

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ РАН

На правах рукописи

МАРШАЛОВ Дмитрий Александрович

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТ
ДИАПАЗОНОВ ВОЛН 13, 6 И 3.5 СМ ДЛЯ
АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Специальность 01.03.02

Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной астрономии РАН.

Научный руководитель:

Доктор технических наук,
профессор

Н. Е. Кольцов

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор
Кандидат технических наук

А. А. Головков
Д. В. Иванов

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Специальная астрофизическая обсерватория (САО РАН)

Защита состоится «11» октября 2010 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 при Учреждении Российской академии наук Институте прикладной астрономии РАН по адресу: 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПА РАН.

Автореферат разослан «____» _____ 2010 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета,
Доктор физ.-мат. наук

Ю. Д. Медведев

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Наиболее точные данные для астрофизики, координатно-временного и эфемеридного обеспечения, астрометрии и космической геодезии дают наблюдения методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), которые регулярно проводятся комплексом «Квазар-КВО». Много информации дают также радиометрические измерения энергетических параметров широкополосного излучения космических источников и регистрация радиоизлучений в спектральных линиях.

Требования к точности данных, получаемых при радиометрических и РСДБ наблюдениях, постоянно повышаются. Для выполнения современных требований по определению Всемирного времени с точностью 0.07 мс (в течение 6 часов) должны проводиться ежедневно часовые сеансы РСДБ-наблюдений, а для определения параметров вращения Земли – суточные сеансы через 1-2 недели (национальные программы наблюдений Ru-UT, Ru-EOP, международные программы IVS-INT1, IVS-INT2 и IVS-R1, IVS-R4, IVS-T2). Наряду с этим увеличивается объем астрофизических исследований методами радиометрии (программы Ru-Flicker, Ru-GRB, Ru-Integral) и РСДБ (программы EURO, VLBA-RDV), проводятся наблюдения излучений в спектральных линиях (программа Ru-OH). Решаются и другие фундаментальные и прикладные задачи.

Увеличение масштабов проводимых радиоастрономических исследований и повышение требований по точности получаемых радиометрических и РСДБ данных возможно только с использованием новой более совершенной приемной аппаратуры, которая позволит не только качественно повысить эксплуатационную надежность в условиях длительной интенсивной работы, устранить подготовительные операции с применением ручного труда операторов и обеспечить проведение наблюдений в режиме автоматического управления радиотелескопом, но и существенно улучшить ряд параметров, влияющих на точность получаемых данных – расширить полосы приема и динамический диапазон, уменьшить собственные шумы, улучшить спектральные характеристики гетеродинов и избирательность по отношению к внеполосным помехам.

Радиоастрономические приемные устройства (РПУ) обычно содержат на входе криоэлектронные малошумящие усилители, обеспечивающие высокую чувствительность радиотелескопа, но для повышения качества данных, получаемых в результате радиоастрономических наблюдений, необходима была разработка широкополосных блоков усиления и преобразования частот (БПЧ) со встроенными гетеродинами на новой элементно-узловой и технологической базе. В первую очередь следовало разработать БПЧ в диапазонах волн 13 и 3.5 см, в которых в настоящее время проводится большинство высокоточных РСДБ-наблюдений, и в диапазоне волн 6 см, в котором широко проводятся астрофизические исследования.

Цели и задачи диссертационной работы:

Целью диссертационной работы является разработка широкополосных блоков преобразования частот и гетеродинов радиоастрономических приемников на новой элементной базе, обеспечивающих повышение точности данных, получаемых при радиометрических и РСДБ наблюдениях, высокую эксплуатационную надежность в режиме длительной интенсивной работы и автоматизацию процессов подготовки и проведения наблюдений.

Для достижения этой цели необходимо было провести следующие исследования и разработки:

- Обосновать требования к широкополосным приемным каналам и к гетеродинам для перспективных РПУ на основе анализа тенденций развития радиоастрономических методов в астрофизике.
- Разработать методики проектирования высокочастотных приемных каналов на перспективной элементной и технологической базе, имеющих высокую надежность, обеспечивающих расширение полосы приема и динамического диапазона, снижение уровня шумов и улучшение избирательности по отношению к шумам зеркального канала и внеполосным радиопомехам.
- Определить технические решения по разработке основных узлов широкополосных приемных каналов (усилителей высоких и промежуточных частот, модуляторов, смесителей, широкополосных фильтров) и принципы конструирования каналов в микроэлектронном исполнении.
- Исследовать возможности улучшения спектральных характеристик гетеродинов и разработать гетеродины в микроэлектронном исполнении с низкими уровнями фазовых шумов и дискретных компонентов спектра.
- Исследовать стабильность параметров широкополосных приемных каналов и гетеродинов в микроэлектронном исполнении и оценить эффективность их применения в приемных системах радиотелескопа.
- Разработать экспериментальные образцы БПЧ диапазонов волн 3.5, 6 и 13 см на базе микросборок широкополосных приемных каналов и гетеродинов.
- Разработать широкополосный блок преобразования частот, обеспечивающий проведение РСДБ-наблюдений в расширенной до 900 МГц полосе приема на радиотелескопах, где установлены системы преобразования сигналов VLBA 4.
- Провести радиометрические и РСДБ наблюдения с использованием разработанных блоков в составе приемных устройств радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО», чтобы оценить эффективность применения разработанных БПЧ в реальных условиях.

Основные научные результаты

Разработана методика проектирования высокочастотных широкополосных приемных каналов в микроэлектронном исполнении для радиоастрономических приемников, обеспечивающая повышение надежности, расширение полосы приема (до 2 ГГц) и улучшение технических параметров, непосредственно влияющих на качество приема радиоастрономических сигналов.

Предложены принципы конструирования микроэлектронных гетеродинов для радиоастрономических приемников и технические решения, обеспечивающие снижение потерь когерентности принимаемого сигнала за счет уменьшения фазовых шумов и дискретных компонентов спектра гетеродинного сигнала.

Показаны и экспериментально подтверждены возможности снижения аппаратных потерь чувствительности радиоинтерферометра и эффективности подавления внеполосных помех за счет разработки более совершенных БПЧ.

Показаны возможности повышения стабильности параметров и надежности широкополосных приемных каналов и гетеродинов радиоастрономических приемников, что необходимо для длительной непрерывной работы радиотелескопа в автоматизированном режиме (без операций подстройки отдельных узлов при подготовке радиометрических и РСДБ наблюдений).

