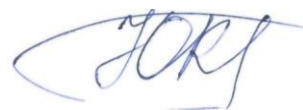


На правах рукописи



Крылов Юрий Валерьевич

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЧАСТОТНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СЕЛЕКТИВНЫЕ
УСТРОЙСТВА АНТЕНН КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: **Саломатов Юрий Петрович,**
кандидат технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ), г. Красноярск, заведующий кафедрой радиотехники

Официальные оппоненты: **Разинкин Владимир Павлович,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), профессор кафедры теоретических основ радиотехники

Сусляев Валентин Иванович,
кандидат физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (НИ ТГУ), доцент кафедры радиоэлектроники

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита диссертации состоится «19» марта 2019 г. в 09 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.268.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/s06h5t9x>

Автореферат разослан «___» февраля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.268.01
доктор физико-математических наук



А. Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современных облучающих системах зеркальных антенн и в глобальных рупорных антеннах космических аппаратов (КА) широкое распространение получили устройства, позволяющие выполнять частотную и поляризационную селекцию сигналов. Обязательными требованиями к таким устройствам являются их широкополосность (многочастотность) и малые массогабаритные показатели. К антеннам КА также предъявляются жесткие требования к работе с сигналами различных поляризаций, а также совмещению каналов приема и передачи в одной антенне. Все эти функции в антенне выполняет входящий в ее состав частотно-поляризационный селектор.

На сегодняшний день достаточно хорошо исследованы узкополосные одно-двухканальные частотно-поляризационные селективные устройства антенн КА, работающие в одном из частотных диапазонов приема или передачи. Для них разработаны методы проектирования. В свою очередь, устройства для организации дуплексного режима работы с сигналами различных поляризаций в одном едином для диапазонов частот приема и передачи частотно-поляризационном селекторе исследованы недостаточно полно и, как следствие, для них отсутствует комплексная методика проектирования.

К настоящему времени недостаточно исследовано устройство, реализованное по «восстанавливающей схеме», для обеспечения широкополосной работы. В антеннах КА селективное устройство, работающее по «восстанавливающей схеме», при большом разnose высокочастотного (ВЧ) диапазона приема и низкочастотного (НЧ) диапазона передачи не используется, ввиду отсутствия исследований по проектированию модового трансформатора, входящего в состав данного устройства.

При этом также не разработаны методы уменьшения массогабаритных показателей такого селектора.

Влияние высших типов волн на частотные характеристики ортомодового селектора, входящего в состав частотно-поляризационного устройства, до сих пор не исследовалось. Такие исследования позволят реализовать частотную и поляризационную селекцию сигналов в едином (одном) облучателе зеркальных антенн или в глобальных рупорных антеннах КА при большом разnose частотных диапазонов приема и передачи.

Все вышеизложенное обуславливает актуальность работ, связанных с исследованием частотно-поляризационных селекторов антенн КА, с реализацией дуплексного режима работы с сигналами различных поляризаций в широкой полосе частот.

Цель работы – разработка широкополосных (многочастотных) частотно-поляризационных селективных устройств, входящих в состав облучателей зеркальных, глобальных рупорных антенн КА и имеющих малые поперечные и продольные габариты.

Задачи диссертационного исследования:

- анализ схемно-технических и конструкторских решений, а также методов проектирования широкополосных частотно-поляризационных селективных устройств;
- исследование частотно-поляризационного селектора, выполненного по «восстанавливающей схеме» и возможности реализации дуплексного режима работы с разносом частот приема и передачи более октавы;
- электродинамическое моделирование и экспериментальные исследования частотно-поляризационного селектора, реализованного по «восстанавливающей схеме»;
- исследование способов уменьшения габаритов частотно-поляризационных селекторов антенн КА;
- разработка малогабаритного ортомодового селектора (ОС) применительно к частотно-поляризационному селектору, выполненному по «восстанавливающей схеме».

Методология и Методы исследования.

В диссертационной работе проведены исследования частотно-поляризационных устройств на основе численных методов электродинамического моделирования в САПР (системы автоматизированного проектирования), а также экспериментальных методов исследования.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

- Разработан (согласно методике поэтапного проектирования) частотно-поляризационный селектор, реализованный по «восстанавливающей схеме», обеспечивающий работу с сигналами с круговыми правой и левой поляризациями в частотных диапазонах, разнесенных более чем на октаву – в соотношении центральных частот диапазонов приема и передачи $\frac{f_{ПРМ}}{f_{ПРД}} = 2,15$.

- Исследовано влияние на распространение волны основного типа волн высших типов, возникающих в ОС, входящем в состав частотно-поляризационного устройства облучателей зеркальных антенн, а также разработан способ их подавления. Подавление высших типов волн составляет не менее 30 дБ;

- Разработаны способы уменьшения поперечных габаритов частотно-поляризационного селектора, реализованного по «восстанавливающей схеме», которые позволяют уменьшить поперечные габариты ОС более чем в 2 раза при сохранении широкополосности работы устройства.

Теоретическая значимость определяется техническими результатами, полученными при численных расчетах и электродинамическом моделировании как составных частей, так и частотно-поляризационного селектора в целом, позволивших обеспечить работу данного селектора с сигналами с круговыми правой и левой поляризациями в частотных диапазонах, разнесенных более чем на октаву, а также уменьшить поперечные габариты данного устройства более чем в 2 раза.

Практическая ценность и внедрение результатов.

Разработаны методики поэтапного проектирования как составных частей, так и частотно-поляризационного селектора в целом, в котором реализован дуплексный режим работы. Созданы новые частотно-поляризационные широкополосные селективные устройства уменьшенных габаритов для антенн КА.

Основные результаты диссертации получены при выполнении опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ, выполненных в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС») за период 2013-2018 г.

Научные и практические результаты работы используются в рамках создания антенн перспективных спутников связи в АО «ИСС». Использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Конструктивный синтез частотно-поляризационного селектора по «восстанавливающей схеме» для обеспечения дуплексного режима работы в полосах частот 8-10% может быть выполнен при помощи пятиэтапной методики, состоящей из последовательности этапов моделирования следующих устройств: ФНЧ, ортомодовых селекторов (прямого и реверсного), поляризаторов, частотно-поляризационного селектора в целом.

2. Волноводный трансформатор в виде ступеней в форме усеченных конусов с инверсным расположением последнего из них (в области ВЧ канала ортомодового селектора) подавляет высшие типы волн в ортомодовом селекторе более чем на 30 дБ, что позволяет получить разнос центральных частот диапазонов приема и передачи в частотно-поляризационном селекторе, реализованном по «восстанавливающей схеме», в соотношении $\frac{f_{\text{ПРМ}}}{f_{\text{ПРД}}} = 2,15$.

3. Угловые трансформаторы НЧ диапазона в области крестового разветвления ортомодового селектора в форме четверти правильного восьмиугольника с радиусом описанной окружности, равным размеру широкой стенки волновода, при длине средней линии $\approx \frac{2}{3}\lambda$ (λ – длина волны в волноводе на средней частоте ВЧ диапазона) уменьшают поперечные размеры частотно-поляризационного селектора, выполненного по «восстанавливающей схеме», в 2,6 раза и обеспечивают полосу рабочих частот 9,7% в ВЧ диапазоне при условии, что значение отношения центральных частот диапазонов приема и передачи $\frac{f_{\text{ПРМ}}}{f_{\text{ПРД}}}$ составляет не более 1,55.

Достоверность и обоснованность.

Результаты диссертационной работы подтверждаются:

- корректным применением численных методов;

- корректным применением САПР для расчета частотно-поляризационных устройств;
- соответствием полученных при исследовании результатов с результатами, опубликованными в отечественной и зарубежной печатях;
- результатами компьютерного моделирования, экспериментальных исследований и внедрением разработанных частотно-селективных устройств в производство.

Апробация работы.

Полученные в диссертационной работе теоретические и практические результаты докладывались и обсуждались на 9 Международных и Всероссийских научно-технических конференциях: V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2016; XVIII, XIX, XX Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева», Красноярск, 2014 - 2016; Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 2014-2016.

