ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 6, с. 76–82

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.274.3

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПРОТОТИПА МОБИЛЬНОЙ РСДБ-СТАНЦИИ

© 2020 г. М. Б. Зотов[a,*], Д. В. Иванов[a], В. Ю. Быков[a], С. А. Гренков[a], И. А. Поздняков[a], И. А. Рахимов [a], В. Г. Стэмпковский[a], А. А. Царук[a], В. К. Чернов[a], И. В. Шахнабиев[a], А. М. Шишикин[a]

[a] *Институт прикладной астрономии РАН*
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10
**e-mail: zmb@iaaras.ru*

Поступила в редакцию 13.05.2020 г.
После доработки 09.06.2020 г.
Принята к публикации 10.06.2020 г.

В обсерватории “Светлое” Института прикладной астрономии РАН создан прототип мобильной РСДБ-станции (РСДБ – радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) на основе механической части антенны спутниковой системы связи TESLA. Представлены основные решения по трансформации антенной системы станции спутниковой связи в антенную систему РСДБ-радиотелескопа, постоянно меняющую ориентацию в пространстве в соответствии с принципами РСДБ-наблюдений. Описан процесс настройки, подготовки к РСДБ-наблюдениям и представлены результаты измерения основных характеристик.

DOI: 10.31857/S0032816220060178

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой улучшения наземной поддержки отечественной навигационной системы ГЛОНАСС является необходимость существенного уточнения опорной системы геоцентрических координат, опирающейся на пункты космической геодезической сети. Одним из наиболее эффективных способов решения этой задачи является определение разности координат пунктов этой сети и пунктов РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” с помощью мобильной РСДБ-станции (РСДБ – радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами). Однако возможности комплекса этим не ограничиваются. Имеется возможность прямых измерений координат и показаний часов в любой точке на территории Российской Федерации и за ее пределами с помощью мобильной РСДБ-станции. Зарубежный опыт выполнения таких измерений показывает, что они могут выполняться с точностью порядка 1 см по координатам и 0.1 нс по времени за сутки [1].

Концепция мобильной РСДБ-станции с радиотелескопом ∅1–5 м для решения задач координатно-временного и навигационного обеспечения была предложена в 2017 году [2]. Для проверки реализуемости концепции был использован прототип передвижного РСДБ-радиотелескопа в составе радиоинтерферометрического комплекса “Квазар-КВО” [3, 4].

В качестве основы для такого прототипа послужила выведенная из эксплуатации наземная спутниковая станция (н.с.с.) TESLA S11 DD 424 (Чехословакия) (рис. 1). Скорость движения антенной системы станции по азимуту и углу места обеспечивает сопровождение источников радиосигнала в РСДБ-наблюдениях. Качество поверхности зеркальной системы удовлетворяет частотному диапазону 8.0–12.0 ГГц (*X*-диапазон). Н.с.с. снабжена двухзеркальной антенной системой с диаметром основного зеркала 4.3 м.

На основе такой станции в обсерватории “Светлое” был создан радиотелескоп РТ-4, являющийся основным инструментом прототипа мобильной РСДБ-станции для совместных наблюдений с радиотелескопами сети “Квазар-КВО”. Для этого была модернизирована система наведения антенной системы и доработана конструкция антенны для монтажа приемной аппаратуры.

Разработана приемная система диапазона частот 8.2–9.1 ГГц, способная осуществлять одновременный прием сигналов правой и левой круговых поляризаций. Прототип мобильной станции также оснащен системами регистрации и частотно-временной синхронизации.

В данной статье описаны основные технические решения, примененные в данной разработке.

Рис. 1. Наземная спутниковая станция TESLA S11 DD 424.

АНТЕННАЯ СИСТЕМА

Оценка текущего состояния н.с.с. TESLA в обсерватории “Светлое” дала основания для использования механической части (зеркальной системы, опорно-поворотного устройства с электродвигателями привода). Однако инкрементные датчики положения и управление электроприводом не подходят для радиотелескопа в силу различий в алгоритме наведения и сопровождения источника радиосигнала. Существенным ограничением для использования н.с.с. является малая скорость перемещения от одного источника к другому (2'/с), а также ограниченный диапазон перемещения по азимуту (±40°). Тем не менее, для создания прототипа данные ограничения допустимы при наличии соответствующей процедуры планирования РСДБ-наблюдений.