Практическая значимость работы

Созданы интегрально-гибридные блоки усиления и преобразования частот со встроенными гетеродинами для радиоастрономических приемников диапазонов волн 3.5/13 см и 6 см, которые повышают надежность, расширяют полосу приема и динамический диапазон и уменьшают объем приемной аппаратуры в два раза. Установка разработанных блоков на радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО» позволила повысить чувствительность при радиометрических измерениях и точность данных, получаемых методами РСДБ. Параметр SEFD (System Equivalent Flux Density), наиболее полно характеризующий реальную чувствительность радиотелескопа в режиме РСДБ, был улучшен в диапазоне волн 3.5 см примерно на 20 % (с 450 Ян до 358 Ян), а разброс этого параметра, характеризующий точность регистрируемых в конкретном наблюдении данных, уменьшился в 3 раза. Аналогичное улучшение параметра SEFD получено в диапазоне волн 13 см, причем в этом диапазоне волн полностью устранено влияние радиопомех, создаваемых ретрансляторами сотовых систем радиосвязи на близких частотах.

На радиотелескопах, оснащенных системой преобразования сигналов VLBA 4 (например, в обсерватории «Зеленчукская»), обеспечена возможность проведения наблюдений во всех диапазонах волн в расширенной до 900 МГц полосе приема.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика проектирования интегрально-гибридных микросборок широкополосных приемных каналов и гетеродинов для радиоастрономических приемников диапазонов волн 3.5, 6 и 13 см, которые значительно повышают надежность приемной аппаратуры и существенно улучшают параметры, влияющие на точность данных, получаемых при наблюдениях – полосы приема, динамический диапазон, избирательность к внеполосным помехам, частотные характеристики каналов и спектральные характеристики гетеродинов.
2. Результаты разработки и исследования широкополосных блоков усиления и преобразования частот со встроенными гетеродинами на диапазоны волн 3.5 / 13 см и 6 см, которые позволяют уменьшить аппаратные потери чувствительности, повысить точность данных, полученных при РСДБ и радиометрических наблюдений, и вдвое сократить объем приемной аппаратуры.
3. Разработка блока преобразования частот, обеспечивающего проведение РСДБ-наблюдений в двух диапазонах волн с расширенной до 900 МГц полосой приема на радиотелескопах, имеющих систему преобразования сигналов VLBA4.
4. Результаты радиометрических и РСДБ-наблюдений, проведенных на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» с использованием разработанных широкополосных блоков усиления и преобразования частот.

Публикации по теме диссертации

Материалы диссертационной работы опубликованы в 6 статьях [1-6], в учебном пособии СПбГЭТУ[11], в 4 тезисах по докладам на конференциях [7-10] и 5 отчетах ИПА РАН [12-16].

В работах [1-2, 7-8, 11-13], написанных в соавторстве, отражены разработанные лично автором принципы конструирования, схемотехнические и технологические решения по созданию основных микроэлектронных узлов и микросборок широкополосных приемных каналов в целом, а также методики исследований их характеристик.

Личным вкладом автора диссертации в работах [3, 9 и 14-16] является разработка схем, топологии микроплаты и конструкторско-технологических решений по микросборке гетеродина 8.08/2.02 ГГц, а также методика и результаты исследования ее параметров и стабильности. Лично автором были разработаны структура и схемотехнические решения построения блоков преобразования частот диапазонов волн 3.5/13 и 6 см и проведено исследование их характеристик.

В работах [4-6] лично автором диссертации выполнены схемотехническая разработка высокочастотных узлов и комплексное конструирование блока преобразования частот, обеспечивающего сопряжение системы преобразования сигналов VLBA 4 с РПУ комплекса «Квазар-КВО».

Апробации работы

Материалы диссертационной работы были апробированы на семинарах и на Ученом совете ИПА РАН, а также на Всероссийской конференции «РСДБ-2012 для астрометрии, геодинамики и астрофизики» (11–15 сентября 2006 г., г. Санкт-Петербург), на Радиоастрономической конференции «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов» (22–27 сентября 2008 г., пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика) и на «II научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике» (14 апреля 2009 г., г. Санкт-Петербург).

Связь диссертации с плановыми работами ИПА РАН

Диссертационная работа непосредственно связана с плановыми разработками ИПА РАН по темам «Эффективность» (№ гос. рег. 01.2.00708315), «Квазар» (№ гос. рег. 0120905305), «Квазар-Астрофизика» (№ гос. рег. 1200905301) и является их составной частью. Результаты диссертационной работы использованы полностью в ОКР «Полюс» и «Полюс-М», выполняемых ИПА РАН, в рамках федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система».

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации 137 страниц, из них: 109 страниц текста, 75 рисунков, 10 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 57 наименований.

Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указаны научная новизна, практическая значимость результатов работы, перечислены положения, выносимые на защиту, даны сведения по публикациям и апробации работы.

В **первой главе** обоснованы требования к широкополосным каналам усиления и преобразования частот и сформулированы задачи исследований и разработки, исходя из современных требований астрофизики, координатно-временного и эфемеридного обеспечения и астрометрии.

В диапазоне волн 6 см важнейшей задачей является расширение полосы приема до 900 МГц, а в диапазоне 3.5 см – до 2 ГГц. В диапазоне волн 13 см, где увеличивается число работающих радиопередатчиков, необходимо значительно повысить помехозащищенность РПУ, обеспечив ослабление внеполосных радиопомех не менее 60 дБ. Для уменьшения аппаратных погрешностей при регистрации данных наблюдений должны быть существенно улучшены такие параметры БПЧ как динамический диапазон, равномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), спектральные характеристики гетеродинов, стабильность коэффициента усиления и коэффициента глубины модуляции сигнала.

Для обеспечения возможности РСДБ-наблюдений на радиотелескопах, оснащенных системой преобразования сигналов VLBA 4 (например, РТ-32 в обсерватории «Зеленчукской»), с расширенной до 900 МГц полосой приема необходимо разработать специализированный широкополосный преобразователь частот.

Решение всех этих задач требует разработки методик проектирования широкополосных приемных каналов (ШПК) и гетеродинов для астрономических приемников в виде монолитных (на единой подложке) интегрально-гибридных сборок, а также исследования параметров и стабильности всех узлов схемы – усилителей, модуляторов, фильтров, гетеродинов.

