

Широкополосная приемная система для РТ-13 обсерватории «Светлое»

© А. А. Евстигнеев, Ю. В. Векшин, О. Г. Евстигнеева, М. Б. Зотов,
А. С. Лавров, В. В. Мардышкин, И. А. Поздняков,
Е. Ю. Хвостов, И. В. Шахнабиев

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрена разработанная в ИПА РАН широкополосная приемная система диапазона 3–16 ГГц, работающая на ортогональных линейных поляризациях и предполагаемая к использованию на радиотелескопе РТ-13 обсерватории «Светлое».

Обоснован выбор частотного диапазона системы, описаны особые условия лабораторных исследований, и даны результаты испытаний созданной системы. В ходе радиометрических измерений получено значение шумовой температуры системы методом двух отсчетов. Радиоинтерферометрические испытания включали работу совместно с трехдиапазонной приемной системой в составе стенда радиоинтерферометра с нулевой базой. Приведена оценка ожидаемых характеристик РТ-13.

Ключевые слова: радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, РСДБ, широкополосная приемная система, линейные поляризации, обсерватория «Светлое», РТ-13, VLBI2010, VGOS.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.46.50-56>

Введение

В настоящее время для решения прикладных задач методом РСДБ формируется глобальная сеть радиотелескопов VGOS (VLBI Global Observing System) с требованием достижения точности определения координат опорных станций до 1 мм. Такая точность достигается наблюдением большого количества источников на малых высокоскоростных антеннах. Для решения подобных задач как в составе российского комплекса «Квазар-КВО», так и в составе всемирной сети, радиотелескоп РТ-13 обсерватории «Светлое» должен быть оснащен приемной системой, соответствующей требованиям VGOS.

В ходе развития технологии РСДБ сформировались два основных подхода к созданию приемных систем — многодиапазонные системы (*S/X/Ka*) на круговых поляризациях и широкополосные (2–14 ГГц) — на линейных поляризациях. Радиотелескоп РТ-13 обсерватории «Светлое» планируется оснастить

приемными системами обоих типов. Настоящая статья посвящена широкополосной приемной системе (ШПС).

Диапазон рабочих частот ШПС

Важнейшим параметром приемной системы является ее входная полоса рабочих частот. В спецификации VLBI2010 [1] диапазон 2–14 ГГц определен как рекомендуемый и 2–18 ГГц — как расширенный. Однако специально проведенный в обсерватории «Светлое» мониторинг помеховой обстановки показал, что расположенные рядом станции мобильной связи являются мощными источниками помех в *S*-диапазоне на частотах 3G (2110–2170 МГц), Wi-Fi (2402–2480 МГц) и GSM1800 (1710–1785 МГц, 1805–1880 МГц).

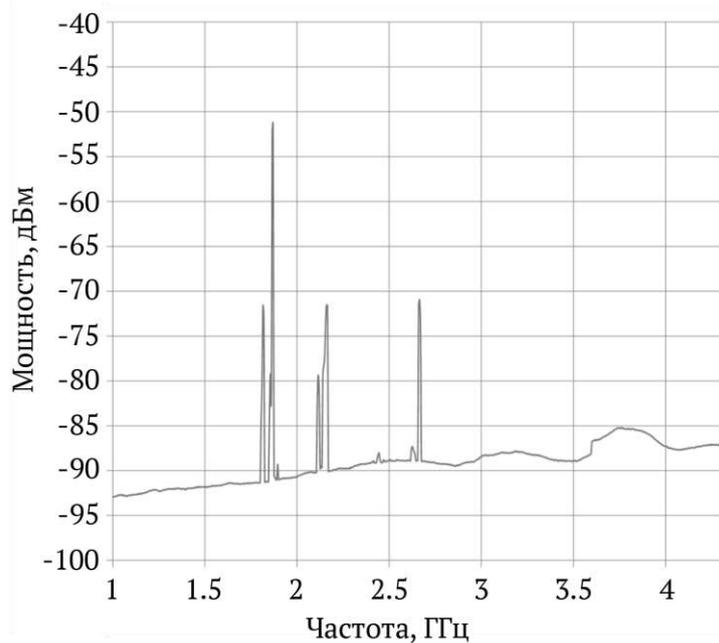


Рис. 1. Результаты измерения помеховой обстановки в обсерватории «Светлое» в диапазоне 1–4 ГГц

Принимаемые меры по подавлению этих источников помех [2] показывают, что, несмотря на определенные успехи, окончательное решение этой проблемы не представляется возможным из-за постоянно растущей потребности в услугах беспроводной связи. Таким образом, целесообразна работа в диапазонах частот выше 3 ГГц.

