

К. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО, А. М. ПИЛИПЕНКО, Э. В. СЛОНИН,  
к. т. н. И. К. СУНДУЧКОВ, В. В. ЧМИЛЬ

Украина, г. Киев, НПП «Сатурн»  
E-mail: chmil@nbi.com

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ МАЛЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

*Описаны новые технологические решения и конструктивные подходы для проектирования радиометрической приемной системы для антенн малого диаметра. Сформулированы проблемы, которые необходимо преодолеть при реализации подобных систем. Подробно рассмотрены конкретные решения, которые прошли апробацию и предлагаются для реализации систем такого класса.*

*Ключевые слова: радиометрическая приемная система, антенна, хладопровод, волновод, S/X/Ka-диапазон, преобразователь частоты.*

В [1] описана радиометрическая приемная система (РПС), предназначенная для проведения радиоастрономических наблюдений за параметрами вращения Земли, определения всемирного времени, уровня моря, круговорота воды, состояния климата и текущей информации об угрозе стихийных бедствий. Эта система относится к интерферометрам нового поколения, размещаемых на радиотелескопах с антеннами малого диаметра — порядка 12–13 метров, как это классифицировано международной службой РСДБ (радиометрии со сверхдлинной базой).

Главной особенностью подобных комплексов является одновременный прием сигналов трех частот: S-диапазона (2,2–2,45 ГГц), X-диапазона (7,0–9,5 ГГц) и Ka-диапазона (28,0–34,0 ГГц) при двух (правой и левой) поляризациях. Для этого применяются, соответственно, трехдиапазонные облучатели с единым фазовым центром для формирования диаграмм направленности.

Подобные РПС уже реализованы на радиотелескопах Wettell (Германия), Бадары и Зеленчук (Россия) и в испано-португальском проекте RAEGE.

Поскольку существующая в радиоастрономии тенденция предполагает расширение парка радиотелескопов на базе антенн малого диаметра, в настоящей работе будут рассмотрены возникающие в таких проектах проблемы и показаны пути их разрешения.

РПС размещается под конусом антенны радиотелескопа (рис. 1). При этом трехдиапазонный S/X/Ka-облучатель, разделители круговых поляризаций, вакуумноплотное радиопрозрачное окно и сверхмалозумящие усилители всех трех диапазонов, а также некоторые другие элементы РПС размещаются в криостате, образуя единый криогенный приемный фокальный блок (КПФБ).

Хотя объем под антенной малого диаметра весьма ограничен, в нем кроме КПФБ и микроохладителя с хладопроводами необходимо разместить и обеспечивающее их работу оборудование. При этом плотность размещения узлов, блоков и соединителей РПС должна обеспечивать беспрепятственный доступ персонала к РПС для проведения профилактических или ремонтных работ в процессе эксплуатации радиотелескопа.

При создании РПС именно эти факторы стали причиной возникновения ряда конструктивно-технологических проблем, среди которых необходимо выделить следующие:

- использование надежного, оптимальных размеров криогенного охладителя и его присоединение к узлам КПФБ;
- обеспечение эффективного охлаждения входных усилителей и их СВЧ-трактов всех трех диапазонов, определяющих чувствительность РПС;



Рис. 1. Фотография антенны радиотелескопа с РПС

— реализация узлов и блоков *Ka*-диапазона, выполняемых на базе волноводов сечением  $7,2 \times 3,4$  мм, с минимальными габаритами.

В целом РПС представляет собой жесткую конструкцию, закрепленную на верхнем фланце конической надзеркальной (выступающей над поверхностью зеркала антенны в ее центре) кабины с помощью специального элемента каркаса РПС — несущего фланца. Габаритный чертеж РПС представлен на **рис. 2**.