Правильность технических решений и возможности улучшения качества данных, получаемых при РСДБ и радиометрических наблюдениях, должны быть проверены при проведении плановых сеансов наблюдений на радиотелескопе.

Во **второй главе** разработана методика проектирования интегрально-гибридных микросборок ШПК для радиоастрономических приемников, обеспечивающая расширение полосы приема и динамического диапазона, снижение уровня собственных шумов и улучшения избирательности к внеполосным радиопомехам. Методика включает в себя обоснование схем микросборок, выбор элементов схем и подложек, разработку способов конструирования микросборок и монтажа элементов, расчет и экспериментальную проверку параметров устройств и их стабильности.

На основе этой методики разработана структура микросборки ШПК диапазона волн 3.5 см и выбрана элементная база. В состав ШПК (рис. 1) для улучшения согласования между отдельными каскадами схемы включены согласующие элементы (СЭ), в качестве которых в рассматриваемом диапазоне волн используются ферритовые микрополосковые вентили типа 3IMS86 (или 3IMS78 для полосы 2 ГГц).

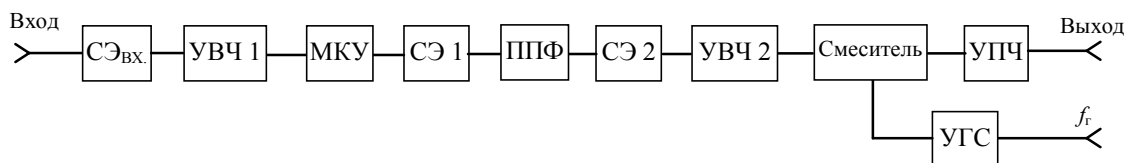


Рис. 1. Схема микросборок ШПК: СЭ – согласующий элемент, УВЧ 1, УВЧ 2, и УПЧ – усилители высокой и промежуточных частот, МКУ – модулятор коэффициента усиления, ППФ – полосно-пропускающий фильтр, УГС – усилитель гетеродинного сигнала.

Для расширения динамического диапазона усилитель высокой частоты должен состоять из малошумящих каскадов усиления (УВЧ 1) и каскадов с большим динамическим диапазоном при приемлемом уровне собственных шумов (УВЧ 2). Между ними установлены модулятор коэффициента усиления, необходимый для работы РПУ в режиме радиометра, и высокочастотный полосно-пропускающий фильтр (ППФ), определяющий основную частотную избирательность ШПК. В состав канала также должны входить широкополосный смеситель с усилителем гетеродинного сигнала

(УГС) и сверхширокополосный усилитель промежуточных частот (УПЧ) для усиления сигнала в полосе выходных промежуточных частот.

Расчеты, проведенные для разных подложек и разных типов полосковых линий передачи, показали, что высокая точность изготовления топологических элементов схемы и удобство соединения с бескорпусными интегральными схемами (кристаллами) обеспечивает заземленная копланарная линия на подложке из материала RO3003 толщиной 0.254 мм.

Анализ элементной базы для ШПК диапазона волн 3.5 см показал, что для УВЧ 1 целесообразно использовать кристалл FMA219, согласованный с помощью микрополосковых ферритовых вентилей. УВЧ 2 реализован на двух усилителях HMC462LP5 и HMC411LP3.

Модулятор собран из двух транзисторных коммутаторов HMC547LP3 и аттенюатора HMC 656, благодаря чему достигнуты высокая стабильность глубины модуляции, равномерность АЧХ в широкой полосе частот и малое время переключения. Исследование влияния нестабильности глубины модуляции на относительную погрешность δ_{T_s} измерения шумовой температуры сигнала показало, что

$$\delta_{T_s} = \frac{(1 + \delta_{\Delta M})(M_0 - 1)}{M_0 + M_0 \delta_{\Delta M} - 1} - 1, \quad (1)$$

где M_0 – номинальное значение глубины модуляции, $\delta_{\Delta M}$ – относительное отклонение глубины модуляции. Разработанный модулятор не вносит каких-либо заметных погрешностей при радиометрических измерениях ($\delta_{T_s} \leq 1.7 \cdot 10^{-5}$). Моделированием схемы модулятора с учетом всех дополнительных элементов были определены значения проходных емкостей, при которых достигается максимальная полоса пропускания (6 ГГц) при высокой равномерности АЧХ.

Моделирование характеристик фильтра позволило определить взаимосвязь между ослаблением шумов зеркального канала $\alpha_{зк}$ и допустимыми пульсациями АЧХ. Требуемое значение $\alpha_{зк}$ (30 дБ) при полосе частот $\Delta f = 900$ МГц обеспечивает полосковый фильтр седьмого порядка с Чебышевской характеристикой I типа (рис. 2).

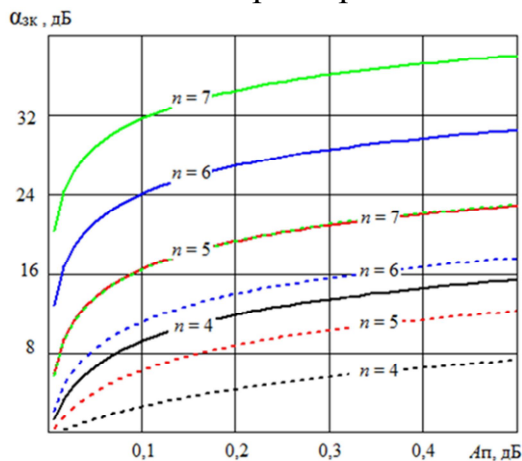


Рис. 2. Зависимости $\alpha_{зк}$ от пульсаций $\Delta_{п}$ АЧХ фильтра с полосами пропускания 900 МГц (сплошные линии) и 2 ГГц (пунктирные).

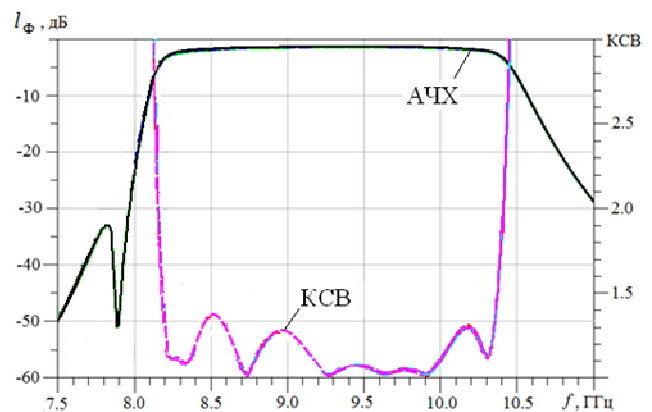


Рис. 3. АЧХ и КСВ фильтра с полосой пропускания 2 ГГц.