Оснащение датчиками положения на основе вращающегося трансформатора 5БВТ с устройствами передачи угла поворота обеспечили систему наведения абсолютными координатами азимута и угла места с разрешением в 20". Преобразование выходного напряжения 5БВТ в 16-разрядный код осуществляет модернизированное устройство преобразования координат [5].

Для двигателей привода антенной системы применено частотное управление с использованием преобразователей частоты, обеспечивающих изменение управляющей частоты в диапазоне 0–400 Гц с дополнительным указанием направления вращения двигателя. Предварительные испытания системы управления электроприводом показали, что для собственных двигателей н.с.с. управляющая частота должна быть ограничена значениями 0–200 Гц для азимутального привода и 0–150 Гц для угломестного. Кроме управления по скорости применение частотных преобразователей позволило повысить скорость перемещения антенны до 3'/с.

Аппаратная часть системы управления электроприводом содержит управляющий компьютер, датчики положения с устройством преобразования координат и преобразователи частоты для управления электродвигателями. Наведение на источник радиосигнала и дальнейшее его сопровождение осуществляется по командам центральной системы управления радиотелескопом (*ЦСУР*). Компьютер, управляющий электроприводом, обеспечивает максимально быстрое перемещение к источнику и работу алгоритма слежения за расчетной траекторией источника радиосигнала. Эти задачи решает программное обеспечение управляющего компьютера. За основу взята программная часть рабочей станции контроля и управления РТ-32 [6].

Для достижения наилучшей точности алгоритм сопровождения был доработан настройкой параметров. Настройка осуществлялась в два этапа. На первом этапе использовалась имитационная математическая модель привода антенной системы, на которой отрабатывались все режимы использования привода (переброс, сопровождение, поиск поправок и сканирование источника). Математическая модель добавляет зашумленность сигналов обратной связи, приближая поведение модели к поведению моделируемого объекта [7].

Перенос результатов имитационного моделирования на действующую антенную систему показал, что точность сопровождения в пределах 1' достигнута с сохранением хороших динамических показателей, таких как время выхода на сопровождение после переброса, возвращение на заданную траекторию при поиске поправок и