Внешние габариты части РПС, размещаемой выше несущего фланца, определяются размерами защитного кожуха: расстояние от плоскости присоединительного (несущего) фланца РПС до фазового центра облучателя КПФБ 1168 мм; диаметр защитного кожуха в плоскости несущего фланца 941 мм; диаметр защитного кожуха в плоскости радиопрозрачного окна КПФБ 490 мм. Высота РПС в сборе составляет 1600 мм.

Для обеспечения нормального функционирования РПС несовпадение оптической оси облучателя и оптической оси РПС не должно превышать  $0,5^\circ$ , а поперечное смещение центра облучателя должно быть не более  $\pm 0,5$  мм.

Несущий фланец 3, присоединительный фланец 4, осевой цилиндр 5, защитный кожух 7 и вакуумноплотное радиопрозрачное окно 2 образуют каркас корпуса РПС, обеспечивающего теплоизоляцию аппаратуры РПС от окружающей среды при ее температуре до минус  $40^\circ\text{C}$ .

С целью минимизации размеров корпуса РПС, а также изоляции электронной аппаратуры от температуры внешней среды, на вну-

тренней поверхности защитного кожуха применено специальное теплоизоляционное покрытие TSM Ceramic [2] толщиной порядка 2 мм вместо 20–25 мм традиционно применяемых материалов, например пенопласта.

Следует отметить, что каркас является основным несущим элементом конструкции РПС, внутри которого размещены все электронные блоки, крепящиеся специальными кронштейнами к цилиндру, ориентированному по вертикальной оси РПС.

Ребра радиаторов всех радиоэлектронных блоков ориентированы сверху вниз, а за счет отбора воздуха из полости РПС со скоростью  $5 \text{ м}^3/\text{мин}$  и воздуха, поступающего из надзеркальной кабины через промежуточный фланец, происходит отбор тепла со всех радиаторов. Кроме этого, для обеспечения стабильной работы электронной аппаратуры РПС в интервале рабочих температур от  $5$  до  $40^\circ\text{C}$ , применяются термоэлектрические батареи с электронными регуляторами температуры. Количество термоэлементов определяется массой термостабируемых блоков.

На несущем фланце РПС выполнены съемные соединения гелиевого трубопровода высокого и низкого давления, вакуумного трубопровода, воздуховода для обдува вакуумноплотного радиопрозрачного окна, а также различных типов кабелей — питающего напряжения сети (220 В, 50 Гц), сигналов синхронизации (100 МГц), СВЧ-соединителей, стандарта Ethernet, а также управления микрокриогенной системой.

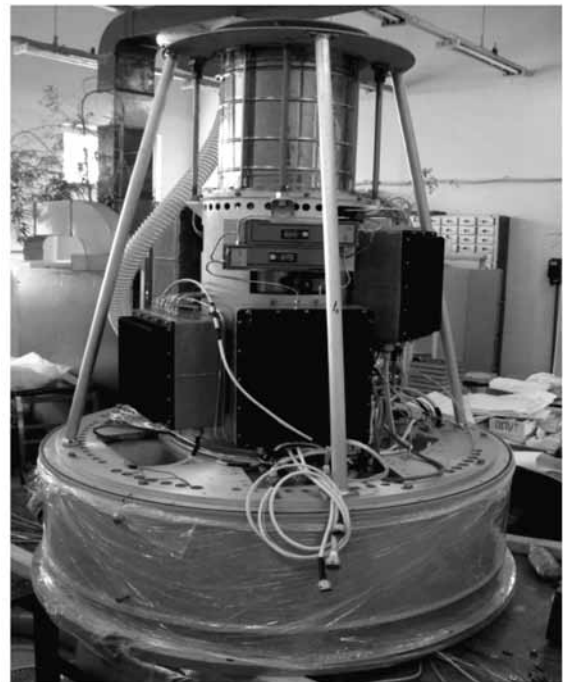
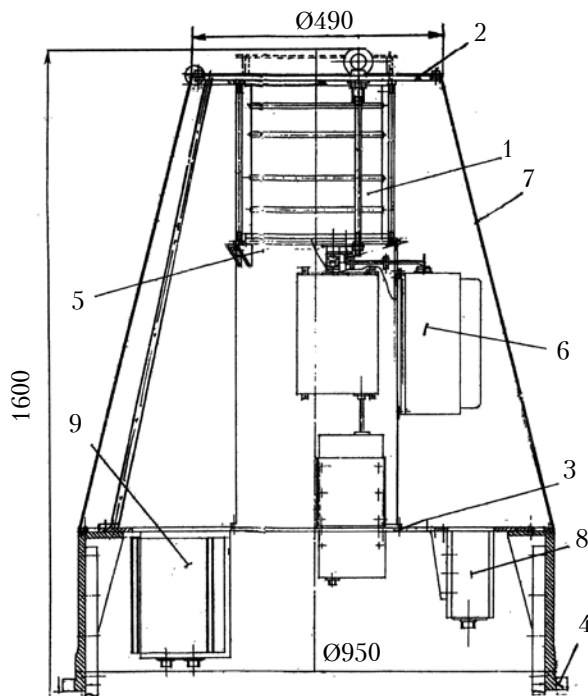