Другим обстоятельством, определяющим диапазон входных частот, является доступность элементной базы. Это относится исключительно к охлаждаемым (криогенным) элементам первого каскада усиления (*frontend*), так как современные неохлаждаемые СВЧ-устройства легко перекрывают очень ши-

рокий диапазон частот, вплоть до 1–40 ГГц. Криогенным компонентом, наиболее ограничивающим диапазон работы, является малошумящий усилитель (МШУ). В данной работе выбран МШУ производства фирмы LowNoiseFactory LNC4_16B с заявленным диапазоном рабочих частот 4–16 ГГц. В этой полосе усиление превышает 42 дБ при эквивалентной шумовой температуре входа (ЭШТВ) не выше 6 К. При более подробном изучении типичных характеристик данного МШУ [3] можно заметить, что в диапазоне 3–4 ГГц параметры практически не ухудшаются. МШУ LNC4_16B можно считать работоспособным в диапазоне 3–16 ГГц, что и определяет рабочий диапазон входных частот всей ШПС.

Описание ШПС

Структурная схема ШПС и принцип ее работы не претерпели значительных изменений по сравнению с более ранними разработками [4]. Блок модулей радиометрического контроля был исключен из приемной системы и разработан в качестве нестандартного средства измерений, применимого для различных приемных систем и радиотелескопов. Элементы блока питания и управления термостатами были включены в состав основного блока питания (БП-24).

Блоки приемной системы размещены на несущей конструкции (каркасе) таким образом, что обеспечивается удобный доступ для обслуживания. В целях увеличения жесткости конструкции и обеспечения тепло- и влагоизоляции в условиях антенны фокальный модуль приемной системы заключен в съемный жесткий кожух и снабжен системой обдува вакуумного окна. Фотография приемной системы в процессе сборки приведена на рис. 2.



Рис. 2. ШПС для обсерватории «Светлое» в процессе сборки

СВЧ-блоки приемной системы выполнены в герметичных термостатированных корпусах. Их конструкции и параметрам посвящена отдельная статья настоящего сборника [5]. На настоящий момент изготовлены основные блоки системы — широкополосный криоэлектронный приемный фокальный блок, блок делителей, широкополосный блок генератора шума, блок питания входных усилителей, блок питания 24 В (БП-24). Широкополосный блок преобразователей частоты находится в процессе сборки и настройки. В текущем состоянии ШПС позволяет проводить исследования с ограничениями в управлении, контроле и количестве частотных каналов.

Условия лабораторных испытаний системы

Исследование характеристик ШПС в лабораторных условиях имело ряд особенностей. В первую очередь, такие свойства как широкая входная полоса, малая шумовая температура и охлаждаемый облучатель делают ШПС особенно восприимчивой к помехам. Необходимо отметить, что помеховая обстановка в условиях города многократно хуже, чем в обсерватории. Для уменьшения влияния помех при измерении ЭШТВ была создана портативная безэховая камера, представляющая собой открытый контейнер с двойными стенками и радиопоглощающим материалом между ними. Размеры контейнера соответствуют размерам ШПС. В качестве радиопоглощающего материала использован материал «Мох-П-70» для диапазона 1.2–40 ГГц. Между наружной стенкой и поглотителем расположен экранирующий слой металлической фольги. Вес камеры не превышает 10 кг.

Применение безэховой камеры позволило значительно (на 10–20 дБ) подавить помехи в принимаемой полосе, что положительно сказалось на СКО (среднеквадратическое отклонение) наблюдаемого радиометрического сигнала.