В ШПК с полосой 2 ГГц для получения необходимого ослабления шумов зеркального канала фильтр следует дополнить двумя режекторными звеньями (рис. 3). При этом в полосе пропускания фильтра обеспечивается хорошее согласование: коэффициент стоячей волны (КСВ) менее 1.4. Статистическое моделирование показало, что фильтр лучше всего изготавливать на диэлектрической подложке TMM10i толщиной 0.635 мм при волновых сопротивлениях резонаторов от 57 до 85 Ом, а топологию по пятому классу точности.

В двойном балансном смесителе на микросхеме HMC220MS8 комбинационные помехи подавлены более чем на 47 дБ. Слабая зависимость коэффициента передачи от мощности гетеродина и температуры (0.083 дБ/мВт и -0.004 дБ/°С) гарантирует высокую стабильность коэффициента усиления ШПК (меньше -0.06 дБ/°С).

Для получения равномерной АЧХ в полосе 100-2100 МГц УПЧ, реализованный на усилителе ERA-3SM, должен содержать двухконтурную Т-образную цепь коррекции наклона АЧХ, фильтр верхних частот пятого порядка на L, С чип-элементах и фильтр нижних частот на основе керамики с низкой температурой обжига LFCN-900 при полосе частот 900 МГц или LFCN-1800 при полосе 2 ГГц (рис. 4).

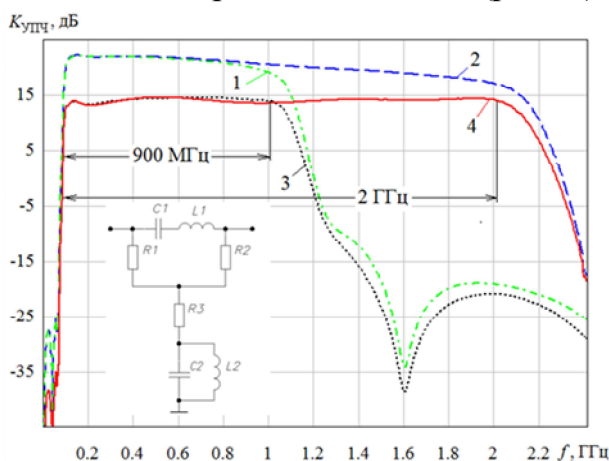


Рис.4 Частотные характеристики УПЧ с полосами частот 900 МГц и 2000 МГц без цепей коррекции АЧХ (кривые 1 и 2) и с разработанными цепями коррекции (3 и 4).

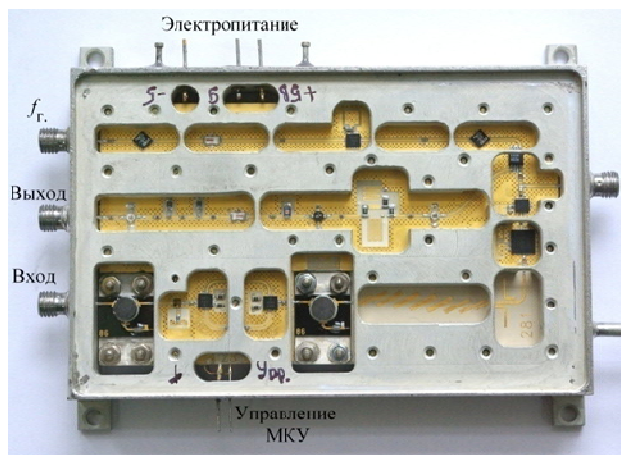


Рис.5 Микросборка ШПК диапазона волн 3.5 см с открытой верхней крышкой

Гибридно-интегральные микросборки ШПК (рис. 5) целесообразно конструировать в корпусах рамочного типа с единым металлическим основанием, а отдельные элементы схемы разделять стенками-перегородками, что обеспечивает получение АЧХ с малой неравномерностью в полосе пропускания и хорошую экранировку отдельных узлов схемы.

Разработаны методы монтажа и соединения конструктивно разных элементов схемы. Экспериментальным путем отработана конструкция и технология установки ферритовых вентилях на общее основание ШПК и соединение его с центральным и заземленными проводниками копланарной линии, которые обеспечивают хорошее согласование и высокую надежность. В результате экспериментальных исследований согласования кристаллов

интегральных схем при разных способах их соединений с копланарной линией установлено, что высокое качество соединения обеспечивают два параллельно соединенных золотых проводника диаметром 17 мкм с высотой петли менее 300 мкм.

В начале **третьей главы** проведено экспериментальное исследование параметров ШПК диапазона волн 3.5 см с целью проверки правильности разработанной методики проектирования и заложенных схемотехнических и конструкторско-технологических решений, уточнения реально достижимых параметров и определения их стабильности.

Полосы пропускания разработанных микросборок ШПК диапазона волн 3.5 см расширены до 900 МГц (8.18-9.08 ГГц) и до 2 ГГц (8.18-10.2 ГГц), шумовая температура каналов снижена до 395 и до 450 К, динамический диапазон расширен на 10-13 дБ. Неравномерность АЧХ – 2 дБ в широкой полосе 2 ГГц (рис. 6).

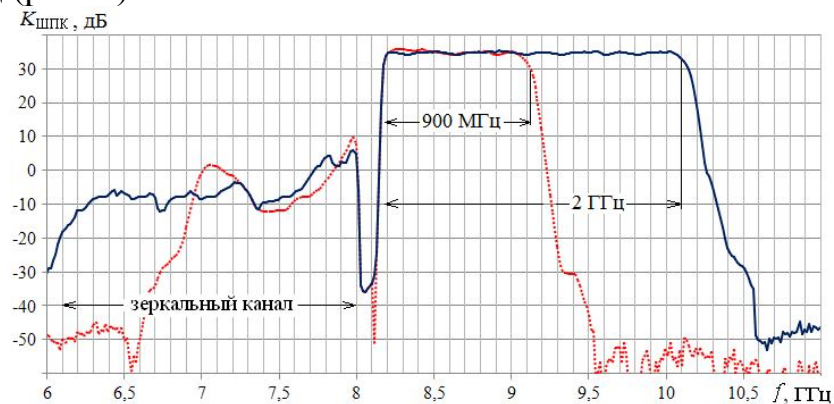


Рис. 6. Коэффициенты усиления $K_{УПЧ}$ для ШПК с полосой 900 МГц (пунктирная линия) и 2 ГГц (сплошная).

