

АНТЕННЫ, ВОЛНОВОДНАЯ И КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.396.677

А. Б. ИПАТОВ¹, В. М. ЧМИЛЬ², В. Н. СКРЕСАНОВ³,
Д. В. ИВАНОВ¹, В. В. МАРДЫШКИН¹, В. К. ЧЕРНОВ¹,
А. М. ПИЛИПЕНКО², А. А. КИРИЛЕНКО³

¹ Институт прикладной астрономии РАН,
наб. Кутузова, 10, г. Санкт-Петербург, 191187, Россия
E-mail: ipatov@ipa.nw.ru

² ПАО «Научно-производственное предприятие “Сатурн”»,
ул. Леся Курбаса, 2-б, г. Киев, 03148, Украина
E-mail: chmil@adamant.net

³ Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61082
E-mail: valery.skresanov@gmail.com

КРИОГЕННЫЙ ПРИЕМНЫЙ ФОКАЛЬНЫЙ БЛОК ДЛЯ ТЕЛЕСКОПОВ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Приводятся результаты синтеза, конструирования и испытаний экспериментального образца криогенного приемного фокального блока (КПФБ) для радиотелескопов российского радиоинтерферометрического комплекса нового поколения. Радиотелескопы комплекса спроектированы для приема сигналов космических радиоисточников одновременно в S, X и Ka диапазонах и частично совместимы с радиотелескопами перспективной глобальной геодезической сети VLBI2010. Обсуждаются принятые технические решения ключевых узлов КПФБ и приводятся основные технические характеристики СВЧ элементов, которые, как показано, удовлетворительно соответствуют проектной спецификации.

Ключевые слова: многодиапазонные облучатели зеркальных антенн, разделители круговых поляризаций, охлаждаемые малошумящие усилители, радиометры, VLBI2010

1. Введение

Институтом прикладной астрономии РАН разработан проект радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) [1]. Наблюдения, выполненные на этом интерферометре, позволят определять параметры вращения Земли и координаты опорных станций на миллиметровом уровне точности, а также оперативно определять всемирное время в интересах Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС).

В настоящее время в России подобные задачи решаются комплексом “Квazar-КВО” при рабо-

те в составе радиоинтерферометрической сети Международной РСДБ-службы для геодезии и астрометрии (International VLBI (Very Long Baseline Interferometry) Service for Geodesy and Astrometry – IVS).

Международное сообщество GGOS (Global Geodetic Observing System) разработало рекомендации по поддержанию и развитию аппаратно-программных средств опорных станций глобальной геодезической сети [2]. Опорные станции со своей инфраструктурой должны предоставлять количественную информацию для определения и мониторинга координат опорных источников небесной системы координат и координат опорных станций земной системы координат, а также информацию о параметрах вращения Земли, уровне

© А. Б. Ипатов, В. М. Чмил, В. Н. Скресанов,
Д. В. Иванов, В. В. Мардышкин, В. К. Чернов,
А. М. Пилипенко, А. А. Кириленко, 2014

моря, круговороте воды, климате и об угрозе стихийных бедствий.

Международная РСДБ-служба в свою очередь разработала проект VLBI2010, направленный на кардинальное повышение точности получаемых данных [3]. Сформулированы требования, которым должны удовлетворять перспективные станции IVS. Рекомендуемые технические характеристики радиотелескопов нового поколения в сравнении с характеристиками радиотелескопов ныне действующей глобальной РСДБ-сети приведены в табл. 1.

Проектная спецификация технических характеристик строящихся радиотелескопов российского РСДБ-комплекса нового поколения в основном соответствует спецификации VLBI2010. Вместе с тем диапазоны частот выбраны с учетом совместимости с комплексом “Квazar-КВО” и отличаются от частот приема, рекомендованных для проекта VLBI2010 (табл. 1). При выборе номиналов частот учтены также перспективы перехода в более высокочастотный диапазон и перспективы проведения совместных исследований по международным программам с радиотелескопами Германии и Испании.

В итоге, российская РСДБ-сеть нового поколения проектируется для приема сигналов одновременно в трех диапазонах частот: в S диапазоне (2.2 ÷ 2.45 ГГц), в X диапазоне (7.0 ÷ 9.5 ГГц) и в Ka диапазоне (28 ÷ 34 ГГц). Близкие по номиналам частот (2.2 ÷ 2.6 ГГц, 7.0 ÷ 9.5 ГГц и 28 ÷ 33 ГГц) диапазоны реализованы в радиотелескопах Wettzell (Германия) [4], а также положены в основу разработки испано-португальского проекта RAEGE [5].

Антенные системы радиотелескопов [4, 5] и радиотелескопов интерферометра нового поколения [1] построены на основе двухзеркальной антенны с эллиптической образующей малого зеркала со смещенной параболической осью основного зеркала (Ringfocal-Design Antenna) немецкой фирмы Vertex Antennentechnik GmbH [4] (рис. 1). В отечественной литературе такая оптическая схема получила условное название “система АДЭ” [6]. Диаметр основного зеркала $D = 13.2$ м, вспомогательного зеркала – 1.48 м, отношение фокуса к диаметру $f/D = 0.29$. Антенна АДЭ-13 (рис. 1) – одна из двух разработанных к настоящему времени антенн, которые рекомендованы IVS для использования в VLBI2010 совместимых радиотелескопах.

В то же время антенные облучатели радиотелескопов национальных РСДБ-сетей разрабатываются каждой страной-участницей проекта индивидуально, что обусловлено различиями в подходах к построению приемных систем.

В радиотелескопах [1, 4–5] используются или находятся в стадии проектирования трехдиапазонные S/X/Ka облучатели с единым фазовым центром, формирующие диаграммы направленности (ДН) в трех диапазонах с требуемыми для АДЭ-13 параметрами. В каждом диапазоне частот облучатели функционально и конструктивно объединяются с разделителями поляризаций. Используются круговые поляризации с тем, чтобы амплитуда принимаемого сигнала не зависела от ориентации антенны на радиоисточник, что является традиционным решением при построении РСДБ-сетей.

Таблица 1. Технические характеристики РСДБ-радиотелескопов

Параметр	Текущее состояние	VLBI2010
Время работы	24 ч, один раз в неделю	Круглосуточно
Время восстановления	До нескольких месяцев	Менее 24 ч
Диаметр антенны	5 ÷ 100 м	10 ÷ 12 м
Скорость движения	2 ÷ 200 °/мин	Более 360 °/мин
Частоты приема	S/X диапазоны	2 ÷ 14 (18) ГГц
Скорость записи	128, 256 Мбит/с	8 ÷ 16 Гбит/с
Передача данных	Транспортировка дисков, в отдельных случаях e-РСДБ*	e-РСДБ*, в отдельных случаях транспортировка дисков
Число станций	40 (распределены случайным образом)	40 (распределены оптимальным образом)

* e-РСДБ (e-VLBI) – так называемая электронная РСДБ – РСДБ в реальном времени



Рис. 1. Антенна АДЭ-13 для радиотелескопов РСДБ-сети нового поколения

Усиление слабых широкополосных сигналов, поступающих с выходов разделителей круговых поляризаций, в каждом диапазоне осуществляется с помощью глубоко охлаждаемых малошумящих усилителей (МШУ), определяющих шумы радиометрических приемников. Наметившаяся в конце прошлого столетия мировая тенденция построения МШУ на основе полевых транзисторов, охлаждаемых криогенными микрофрижераторами до $12 \div 20$ К [7], остается актуальной и поныне [8].

В радиотелескопах TTW (Wetzell) трехдиапазонный S/X/Ka облучатель (компания Mirad) установлен снаружи криостата (компания Callisto), в котором размещены охлаждаемые МШУ S/X/Ka диапазонов [4]. Для снижения шумовой температуры приемной системы радиотелескопов имеет значение и часто используется глубокое охлаждение всего облучателя. Например, квадрупольные облучатели (Quadruple-Ridged Flared Horn), которые специально разработаны для диапазона $2 \div 14$ ГГц, охлаждаются в VLBI2010 совместимых радиотелескопах NASA [8]. Как альтернативный вариант охлаждения облучателя будет испытано и в радиотелескопах Wetzell при установке в них облучателей диапазона $2 \div 14$ ГГц, известных как Eleven Feed [9]. Для испанского

[5] и российского [1] проектов принято решение разработать охлаждаемые до физических температур МШУ S/X/Ka облучатели.

Трехдиапазонный S/X/Ka облучатель, разделители круговых поляризаций и МШУ трех диапазонов, а также направленные ответвители для ввода сигналов калибровки радиометров в трех диапазонах размещены в криостате и конструктивно образуют единый криогенный приемный фокальный блок (КПФБ) радиотелескопа. КПФБ устанавливается под защитным конусом антенны АДЭ-13 (рис. 1) таким образом, чтобы фазовый центр S/X/Ka облучателя, расположенный внутри КПФБ, был совмещен с фокусом эллиптического вспомогательного зеркала.

Функциональные схемы КПФБ и технические решения СВЧ узлов в S/X/Ka диапазонах для телескопов национальных сетей [1, 4–5] во многом подобны. Вместе с тем имеются существенные отличия как в схемах построения, так и в принятых технических решениях функциональных узлов.