Важной особенностью лабораторных измерений является исследование ШПС не только в радиометрическом режиме, но и на специально созданном лабораторном стенде радиоинтерферометра с нулевой базой. Стенд включает в себя ШПС, трехдиапазонную приемную систему радиотелескопа, систему РСДБ-регистрации, полноценную корреляционную обработку и позволяет оценить работу систем в составе РСДБ-сети до установки на радиотелескоп по основному параметру радиоинтерферометра — задержки времени прихода сигнала и ее СКО. Данному стенду посвящена отдельная статья [6].

Результаты лабораторных испытаний системы

В ходе исследования характеристик приемной системы особое внимание было уделено ЭШТВ ШПС. Этот параметр измерялся при помощи хорошо отработанного метода «двух отсчетов», реализованного с помощью согласованной нагрузки, в начале находящейся при комнатной температуре, а затем — при температуре жидкого азота.

Основываясь на данных измерений и известных из [7] оценках шумовой температуры неба и антенны, можно рассчитать шумовую температуру всего радиотелескопа. Результат приведен на графике (рис. 3), где каждой точке соответствует значение интегральной шумовой температуры в полосе шириной 1 ГГц. Суммарная ЭШТВ системы составляет не более 50 К в диапазоне до 14 ГГц и не более 60 К в диапазоне до 16 ГГц. Для ее снижения в диапазоне частот 14–16 ГГц необходимо улучшить согласование охлаждаемого облучателя и МШУ.

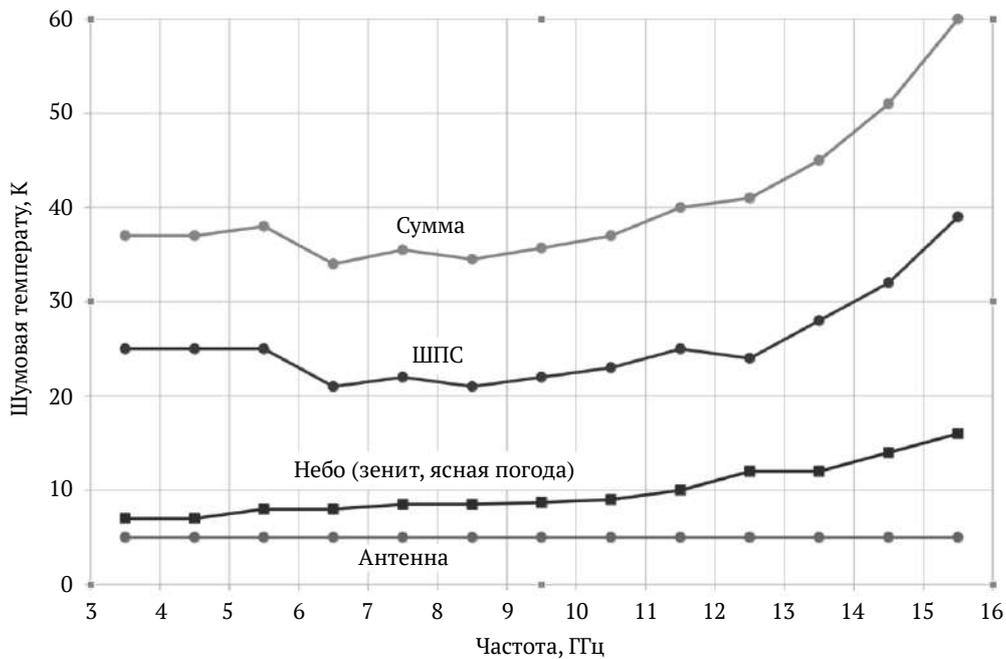


Рис. 3 Расчет шумовой температуры РТ-13 с ШПС

При исследовании ШПС в радиоинтерферометрическом режиме были получены корреляционные отклики в 100 % случаев, что подтвердило правильность примененных технологических решений и позволило исследовать влияние определенных параметров ШПС на получаемый результат. В частности, был обнаружен эффект, вызванный неточностью установки частоты гетеродина при цифровом синтезе частоты. Отличие частот от номинального значения порядка 30 ГГц даже на сотые доли Гц приводит к синусоидальным трендам задержек корреляционного отклика.