Публикации.

По материалам диссертации получены 2 патента и опубликовано 15 научных работ, включая 5 статей в рекомендованных ВАК РФ изданиях, 10 статей в трудах российских и международных конференций.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в следующем:

- исследование методов построения схем частотно-поляризационных селекторов с обеспечением дуплексного режима работы;
- разработка ортомодового селектора, позволяющего обеспечить работу с разнесом частот более октавы;
- разработка методики поэтапного проектирования частотно-поляризационных устройств;
- исследование возможности применения «восстанавливающей схемы» в качестве широкополосного частотно-селективного устройства;
- исследование способов подавления влияния высших типов волн, возникающих в области волноводного трансформатора круглого сечения;
- разработка способов уменьшения габаритов частотно-поляризационного селектора, реализованного по «восстанавливающей схеме».

Автор принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, четырёх глав, Выводов и Заключения, библиографического списка и Приложения. Работа изложена на 151 страницах машинописного текста, включая 97 рисунков и 3 таблицы. Библиографический список из 103 отечественных и зарубежных источников на

12 страницах, приложения с актами использования результатов исследований и патентов на изобретения на 4 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, отмечены теоретическая и практическая значимость работы (сведения о внедрении результатов), научная новизна; описаны методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации работы, структуре диссертации.

В **первой главе** приведен обзор существующих устройств частотно-поляризационной селекции сигналов. Показаны различные конструкции ОС, которые предназначены для работы в рупорных облучателях зеркальных антенн КА в относительно узком частотном диапазоне (в пределах 5%):

- ОС в виде клинообразных структур различного профиля;
- ОС с перегородкой;
- ОС с продольным ответвлением волновода прямоугольного сечения.

Для выполнения требований по широкополосности работы устройства необходимо, чтобы ОС имел особую структуру, обладающую свойствами симметрии расположения элементов, входящих в его состав. ОС такого типа работают в частотном диапазоне порядка 10% и более, например, такие как:

- ОС с симметричными продольными ответвлениями;
- ОС в виде крестового разветвителя.

Для обеспечения работы частотно-поляризационного устройства с сигналами круговой поляризации необходимо в схему радиочастотной облучающей (излучающей) системы антенны КА ввести поляризующее устройство (поляризатор), обзор которых был также проведен в первой главе.

В современных облучателях зеркальных антенн спутниковой связи большое распространение получили устройства, позволяющие выполнять частотную и поляризационную селекции сигналов со значительным разносом приемных и передающих рабочих частотных диапазонов. Одним из обязательных условий разработки таких устройств является их широкополосность и малые массогабаритные показатели, поэтому разрабатываемый частотно-поляризационный селектор должен выполнять задачу разделения сигналов приема и передачи без необходимости создания дополнительного облучателя под конкретный диапазон частот.

Существует несколько способов реализации частотно-поляризационного селектора для организации дуплексного режима работы с сигналами различных поляризаций без необходимости использования дополнительного облучателя под конкретный диапазон частот:

- широкополосная частотно-поляризационная селекция сигналов с прямым (торцевым) НЧ выходом ОС и выделением ВЧ сигналов с помощью двойных Т-мостов, показанная на рис. 1;

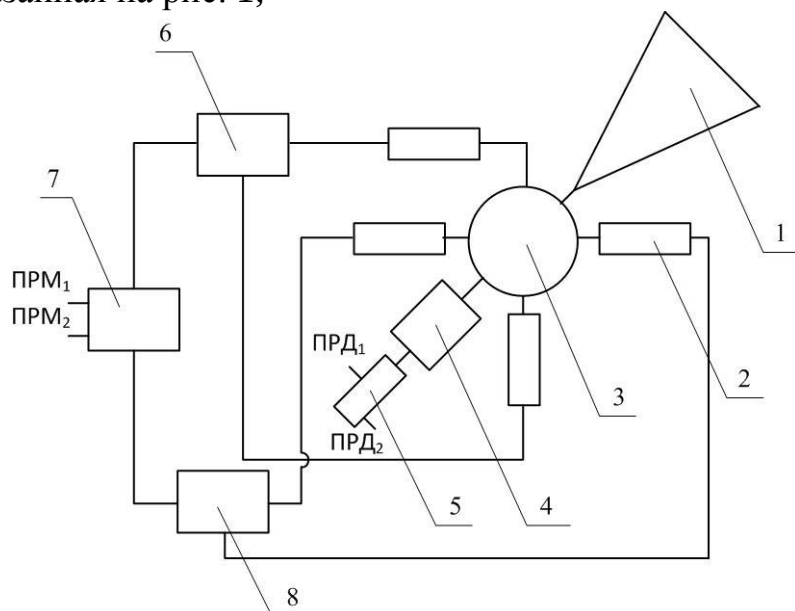


Рис. 1. Блок-схема облучателя с использованием двойных Т-мостов: 1 – рупор; 2, 4 – фильтры; 3 – ОС; 5 – септум-поляризатор (или другой поляризатор с последующим подключением селектора с ортогональными выходами); 6, 8 – двойной Т-мост с установленной в Е-плече нагрузкой; 7 – двойной Т-мост

- широкополосная частотно-поляризационная селекция сигналов с прямым (торцевым) ВЧ выходом ОС и выделением НЧ сигнала с помощью дополнительного ОС («восстанавливающая схема»). Данная схема показана на рис. 2.

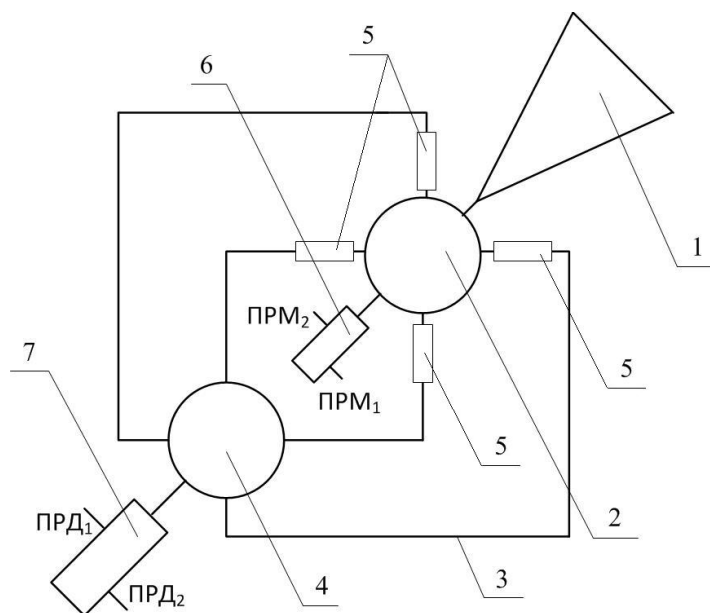


Рис. 2. Блок-схема облучателя с двумя ОС: 1 – рупор; 2,4 – ОС; 3 – четыре прямоугольных волновода; 5 – ФНЧ; 6,7 – септум-поляризатор (или другой поляризатор с последующим подключением селектора с ортогональными выходами)

Указаны преимущества и недостатки данных схем исполнения частотно-поляризационного селектора и сделан вывод о том, что наиболее перспективным вариантом исполнения данного устройства в составе облучателей зеркальных антенн КА является селектор, выполненный по «восстанавливающей схеме».

Вторая глава посвящена разработке методики поэтапного проектирования как составных частей, так и частотно-поляризационного селектора в целом, выполненного по «восстанавливающей схеме» и предназначенного для обеспечения дуплексного режима работы антенны КА. Показано, что при проектировании такого селектора в целом необходимо решить в строгой последовательности следующие задачи:

- 1) расчет и моделирование фильтра нижних частот (ФНЧ), устанавливаемого в каждом из четырех плеч ОС;
- 2) расчет и моделирование ОС (включая модовый трансформатор) совместно с установленными ФНЧ в разветвлениях ОС;
- 3) расчет и моделирование реверсного ОС;
- 4) моделирование поляризующих устройств;
- 5) моделирование частотно-поляризационного селектора в целом.