К настоящему моменту нами разработан и прошел лабораторно-отладочные испытания экспериментальный образец КПФБ для радиотелескопов РСДБ-комплекса [1]. Фотография КПФБ представлена на рис. 2. Цель статьи – описание устройства КПФБ и технических решений ключевых элементов КПФБ, а также обсуждение результатов синтеза и данных измерений характеристик ряда СВЧ узлов.

2. Требования к элементам и узлам КПФБ в диапазонах рабочих частот

Требования к параметрам комплексной ДН, которая должна быть сформирована S/X/Ka облучателем в каждом из трех диапазонов частот, определяются геометрией зеркал оптической схемы антенны АДЭ-13. Параметр SEFD (System Equivalent Flux Density) антенной системы – отношение мощности шумов антенны к ее эффективной поверхности – должен быть минимальным. Чем меньше SEFD, тем чувствительнее радиотелескоп. Использование в радиотелескопах перспективной РСДБ-сети антенн меньшего, чем у антенн радиотелескопов ныне действующей РСДБ-сети (32 м в РСДБ “Квазар-КВО”), диаметра выглядит на первый взгляд парадоксальным, поскольку при этом увеличивается SEFD приемной системы.

Выбор антенны меньшего диаметра обусловлен требованием определения координат опорных

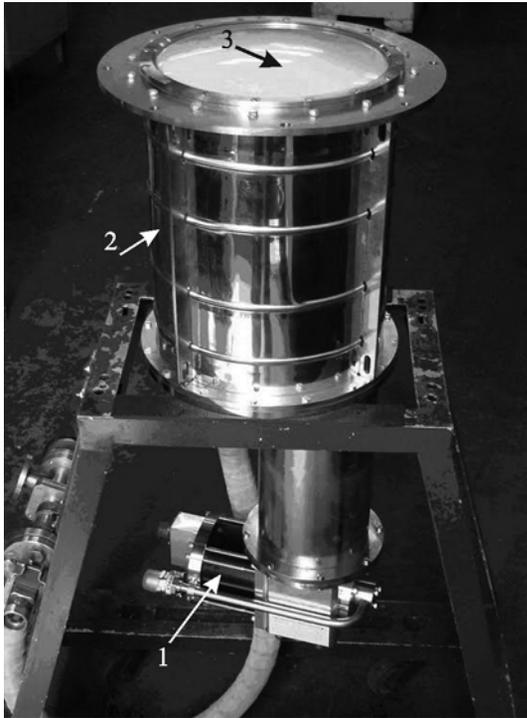


Рис. 2. Экспериментальный образец КПФБ: 1 – микрорефрижератор, 2 – корпус криостата, 3 – вакуумное окно

станций с погрешностью порядка 1 мм. Оказалось, что обеспечить желаемую погрешность можно, если время переброски антенны с одного радиостанции на другой составит порядка 30 с [10]. Для этого скорости вращения антенны по азимуту и углу места должны быть высокими (см. табл. 1), что затруднительно обеспечить приводами антенн больших диаметров.

В X диапазоне эффективность выбранной антенны АДЭ-13 превышает 80 %, а шумовая температура при ориентации в зенит составляет 10 К (без учета шумов атмосферы) [4]. Чтобы реализовать эти характеристики, ширина ДН облучателя по уровню -16 дБ должна быть порядка 130° , а неравномерность фазовой ДН в этом секторе не должна превышать $\pm 20^\circ$. Указанную неравномерность фазовой ДН требуется обеспечить одновременно в трех диапазонах частот относительно единого фазового центра S/X/Ка облучателя.

Требование к уровню амплитудной ДН облучателя для круговой кроссполяризации относительно уровня амплитудной ДН по главному направлению для круговой рабочей поляризации следует из заданного отношения сигнал/шум (S/N) приемной системы телескопа. Минимальное значение S/N должно быть не менее 10 дБ [10]. Исходя из этого, задан

уровень кроссполяризации ДН облучателя. Он не должен превышать -15 дБ. Чтобы реализовать это требование, в конструкции осесимметричного S/X/Ка облучателя предприняты меры по симметрированию ДН в E и H плоскостях.

Коэффициент эллиптичности (КЭ) облучателя вдоль оси определяющим образом влияет на КЭ всей антенны телескопа и должен быть минимальным, поскольку этот параметр непосредственно влияет на погрешность определения времен задержек сигналов на станциях сети при корреляционной обработке. Определено, что КЭ облучателя в направлении оси должен быть не хуже 0.6 дБ в полосе рабочих частот. Значение КЭ осесимметричного облучателя вдоль оси определяющим образом зависит от КЭ разделителей круговых поляризаций. Следовательно, этот параметр является одним из основных показателей качества спроектированных поляризаторов.

К основным показателям качества КПФБ в целом относится также шумовая температура входных цепей S/X/Ка радиометров, которая должна быть минимальной. Проектные номиналы шумовой температуры приемной системы радиотелескопа оценены следующим образом: в S диапазоне – 23 К, в X диапазоне – 30 К и в Ка диапазоне – 45 К [1]. Две составляющие шумовой температуры приемной системы определяются функциональными элементами КПФБ: охлаждаемыми МШУ и пассивными элементами КПФБ на входах МШУ (апертурный узел с радиопрозрачным вакуумным окном, разделители круговых поляризаций, направленные ответвители для ввода калибровочных сигналов и ферритовые вентили). Шумовая температура пассивных элементов зависит от физической температуры T_F элемента и вносимых элементом потерь L . В случае малых вносимых потерь ($L < 0.5$ дБ) шумовая температура T_e элемента определяется простой формулой: $T_e = (L/4.34)T_F$ [11]. Потери 0.1 дБ в элементе, находящимся при 300 К, дают вклад в шумовую температуру 7 К, а вклад элемента, охлажденного до 20 К, с такими же потерями составит лишь 0.5 К. Отсюда очевидны преимущества технических решений, в которых используется полностью охлаждаемые облучатели и разделители поляризаций. Требуется, чтобы вносимые потери облучателя не превышали 0.5 дБ.

Обратные потери на входах и выходах СВЧ узлов КПФБ и развязка по выходам разделителей круговых поляризаций влияют на S-парамет-

ры КПФБ. Достаточно, чтобы номиналы параметров были не хуже 20 дБ.

3. Состав, функции и элементы КПФБ

Схема экспериментального образца КПФБ (рис. 2) приведена на рис. 3. Излучение космических радиоисточников (квазаров) поступает на вход и проникает в КПФБ через радиопрозрачное вакуумное окно W1 и инфракрасный (ИК) фильтр W2, фокусируясь рефлекторами антенны в фазовом центре S/Х/Ка облучателя W3. Конструктивно S/Х/Ка облучатель представляет собой сбо-

рочную единицу, состоящую из S/Х/Ка апертурного узла, разделителей круговых поляризаций Ка и X диапазонов и разделителя линейных поляризаций S диапазона (см. также сечение облучателя на рис. 4 и компоновку узлов на рис. 5). Апертурный узел совместно с вакуумным окном формирует требуемую ДН облучателя.

В апертурном узле сверхширокополосное излучение квазаров разделяется по диапазонам частот и поступает в S, X, и Ка тракты облучателя, в каждом из которых осуществляется разделение сигналов по поляризации. В Ка и X диапазонах сигналы левых и правых круговых поляризаций по-