Шумы зеркального канала ослаблены более чем на 36 дБ за исключением участка частот 7.9-7.98 ГГц, в котором ослабление снижается до 26 дБ. Потерь чувствительности радиотелескопом за счет шумов зеркального канала практически нет (менее 0.03 %, а в узком участке 7.9-7.98 ГГц – менее 0.3 %).

Полученная высокая температурная стабильность коэффициента усиления ШПК (температурный коэффициент усиления менее -0.06 дБ/°С) и малая чувствительность к напряжениям электропитания гарантируют высокую стабильность результатов радиоастрономических наблюдений при воздействии дестабилизирующих факторов.

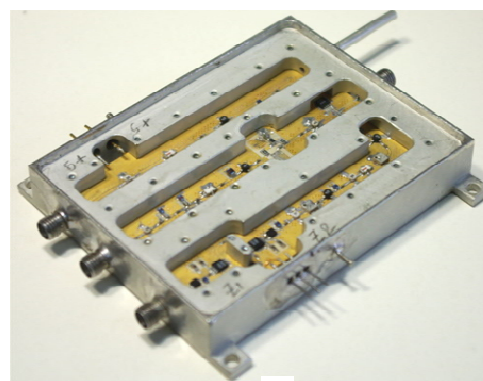
В следующем разделе главы 3 разрабатывается ШПК диапазона волн 13 см по схеме (рис. 1). УВЧ 1 собран на двух каскадах малошумящих РНЕМТ усилителей SPF-5122Z, которые хорошо согласованы по входу (КСВ менее 1.5), что позволяет отказаться от использования ферритового вентиля и все элементы согласования каскадов схемы выполнить на резистивных широкополосных аттенюаторах РАТ-3. Для расширения динамического диапазона второй каскад УВЧ 1 расположен за схемой модулятора, выполненного на микросхемах коммутаторов НМС435MS8 и резистивном аттенюаторе НМС656LP2. УВЧ 2 построен на двух микросхемах усилителей

ERA-51SM с большим динамическим диапазоном при приемлемом уровне собственных шумов.

Анализ технических решений реализации фильтра, обеспечивающего ослабление шумов зеркального канала более 60 дБ, показал, что он должен содержать два полосно-пропускающих фильтра на основе керамики с низкой температурой обжига BP156 и один фильтр верхних частот типа HFCN-2100. При этом ослабление внеполосных радиопомех достигает 73 дБ (рис. 7 а). Размещение этих элементов между каскадами УВЧ 2 обеспечивает получение малой (менее 0.5 дБ) неравномерности АЧХ в полосе пропускания фильтра.



а



б

Рис. 7. Частотная характеристика микросборки ШПК диапазона волн 13 см (а) и ее внешний вид с открытой крышкой (б).

Для смесителя использована двойная балансная схема на диодах Шоттки, которая выполнена в виде микросхемы HMC213AMS8. Выходной УПЧ аналогичен разработанному для ШПК диапазона волн 3.5 см, но здесь для ФНЧ выполнен на модуле LFCN-400, а снизу полосу пропускания ограничивает ФВЧ с частотой среза 180 МГц.

Экспериментальные исследования микросборки ШПК диапазона волн 13 см (рис. 7 б) подтвердили правильность примененных технических решений, позволивших существенно улучшить все основные параметры канала. Динамический диапазон расширен до 37 дБ, эквивалентная шумовая температура снижена до 110 К, неравномерность АЧХ уменьшена до 1.4 дБ. Температурный коэффициент усиления снижен до -0.024 дБ/°С, что гарантирует высокое качество радиометрических измерений при использовании ШПК в термостатируемых блоках РПУ.

Последний раздел главы посвящен разработке микросборки ШПК диапазона волн 6 см. Для УВЧ 1 применены два каскада малошумящих PHEMT усилителей типа HMC717. УВЧ 2 построен на более высокочастотных усилителях ERA-1SM. Проведенные расчеты показали, что требуемую избирательность обеспечивает высокочастотный планарный полосковый фильтр на пяти связанных полуволновых резонаторах и двух режекторных звеньях, выполненный на диэлектрической подложке из материала RO3010 толщиной 0.635 мм. Встроенный в микросхему двойного балансного смесителя HMC488MS8G усилитель сигнала гетеродина

дополнен согласующими резисторами. Состав и схема выходного УПЧ аналогичны, рассмотренным выше для ШПК диапазона 3.5 см с полосой частот 900 МГц.

Полоса пропускания ШПК в диапазоне волн 6 см расширена с 500 до 900 МГц, эквивалентная шумовая температура снижена до 250 К, динамический диапазон увеличен до 35 дБ, а шумы зеркального канала ослаблены на 28 дБ. Рациональный подбор элементов схемы позволил уменьшить температурный коэффициент усиления канала до -0.04 дБ / °С, что гарантирует получение данных наблюдений высокого качества.

В четвертой главе исследованы возможности улучшения спектральных характеристик гетеродинов. По результатам анализа разработаны гетеродины в микроэлектронном исполнении с низкими уровнями фазовых шумов и дискретных компонентов спектра. Поскольку РСДБ-наблюдения проводятся в диапазонах волн 3.5 и 13 см одновременно, гетеродины этих диапазонов целесообразно выполнить в одной микросборке, работающей на двух частотах – 8.08 и 2.02 ГГц, причем частоту 8.08 ГГц целесообразно формировать в однокольцевой системе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), а частоту 2.02 ГГц получать делением генерируемой частоты на 4.

Исследование показали, что уровень фазовых шумов зависит от частоты сравнения в кольце ФАПЧ гетеродина 8.08/2.02 ГГц и минимален при использовании опорного сигнала с частотой 100 МГц и частоте сравнения 20 МГц. При этом среднеквадратическое отклонение (СКО) фазовых шумов в полосе частотных отстроек от 30 Гц до 30 МГц не превышает 1.1 градуса. Можно использовать и опорный сигнал с частотой 5 МГц, установив частоту сравнения равной 5 МГц, но СКО фазовых шумов при этом увеличивается до 2.9 градусов.