Рис. 2. Габаритный чертеж РПС и ее фото без защитного кожуха:

1 — КПФБ; 2 — радиопрозрачное окно; 3 — несущий фланец; 4 — присоединительный фланец; 5 — цилиндр; 6 — блок преобразования частоты *Ka*-диапазона (БПЧ-*Ka*); 7 — защитный кожух; 8 — блок питания, дистанционного контроля и управления КПФБ (БПДКУ-1); 9 — блок неохлаждаемых электронных блоков РПС (БПДКУ-2)

КПФБ, соединенный с микроохладителем (рис. 3), обеспечивает прием радиоастрономических сигналов, усиление их и выделение полосы приема. Его корпус для минимизации массы и габаритов выполняется из тонкостенного (не более 0,8 мм) материала.

Для повышения жесткости установки КПФБ крепится специальными шпильками и подкосами соответственно к фланцу радиопрозрачного окна и несущему фланцу каркаса РПС. Для уменьшения теплопритоков используется провод с наименьшим коэффициентом теплопроводности WQL-32 [3], волноводы из нержавеющей стали с минимальной (0,3 мм) толщиной стенок и специальные кабели из нержавеющей стали. С этой же целью поверхности экрана и других деталей КПФБ доведены с помощью электрополировки до зеркального блеска.

Радиопрозрачное окно служит одновременно и верхним фланцем корпуса КПФБ. Именно под ним размещены облучатели  $S/X/Ka$ -диапазонов, конструкции которых обеспечивают формирование и разделение круговых (левой и правой) поляризаций волн. Вакуумноплотное радиопрозрачное окно представляет собой фланец в виде кольца диаметром 480 мм, в центральное отверстие которого вклеена деталь специальной формы из пенопласта марки ПС-1-200 (ТУ6-05-1178-87), которая накрыта двумя слоями пленки: полиэтилентерефталатом ПЭТ-7 (ГОСТ 24234-80) толщиной 0,02 мм и листовым фторопластом Ф-4 (ТУ 952467-93) толщиной 0,1 мм.

К каждому из трех облучателей  $S/X/Ka$ -диапазонов подсоединен охлаждаемый до криогенных температур малошумящий усилитель (ОМШУ) соответствующего диапазона. При этом для снижения габаритов СВЧ-тракта

ОМШУ  $Ka$ -диапазона сотрудником Института радиоэлектроники НАН Украины В. Н. Скрасановым была разработана уникальная скрутка волновода сечением  $7,2 \times 3,4$  мм толщиной 2,3 мм. Это позволило уменьшить размеры волноводного тракта  $Ka$ -диапазона (примерно до 90 мм) и разместить все СВЧ-элементы, требующие криогенного охлаждения (в первую очередь, облучатели и ОМШУ), внутри экрана диаметром 244 мм.