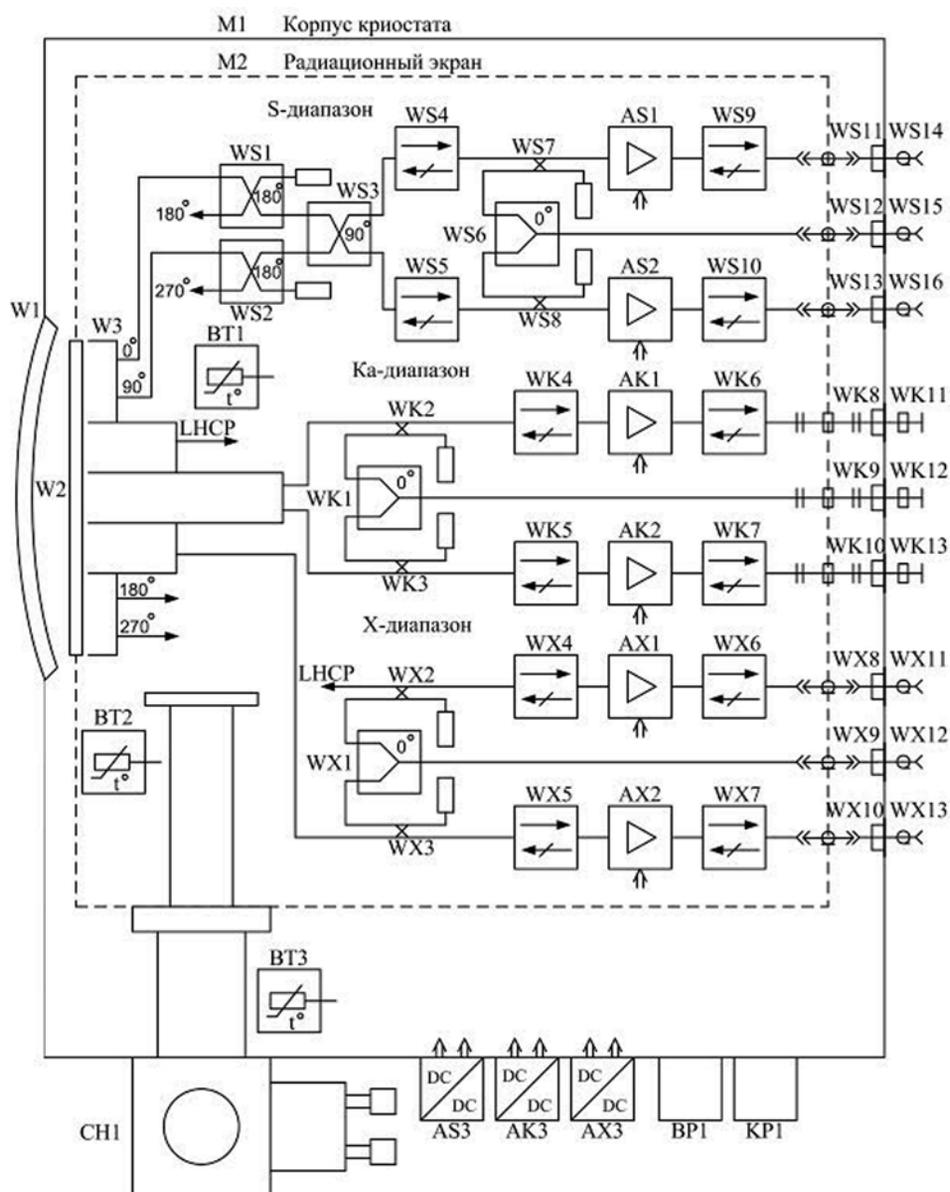


Рис. 3. Структурная схема КПФБ

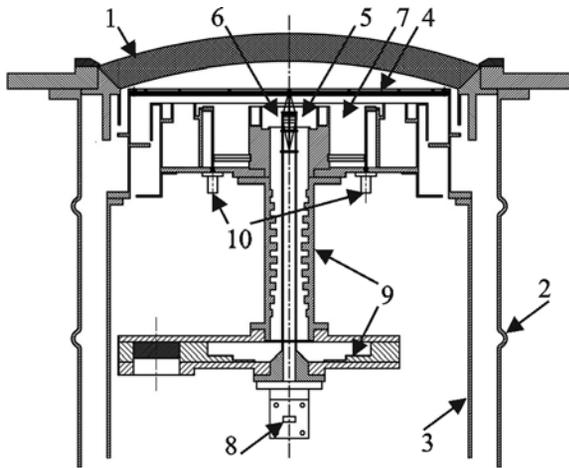


Рис. 4. Облучатель в криостате: 1 – вакуумное окно, 2 – корпус криостата, 3 – корпус радиационного экрана, 4 – ИК фильтр; 5 – Ka облучатель, 6 – X облучатель, 7 – S облучатель, 8 – Ka поляризатор, 9 – X поляризатор, 10 – SMA розетки

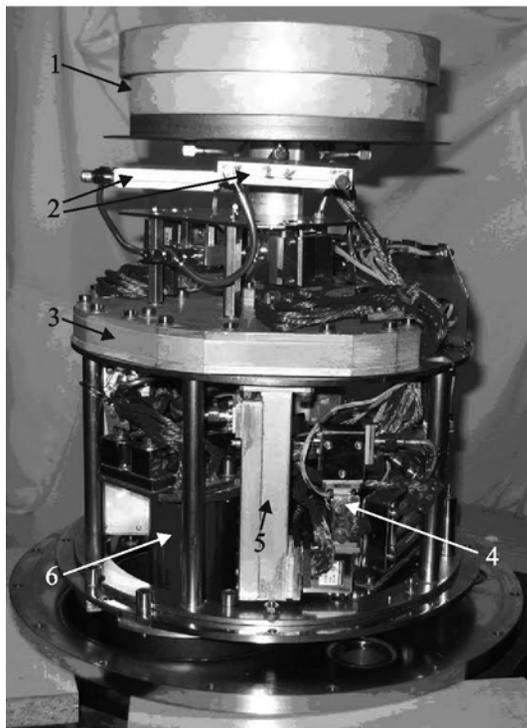


Рис. 5. Компоновка элементов КПФБ под радиационным экраном: 1 – облучатель, 2 – 3 дБ/180° мосты, 3 – X поляризатор, 4 – МШУ X диапазона, 5 – направленный ответвитель X диапазона, 6 – цилиндр 2-й ступени охлаждения

ступают на волноводные выходы облучателя. В S диапазоне с четырех коаксиальных выходов облучателя снимаются равноамплитудные сиг-

налы с фазами 90°, 180° и 270° по отношению к нулевой фазе сигнала на одном из выходов. Последующее суммирование и разделение четырех сигналов линейных поляризаций на два сигнала круговых поляризаций осуществляется с помощью двух 3 дБ/180° мостов WS1 и WS2 и одного 3 дБ/90° моста WS3 (см. рис. 3).

Сигналы левых и правых круговых поляризаций S, X, и Ka диапазонов поступают через ферритовые вентили на входы МШУ AS1, AS2, AX1, AX2, АК1 и АК2 соответственно. После усиления сигналы через ферритовые вентили поступают на выходы левых и правых круговых поляризаций КПФБ. В Ka диапазоне используются герметичные выводы WK11 и WK13 на фланцы прямоугольных волноводов стандартного сечения, а в X и в S диапазонах применены герметичные выводы на стандартные SMA розетки (WX11, WX13, WS14 и WS16). Питающие напряжения на усилители подаются через герметичные многостырьковые соединители AS3, AX3 и АК3.

Направленные ответвители WS7, WS8, WX2, WX3, WK2 и WK3 с переходным ослаблением –27 дБ предназначены для подачи на входы всех МШУ сигналов фазовой и амплитудной калибровок. Сигналы калибровки каждого диапазона подаются в КПФБ от блока калибровочных сигналов приемного модуля радиотелескопа через герметичные выводы WK12, WX12 и WS15 и поступают на соответствующие входы ответвителей каждого из шести каналов с выходов делителей мощности WK1, WX1 и WS6.

Облучатель, МШУ, вентили, направленные ответвители и делители мощности охлаждаются до температуры 20 К. Используется микрофрижидератор RDK-408S2 (обозначен как CH1 на рис. 3). Фланец 1-й ступени охлаждения (45 К, холодопроизводительность 35 Вт) подсоединен к радиационному экрану M2. От цилиндра 2-й ступени охлаждения микрофрижидератора (20 К, холодопроизводительность меньше 10 Вт) через медные тепловые мосты охлаждаются все СВЧ узлы внутри радиационного экрана. Температуры облучателя, а также холодного цилиндра и фланца 1-й ступени микрофрижидератора контролируются с помощью датчиков температуры ВТ1 – ВТ3.

С целью уменьшения тепловых потоков, помимо использования радиационного экрана, предпринят ряд дополнительных мер. В торце радиационного экрана установлен ИК фильтр из фторопластовой

пленки (рис. 3), снижающий радиационные потоки от вакуумного окна в направлении облучателя. Между герметичными выводами и СВЧ трактами внутри радиационного экрана установлены тепловые развязки WK8 – WK10, WS11 – WS13 и WX8 – WX10 в виде тонкостенных прямоугольных волноводов и коаксиальных волноводов с перехватом тепловых потоков на радиационный экран. СВЧ узлы установлены на несущем фланце, который соединен с фланцем радиационного экрана через тонкостенные трубки из нержавеющей стали. Апертурный узел облучателя не имеет теплового контакта с радиационным экраном М2, который, в свою очередь, не имеет теплового контакта с корпусом криостата М1.

КПФБ подсоединен к шлангу вакуумного насоса ADVAVAC 40-20 через электромагнитный вакуумный клапан (КР1). Степень вакуума контролируется активным датчиком VSP62MV (позиция ВР1). Вакуумное уплотнение радиопрозрачного окна W1 из пенополистирола ПС-200 обеспечивается полиэтилентерефторатной пленкой толщиной 0.02 мм, покрывающей пенополистироловый купол, и резиновым кольцом между фланцем вакуумного окна и фланцем корпуса криостата. Поскольку полиэтилентерефторатная пленка гигроскопична, вакуумное окно покрыто еще одной – гидрофобной – пленкой (лист фторопласта толщиной 0.1 мм). Подобное решение применялось для вакуумного уплотнения плоского радиопрозрачного окна диаметром 120 мм из материала Pporazote [12]. Укрытие осуществлялось каптоновой и тефлоновой пленками [12].

В КПФБ (рис. 2) диаметр вакуумного окна, определяемый апертурой облучателя, в два раза больше (237 мм), чем в [12], и сила атмосферного давления, приложенная к окну, становится значительной (около 6000 Н). Для предотвращения деформаций окна ему придана куполообразная форма. Такое решение позволяет уменьшать толщину окна, что, в свою очередь, уменьшает потери радиосигнала в окне и тем самым понижает шумовую температуру приемной системы радиотелескопа.