Механизм возникновения тренда представляется следующим: из-за недостаточной крутизны характеристик выходных фильтров промежуточной частоты и применения цифровой системы преобразования сигнала происходит наложение части сигнала из соседних зон Найквиста на исходный сигнал. Это наложение происходит с фазовым смещением, синусоидально меняю-

щимся со временем пропорционально ошибке установки частоты. В результате задержка, определяемая по этому сигналу, также имеет синусоидальный тренд. Искусственное внесение поправок при корреляционной обработке на величину ошибки установки частоты в частоту доплеровского сдвига не решило бы проблему наличия синусоидального тренда задержки.

Для решения этой проблемы были уточнены требования к характеристикам гетеродинов. Исследование на интерферометрическом стенде гетеродинов с нулевой ошибкой установки частоты показало отсутствие трендов. Это подтверждает правильность гипотез о возникновении проблемы и метод ее решения. СКО задержки, полученной на стенде с применением ШПС, составило 14 пс.

Заключение

Для установки ШПС на РТ-13 обсерватории «Светлое» были проведены следующие работы:

- определен частотный диапазон ШПС (3–16 ГГц);
- разработана рабочая конструкторская документация на ШПС;
- изготовлены основные блоки приемной системы;
- исследованы характеристики изготовленных блоков и некоторые характеристики ШПС в радиоинтерферометрическом режиме, получен положительный результат, свидетельствующий о правильности примененных технологических решений.

Дальнейшая работа предполагает завершение изготовления широкополосного блока преобразователей частоты, продолжение измерений в лаборатории, монтаж и испытания на РТ-13 обсерватории «Светлое».

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

Литература

1. *Petrachenko B., Niell A., Behrend D. et al.* Design Aspects of the VLBI2010 System. Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee, June 2009. NASA/TM–2009–214180. — 2009. — 62 p.
2. *Царук А. А., Гренков С. А., Ильин Г. Н.* Помехи и методы борьбы с ними в обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2014. — Вып. 33. — С. 72–79.
3. Характеристики усилителя LNC4_16B. Официальный сайт фирмы LowNoise Factory. URL: http://www.lownoisefactory.com/files/8714/8943/7020/LNF-LNC4_16B.pdf (дата обращения: 7.08.2018).
4. *Евстигнеев А. А., Евстигнеева О. Г., Лавров А. С., Мардышкин В. В., Поздняков И. А., Хвостов Е. Ю.* Результаты разработки сверхширокополосной приемной системы радиотелескопа РТ-13 // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 35. — С. 99–103.
5. *Евстигнеева О. Г., Евстигнеев А. А., Хвостов Е. Ю., Зотов М. Б., Ипатова И. А., Поздняков И. А., Мардышкин В. В., Векшин Ю. В., Лавров А. С.* СВЧ-блоки широкопо-

лосной приемной системы для RT-13 обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 46. — С. 132–138.

6. Векшин Ю. В., Кен В. О., Черно В. К., Евстигнеев А. А. Исследования характеристик приемных устройств на радиоинтерферометрическом стенде // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 46. — С. 19–30.

7. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973.

An Ultra-Wideband Receiving System for the RT-13 Radio Telescope in the “Svetloe” Observatory

**A. A. Evstigneev, Y. V. Vekshin, O. G. Evstigneeva, M. B. Zotov,
A. S. Lavrov, V. V. Mardyshkin, I. A. Pozdnyakov,
E. Y. Khvostov, I. V. Shakhnabiev**

The article describes an ultra-wideband receiving system for the frequency range from 3 to 16 GHz which is developed by the IAA RAS and supposed to be used for the RT-13 radio telescope in the “Svetloe” observatory. The system has channels to receive two orthogonal linear polarized components of incoming signals.

The choice of the input frequency range for the receiving system is explained. Special conditions for the laboratory tests are described and the designed system’s test results are given. The system noise temperature was measured using the Y-factor method during the radiometry measurements. The interferometric tests included zero-base interferometry with a tri-band receiving system. The expected RT-13 parameters are estimated and presented.

Keywords: VLBI, ultra-wideband receiving system, linear polarizations, “Svetloe” observatory, RT-13, VLBI2010, VGOS.