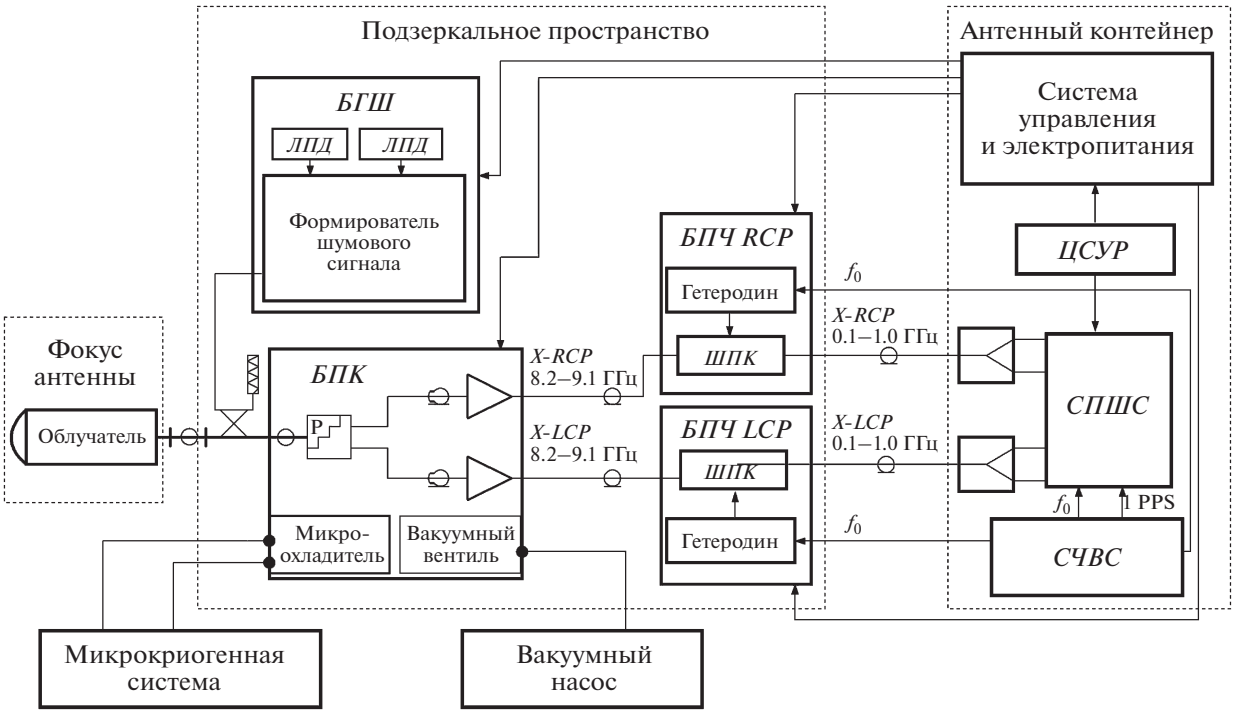

Рис. 2. Структура прототипа мобильной РСДБ-станции. *БГШ* – блок генераторов шума, *ЛПД* – лавинно-пролетный диод, *БПК* – приемный криостатируемый блок, *БПЧ* – блок преобразования частоты, *СПШС* – система преобразования широкополосных сигналов, *ШПК* – широкополосный преобразовательный канал, *СЧВС* – система частотно-временной синхронизации, *ЦСУР* – центральная система управления радиотелескопом, *RCP* и *LCP* – правая и левая круговые поляризации.

следование траектории сканирования в окрестности источника радиосигнала.

Оснащение н.с.с. новыми датчиками положения и замена аппаратной части системы управления электроприводом позволили получить необходимую точность сопровождения в совокупности с динамическими характеристиками антенны. Данные результаты позволяют говорить о возможности использования механической части н.с.с. TESLA в качестве основы для радиотелескопа РТ-4 прототипа мобильной РСДБ-станции. РТ-4 может быть использован в РСДБ-наблюдениях при соответствующем планировании наблюдений с учетом особенностей полученных характеристик радиотелескопа.

ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА

Прототип мобильной РСДБ-станции состоит из радиотелескопа РТ-4 с размещенной на нем приемной системой и антенного контейнера с размещенной в нем аппаратурой систем регистрации и частотно-временной синхронизации. Антенный контейнер распложен в непосредственной близости от радиотелескопа. Для сопряжения волновода облучателя с входом радиоприемника предусмотрена регулировка положения приемного криостатируемого блока (*БПК*).

На рис. 2 представлена функциональная схема разработанной приемной системы, основными элементами которой являются: *БПК*, осуществляющий первоначальное усиление и разделение принимаемого сигнала на сигналы правой и левой круговой поляризации (*RCP* и *LCP)*, два блока преобразования частоты (*БПЧ*), выполняющие окончательное усиление, фильтрацию и преобразование с.в.ч.-сигнала в сигнал промежуточной частоты, один блок генераторов шума (*БГШ*), обеспечивающий амплитудную и фазовую калибровку тракта приемной системы, блоки связи и управления, микрокриогенная система [8].

Разработанный для прототипа радиотелескопа РТ-4 облучатель *X*-диапазона представляет собой конический скалярный рупор, фазовый центр которого совмещен с вторичным фокусом антенной системы РТ-4. Ширина диаграммы направленности облучателя по уровню –11 дБ составляет 50–52° (рис. 3). Облучатель помещен в цилиндрический контейнер ∅112 мм.

Волноводный тракт круглого сечения длиной 1 м имеет внутренний диаметр 25 мм, что обеспечивает передачу волн типа TE_{11} двух ортогональных поляризаций с малыми потерями и препятствует распространению волн высших типов во всем рабочем диапазоне частот приемной систе-

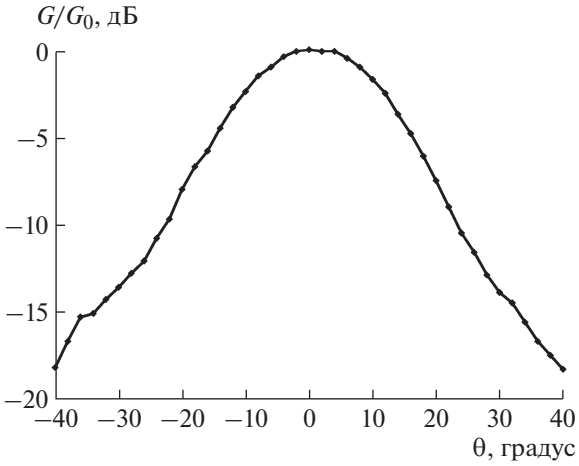

Рис. 3. Измеренная диаграмма направленности облучателя радиотелескопа РТ-4.