4. Апертурный узел КПФБ

Функционально к апертурному узлу КПФБ относятся апертурный узел облучателя (рис. 6), вакуумное окно и ИК фильтр (рис. 4). Характеристики апертурного узла КПФБ определяются в пер-

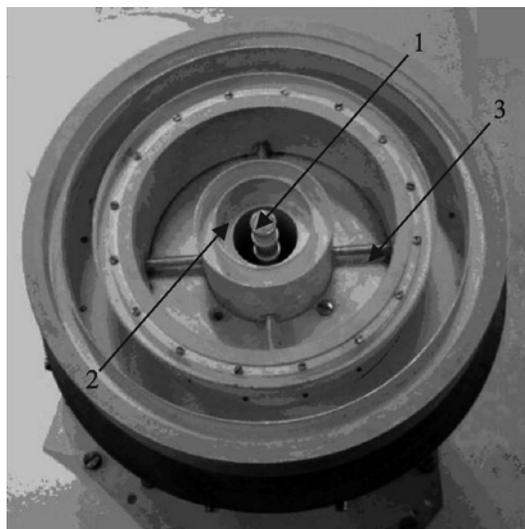


Рис. 6. Апертурный узел облучателя: 1 – Ka облучатель, 2 – X облучатель, 3 – S облучатель

вую очередь техническим решением апертурного узла облучателя. Влияние вакуумного окна с элементами крепления наиболее заметно сказывается на кроссполяризационной ДН и уровне обратных потерь. ИК фильтр оказывает видимое влияние только на обратные потери, начиная с уровня –25 дБ.

Известно множество технических решений двух- и трехдиапазонных облучателей зеркальных антенн (достаточно полный обзор дан в [13]). Как правило, многодиапазонные облучатели зеркальных антенн с единым фазовым центром строятся по принципу вложенных друг в друга круглого и коаксиальных волноводов так, что внешний проводник облучателя высокочастотного диапазона является внутренним проводником облучателя низкочастотного диапазона.

В основу конструкции апертурного узла КПФБ положен S/X/Ka облучатель, предложенный в ИПА РАН [14]. Апертурный узел S/X/Ka облучателя (рис. 4 и рис. 6) состоит из облучателя Ka диапазона (открытый конец круглого волновода с диэлектрическим стержнем) и облучателей X и S диапазонов (открытые концы коаксиальных волноводов). В торцах коаксиальных волноводов выполнена система концентрических дроссельных канавок, предотвращающих затекание токов на внешнюю поверхность облучателей, что снижает уровень кроссполяризационного излучения. Эта идея известна и успешно используется при разработке облучателей с малым уровнем кроссполяризационного излучения [15].

Другая идея, которая также широко используется для снижения уровня кроссполяризованного излучения, принадлежит Поттеру [16]. Ее суть – возбуждение в апертуре круглого или коаксиального рупоров суммы H_{11} и E_{11} типов волн таким образом, чтобы суммарное поле имело линейную поляризацию в плоскости раскрыва. В облучателе X диапазона (рис. 4) H_{11} волна частично трансформируется в E_{11} волну в месте ступенчатого изменения сечения коаксиального волновода.

В облучателе Ka диапазона использован диэлектрический стержень в раскрыве круглого волновода – решение, получившее широкое распространение в антенной технике сантиметрового диапазона для возбуждения короткофокусных зеркальных антенн [17].

Элементы конструкции низкочастотных облучателей влияют на характеристики высокочастотных облучателей, повышая уровень кроссполяризованного излучения и искажая форму амплитудной ДН (наблюдается характерная “изрезанность” ДН). Уменьшение такого влияния – наиболее сложная задача синтеза многодиапазонных облучателей.

Плодотворный подход к синтезу многодиапазонных облучателей состоит в задании из физических соображений конфигурации облучателя, построении его электродинамической модели и расчете геометрии с использованием того или иного метода многопараметрической оптимизации. Целевая функция строится исходя из требований технического задания на разработку.

Эффективность подхода определяется эффективностью используемой системы электродинамического моделирования. Предпочтительнее системы проектирования, сочетающие метод частичных областей (модели ключевых элементов конструкции) с методом обобщенных матриц рассеяния (“сборка” элементов конструкции в единую конфигурацию) [18, 19]. Возможности такого подхода на примере синтеза облучателя продемонстрированы в [20].

В настоящей работе проектирование облучателя проведено с помощью пакета программ CST Microwave Studio, основанного на численном решении интегральных уравнений Максвелла, предусматривающем разбиение исследуемой структуры на элементарные ячейки [21]. Сеточные методы позволяют рассчитывать облучатели с элементами сложной конфигурации, такими как диэлектричес-

кий конусный стержень в волноводе облучателя Ka диапазона или куполообразное вакуумное окно и прочие. Основная проблема синтеза апертурного узла КПФБ с использованием сеточных методов состоит в длительном времени вычислений одного варианта конфигурации. Это ограничивает возможности многопараметрической оптимизации геометрии облучателя.

На рис. 7–9 представлены примеры рассчитанных (пунктирные линии) и измеренных (сплошные линии) амплитудных ДН синтезированного облучателя на кросс- и рабочих круговых поляризациях в трех диапазонах частот. В S и X диапазонах рассчитывалась полная конфигурация апертурного узла КПФБ, а в Ka диапазоне – конфигурация апертурного узла без облучателя S диапазона, радиационного экрана и криостата.

Измерения ДН во всех диапазонах выполнены для полной конфигурации КПФБ. Запись ДН осуществлялась при вращении КПФБ в горизонтальной плоскости относительно оси, проходящей вблизи точки фазового центра.

Специально разработанные малогабаритные приемники S/X/Ka диапазонов подсоединялись к соответствующим выходам круговых поляризаций КПФБ. В месте расположения КПФБ создавалось поле плоской волны левой или правой эллиптических поляризаций с низким уровнем КЭ. Для этого к вспомогательным осесимметричным рупорным антеннам были подключены специаль-

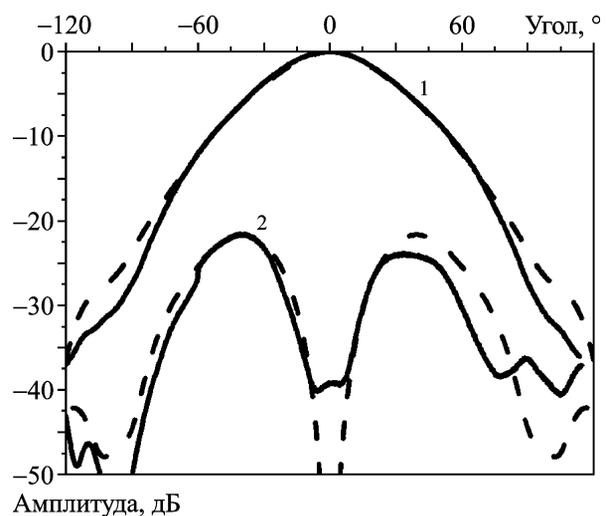


Рис. 7. ДН апертурного узла КПФБ на рабочей (кривые 1) и кросс- (кривые 2) круговых поляризациях на частоте 2.3 ГГц; пунктирные линии – расчет, сплошные линии – эксперимент

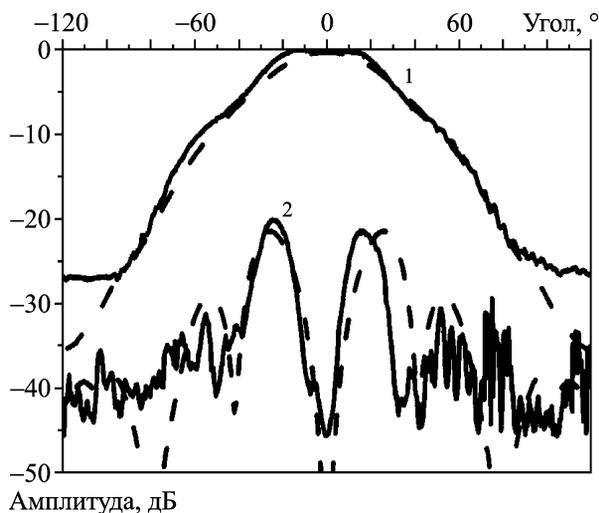


Рис. 8. ДН апертурного узла КПФБ на рабочей (кривые 1) и кросс- (кривые 2) круговых поляризациях на частоте 7.75 ГГц: пунктирные линии – расчет, сплошные линии – эксперимент

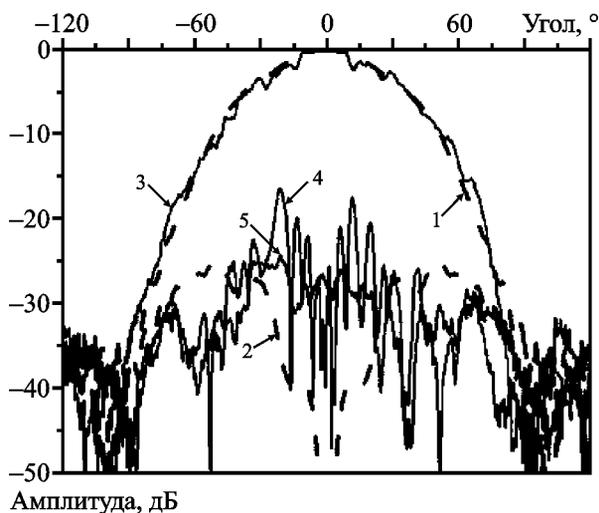


Рис. 9. ДН апертурного узла КПФБ на рабочей и кросс-круговых поляризациях на частоте 31.52 ГГц: кривые 1, 2 – расчет для Ка облучателя; кривые 3, 4 – испытания полной конфигурации КПФБ; кривая 5 – кроссполяризованная ДН, измеренная для облучателя без крестата

но разработанные поляризаторы [22]. Малогабаритные передатчики S/X/Ка диапазонов подсоединялись к входам поляризаторов.