По сравнению с применявшимся ранее гетеродином на частоте 8.08 ГГц фазовые шумы снижены на 14 дБ (спектральная плотность мощности $S_{\varphi}(\nu) = 74$ дБ/Гц при отстройке $\nu = 100$ Гц), дискретные компоненты спектра на частоте сравнения и ее гармониках – на 20 дБ (ослабление не менее 90 дБ), а сетевые компоненты – на 25 дБ (ослабление более 70 дБ). Влияние фазовых шумов и дискретных компонентов спектра гетеродинного сигнала на отношение сигнал/шум в РСДБ-корреляторе практически исключено (снижение менее 0.4% для диапазона волн 3.5 см и 0.14% для диапазона волн 13 см).

Экспериментальные исследования фазовых шумов разработанных гетеродинов показали хорошее совпадение с расчетными характеристиками (рис. 8). СКО фазовых шумов гетеродина на частоте 4.5 ГГц, используемого в канале диапазона волн 6 см, достигает минимального значения (0.28 градусов в полосе частотных отстроек от 30 Гц до 30 МГц) при частоте сравнения в кольце ФАПЧ 25 МГц. При работе от опорного сигнала с частотой 5 МГц СКО фазовых шумов немного увеличивается (до 0.68 градуса в той же полосе отстроек), спектральная плотность мощности фазовых шумов составляет $S_{\varphi}(\nu) = -74$ дБн/Гц, -83 дБн/Гц и -111 дБн/Гц при

отстройках $\nu = 100$ Гц, 1 кГц и 100 кГц соответственно, но это допустимо для радиointерферометра (расчетное снижение корреляционного отклика менее 0.13%).

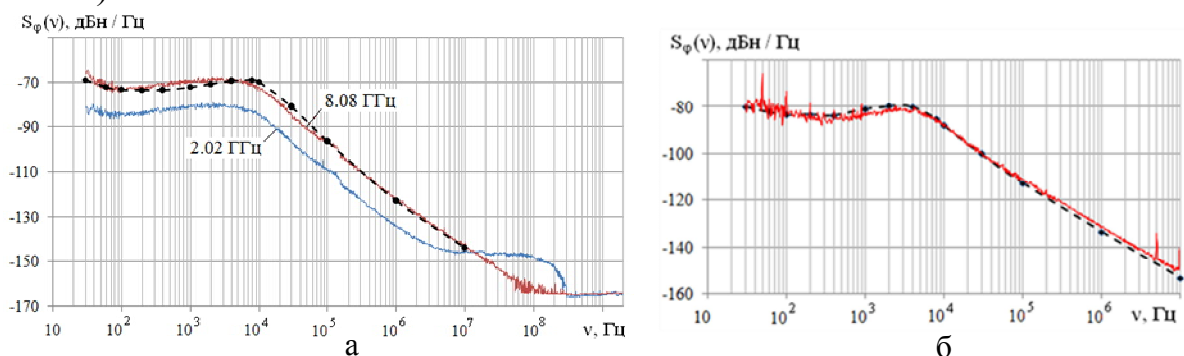


Рис. 8. Спектры фазовых шумов гетеродина с частотами 8.08/2.02 ГГц (а) и гетеродина с частотой 4.5 ГГц (б).

В пятой главе представлены результаты конструирования широкополосных блоков преобразования частот и их использование на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» при радиометрических и РСДБ наблюдениях.

На основе разработанных микросборок ШПК и гетеродинов были созданы двухдиапазонные (3.5 / 13 см) блоки преобразования частот (рис. 9) и двухканальные блоки на диапазон волн 6 см. БПЧ-3.5 / 13 см обеспечивает проведение РСДБ-наблюдений в двух диапазонах волн одновременно и уменьшает объем аппаратуры радиотелескопа с пяти блоков до двух.

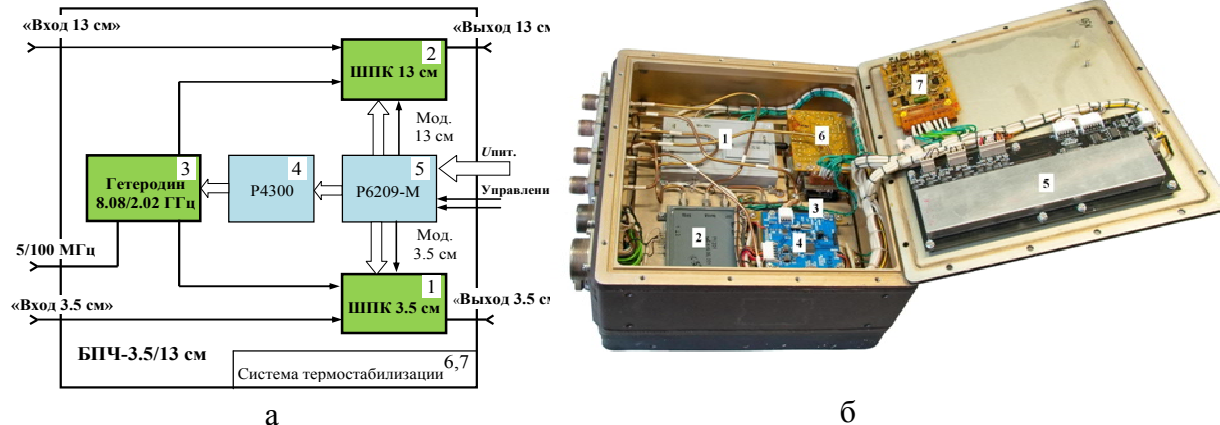


Рис. 9. Структурная схема (а) и внешний вид БПЧ-3.5/13 см с открытой крышкой (б): 1 – микросборка ШПК 3.5 см, 2 – микросборка ШПК 13 см, 3 - микросборка гетеродина 8.08/2.02 ГГц, 4 - плата управления гетеродином Р4300, 5 – плата электропитания Р6209-М, 6, 7 – платы управления термостабилизацией блока.

Разработанные двухдиапазонные блоки БПЧ-3.5/13 см введены в состав РПУ радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО». С применением этих блоков регулярно проводятся радиометрические (программы Ru-Flicker, Ru-GRB, Ru-Integral) и РСДБ наблюдения по международным и национальным программам (например, IVS-R4, R1, Ru-UT, Ru-EOP).