мы. Тракт и облучатель имеют серебряное покрытие толщиной 9 мкм. Расчетные потери в волноводном тракте составляют не более 0.2 дБ.

Одним из важных параметров входных цепей приемной системы, работающей на круговой поляризации, является осевой коэффициент эллиптичности. Его величина главным образом определяется разделителем поляризаций, находящимся внутри *БПК*, но зависит также и от качества изготовления облучателя и волноводного тракта. Измерения коэффициента эллиптичности проводились методом вращающейся передающей антенны, расположенной на оси входного тракта приемной системы в дальней зоне для данного облучателя. Измерения показали, что осевой коэффициент эллиптичности входных с.в.ч.-цепей приемной системы радиотелескопа РТ-4 во всем рабочем диапазоне частот не превышает 1 дБ, что является хорошим показателем.

В *БПК* сигнал с выхода разделителя поляризаций подается на охлаждаемые малошумящие усилители на полевых транзисторах HEMT. Для охлаждения разделителя поляризаций и малошумящих усилителей до водородных уровней температур (15 K) используется микрокриогенная система МСМР-110Н-3.2/20 замкнутого цикла охлаждения на базе двухступенчатого микроохладителя (15/77 K) и компрессора с воздушным охлаждением. Для обеспечения криостатирования до нужных температур проводится вакуумирование полости *БПК* с помощью двухступенчатого пластинчато-роторного вакуумного насоса со степенью разрежения 1 Па.

Непосредственно перед *БПК* расположен направленный ответвитель для ввода сигналов амплитудной во входной с.в.ч.-тракт от блока генераторов шума (*БГШ*) и фазовой калибровки от генератора пикосекундных импульсов (*ГПИ*). Источником сигнала амплитудной калибровки в *БГШ* являются малогабаритные широкополосные генераторы шума на лавинно-пролетных диодах (*ЛПД*). С выхода *БПК* сигналы поступают в блок преобразования частоты (*БПЧ*), по одному для каждой поляризации.

БПЧ включает в себя микросборку широкополосного преобразовательного канала (*ШПК*) [9], микросборку гетеродина, систему термостабилизации и платы вторичных источников питания. В нем высокочастотный сигнал усиливается и преобразуется в диапазон промежуточных частот (100–1000 МГц). Блоки *БПК*, *БГШ* и *БПЧ* располагаются в подзеркальном пространстве антенны.

Сигналы с выходов соответствующих *БПЧ* по радиочастотным кабелям поступают на делители мощности и соответствующие входы широкополосной системы преобразования и регистрации сигналов (*СПШС*). Система управления и электропитания, *СПШС* и часть блоков системы частотно-временной синхронизации (*СЧВС*) располагаются в антенном контейнере вблизи радиотелескопа РТ-4. Приемная система смонтирована на макете РТ-4 в обсерватории “Светлое”. По своим основным характеристикам она соответствует характеристикам приемных систем комплекса “Квазар-КВО” [10].

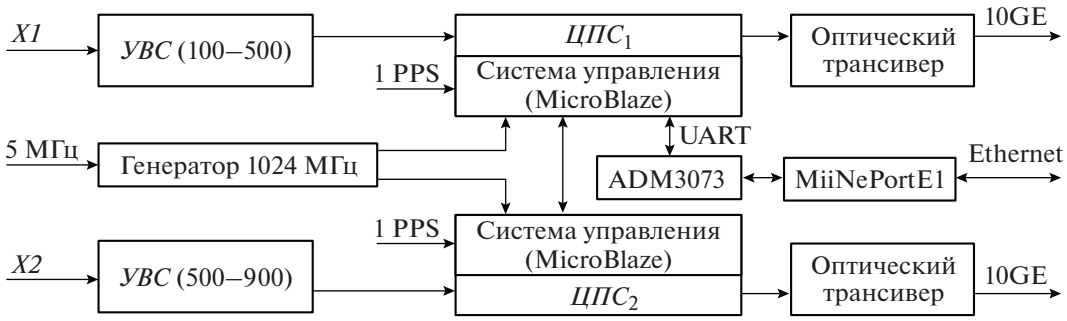

Рис. 4. Структурная схема модуля системы преобразования широкополосных сигналов. *УВС* – усилитель входных сигналов, *ЦПС* – цифровой преобразователь сигналов; 10GE – 10 Gigabit Ethernet.

СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

В качестве системы регистрации на прототипе мобильной РСДБ-станции использована цифровая система преобразования широкополосных сигналов *СПШС*, которая состоит из двух одинаковых модулей (рис. 4) [11], каждый из которых содержит по два канала цифрового преобразования сигналов, подключаемых к широкополосным выходам промежуточных частот радиоастрономической приемной системы. *СПШС* предназначена для усиления, фильтрации и двухбитного квантования принимаемых антенной шумовых сигналов в заданных полосах частот с формированием на выходе цифровых информационных потоков, которые по оптоволокну поступают в систему буферизации или регистрации данных наблюдений радиотелескопа. Каждый канал преобразования сигналов управляется специальным контроллером MicroBlaze, который сформирован в программируемой логической интегральной схеме, и через интерфейс UART, а также преобразователь UART-Ethernet связан с управляющим компьютером радиотелескопа. С устройством и принципом работы каналов цифрового преобразования сигналов можно ознакомиться в [12]. Основные параметры *СПШС*:

Число каналов	4
Полоса пропускания канала	512 МГц
Тактовая частота считывания выборок сигнала	1024 МГц
Вид квантования, бит	2
Суммарная скорость потока данных на выходе каждого канала	2.048 Гбит/с
Суммарная скорость потока данных на выходе системы	8.192 Гбит/с
Формат данных на выходе системы	VDIF
Тип интерфейса на выходе	10 Gigabit Ethernet (10GE)
Интерфейс управления	10/100 Ethernet
Сигналы внешней синхронизации	5/10/100 МГц, 1 Гц (1 PPS)
Автоматическая регулировка усиления	0–31 дБ

СИСТЕМА ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Система частотно-временной синхронизации *СЧВС* (рис. 5) на основе водородного стандарта времени и частоты формирует сигналы опорной частоты 5 МГц и 1 Гц, когерентные с сигналами для других радиотелескопов. Сформированные опорные сигналы по длинным радиочастотным кабелям передаются в антенный контейнер радиотелескопа РТ-4 мобильной РСДБ-станции. Сигналы 5 МГц и 1 Гц принимаются распределительными усилителями и синхронизуют приемно-регистрирующую аппаратуру радиотелескопа.

Поскольку расстояние от помещения хранителя времени и частоты до радиотелескопа РТ-4 составляет более 100 м, особое внимание уделено фазовой стабильности кабелей передачи опорных сигналов, а именно, снижению влияния суточных колебаний температуры. Стандартный коаксиальный кабель РК-50-7-11 имеет температурный коэффициент задержки порядка 800 пс/(км · К) [13], что при суточном изменении температуры 15°С может привести к высоким потерям когерентности при проведении длительных РСДБ-наблюдений. Для уменьшения влияния температуры кабели проложены в подземных коммуникациях на глубине 1 м. Снижение суточных колебаний температуры в глубине грунта связано с тем, что тепловая волна с суточным циклом ослабляется с ростом глубины экспоненциально [14], и на метровой глубине колебание температуры воздуха ослабляется на два порядка. Малая амплитуда температурной суточной волны у кабеля при таком подземном заложении дает возможность обеспечения суточных колебаний фазы в кабеле менее 20 пс.

Для распределения сигнала до потребителей использованы импульсные распределительные усилители, обеспечивающие джиттер сигнала <50 пс, и малошумящие распределительные усилители гармонических сигналов, имеющие низкую вносимую нестабильность частоты (среднее квадратическое относительное случайное двухвыборочное отклонение на интервале усреднения 1 ч $<5 \cdot 10^{-15}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПА РАН разработан прототип мобильной РСДБ-станции, основным инструментом которой является радиотелескоп РТ-4, созданный на основе антенной системы н.с.с. TESLA с диаметром основного зеркала 4.3 м. Для этого была модернизирована система наведения антенной системы и доработана конструкция антенны для монтажа приемной системы. В ходе работы специально для данной антенны были разработаны приемная система *X*-диапазона частот с коническим скалярным рупором и криогенным охлаждением входных усилительных каскадов, а также цифровая система преобразования широкополосных сигналов. Для осуществления возможности РСДБ-наблюдений была создана система частотно-временной синхронизации РТ-4.