С помощью разработанных приемопередатчиков S/X/Ка диапазонов были измерены также фазовые ДН облучателя. Частоты гетеродинов передатчиков и приемников сдвинуты на 10 МГц и синхронизированы от общего кварцевого генератора с номинальной частотой 10 МГц. В резуль-

тате изменение фазы в S/X/Ка диапазонах при вращении КПФБ переносятся на частоту 10 МГц и регистрируются с помощью стандартного измерителя разности фаз.

Расчетные (штриховые линии) и измеренные (сплошные линии) отклонения фазы облучателя в пределах главного лепестка амплитудной ДН на избранных частотах (31.52, 7.75 и 2.3 ГГц) S/X/Ка диапазонов представлены на рис. 10.

Наблюдается удовлетворительное соответствие результатов измерений как амплитудных, так и фазовых ДН облучателя в составе КПФБ с расчетными зависимостями. В свою очередь, облучатель синтезирован таким образом, что его характеристики удовлетворяют требованиям технического задания на разработку. В частности, уровни обратных потерь апертурного узла в S/X/Ка диапазонах частот удовлетворяют требованиям, что было подтверждено результатами измерений.

В S диапазоне для согласования стандартных SMA розеток (рис. 4) на выходах облучателя используются короткозамкнутые отрезки коаксиальной линии, повернутые на 180°, и индуктивные штыри [14]. Такое решение отличается компактностью, однако обеспечивает согласование в зауженном диапазоне частот (2.2 ÷ 2.45 ГГц). В случае необходимости расширения диапазона до 2.6 ГГц может быть использовано другое устройство согласования [20].

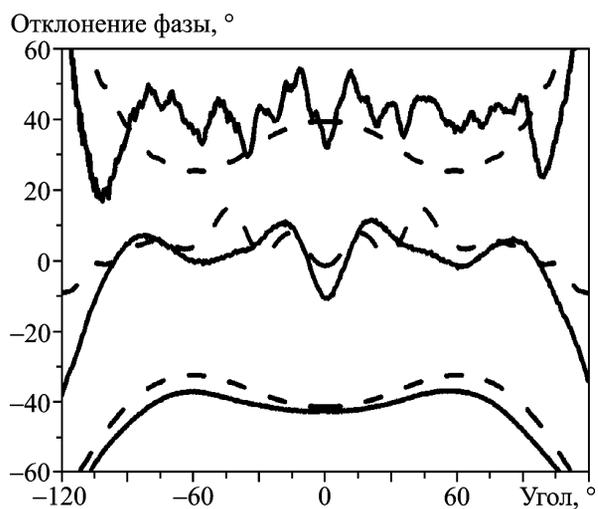


Рис. 10. Отклонение фазы комплексной ДН апертурного узла КПФБ относительно единого фазового центра в Ка, X и S диапазонах (сверху вниз): штриховые линии – расчет, сплошные линии – эксперимент

5. Разделители круговых поляризаций S, X, и Ka диапазонов

Разделители круговых поляризаций S/X/Ka диапазонов (далее – поляризаторы) разработаны с использованием известных принципов. Техническая реализация поляризаторов содержит элементы новизны, что обусловило уменьшение габаритных размеров КПФБ. Усовершенствованы также процедуры синтеза поляризаторов [22]. Внешний вид поляризаторов S/X/Ka диапазонов в составе облучателя показан на рис. 11.

В поляризаторе S диапазона использованы коммерчески доступные 3 дБ мосты компании Clear Microwave, Inc. [23] (рис. 10). Мосты имеют приемлемые характеристики по неравномерности коэффициентов деления и балансу фаз с тем, чтобы обеспечить требуемый уровень КЭ в диапазоне рабочих частот.

Оценку КЭ облучателя в составе КПФБ в S диапазоне можно сделать из измеренных амплитудных ДН для рабочей и кросс- круговых поляризаций (рис. 7). Как следует из рис. 7, в направлении оси облучателя отношение амплитуд сигналов правой и левой круговых поляризаций на выходах 3 дБ / 90° моста составляет 39 дБ. Это соответствует уровню КЭ 0.19 дБ.

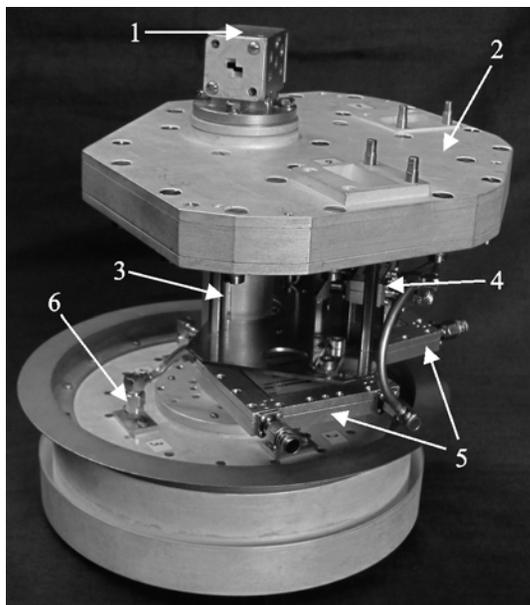


Рис. 11. Поляризаторы S/X/Ka диапазонов: Ka поляризатор (1), X поляризатор (состоит из ОМТ (2) и ФС (3)), S поляризатор (состоит из 3 дБ / 90° моста (4) и 3 дБ / 180° мостов (5)), SMA розетка (6)

Измеренные в диапазоне рабочих частот вносимые потери сборки двух 3 дБ / 180° и одного 3 дБ / 90° мостов совместно со штатными отрезками соединительных коаксиальных волноводов не превышают 0.7 дБ в неохлажденном состоянии. Этот уровень потерь оказался несколько выше планируемой величины. Основной вклад в потери дают 3 дБ / 180° мосты.

Поляризатор X диапазона (рис. 11) состоит из трансформатора ортогональных H_{11} мод (ОМТ) коаксиального волновода в H_{10} моды двух прямоугольных волноводов на выходах ОМТ и фазосдвигающей секции (ФС) в коаксиальном волноводе. Сигналы горизонтальной и вертикальной поляризаций в X фидере облучателя на выходе ФС приобретают разность фаз 90°. Плоскости поляризации ортогональных мод ОМТ и ФС повернуты в пространстве на 45° друг относительно друга. В результате, как нетрудно видеть, сигналы левой и правой круговых поляризаций после прохождения ФС и ОМТ будут поступать на разные волноводные выходы ОМТ.

В состав ОМТ (рис. 12, в центре) входят турникетное соединение коаксиала и четырех прямоугольных волноводов (рис. 12, слева), две пары 180° разворотов прямоугольных волноводов и два волноводных E-плоскостных Y сумматора (рис. 12, справа).

В турникетном соединении H_{11} волна коаксиала полностью трансформируется в равные по амплитуде H_{10} волны пары противоположащих прямоугольных волноводов, если ось волноводов лежит в плоскости поляризации H_{11} волны. После распространения вдоль 180° разворотов две волны складываются в E-плоскостном Y тройнике. Таким способом осуществляется разделение волн ортогональных поляризаций коаксиала по двум волноводным выходам ОМТ.

При синтезе ОМТ использовался ряд известных конструкторских идей [24, 25]. Согласование прямоугольных волноводов и коаксиала в турникетном соединении осуществляется с помощью конусного расширения центрального проводника и ступенчатого расширения внешнего проводника коаксиала. Плечи E-плоскостных Y сумматоров согласуются призмой в основании сумматора и ступенчатыми трансформаторами в волноводах. В 180° разворотах прямоугольных волноводов используются переходы на зауженные

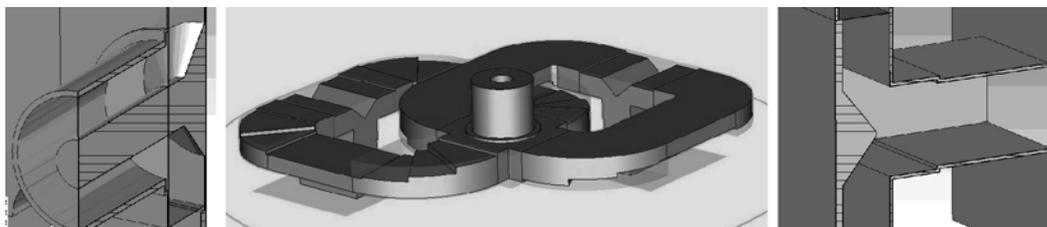


Рис. 12. CST проекты ОМТ (в центре) и его узлов: волноводно-коаксиальное турникетное соединение (слева), волноводный E -плоскостной Y сумматор (справа)

сечения с тем, чтобы обеспечить пересечение волноводов соседних плеч в одной плоскости.