Разработана конструкция фильтра, который может использоваться в рассматриваемом частотно-поляризационном селекторе. Фильтр позволяет обеспечить требуемые полосы частот, минимальные потери в полосе пропускания, уровень заграждения в полосе подавления при небольших массогабаритных показателях.

Приведены способы расчета и моделирования ОС, выполненного в виде крестового разветвителя. Показано, что при разработке ОС (см. рис. 3) необходимо искать компромисс между минимальным расстоянием от фильтра до щели и согласованием данного ФНЧ с волноводом круглого сечения в требуемой полосе частот (см. рис. 4). Минимальная длина трансформатора, согласующего щель с фильтром, необходима для минимизации в рабочем ВЧ диапазоне противофазно отраженных от ФНЧ волн (см. рис. 5).

На рис. 4 и 5 показаны результаты моделирования ОС на частотах приема при различных длинах четвертьволнового трансформатора (ЧТ): 1 – 22,5 мм, 2 – 24,5 мм, 3 – 26,5 мм.

На рис. 5 в ВЧ диапазоне при удлинении ЧТ наблюдается явление резкого возрастания амплитуды отраженной волны (см. кривую КСВН 3 рис. 5). Этот эффект объясняется наличием ФНЧ в составе ОС. Отражения от ФНЧ на разных частотах представляют собой электромагнитные волны с различными фазами. Если отраженная от ФНЧ волна достигает места сочленения прямоугольного и круглого волноводов в противофазе с падающей волной, то общая напряженность поля падает.

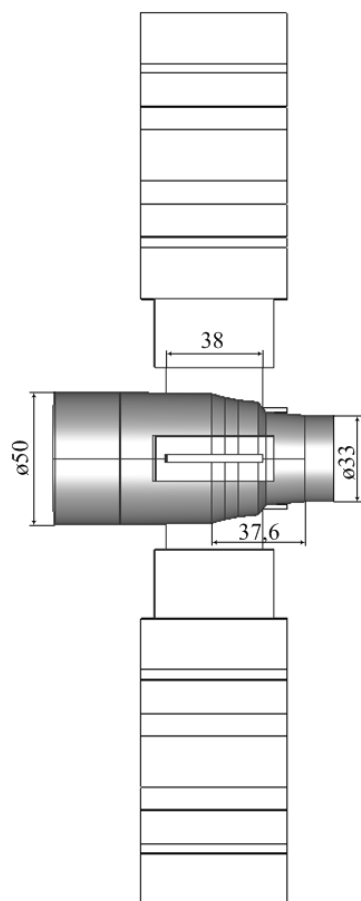


Рис. 3. Ортомодовый селектор С-диапазона частот (размеры в мм)