За счет улучшения параметров широкополосных приемных каналов и гетеродинов, заметно снижены аппаратные потери когерентности сигналов и чувствительности радиотелескопа, что подтверждает анализ значений

параметра SEFD, который наиболее полно характеризует реальную чувствительность радиотелескопа в режиме РСДБ. Значения SEFD, полученные международным РСДБ-центром (IVS) по результатам наблюдений серий R1 и R4 для обсерватории «Светлое» (см. <http://lupus.gsfc.nasa.gov/sess/sesshtml/2009/station-perf09.html>) в периоды времени до и после установки новых блоков преобразования частот показывают, что в диапазоне волн 3.5 см значение SEFD снизилось с 450 Ян до 358 Ян, а разброс этого параметра уменьшился примерно в 3 раза (рис. 10 а).

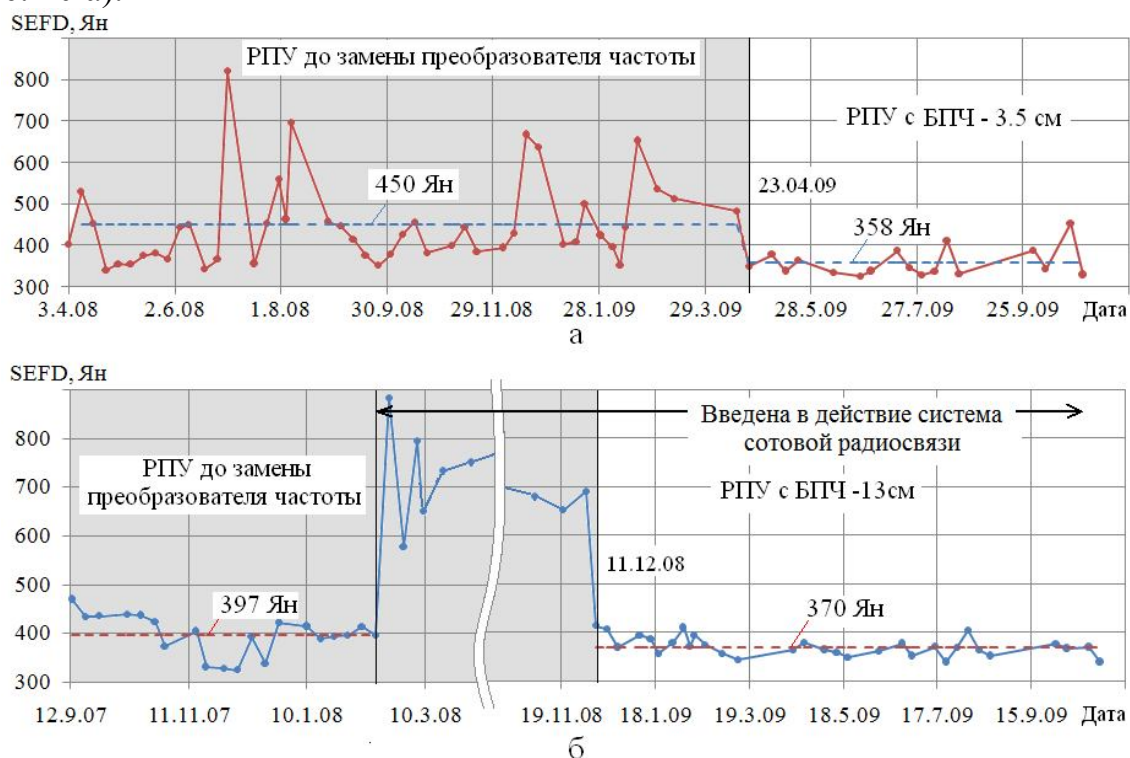


Рис.10. Значение параметра SEFD в диапазонах волн 3.5 см (а) и 13 см (б) на радиотелескопе обсерватории «Светлое» до (подкрашенные части графиков) и после введения в РПУ блоков БПЧ-3.5/13.

В диапазоне 13 см первоначально (до февраля 2008 г.) значения SEFD имели разброс в пределах 330-480 Ян, а после февраля 2008 г., когда недалеко от обсерватории начал действовать ретранслятор сотовой системы связи стандарта IMT-2000/UMTS, значения и разброс SEFD увеличились до 600-900 Ян, что создало неприемлемые для РСДБ-наблюдений условия. После установки нового блока преобразования частот (декабрь 2008 г.) влияние внеполосных помех от ретранслятора было исключено, а значения SEFD уменьшились и стали достаточно стабильными – 320-410 Ян. Снижение параметра SEFD подтверждает улучшение данных, получаемых при РСДБ-наблюдениях.

Для обеспечения приема сигналов в полосе частот 900 МГц на радиотелескопах, оснащенных системой преобразования сигналов VLBA 4, был разработан специализированный широкополосный блок преобразования частот, состоящий из двух идентичных каналов, работающих по принципу сложения частот, и гетеродина, настроенного на частоту 479.9 МГц (рис. 11).

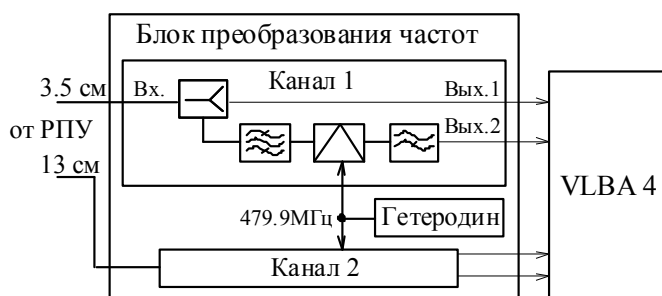


Рис.11. Схема блока преобразования частот, расширяющего полосу приема VLBA 4.

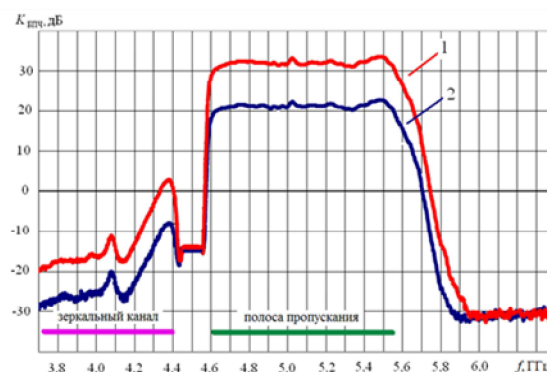


Рис.12. АЧХ широкополосного канала диапазона волн 6 см.

