыми потерями, а также широкие полосы заграждения с высоким затуханием без паразитных полос пропускания для всех типов волн. Для создания таких фильтров нижних частот (ФНЧ) используются методы радиотехнического синтеза, основанные на теории цепей, а в последнее время – на основе электродинамического моделирования и оптимизации, например, на основе метода Галеркина и метода обобщенных матриц рассеяния [5]. Ключевые задачи рассеяния решаются на базе H - и E -волн, с учетом которых рассчитываются критические частоты полей H - и E -волн многогребневого волновода с произвольным количеством гребней различных размеров. Наряду с электрическими характеристиками ФНЧ актуальным является вопрос конструктивной простоты и сокращения габаритов фильтров. Для достижения требуемых электрических и геометрических характеристик необходимо обеспечить минимальное число многогребневых секций и минимальный продольный размер фильтра.

Для оптимизации минимизируется функция вида

$$F(x) = W_p \sum_{i=1}^{N_p} [S_{11p} - S_{11}(f_i)]^2 + W_s \sum_{i=N_p+1}^{N_p+N_s} [S_{21s} - S_{21}(f_i)]^2, \quad (1)$$

где N_p, N_s – количество частотных точек в полосе пропускания и в полосах заграждения соответственно; S_{11p} – требуемый уровень (S_{11}) в полосе пропускания, дБ; S_{21s} – требуемый уровень (S_{21}) в полосе заграждения, дБ; W_p, W_s – весовые коэффициенты; $S_{11}(f_i), S_{21}(f_i)$ – значения модулей элементов матриц рассеяния в соответствующих частотных точках, дБ.

Для СВЧ-диапазона f 14 ГГц такие фильтры могут иметь четыре пятигребневых секций длиной 27...30 мм.

При создании авторами облучателя с ребристым рупором, работающим в КВЧ-диапазоне и предназначенным для формирования СВЧ-сигнала круговой (эллиптической) поляризации как левого, так и правого направления вращения плоскости поляризации, для независимого прохождения двух ортогональных СВЧ-сигналов, поданных с входов 1 и 2, был использован диплексер. Диплексер представлял собой волноводный элемент, состоящий из двух пересекающихся под углом 90° каналов прямоугольного сечения с размером канала $3,6 \times 1,8$ мм и круглого диаметра 3,8 мм. В канал круглого сечения монтировалась пластина толщиной d мм и длиной $L = l + E$, где E – расчетная длина; l – фиксированная длина. Толщина стенок диплексера была $1,0^{+0,2}$ мм, внутренние радиусы переходов $r = 0,1 \dots 0,2$ мм в прямоугольном канале. Рупор имел поперечные канавки переменной глубины для работы облучателя круговой поляризации в широком диапазоне частот [6].

Расфазировку поля рупора в плоскости раскрыва определяли по формуле

$$\Delta = (r / \lambda_0) \operatorname{tg} \theta / 2, \quad (2)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; $\theta / 2$ – половина угла раскрыва рупора; r – радиус раскрыва. Для широкополосных рупоров рекомендуется $\Delta > 0,4$.

При электроиспытаниях у облучателя определялись следующие радиотехнические характеристики: коэффициент стоячей волны с обоих выходов диплексеров, электрические потери, диаграмма направленности, коэффициент усиления и развязка между каналами в диапазоне частот $f_0 - f_1 - f_2$.

Определение коэффициента усиления (КУ) облучателей производили прибором Р2-69 на фиксированных частотах путем установки одинаковых облучателей (рис. 1, а) на расстоянии

$$H \geq \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (3)$$

где λ – длина волны, D – диаметр раскрыва рупора.

Коэффициент усиления облучателя рассчитывали по формуле

$$K_y = 10 \lg G,$$

где

$$G = \frac{4\pi H}{\lambda} \cdot \frac{1}{B}, \quad (4)$$

где B – затухание, определяемое из выражения

$$B = B_2 - B_1, \quad (5)$$

где B_2 – потери в линии «облучатель – облучатель»; B_1 – потери в каналах отраженной и падающей волны прибора Р2-69.

По схеме, представленной на рис. 1, а, производились измерения диаграммы направленности (ДН) облучате-

лей. Схема измерения КСВ облучателей представлена на рис. 1, б.