С целью уменьшения габаритов ОМТ ступенчатое понижение высоты волноводов выполнено совместно с 90° поворотами волноводов в H плоскости. Как было показано, при заданном уровне обратных потерь такое решение позволяет выполнять H -плоскостной 90° поворот с меньшим радиусом изгиба, чем изгиб волновода неизменной высоты. Качественно этот эффект объясняется компенсацией индуктивности поворотов в H плоскости емкостью ступеней.

Процедура проектирования ОМТ состояла в предварительном синтезе и оптимизации функциональных узлов ОМТ с последующей сборкой в единую конструкцию с оптимизацией фазовых набегов между узлами. Использовался пакет программ CST Microwave Studio.

Конструкция ФС представляет собой коаксиальный волновод, между проводниками которого в осевой плоскости установлены две пластины ступенчатого профиля (рис. 4). Синтез и оптимизация ФС выполнены с помощью системы электродинамического проектирования [19] и описаны в [26].

Расчетные зависимости обратных потерь и развязки по выходам X поляризатора не хуже 20 дБ во всем диапазоне рабочих частот, что подтверждено результатами измерений. Для примера на рис. 13 представлены результаты расчета и измерений развязки по волноводным выходам отдельно для ОМТ и для X поляризатора в целом.

Измеренные при комнатной температуре вносимые потери X поляризатора, покрытого серебром, составили порядка 0.2 дБ.

Частотная зависимость КЭ по выходам правой и левой круговых поляризаций X поляризатора представлена на рис. 14.

CST модель поляризатора Ка диапазона представлена на рис. 15 [22]. Основной узла является пластина ступенчатой формы, установленная в секции (1) квадратного волновода – решение разделителя круговых поляризаций, известное как “septum polarizer”. Секция (1) согласована с круглым волноводом (2) Ка облучателя с помощью ступенчатого трансформатора. Два прямоугольных выхода septum polarizer с помощью ступенчатых трансформаторов согласованы с прямоугольными волноводами стандартного сечения.

Синтез и оптимизация septum polarizer совместно с согласующими трансформаторами выполнены с помощью разработанного нами ранее алгоритма [27].

С целью подсоединения выходов поляризатора к волноводным элементам со стандартными фланцами в состав Ка поляризатора введены два 90° поворота, каждый из которых состоит из пары

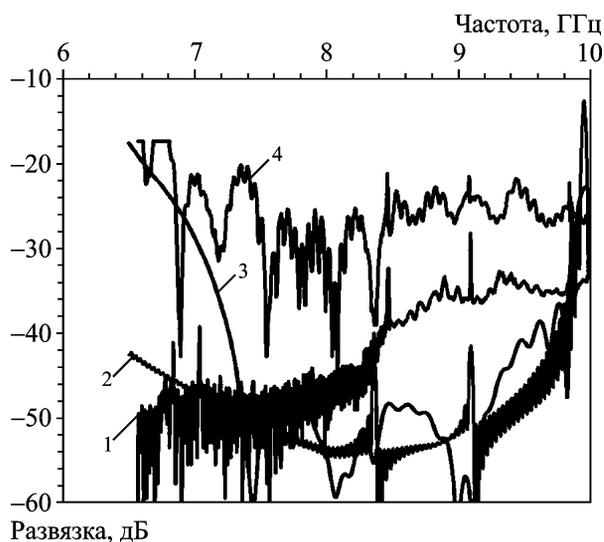


Рис. 13. Частотная зависимость развязки по выходам ОМТ (кривая 1 – эксперимент, кривая 2 – расчет) и по выходам X поляризатора (кривая 3 – расчет, кривая 4 – эксперимент)

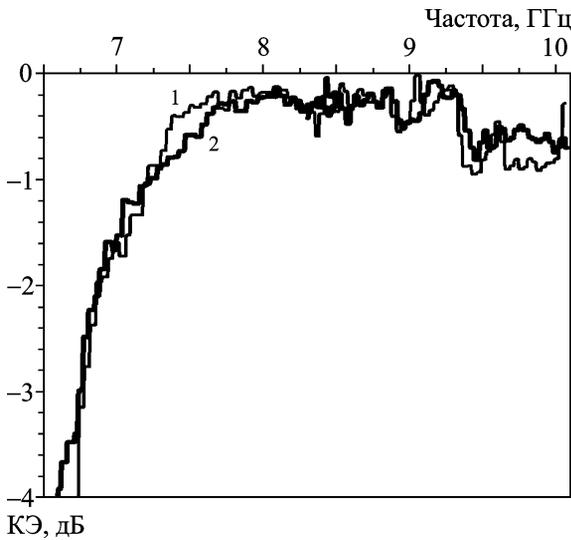


Рис. 14. Экспериментальная частотная зависимость КЭ по выходу правой (кривая 1) и выходу левой (кривая 2) круговых поляризаций X поляризатора

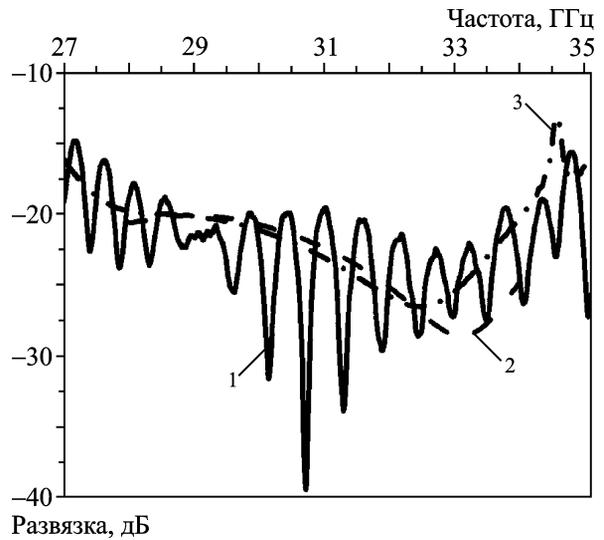


Рис. 16. Частотная зависимость развязки по выходам Ka поляризатора: кривая 1 – эксперимент, кривая 2 – модель septum polarizer, кривая 3 – CST модель Ka поляризатора

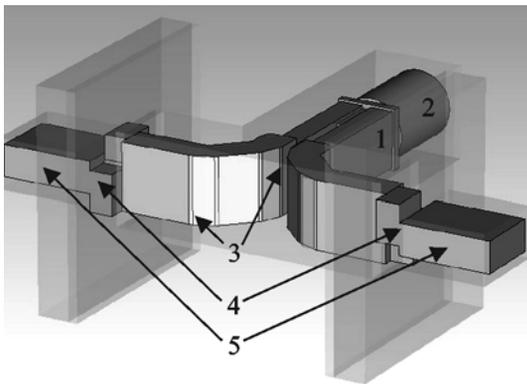


Рис. 15. Ka поляризатор: 1 – septum polarizer, 2 – круглый волновод, 3 – 135° “скосы” волноводов, 4 – скрутки, 5 – стандартные волноводы

135° волноводных “скосов” (3) в E плоскости. Для плотной компоновки элементов и узлов КПФБ (рис. 5) в конструкцию Ka поляризатора введены компактные (толщина 2.5 мм) волноводные скрутки (4), предложенные нами ранее [28].

Проведенные испытания Ka поляризатора (рис. 15) показали удовлетворительное соответствие результатам синтеза и заданию на разработку. Вносимые потери, измеренные при комнатной температуре, не превышают 0.4 дБ во всем диапазоне рабочих частот. На рис. 16 и рис. 17 представлены измеренные частотные зависимости развязки и КЭ на выходах Ka поляризатора в сравнении с результатами моделирования.

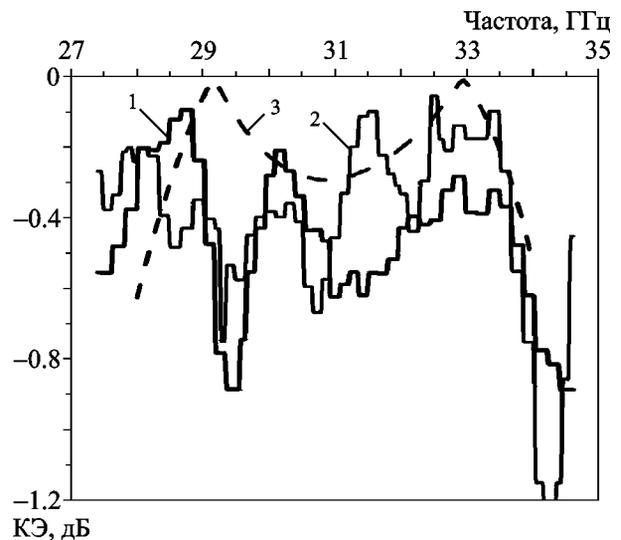


Рис. 17. Частотная зависимость КЭ на выходах Ka поляризатора: кривые 1 и 2 – эксперимент для 1-го и 2-го выходов соответственно, кривая 3 – модель septum polarizer

6. Малощумящие усилители

МШУ S, X и Ka диапазонов разработаны на современной элементной базе с применением новых технических решений с целью достижения более низкого уровня эквивалентной шумовой температуры, повышения надежности и других эксплуатационных параметров КПФБ.