Для реализации максимальной чувствительности РПС при приеме радиоастрономических сигналов необходимо с помощью микроохладителя обеспечить температуру ОМШУ, облучателей и волноводных элементов тракта  $Ka$ -диапазона на уровне 10 К. Каждое из этих устройств РПС охлаждается до криогенного уровня посредством хладопроводов (рис. 4), которые с целью создания наименьшего коэффициента теплового сопротивления в точках крепления к устройствам в обязательном порядке снабжены прокладками из индия (это мягкий и пластичный металл с высокой электро- и теплопроводностью, обладающий хорошей адгезией ко многим материалам; наиболее эффективный материал в данном случае). При этом для охлаждаемых элементов СВЧ-трактов необходимо минимизировать размеры их корпусов и изготавливать из материалов с максимально возможным коэффициентом теплопроводности.

Отдельно остановимся на проблеме реализации блока преобразования частоты (БПЧ)  $Ka$ -диапазона: если в  $S$ - и  $X$ -диапазонах (БПЧ- $S$  и БПЧ- $X$ ), реализуемых на основе коаксиальных соединителей и кабелей, особых трудностей не возникает, то в случае БПЧ- $Ka$  появляется сложность, вызванная необходимостью минимизации числа фланцев волноводных соединений,

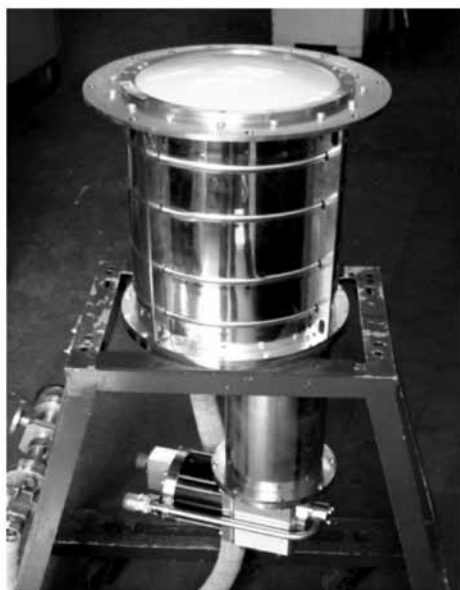