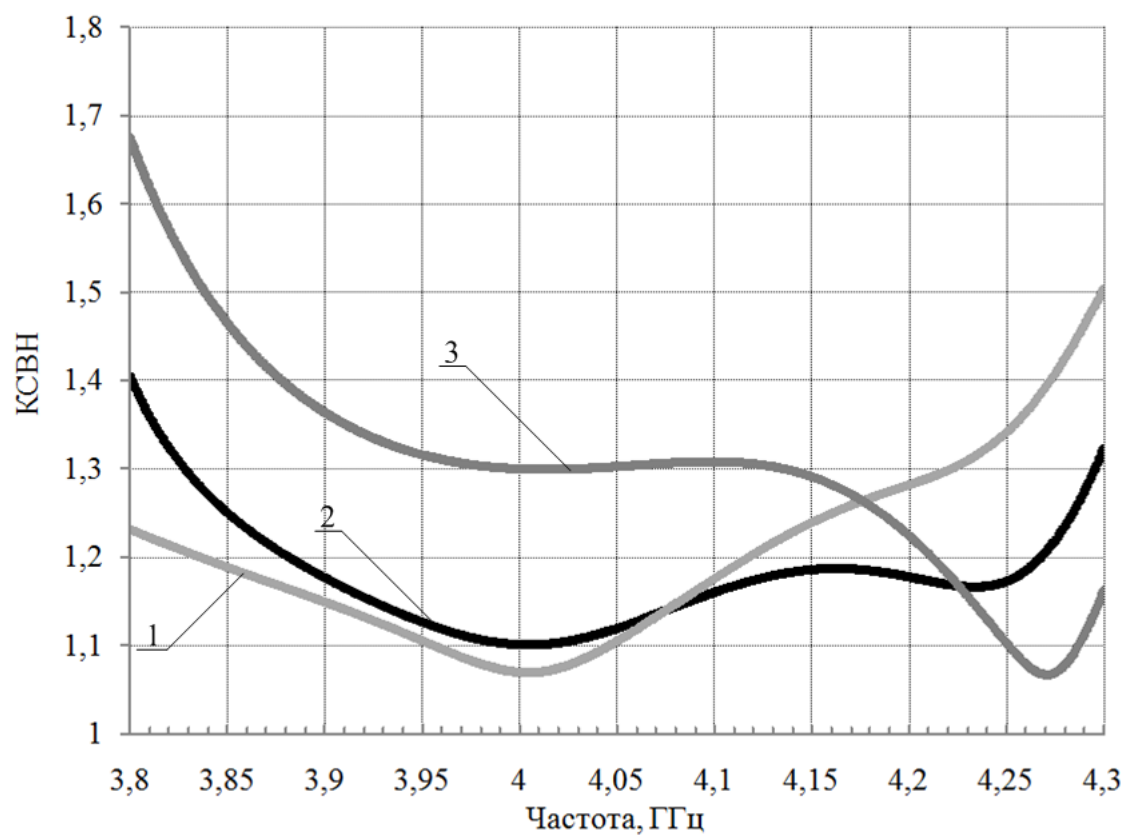


Рис. 4. КСВН ортомодового селектора на частотах 3.8–4.3 ГГц

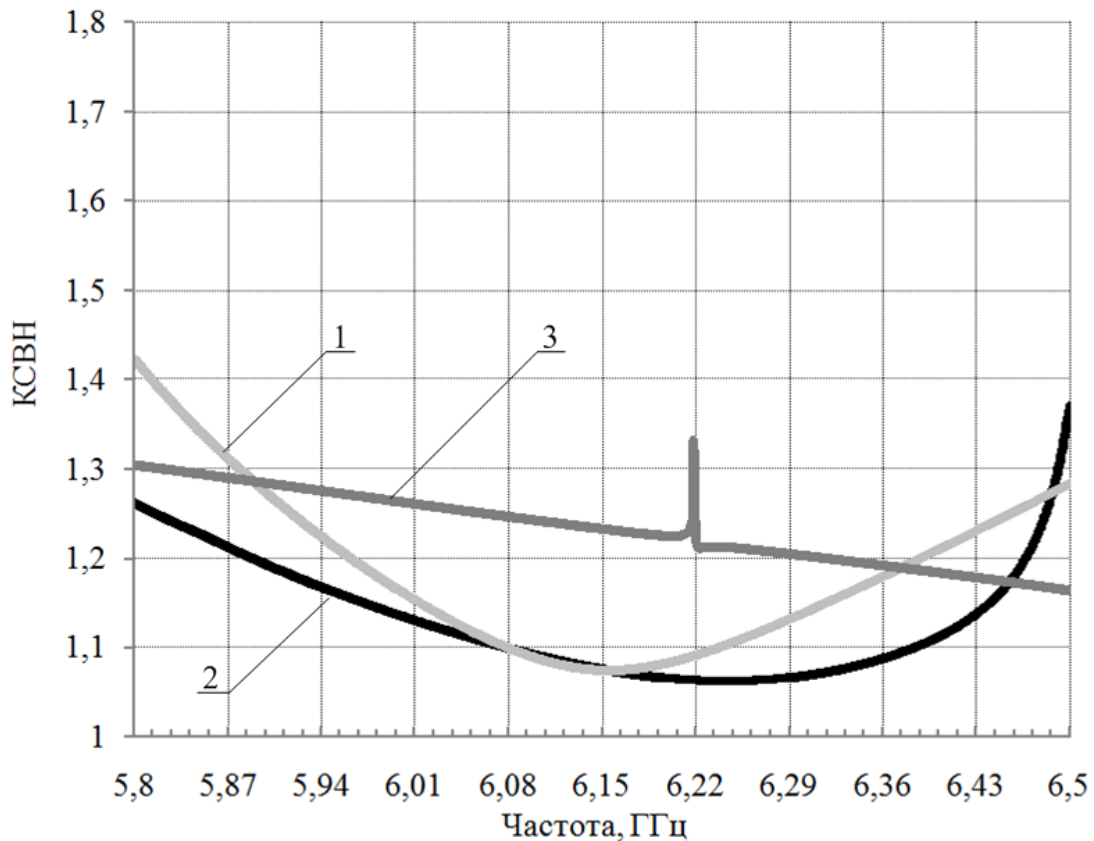


Рис. 5. КСВН ортомодового селектора на частотах 5.8–6.5 ГГц

Также во второй главе приведено моделирование септум-поляризатора и представлены зависимости коэффициента эллиптичности (КЭ) и КСВН от геометрических размеров пластины поляризатора.

Показано, что в качестве волноводных изгибов для соединения двух ОС посредством четырех волноводов П-образной формы наиболее приоритетным является его исполнение в виде двухгранного изгиба, представляющего собой четверть правильного восьмиугольника с радиусом описанной окружности, равным длине широкой стенки прямоугольного волновода.

Был проведен модовый анализ ОС в С-диапазоне частот, который необходим ввиду того, что в ОС в волноводе большего диаметра (рассматриваемое устройство должно обеспечивать дуплексный режим работы) в рабочем ВЧ диапазоне возможно возбуждение кроме волны основного типа H_{11} волн высших типов (E_{01} , H_{21} , ...). Как известно, недостатком такого многомодового волновода являются потери части энергии волны основного типа H_{11} на передачу энергии волнам высших типов. Таким образом, создаются помехи, приводящие к шумам в каналах радиосвязи.

В третьей главе приведены исследования разработанного в рамках создания перспективного телекоммуникационного спутника частотно-поляризационного селектора (выполненного по «восстанавливающей схеме») облучателя двухзеркальной антенны для приема и передачи сигналов с круговыми поляризациями в К/Q-диапазонах.

На рис. 6 показана модель частотно-поляризационного селектора в составе облучателя.

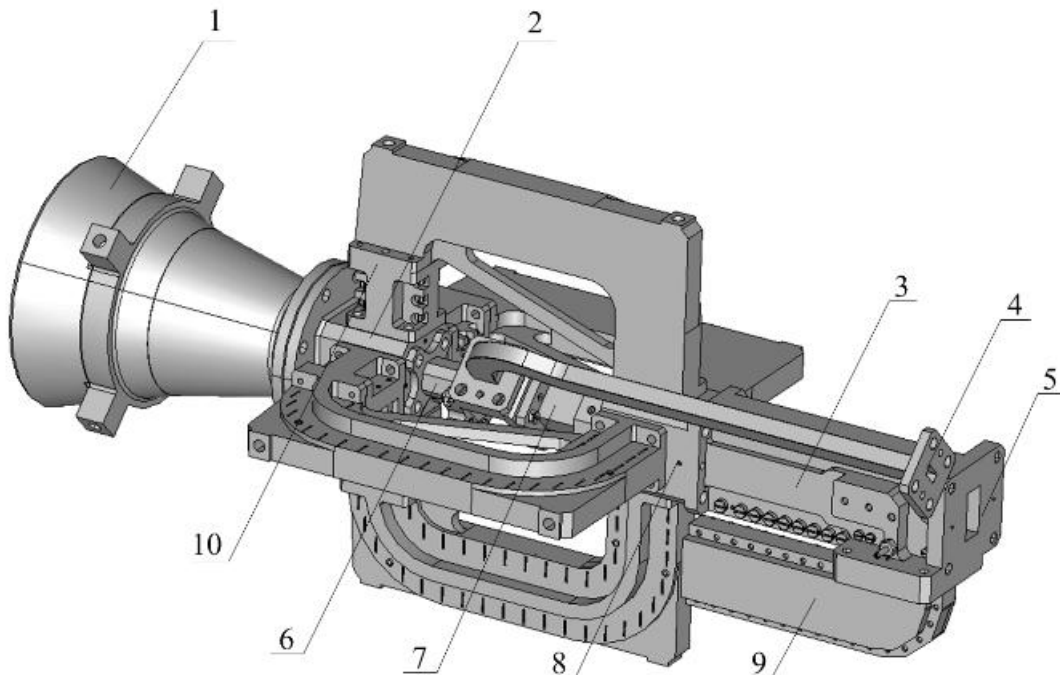


Рис. 6. Облучатель К/Q-диапазонов: 1 – рупор; 2,8 – ортомодовый селектор; 3 – септум-поляризатор; 4 – выход приемного сигнала; 5 – выход передающего сигнала; 6 – поляризатор с пазом; 7,9 – нагрузки; 10 – ФНЧ

Селектор 2 (ОС), расположенный сразу после рупора, представляет собой волновод круглого сечения, к которому перпендикулярно его оси подключены четыре взаимно перпендикулярных фильтра прямоугольного сечения. Диаметр волновода круглого сечения был рассчитан исходя из обеспечения условия распространения основной волны H_{11} в НЧ диапазоне (частотный диапазон передачи). Выход селектора представляет собой переход на сечение меньшего диаметра для распространения основной волны H_{11} в диапазоне частот приема. Данный переход выполнен в виде множественных изменений сечения круглого волновода для подавления паразитных составляющих высших мод, которые возбуждаются в круглом сечении волновода большего диаметра.

Разработанный ОС входит в состав частотно-поляризационного селектора облучателя зеркальных антенн или глобальных рупорных антенн, поэтому необходимо, чтобы работа ОС осуществлялась на основной волне H_{11} во всем рабочем диапазоне частот. В приведенных в главе 3 расчетах было отмечено, что кроме основного типа волны H_{11} на выходе волновода большего сечения распространяются еще высшие типы волн E_{11} , H_{31} и H_{12} . Для подавления вышеуказанных мод необходимо варьировать диаметрами сечений ступеней переходной секции, а также их длинами. Критериями настройки волноводного трансформатора и ОС в целом служат величина обратных потерь менее минус 20 дБ в полосе частот 43–46 ГГц и величина развязки между основной модой и высшими, которая должна быть менее минус 30 дБ. Спроектированный ОС, удовлетворяющий этим требованиям, показан на рис.7.