В обсерватории “Светлое” проведены радиометрические измерения параметров приемной системы в составе макета радиотелескопа РТ-4, результаты которых приведены в работе [8]. Методом двух отсчетов с использованием охлаждаемой жид-

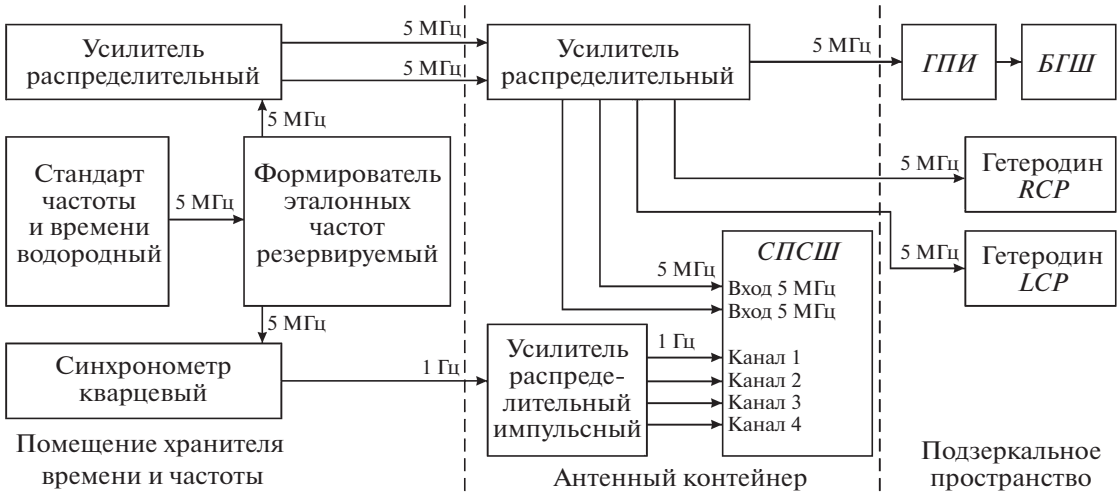

Рис. 5. Система частотно-временной синхронизации РТ-4. *БГШ* – блок генераторов шума, *ГПИ* – генератор пикосекундных импульсов, *СПШС* – система преобразования широкополосных сигналов, *RCP* и *LCP* – правая и левая круговые поляризации.

ким азотом согласованной нагрузки определены шумовая температура приемника и уровень сигнала амплитудной калибровки. Шумовая температура системы определялась сравнением выходного сигнала приемной системы при включенном и выключенном сигнале амплитудной калибровки. Для проверки совмещения фазового центра облучателя с вторичным фокусом антенны макета радиотелескопа РТ-4 проведено измерение коэффициента использования поверхности (*КИП*) и ширины диаграммы направленности радиотелескопа. Для определения *КИП* был измерен параметр *SEFD* (System Equivalent Flux Density) РТ-4. Измерения *SEFD* и РТ-4 проводились по космическому радиоисточнику CygnusA.

По известному выражению [11] отношение сигнал/шум $R_{s/n}$ при корреляционной обработке РСДБ-наблюдений может быть вычислено:

$$R_{s/n} = \eta S\sqrt{\frac{2Bt}{SEFD_1 SEFD_2}},$$

где η – коэффициент потерь из-за квантования принимаемого радиосигнала ($\eta = 0.88$ для двухбитного квантования), S – плотность потока излучения от источника, B – ширина полосы регистрируемого частотного диапазона, t – длительность наблюдения. Необходимое время для детектирования источника выбирается исходя из его яркости и требуемого $R_{s/n}$. При постпроцессорной обработке РСДБ-данных $R_{s/n} = 7$ считается минимально допустимым значением для достоверного обнаружения сигнала от радиоисточника. Значения $SEFD_x$ с учетом особенностей систем регистрации для РТ-13 – 1000 Ян, для РТ-32 – 350 Ян. Таким образом, источники с плотностью потока излучения 138 мЯн и 115 мЯн для баз РТ-4 с РТ-13 и РТ-32 являются минимально разрешимыми при времени наблюдения 1 мин.