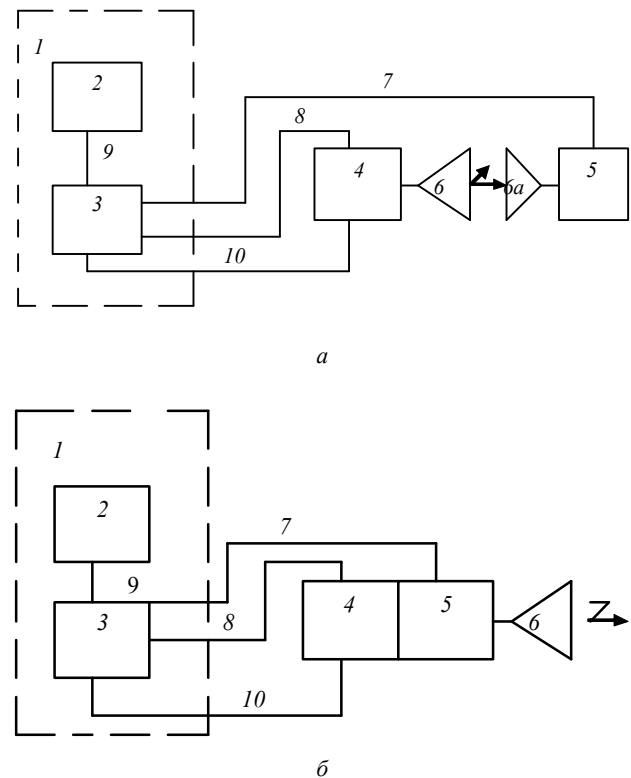


Рис. 1. Схема измерения ДН и КУ (а) и КСВ (б) облучателей:

- 1 – измеритель КСВ панорамный Р2-69 в составе;
2 – индикатор; 3 – генератор ВЧ-сигналов;
4 – направленный ответвитель канала падающей волны;
5 – направленный ответвитель канала отраженной волны;
6, 6а – исследуемые облучатели; 7, 8, 9 – соединительные кабели; 10 – ВЧ-кабель

При этом сначала исследовались отдельно характеристики волноводных элементов, входящих в состав облучателя: переходов, согласующих и фазировочных секций, поляризаторов, диплексеров, потери которых не превышали 0,1 дБ, КСВ – 1,12.

Настройка и оптимизация параметров облучателя при сборке производилась подбором корпусов поляризатора, диплексера, перехода, согласующих и фазировочных секций, с соответствующими частотно-зависимыми параметрами и параметрами шероховатости рабочей поверхности, а также электрическими характеристиками, обеспечивающими лучшее согласование в требуемом диапазоне частот $f_0 - f_1 - f_2$.

Развязка между входящими каналами облучателя была не хуже 28,5 дБ, что близко соответствовало расчетному значению. Облучатель имел стабильную ширину диаграммы направленности в широком диапазоне частот: ширина ДН по уровню 10 дБ составляла $37,4^\circ \pm 0,6^\circ$, ДН в плоскостях E и H в пределах углов от -10° до 10° совпадали. Разбег ДН был не более 1 дБ при угле $+20^\circ$, в связи с этим при наличии поляризатора можно получить высокий коэффициент эллиптичности.

Коэффициент усиления в диапазоне $f_0 - f_1$ растет более интенсивно: $K_{y1} = a_1 x + 14,8$; в диапазоне $f_1 - f_2$ интенсивность роста коэффициента усиления несколько снижает-

ся: $K_{y2} = a_2 f + 15,4$ (рис. 2), при этом КСВ облучателя на частотах f_1 – f_2 находится в пределах 1,15...1,18 (рис. 3).