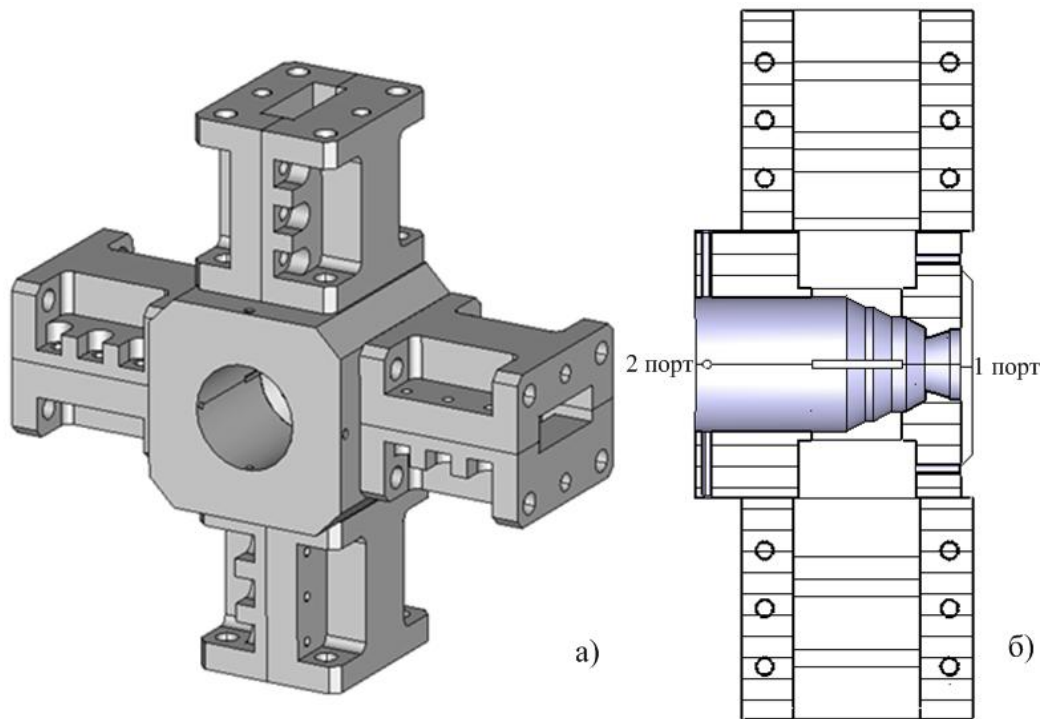


Рис.7. Конструкция ортомодового селектора К/Q – диапазонов:
а) – изометрический вид; б) – вид сбоку (продольный разрез)

Волноводный трансформатор, входящий в состав данного ОС, спроектирован в соответствии с разработанным способом подавления высших типов волн. Данный способ реализации волноводного трансформатора заключается в сложной форме перехода, состоящего из определенного количества ступеней. Для согласования и подавления высших мод необходимо, чтобы устройство состояло из 3-6 ступеней, количество которых определяется разномом частотных диапазонов приема и передачи. В рассматриваемом случае при $\frac{f_v}{f_n} \geq 2$ количество ступеней равно 6. Поверхности данных ступеней представляют собой усеченные конусы с различными диаметрами сечений. Первые 5 ступеней в большей степени служат для согласования ОС в ВЧ диапазоне и в меньшей степени в НЧ диапазоне. Последний конус трансформатора в наибольшей степени необходим для подавления волн высших типов.

Для того чтобы оценить правомерность использования разработанного волноводного трансформатора в качестве модового дискриминатора, необходимо в САПР (CST Microwave Studio) рассмотреть развязки между волной основного типа H_{11} (1 модой) на входе трансформатора (со стороны меньшего сечения – 1 порт) и волнами высших типов (3...16 модами) на выходе трансформатора (2 порт). На рис. 8 показаны потери на прохождение S_{21} в ОС первой моды, на рис. 9 – развязки между волной основного типа H_{11} и волнами высших типов E_{11} , H_{31} , H_{12} (7, 9, 15 моды в CST). Развязки между волной основного типа и остальными высшими типами волн составили более 60 дБ.

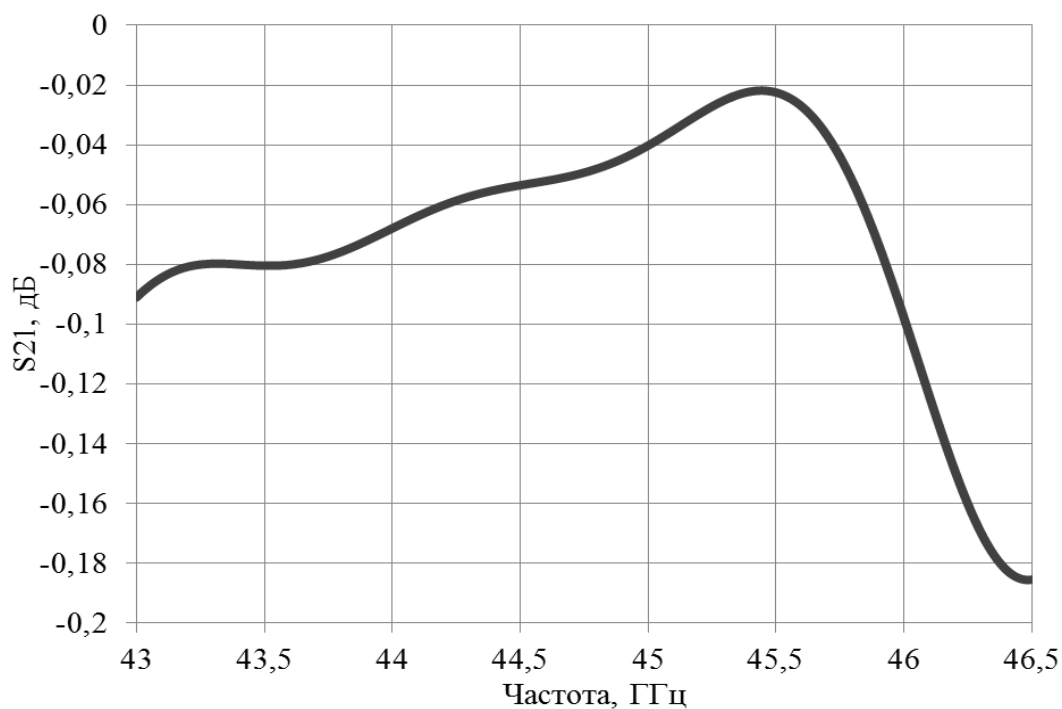


Рис. 8. Частотная зависимость потерь на прохождение S_{21} в ОС первой моды

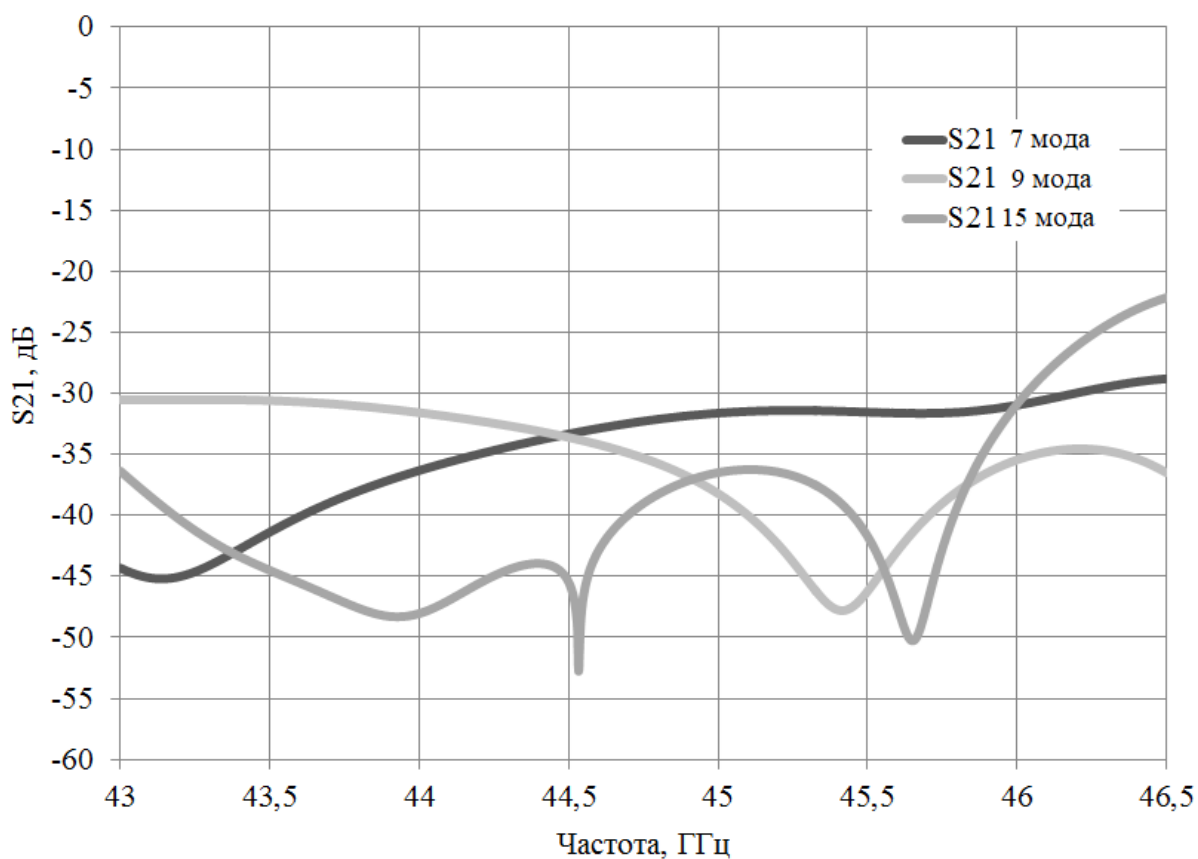


Рис. 9. Развязки между волной H_{11} и волнами высших типов E_{11} , H_{31} , H_{12} (7, 9, 15 моды)