В настоящее время наблюдается вытеснение классических (параметрических и квантовых)

МШУ транзисторными МШУ. Быстрое распространение транзисторных МШУ обусловлено их низким уровнем шумовых температур (соизмеримым с шумовыми температурами классических МШУ), широкополосностью и эксплуатационными преимуществами (устойчивость, экономичность, способность работать при неглубоком охлаждении).

Особенность текущего этапа развития технологии транзисторных МШУ – фактически состоявшийся переход к транзисторным гетероструктурам с высокой подвижностью электронов (НЕМТ, в частности, псевдоморфным – рНЕМТ, на фосфиде индия – InP-НЕМТ).

Наилучшим комплексом характеристик среди гетероструктурных полевых транзисторов, доступных для приобретения, обладают псевдоморфные НЕМТ. Основываясь на паспортных данных фирм-изготовителей, мы сделали выбор в пользу семейства бескорпусных рНЕМТ фирмы NEC.

Количество каскадов усиления выбирается так, чтобы общий коэффициент усиления МШУ превысил 30 дБ. В этом случае можно пренебречь вкладом в шумовую температуру последующих элементов тракта приемника. Количество каскадов в S, X и Ka диапазонах будет различным (определяется параметрами транзисторов в этих диапазонах). Например, в S диапазоне оптимальна двухкаскадная схема со структурой межкаскадной согласующей цепи, оптимизированной по критерию максимальной устойчивости 1-го каскада. Ограничимся рассмотрением этого примера.

Важнейшая задача проектирования МШУ – синтез входной согласующей цепи, обеспечивающей широкополосное согласование транзистора по входу. Критерий оптимальности – минимизация шумовой температуры при безусловной устойчивости усилителя. Для трансформации стандартного сопротивления источника 50 Ом в приводимый к транзистору импеданс использована двухэлементная Г-образная согласующая цепь.

Для увеличения устойчивости требуется минимальное отражение сигнала на входе и выходе каскада. Поскольку приводимый к транзистору оптимальный импеданс жестко определен условиями согласования по минимуму шум-фактора, минимизация отражения физически означает нейтрализацию отраженной от транзистора волны. В нашем случае применена малошумящая отри-

цательная обратная связь, осуществляющая компенсацию отраженной волны.

Активная часть входного импеданса 2-го каскада действием отрицательной обратной связи приводится к значению активной части выходного импеданса 1-го каскада. Фактически межкаскадная цепь в нашем случае осуществляет только согласование реактансов. Такое построение позволило исключить все признаки неустойчивости в нижней части рабочего диапазона и увеличило запас устойчивости во всем рабочем диапазоне.

Особое внимание уделяется обеспечению устойчивости на частотах выше рабочего диапазона. Специфика здесь заключается в практической невозможности гарантировать низкий коэффициент отражения на входе, поскольку комплексный импеданс источника (облучатель) вне полосы рабочих частот может изменяться в очень широких пределах. Для решения проблемы устойчивости выше полосы рабочих частот в предлагаемом усилителе был задействован механизм принудительного снижения собственного коэффициента усиления транзисторов.

По сравнению с паспортным значением напряжение сток-исток транзисторов снижалось в 1.5 (комнатная температура) – 3 (охлаждение до 15 К) раза. При этом, с учетом действия обратной связи, коэффициент усиления 1-го каскада близок к 15 дБ, и этого значения вполне достаточно для решения основной задачи – минимизации шум-фактора. Проблемы с устойчивостью на верхнем краю (и выше) рабочего диапазона исчезают.

Наконец, следует остановиться на еще одном важном моменте. Импеданс реального источника сигнала может заметно отличаться от значения 50 Ом, для которого оптимизированы представленные усилители. Здесь, в плане минимизации шумовой температуры и неравномерности АЧХ, более выгодно применение ферритовых развязывающих вентилях на входе и на выходе МШУ.

Внешний вид пары спроектированных усилителей S диапазона вместе с источником сигнала (3 дБ / 90° мост) и ферритовыми вентилями на входах представлен на рис. 18.

В прототипе описываемого устройства [29] для организации режима по постоянному току транзисторов охлаждаемого МШУ применяется техника токовых мониторов. Охлаждаемые МШУ, построенные по такому принципу, содержат два модуля: охлаждаемый усилительный модуль и

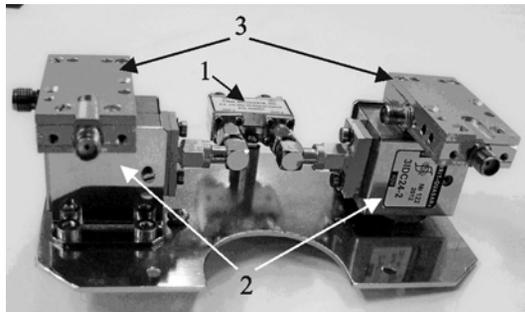


Рис. 18. Элементы тракта S диапазона: 1 – 3 дБ/90° мост, 2 – ферритовые вентили, 3 – МШУ

отдельный модуль питания и режимов. Последний обыкновенно содержит до трех кремниевых операционных усилителей на один транзистор сигнального модуля.

Наличие кремниевых микросхем (неработоспособных ниже 200 К) делает невозможной моноблочную реализацию МШУ, предпочтительную по ряду эксплуатационных параметров (надежности, помехозащищенности и т. п.). Традиционная конструкция МШУ, из двух связанных многожильным кабелем модулей, особенно неудачна в S диапазоне, в котором радиопомехи от телевидения и мобильной связи приводят к необходимости многоступенчатой фильтрации на всех (четырёх и более) токовых вводах.

Разработанные усилители имеют моноблочную конструкцию, напрямую улучшающую эксплуатационные параметры. Усилители изготовлены по обычной технологии печатных плат, но с использованием навесных элементов сигнального тракта, включая емкости и индуктивные элементы. Тем самым нейтрализуются низкие электротехнические (большой тангенс угла диэлектрических потерь) и теплофизические качества использованного материала подложки – RT/duroid® 6002 фирмы Rogers. Коэффициенты температурного расширения подложки и керамических SMD-конденсаторов заметно отличаются, поэтому при монтаже к токоведущим шинам конденсаторы припаивались либо через гибкие элементы из золотой фольги, либо непосредственно к проводным линиям.

Расчетные значения технических характеристик разработанных МШУ S/X/Ка диапазонов удовлетворяют требованиям на разработку, а испытания экспериментальных образцов МШУ в S и X диапазонах подтвердили этот вывод.

Измеренные значения коэффициентов усиления МШУ в рабочих полосах частот составили не менее 30 дБ, а достигнутые уровни шумовой температуры приведены в табл. 2.

7. Заключение

Предложенный и описанный в данной работе КПФБ является многофункциональным и технически сложным блоком радиотелескопов РСДБ-комплекса нового поколения, во многом определяющим показатели качества работы приемных станций сети. Проведенные испытания экспериментального образца КПФБ и его ключевых элементов – трехдиапазонного апертурного узла, S/X/Ка разделителей круговых поляризаций и охлаждаемых транзисторных МШУ – подтвердили правильность принятых технических решений. Достигнутые технические характеристики в основном удовлетворяют спецификации на разработку РСДБ-комплекса. Вместе с тем были выявлены отклонения отдельных параметров элементов КПФБ от расчетных номиналов, а также ряд недостатков в конструкции, которые, однако, будут устранены на последующих стадиях разработки.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела вычислительной электродинамики ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины Д. Ю. Кулику, А. О. Перову, С. А. Приколотину, Л. А. Рудю, С. А. Стешенко и сотрудникам отдела полупроводниковой электроники ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины В. В. Гламаздину, В. А. Золотареву, М. П. Натарову, А. И. Шубному, принимавшим творческое участие в разработке программного обеспечения и синтезе СВЧ элементов, подготовке измерительных стендов и испытаниях узлов КПФБ, а также сотрудникам конструкторско-технологических отделов ПАО «НПП “Сатурн”» за разработку документации и изготовление экспериментального образца КПФБ. Авторы призна-

Таблица 2. Характеристики МШУ

Диапазон	Частота, ГГц	Шумовая температура, К
S	2.2÷2.6	< 3.5
X	7.0÷9.5	< 6.5
Ка	28÷34	< 25*