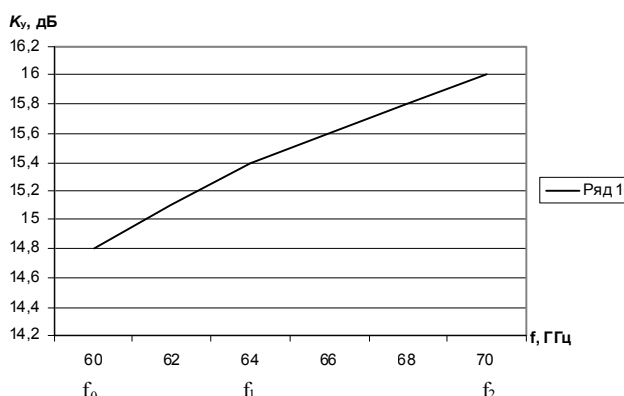


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления облучателя K_y с ребристым рупором от частоты передаваемой волны

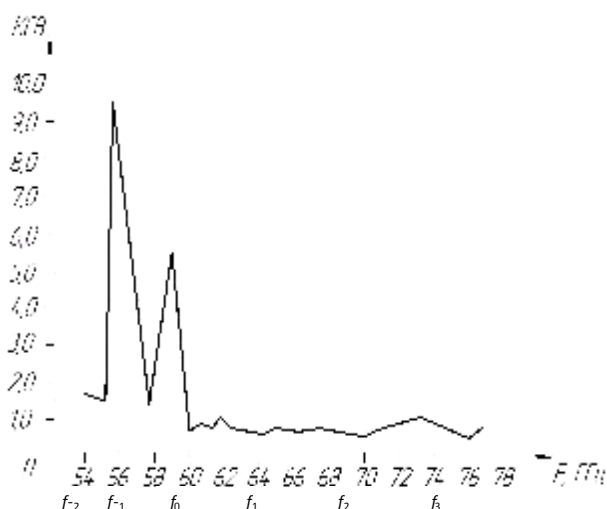


Рис. 3. КСВ облучателя с переходом № 5

Таким образом, отечественная спутниковая связь с освоением КВЧ-диапазонов, расширит возможности интеграции России в мировые структуры сетевой эко-

номики и позволит создать единую систему спутниковой связи для решения различных задач. Разработка элементной базы антенно-фидерных устройств, работающих в КВЧ-диапазоне, является важнейшим направлением создания систем спутниковой связи. Экспериментальное исследование опытных технологий и широкополосного облучателя с ребристым рупором позволяет оценить конструкторско-технологические решения и наметить дальнейшие направления НИР и ОКР в КВЧ-диапазоне.

Библиографический список

1. Радиоизмерительные и электронные системы в короткой части миллиметрового диапазона волн / Н. С. Акиншин, А. Б. Бордов, Р. П. Быстров и др. // Зарубежная радиоэлектроника. 1999. № 5. С. 22–61.
2. Быстров, Р. П. Применение миллиметровых и субмиллиметровых волн в радиотехнических системах различного назначения / Р. П. Быстров, А. В. Соколов // Тр. III Всесоюз. шк. по распространению ММ- и СММ-волн. Харьков, 1989. С. 2–17.
3. Соколов, А. В. Субмиллиметровые и миллиметровые волны и их применение / А. В. Соколов // 100 лет радио: сб. ст. / под ред. В. В. Мичулина, А. В. Гороховского. М.: Радио и связь, 1995. С. 111–120.
4. Горностаев, Ю. М. Перспективные спутниковые системы / Ю. М. Горностаев, В. В. Соколов, Л. М. Невдяев. М.: МЦНТИ, 2000.
5. Менуилов, М. Б. Волноводные фильтры нижних частот для многодиапазонных фидерных трактов зеркальных антенн / М. Б. Менуилов, К. В. Кобрин // Успехи современной радиоэлектроники, 2006. № 4. С. 46–50.
6. Технологические особенности создания элементной базы антенно-фидерных устройств миллиметрового диапазона волн / И. В. Трифанов, В. В. Леонов, Л. А. Бабкина и др. // Вестник Сиб. аэрокосмич. акад. им. акад. М. Ф. Решетнева: сб. науч. тр. / под. ред. проф. Г. П. Белякова. Красноярск, 1999. С. 109–116.

N. A. Testoedov, I. V. Trifanov, I. V. Sterekhov, L. I. Oborina, T. A. Trifanova

CONSTRUCTING ELEMENT BASIS OF THE TRANSMIT-RECEIVE EQUIPMENT FOR EXTREMELY HIGH FREQUENCY (EHF)

The main directions of the constructing antenna-feeder devices EHF-range are considered.

Keywords: *element basis, antenna-feeder device, satellite communication system, radiation source, band, radio technical characteristics, electric test.*