Таким образом, разработанный способ реализации волноводного трансформатора (необходимого для согласования в ОС двух входных волноводов круглого сечения) в виде ступеней в форме усеченных конусов и с

инверсной формой последнего из них позволяет в рабочем ВЧ диапазоне добиться подавления высших типов волн, возбуждающихся в волноводном трансформаторе ОС. Данное решение предоставляет возможность в разработанном частотно-поляризационном селекторе (К/Q – диапазонов) передавать/принимать сигналы с разном диапазоном частот приема и передачи более октавы.

Экспериментальные значения КСВН и КЭ частотно-поляризационного селектора К/Q-диапазонов, представленные на рис.10 – 13 (сплошные линии – значения КСВН и КЭ, полученные при моделировании частотно-поляризационного селектора, штрихпунктирные – измеренные значения), в высокой степени коррелируют со значениями, полученными при моделировании устройства, что доказывает корректность методов расчета и моделирования частотно-поляризационного селектора, представленных в главах 3 и 2.

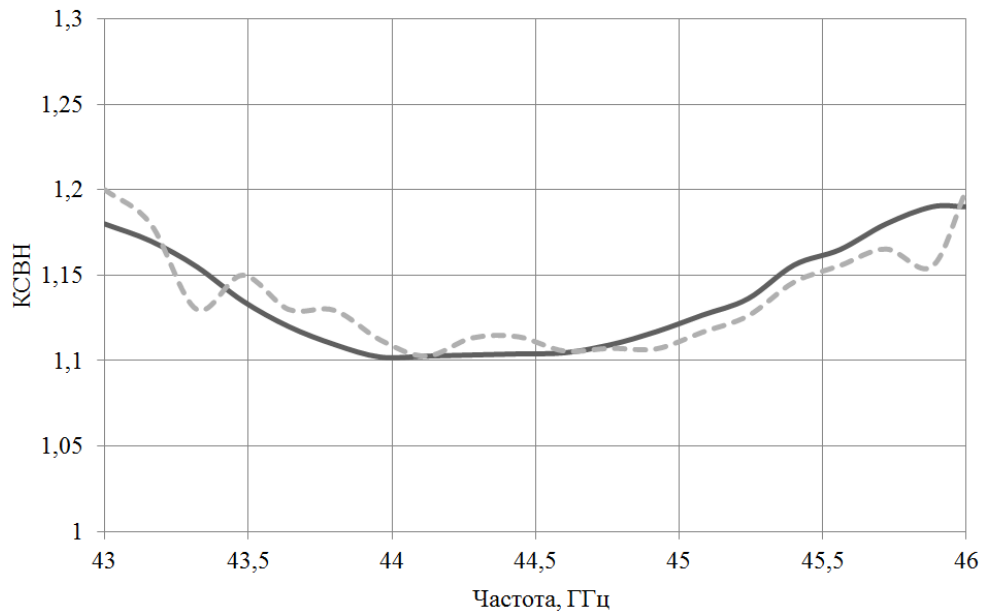


Рис. 10. КСВН селектора К/Q-диапазонов в приемном частотном диапазоне

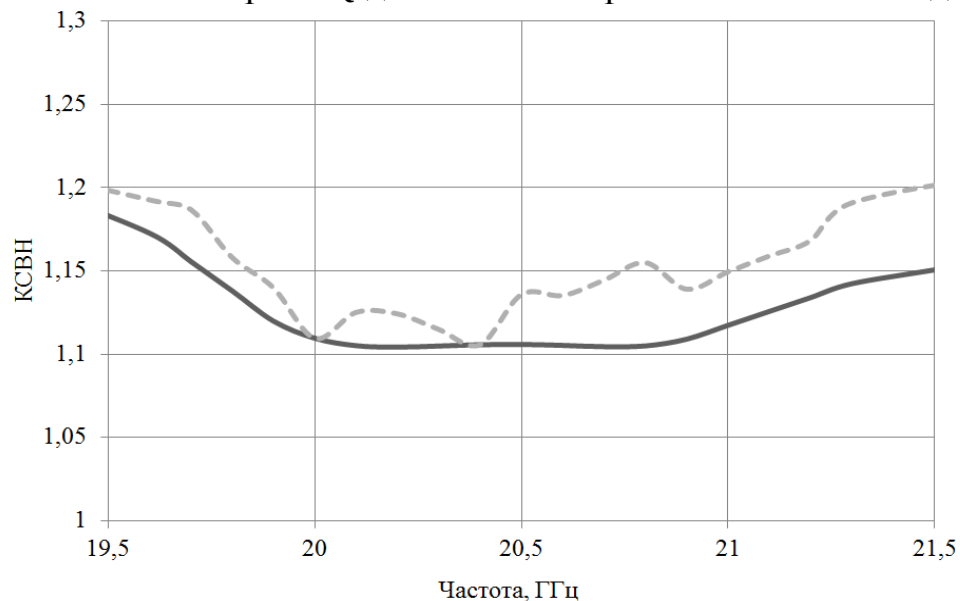


Рис. 11. КСВН селектора К/Q-диапазонов в передающем частотном диапазоне

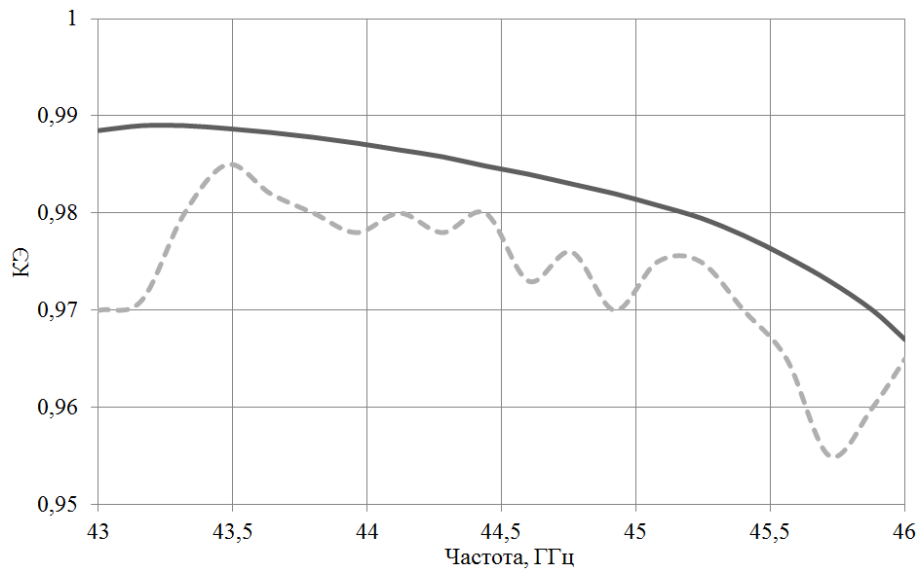


Рис. 12. График частотной зависимости КЭ селектора К/Q-диапазонов в приемном частотном диапазоне