* – расчетное значение

тельно коллегам из Института физики АН Китая и Китайского университета науки и технологии (г. Пекин) за предоставленную возможность проводить расчеты с помощью лицензионного пакета CST Microwave Studio.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Инатов А. В.* Радиointерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183, № 7. – С. 769–777.
2. *Plag H. P. and Pearlman M., editors.* Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of Global Society on Changing Planet in 2020. – New York: Springer-Verlag, 2009. – 332 p.
3. *Hase H., Dassing R., Kronschnabl G., Schluter W., Schwarz W., Kilger R., Lauber P., Neidhardt A., Pausch A., and Gbldi W.* Twin Telescope Wettzell – a VLBI2010 Radio Telescope Project. In: A. Finkelstein, D. Behrend, editors. Measuring the Future: Proc. of the Fifth IVS General Meeting, St. Petersburg (Russia), 3-6 March, 2008. – St. Petersburg: Nauka, 2008. – P. 109–113.
4. *Kronschnabl G., Neidhardt A., Pausch K., Göldi W., Rayet R., and Emrich A.* The TWIN-Radiotelesopes Wettzell // IVS TecSpec Workshop, Bad Kötzing, Germany, March 1–2, 2012. – Bad Kötzing (Germany). – 2012.
5. *Lopez-Fernández J. A.* The RAEGE VLBI radio telescope // IVS TecSpec Workshop, Bad Kötzing, Germany, March 1–2, 2012. – Bad Kötzing (Germany). – 2012.
6. *Айзенберг Г. С., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н.* Антенны УКВ. Ч. 2. – М.: Связь, 1977. – 262 с.
7. *Webber J. C. and Pospieszalski M. W.* Microwave instrumentation for radio astronomy // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2002. – Vol. 50, No. 3. – P. 968–995.
8. *Beaudoin C.* Overview of the NASA/Haystack VLBI2010 Receiver Frontends // IVS TecSpec Workshop, Bad Kötzing, Germany, March 1–2, 2012. – Bad Kötzing (Germany). – 2012.
9. *Pantaleev M., Yang J., Helldner L., Kildal P.-S., Raza H., Yin J., and Klein B.* Design and System Integration of 2-14 GHz Eleven Feed Receiver for VLBI2010 // IVS TecSpec Workshop, Bad Kötzing, Germany, March 1–2, 2012. – Bad Kötzing (Germany). – 2012.
10. *Petrachenko B.* Review of VLBI2010 Concept and General Specifications // IVS TecSpec Workshop, Bad Kötzing, Germany, March 1–2, 2012. – Bad Kötzing (Germany). – 2012.
11. *Сигмен А.* Мазеры / Перевод с англ. под ред. Т. А. Шмаонова. – М.: Мир, 1966. – 520 с.
12. *Britcliffe M. J., Hanson T. R., and Franco M. M.* Cryogenic Design of the Deep Space Network Large Array Low-Noise Amplifier System // IPN Progress Report. – 2004. – Vol. 42-157. – P. 1–13.
13. *Дубровка Ф. Ф., Овсяник Ю. А.* Дво- та багато діапазонні рупорні опромінювачі дзеркальних антен // Вісник національного технічного університету України «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2009. – № 38. – С. 130–147.
14. *Чернов В. К., Инатов А. В., Мардышкин В. В., Хвостов Е. Ю.* Трехдиапазонный охлаждаемый облучатель // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2013): Тезисы докладов, Санкт-Петербург (Россия), 15–19 апреля 2013 г. – Санкт-Петербург: Из-во ИПА РАН, 2013. – С. 205–206.
15. *Profera C. E.* Improvement of TE₁₁ Mode Coaxial Waveguide and Horn Radiation Patterns by Incorporation of a Radial Aperture Reactance // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1976. – Vol. 24, No. 2. – P. 203–206.
16. *Potter P.* A New Horn Antenna with Suppressed Sidelobes and Equal Beamwidths // Jet Propulsion Lab. Technical Report № 32-354; NASA-CR-50625. – Pasadena, California: California Institute of Technology, 1963. – 16 p.
17. *Narasimhan M. and Sheshadri M.* Propagation and Radiation Characteristics of Dielectric Loaded Corrugated Dual-Frequency Circular Waveguide Horn Feeds // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1979. – Vol. 27, No. 6. – P. 858–860.
18. *Приколотин С. А., Кириленко А. А.,* Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 1. Спектры собственных волн ортогонных волноводов // Радиофизика и электроника. – 2010. – Т. 15, № 1. – С. 17–29.
19. *Стещенко С. А., Приколотин С. А., Кириленко А. А., Кулик Д. Ю., Рудь Л. А., Сенкевич С. Л.* Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 2. Плоско-поперечные соединения и «in-line» объекты // Радиофизика и электроника. – 2013. – Т. 18, № 4. – С. 3–12.
20. *Perov A. O., Glamazdin V. V., and Skresanov V. N.* Design and optimization of tri-band coaxial feed horn for the radiotelescope antenna // IX Int. Conf. Antenna Theory and Techniques, September 17, 2013. – Odessa (Ukraine). – 2013. – P. 441–443.
21. Computer Simulation Technology (CST) ‘Microwave Studio’, Headquarters: Darmstadt, Germany. Available from: <http://www.cst.com>
22. *Skresanov V. N., Glamazdin V. V., Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Natarov M. P., Pylypenko O. M., Rud L. A., Shubnyj A. I., and Zolotarev V. A.,* Circular polarization splitters for three-band feed radiotelescope reflector antenna // IX Int. Conf. Antenna Theory and Techniques, September 17, 2013. – Odessa (Ukraine). – 2013. – P. 49–52.
23. 90° 3 dB Hybrids, 180° 3 dB Hybrids. Available from: <http://www.clearmicrowave.com>
24. *Aramaki Y., Yoneda N., Miyazaki M., and Horie T.* Ultrathin Broadband OMT with Turnstile Junction // Dig. 2003 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, June 8-13, 2003. – Philadelphia, Pennsylvania (USA). – 2003. – Vol. 1. – P. 47–50.
25. *Srikanth S., Solatka M., and Meek M.* Turnstile Junction Orthomode Transducer // X-Band OMT Design Review Meeting, October 1, 2009. – AOC, Socorro, New Mexico (USA). – 2009.
26. *Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Prikolotin S. A., Rud L. A., and Steshenko S. A.,* Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers // IX Int. Conf. Antenna Theory and Techniques, September 17, 2013. – Odessa (Ukraine). – 2013. – P. 470–472.
27. *Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Rud L. A., Tkachenko V., and Herscovici N.* Electromagnetic modeling and design of dual-

- band septum polarizers // *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.* – 2006. – Vol. 21, No. 2. – P. 155–163.
28. Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., and Rud L. A. Compact 90 Twist Formed by a Double-Corner-Cut Square Waveguide Section // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 2008. – Vol. 56, No. 7. – P. 1633–1637.
29. Angelov I. M., Stoev I. K., Ivanov Z. G., Todorov B. N., Spasov A. I., Kollberg E L., Lindstrom C. O., and Wendemo B. L. Low Noise Cooled Amplifiers – Simulation and Design // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1992. – Vol. 40, No. 2. – P. 389–399.

А. Б. Іпатов¹, В. М. Чміль², В. М. Скресанов³,
Д. В. Іванов¹, В. В. Мардишкін¹, В. К. Чернов¹,
О. М. Пилипенко², А. О. Кириленко³

¹ Інститут прикладної астрономії РАН,
наб. Кутузова, 10, м. Санкт-Петербург, 191187, Росія

² ПАТ «Науково-виробниче підприємство «Сатурн»»,
вул. Леся Курбаса, 2-б, м. Київ, 03148, Україна

³ Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України,
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

КРИОГЕННИЙ ПРИЙМАЛЬНИЙ ФОКАЛЬНИЙ БЛОК ДЛЯ ТЕЛЕСКОПІВ РАДІОІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО КОМПЛЕКСУ НОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Наводяться результати синтезу, конструювання та випробувань експериментального зразка криогенного приймального фокального блоку (КПФБ) для радіотелескопів російського радіо-інтерферометричного комплексу нової генерації. Радіотелескопи комплексу здатні приймати сигнали космічних радіоджерел одночасно у S, X та Ka діапазонах і частково сумісні із радіотелескопами перспективної гло-

бальної геодезичної мережі VLBI2010. Дискутуються прийняті технічні рішення ключових вузлів КПФБ та наводяться головні технічні характеристики НВЧ елементів, котрі, як показано, задовільно відповідають проектній специфікації.

А. Б. Іпатов¹, В. М. Чміль², В. М. Скресанов³,
Д. В. Іванов¹, В. В. Мардишкін¹, В. К. Чернов¹,
О. М. Пилипенко², and А. А. Кириленко³

¹ Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences,
10, Kutuzov Quay, St.-Petersburg, 191187, Russia

² Join-Stock “Saturn”,
2b, Les’ Kurbas St., Kyiv, 03148, Ukraine

³ O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine,
12, Akad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

CRYOGENIC RECEIVING FOCAL UNIT FOR TELESCOPES OF RADIOINTERFEROMETRIC COMPLEX OF NEW GENERATION

Results of synthesis, design and tests of the experimental sample of cryogenic receiving focal unit (CRFU) for telescopes of Russian radio interferometric complex of new generation are presented. The radio telescopes can receive signals of space radio sources simultaneously in the S, X, and Ka bands. They are partially compatible with radio telescopes of promising global geodesic network VLBI2010. Approved technical solutions of CRFU key units are considered. The main characteristics of microwave elements are shown to satisfactorily correspond to design specification.

Стаття постуила в редакцію 13.11.2013