Создание и введение этого блока в эксплуатацию на радиотелескопе обсерватории «Зеленчукская» дало возможность работать во всех диапазонах волн и обеспечить прием сигналов в полосе 900 МГц.

Двухканальный БПЧ диапазона волн 6 см выполнен в таком же термостатируемом корпусе как и БПЧ-3.5/13 см. Этот БПЧ содержит два идентичных широкополосных канала и гетеродин на частоту 4.5 ГГц. Полоса пропускания широкополосного приемного канала расширена с 500 до 900 МГц (4.6-5.5 ГГц). Неравномерность АЧХ в полосе пропускания не превышает 2 дБ, причем форма АЧХ при переключении модулятора коэффициента усиления не изменяется (рис. 12). Шумы зеркального канала ослаблены более чем на 43 дБ, за исключением участка 4.2-4.4 ГГц, в котором ослабление составляет 28 дБ.

Разработанные БПЧ диапазонов волн 6 см введены в эксплуатацию на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО», что расширило возможности астрофизических исследований, проводимых методами РСДБ и радиометрии. С использованием этих блоков проводятся регулярные РСДБ-наблюдения совместно с Европейской РСДБ-сетью (серии N10C1 и N10C2). Выполнены также радиометрические исследования микроквазара Cyg X-3 в правой и левой круговых поляризациях (17 ноября и 21 декабря 2009 года), которые дополнили информацию о плотности потока мощности в диапазоне волн 6 см.

Эксплуатация блоков на радиотелескопе комплекса «Квазар-КВО» подтвердила высокую надежность и стабильность их параметров: за время эксплуатации (около двух лет) не было ни одного отказа.

В разделе «**Заключение**» сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Публикации по теме диссертации:

1. Маршалов Д. А., Кольцов Н. Е. Преобразователи частот для радиоастрономических приемников. // Приборы и техника эксперимента. 2007. №6 С. 132-133.

2. Маршалов Д. А., Кольцов Н. Е. Микросборки широкополосных каналов усиления и преобразования частот для радиоастрономических приемников // Тр. ИПА РАН. Вып. № 15. СПб.: Наука, 2006. С. 110-129.

3. Маршалов Д. А., Бердников А. С., Кольцов Н. Е., Мардышкин В. В. Модернизация блоков преобразования частот радиоастрономических приемников комплекса «Квазар-КВО» // Тр. ИПА РАН. Вып. № 19. СПб.: Наука, 2008. С. 139-151.
4. Маршалов Д. А., Бердников А. С. Преобразователь частоты для сопряжения радиоастрономических приемников с терминалом VLBA радиоинтерферометров со сверх длинными базами. // Приборы и техника эксперимента. 2007. №5. С. 151-152.
5. Маршалов Д. А. Бердников А. С. Преобразователь частоты для РСДБ-терминала VLBA 4 обсерватории «Зеленчукская» // Сообщения ИПА РАН. № 164. СПб, 2006. –17 с.
6. Dmitriy Marshalov, Leonid Fedotov, Alexander Ipatov et al. Institute of Applied Astronomy Technology Development Center, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2005 Annual Report, edited by D. Behrend and K. Baver, NASA/TP-2006-214136, 2006. p. 286-289.
7. Маршалов Д. А., Кольцов Н. Е. Широкополосные усилительно-преобразовательные устройства для радиоастрономических приемников Всероссийская конференция «РСДБ-2012 для астрометрии, геодинамики и астрофизики» (РСДБ-2012). // Тезисы докладов. СПб.: ИПА РАН, 2006, С. 148-149.
8. Маршалов Д. А., Кольцов Н. Е. Широкополосные усилительно-преобразовательные устройства для радиоастрономических приемников Всероссийская конференция «РСДБ-2012 для астрометрии, геодинамики и астрофизики» (РСДБ-2012). // Тр. ИПА РАН. Вып. № 16. СПб.: Наука, 2007. С. 245-251.
9. Маршалов Д. А. Модернизация блоков преобразования частот радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» сантиметрового диапазона волн. // Тезисы докладов Радиоастрономической конференции «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов». Пос. Нижний Архыз, 22 - 27 сентября 2008 г. С. 61.
10. Маршалов Д. А. Широкополосные блоки преобразования частот радиоастрономических приемников. // Сборник докладов II научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике – СПб.: Аграф+, 2009. С. 24-32.
11. Маршалов Д. А., Кольцов Н. Е. Широкополосные каналы радиоастрономических РПУ нового поколения // В уч. пособии Ипатов А. В., Кольцов Н. Е. Радиометры. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. С. 56-67.
12. Маршалов Д. А. Технические предложения по модернизации блоков усиления и преобразования частот широкополосных радиоастрономических приемных устройств диапазонов волн 13 и 3.5 см. Разработка микросборок гетеродинов. Модернизация блоков преобразования частот на базе новых микросборок. // Разделы 3, 4 и 5 пояснительной записки к эскизному проекту ОКР «Полус». СПб.: ИПА РАН, 2007. С.38-68.

13.Маршалов Д. А. Модернизация блоков преобразования частот диапазонов волн 13 и 3.5 см. // Раздел 1 научно-технического отчета по этапу 1.3 ОКР «Полюс». СПб.: ИПА РАН, 2008. С.10-52.

14.Маршалов Д. А. Разработка, изготовление и испытание блоков преобразования частот для модернизации приемных устройств. // Раздел 1 научно-технического отчета по этапу 1.4 ОКР «Полюс». СПб.: ИПА РАН, 2008. С.8-35.

15.Маршалов Д. А. Разработка двухдиапазонного БПЧ 13 / 3.5 см. Модернизация ШПК 3.5 см, обеспечивающего расширение полосы пропускания до 1.5-2 ГГц. // Разделы 2.4 и 2.5 пояснительной записки к эскизному проекту ОКР «Полюс-М». СПб.: ИПА РАН, 2009. С.72-82.

16.Маршалов Д. А. Блоки преобразования частот. // Раздел 4 научно-технического отчета по этапу 2.1 ОКР «Полюс-М». СПб.: ИПА РАН, 2010. С.53-68.

Издание осуществлено с оригинал-макета,
подготовленного к печати
в Институте прикладной астрономии РАН

Подписано к печати 8.09.2010.
Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 16.8. Тип. зак. №
Тираж 120.

ЗАО «Полиграфическое предприятие» № 3
191104, Санкт-Петербург, Литейный пр., д. 55.

ИПА РАН, 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10