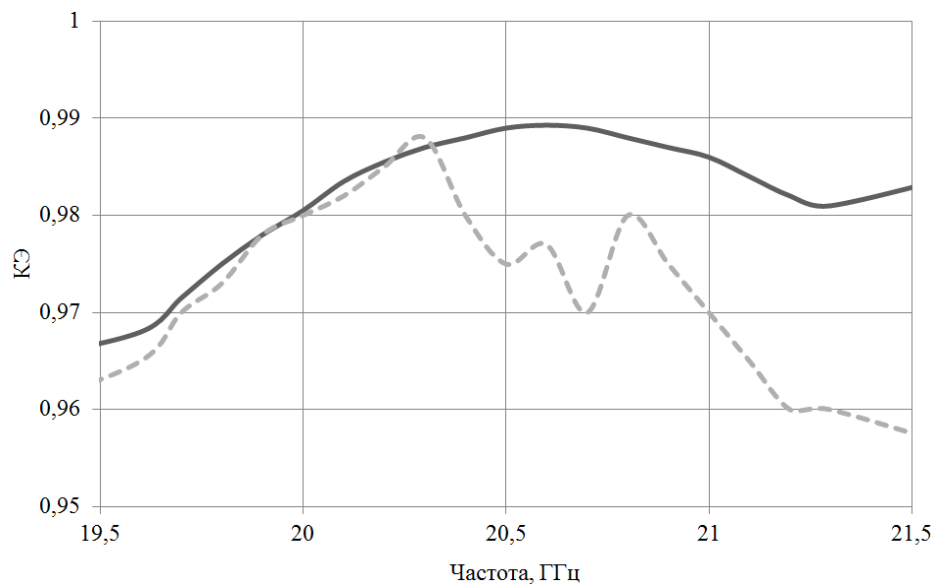


Рис. 13. График частотной зависимости КЭ селектора К/Q-диапазонов в передающем частотном диапазоне

В **четвертой главе** представлены способы уменьшения габаритов частотно-поляризационного селектора, реализованного по «восстанавливающей схеме». Данный селектор не имеет в своем составе двойных Т-мостов в отличие от используемой схемы с НЧ выходом, расположенным в продольном направлении ОС, выполненным в виде крестового разветвителя. Данное отличие рассматриваемой схемы позволяет уменьшить поперечные габариты частотно-поляризационного селектора в целом при условии компактности ФНЧ, расположенных в плечах первого ОС, подключаемого к рупору.

Для уменьшения поперечных габаритов ОС с сохранением электрических длин как ЧТ, так и ФНЧ был предложен способ исполнения ЧТ, заключающийся в реализации данного трансформатора в виде волноводного

изгиба. Внешний вид ОС с трансформатором такого типа приведен на рис. 14. Данное устройство состоит из: 1 – волновода круглого сечения; 2 – трансформатора (модового) волновода круглого сечения; 3 – четырёх ЧТ прямоугольных сечений; 4 – четырёх фильтров нижних частот.

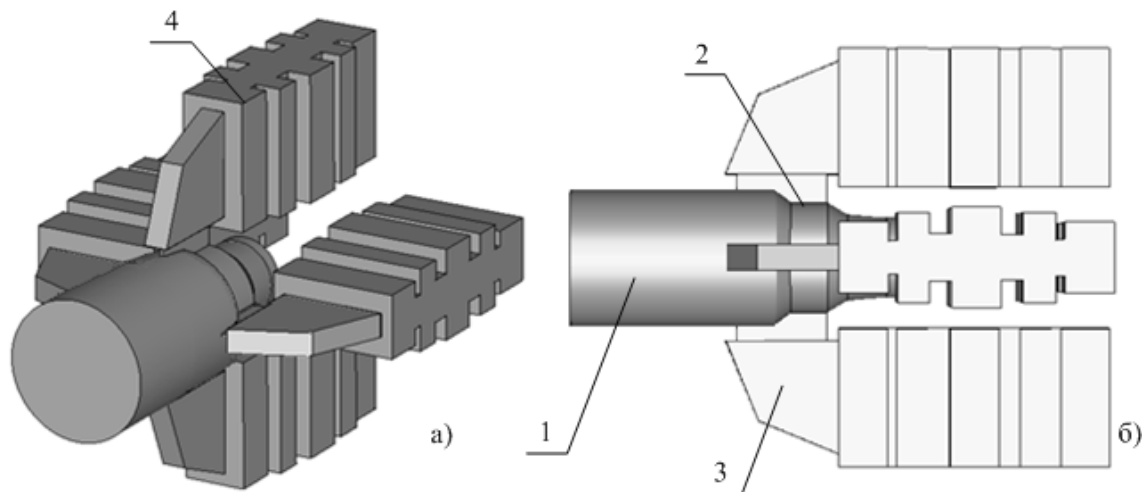


Рис. 14. Внешний вид компактного ортомодового селектора:
а) – изометрический вид; б) – вид сбоку

Форма волноводного ЧТ прямоугольного сечения представляет собой четверть правильного восьмиугольника с радиусом описанной окружности, равным длине широкой стенки волновода. Данная форма трансформатора позволяет уменьшить поперечные габариты ОС за счет углового 90° -го соединения с ФНЧ. Таким образом, ФНЧ располагаются не в поперечной плоскости ОС (или частотно-поляризационного селектора в целом), а в продольных. За счет такого согласующего трансформатора из поперечных размеров ОС исключаются длины входящих в его состав ФНЧ.

Относительная полоса у данного ОС в рабочем НЧ диапазоне составляет 7,5 %, в ВЧ диапазоне – 9,7 %. Также ОС, реализованный в соответствии с вышеописанным способом, имеет существенное преимущество, а именно – поперечные размеры разработанного устройства более чем в 2,5 раза меньше относительно размеров ОС, выполненного в виде простого крестового разветвления.

Еще одним вновь разработанным вариантом уменьшения поперечных размеров ОС, выполненного в виде крестового разветвителя, является применение ФНЧ сложной формы. Так как уменьшение длины ФНЧ негативно влияет на его АЧХ, то было принято решение изменить продольный габарит фильтра за счет искривления его оси, а именно – изменения его формы за счет Г-образного изгиба центрального расширения фильтра, т.е. изгиба под углом 90° в H -плоскости. На рис. 15 показана модель разработанного ОС.

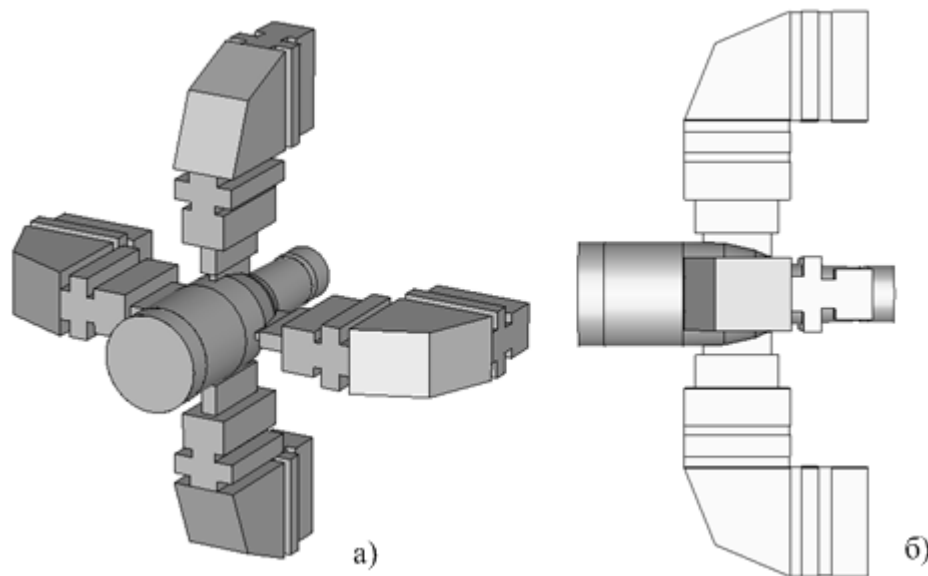


Рис. 15. Разработанный ортомодовый селектор с ФНЧ Г-образной формы:
а) – изометрический вид; б) – вид сбоку

Относительная полоса у ОС с разработанными фильтрами Г-образной формы в рабочем НЧ диапазоне составляет 9,3 %, в ВЧ диапазоне – 8,6 %. Данный ОС обеспечивает прием и передачу сигналов в сопоставимых с ОС, выполненным в виде простого крестового разветвления, диапазонах частот, а также имеет более чем в 1,5 раза меньший поперечный габарит относительно ОС, выполненного в виде крестового разветвителя.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основными результатами диссертационной работы являются представленные решения актуальных задач по разработке компактных частотно-поляризационных селекторов облучателей зеркальных или глобальных рупорных антенн КА с реализацией дуплексного режима работы с сигналами различных поляризаций. Представленные в данной работе экспериментальные и теоретические результаты имеют высокую практическую значимость в области создания частотно-поляризационных селективных устройств антенн спутниковой связи.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан частотно-поляризационный селектор, выполненный по «восстанавливающей схеме» согласно методике поэтапного (последовательного) проектирования составных частей, что позволило спроектировать частотно-поляризационный селектор с реализацией дуплексного режима работы в полосах частот 8-10 %, сопоставимых с используемой на сегодняшний день схемой с ортомодовым селектором, в крестовом разветвлении которого выделяется ВЧ канал рабочего диапазона.