Разработанная приемная система *X*-диапазона частот для прототипа мобильной РСДБ-станции совместима по своим основным параметрам с приемными системами радиотелескопов комплекса “Квазар-КВО”. Ниже приведены основные параметры прототипа радиотелескопа РТ-4 мобильной РСДБ-станции:

Диаметр основного зеркала	4.23 м	
Фокусное расстояние	1185.5 мм	
Перемещение по азимуту	±40°	
Перемещение по углу места	0–80°	
Погрешность наведения антенны	не более 20"	
Скорость перемещения антенны	не менее 3'/с	
Диапазон принимаемых частот	8.2–9.1 ГГц	
Диапазон выходных частот	0.1–1 ГГц	
Полоса пропускания одного канала системы регистрации	512 МГц	
Поляризация	*RCP*	*LCP*
Шумовая температура приемника	35 K	34 K
Уровень амплитудной калибровки	5.4 K	5 K
Шумовая температура системы	59 K	57 K
SEFD	17 кЯн	16 кЯн
КИП	0.7	
Ширина диаграммы направленности по уровню –3 дБ:		
по углу места	0.56°	
по азимуту	0.58°	

Данный прототип готов к проведению радиоинтерферометрических наблюдений в составе РСДБ-комплекса “Квазар-КВО”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ichikawa Ryuichi, Iishii Atsutoshi, Takiguchi Hiroshi, Takefuji Kazuhiro, Ujihara Hideki, Koyama Yasuhiro, Kondo Tetsuro, Kurihara Shinobu, Miura Yuji, Kawabata Ryoji, Kokado Kensuke, Machida Morito, Takashima Kazuhiro, Fujisaku Junichi, Tanimoto Daisuke, Nozawa Kentaro* // J. National Institute of Information and Communications Technology. 2010. V. 57.№.3/4. P. 241.
2. *Иванов Д.В., Ипатов А.В., Гаязов И.С., Зотов М.Б., Мельников А.Е., Стэмпковский В.Г., Суркис И.Ф., Чернов В.К.* // Тезисы докладов Седьмой Всероссийской конференции “Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2017)”. Санкт-Петербург, 17–21 апреля 2017. 2017. С. 131.
3. *Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Кайдановский М.Н., Кольцов Н.Е., Коркин Э.И., Малкин З.М., Рахимов И.А., Сальников А.И., Смоленцев С.Г.* // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 13. С. 104.
4. *Ипатов А.В., Гаязов И.С., Смоленцев С.Г., Варганов М.Е., Иванов Д.В., Шахнабиев И.В., Мардышкин В.В., Федотов Л.В., Кайдановский М.Н., Вытнов А.В., Сальников А.И., Михайлов А.Г.* // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 216.
5. *Быков В.Ю., Ильин Г.Н.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 294.
6. *Белоусов Н.Ю., Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Кайдановский М.Н., Стэмпковский В.Г., Шишикин А.М.* // Труды ИПА РАН. 2012 .Вып. 25. С. 16.
7. *Стэмпковский В.Г.* // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 24. С. 87.
8. *Зотов М.Б., Иванов Д.В., Поздняков И.А., Хвостов Е.Ю., Чернов В.К.* // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 48. С. 50. https://doi.org/10.32876/ApplAstron.48.50-55
9. *Маршалов Д.А., Кольцов Н.Е.* // Труды ИПА РАН. 2007. Вып. 16. С. 245.
10. *Иванов Д.В., Ипатов А.В., Ипатова И.А., Мардышкин В.В., Михайлов А.Г.* // Труды ИПА РАН. 1997. Вып. 2. С. 242.
11. *Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: Мир, 1989.
12. *Whitney A., Kettenis M., Phillips Ch., Sekido M.* // IVS 2010 General Meeting Proceeding. 2010. P. 192.
13. *Карпичев А.С.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 80.
14. *Балаев Р.И., Шибаева Д.М., Малимон А.Н., Курчанов А.Ф.* // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 165.