2. Исследования характеристик частотно-поляризационного селектора К/Q-диапазонов позволяют сделать вывод о том, что данное устройство обеспечивает прием и передачу сигналов с круговой поляризацией в

соответствии с требованиями, предъявляемыми к облучающим системам спутниковой связи, что подтверждает возможность применения «восстанавливающей схемы» в виде двойного использования ОС в качестве частотно-селективного устройства с разносом частот приема и передачи более октавы.

3. Предложен способ реализации волноводного трансформатора в виде ступеней в форме усеченных конусов с инверсной формой последнего из них. Трансформатор подавляет высшие типы волн, которые возбуждаются в ортомодовом селекторе, что позволяет добиться разноса центральных частот диапазонов приема и передачи в частотно-поляризационном селекторе, реализованном по «восстанавливающей схеме», в соотношении

$$\frac{f_{ПРМ}}{f_{ПРД}} = 2,15.$$

4. Предложены способы уменьшения поперечных габаритов частотно-поляризационного селектора, выполненного по «восстанавливающей схеме», которые позволяют уменьшить поперечные габариты ОС в 2,5 и в 1,5 раза соответственно, относительно ОС, реализованного в виде простого крестового разветвления.

4.1 Предложен способ уменьшения поперечных габаритов ОС за счет изменения формы ЧТ, а именно – использования волноводного изгиба в качестве трансформатора, форма которого представляет собой четверть правильного восьмиугольника. В рабочем НЧ диапазоне частот относительная полоса частот ОС, выполненного в соответствии с данным способом реализации крестового разветвления, немногим меньше, чем у ОС с ЧТ, выполненным в виде регулярной линии (относительная полоса частот меньше примерно на 2%). Разработанный ОС имеет относительно ОС в виде простого крестового разветвления более чем в 2,5 раза меньшие поперечные габариты.

4.2 Предложен способ уменьшения поперечных габаритов ОС, выполненного на основе крестового разветвителя, за счет внедрения в его конструкцию Г-образных фильтров (фильтр по центру изогнут под углом 90° в H -плоскости), что позволило более чем в 1,5 раза уменьшить поперечные габариты устройства относительно ОС, выполненного в виде крестового разветвителя, а также обеспечить прием и передачу сигналов в сопоставимых с ним диапазонах частот.

Проведенные в настоящей диссертационной работе исследования и предложенные конструкции частотно-поляризационных селективных устройств как селектора К/Q-диапазонов, так и представленных в разделе 4 компактных конструкций ОС, нашли применение в антеннах современных телекоммуникационных спутников связи, разрабатываемых в АО «ИСС».

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи, входящие в перечень рекомендуемых ВАК изданий:

1. **Крылов Ю. В.** Компактный облучатель Ka/Q-диапазона круговой поляризации / Ю. В. Крылов, И. Ю. Данилов, Ю. Г. Выгонский, А. Г. Романов // Научные технологии. – 2015. – Вып. 3(16). – С. 52–55.
2. **Крылов Ю. В.** Проектирование облучателя в Ka/Q-диапазоне на основе «восстанавливающей» схемы / Ю.В. Крылов, В.Б. Тайгин. // Вестник СибГАУ. – 2015. – Вып. 2(16). – С. 417–422.
3. **Крылов Ю. В.** Исследование ортомодового селектора на основе крестового разветвителя // Научные технологии. – 2016. – Вып. 8(17). – С. 13–16.
4. **Крылов Ю. В.** Проектирование волноводного трансформатора для широкополосного облучателя зеркальных антенн // Доклады ТУСУРа. – 2016. – № 3 (19). – С. 16–20.
5. **Крылов Ю. В.** Способ уменьшения поперечного размера ортомодового селектора частотно-поляризационного устройства облучателя зеркальных антенн КА // Доклады ТУСУРа. – 2017. – № 1 (20). – С. 18–22.

Патенты на изобретения:

6. Пат. № 2647203, Российская Федерация. Частотно-поляризационный селектор / **Крылов Ю. В.**, Першин А. С., Романов А. Г., Данилов И. Ю.; заявитель и патентообладатель «РОСКОСМОС», АО «ИСС». – № 2016132916, заявл. 09.08.2016, опубл. 14.03.2018.
7. Пат. № 2639736, Российская Федерация, МПК H01P1/16. Устройство возбуждения волны E_{01} в круглом волноводе/ Данилов И. Ю., Романов А. Г., Чони Ю. И., Лаврушев В. Н., Валиуллина А. И., **Крылов Ю. В.**; заявитель и патентообладатель «РОСКОСМОС», АО «ИСС». – № 2016111227, заявл. 25.03.2016, опубл. 22.12.2017.

Статьи и тезисы в трудах российских и международных конференций:

8. **Крылов Ю. В.** Частотно-поляризационная селекция сигналов в рупорных облучающих системах зеркальных антенн // Исследования наукограда. – 2015. – № 2. – С. 5–9.
9. **Крылов Ю.В.** Частотно-поляризационный селектор облучателя С-диапазона // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург). – 2016 г. – С. 297–300
10. **Крылов Ю. В.** Облучатель С-диапазона круговой поляризации / Ю. В. Крылов, Р. С. Зубарев, А. Ю. Лапин // Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 2015. – С. 238–240

11. **Крылов Ю. В.** Компактный частотно-поляризационный селектор // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. [Электронный ресурс] – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2015. – С. 348–351.

12. **Крылов Ю. В.** Широкополосный волноводный фильтр для облучателя зеркальных антенн / Ю.В. Крылов, А.Ю. Лапин // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 2016. – С. 132–134.

13. **Крылов Ю. В.** Исследование ортомодового селектора / Ю. В. Крылов, А. Ю. Лапин // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. [Электронный ресурс] – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2016. – С. 332–334.

14. Зубарев Р. С. Двухзеркальная осесимметричная антенна со специальным профилем контррефлектора / Р. С. Зубарев, **Ю. В. Крылов**, А. Ю. Лапин // Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 2015. – С. 228–230.

15. **Krylov Y. V.** The broadband waveguide selector of Ku – band / Y. V. Krylov, Y. P. Salomatov, V. V. Vonog // Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники», посвященная 119-й годовщине Дня радио. Красноярск. Сибирский федеральный университет. – 2014. – С. 576–578.

16. **Крылов Ю. В.** Использование частотно-селективных поверхностей в антенно-фидерном тракте / Ю. В. Крылов, А. Ю. Лапин // Решетневские чтения: материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (11–14 нояб. 2014, г. Красноярск): в 3 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 2014. – С. 188–190.

17. Лапин А. Ю. Волноводные фильтры на основе частотно-селективной поверхности / А. Ю. Лапин, **Ю. В. Крылов** // Решетневские чтения: материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (11–14 нояб. 2014, г. Красноярск): в 3 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 2014. – С. 190–192.