Рис. 3. Фотография КПФБ в сборе с микроохладителем на технологической подставке

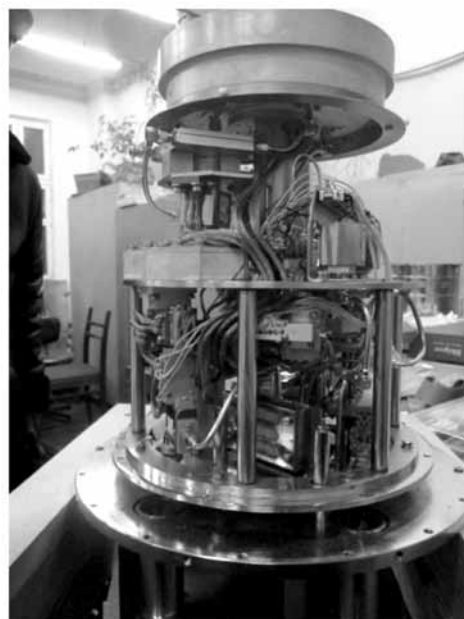


Рис. 4. Внутренний объем КПФБ с хладопроводами

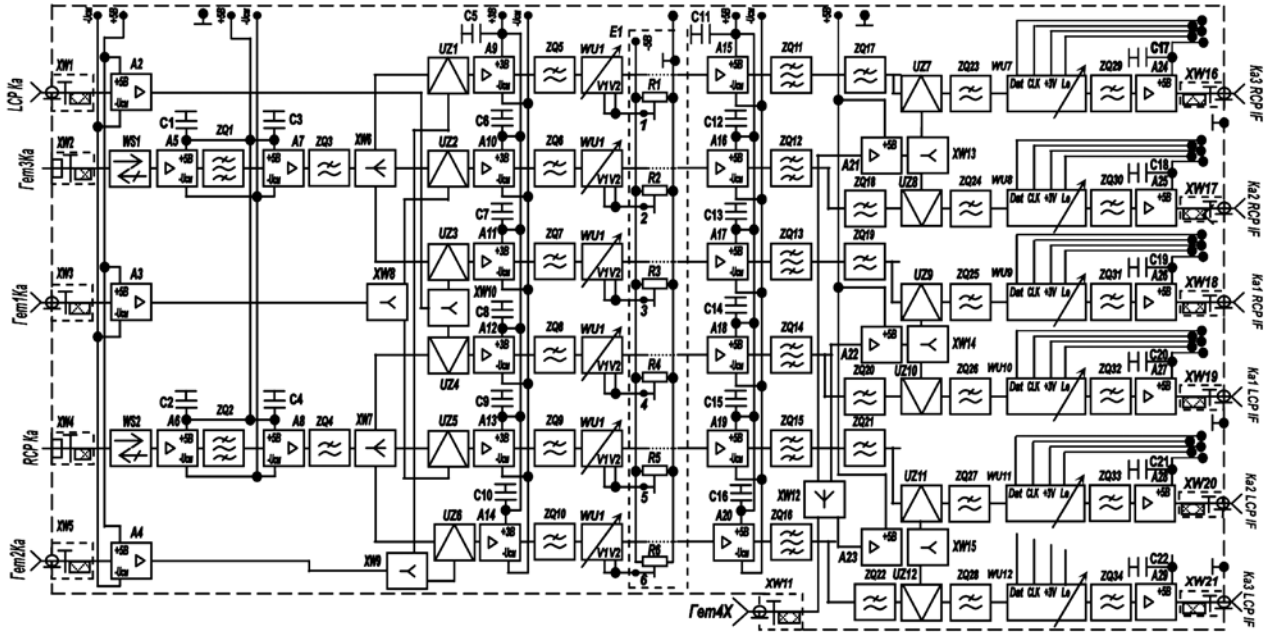


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема двухканального блока преобразования частоты *Ka*-диапазона

а также снижения массогабаритных характеристик этого блока.

БПЧ-*Ka* осуществляет преобразование принимаемых сигналов частотой 28,0–34,0 ГГц в сигналы с промежуточной частотой в диапазоне 1,0–2,0 ГГц.

Из приведенной на рис. 5 схемы БПЧ-*Ka* видно, что это СВЧ-устройство является двухканальным по входу (для правой и левой поляризации) и шестиканальным по выходу промежуточной частоты – по три выхода на каждую поляризацию, что обусловлено требованием минимальной неравномерности амплитудно-частотной характеристики канала промежуточной частоты при преобразовании сигнала из широкой полосы принимаемого радиоастрономического сигнала.

В каждом канале традиционная структура (входная маломощная часть, первое преобразование, узлы усиления и фильтрации первого преобразования, второе преобразование, узлы усиления и фильтрации второго преобразова-

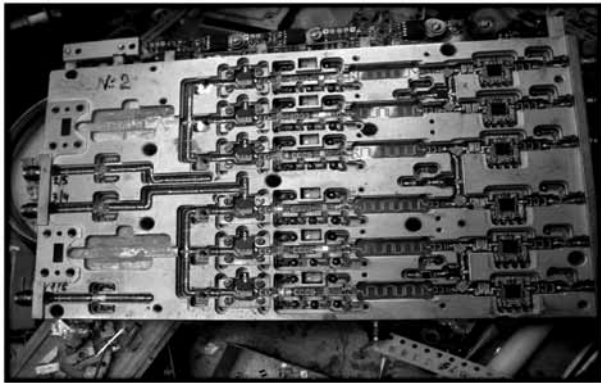


Рис. 6. Приемопреобразующий модуль *Ka*-диапазона

ния) дополняется полосно-пропускающим фильтром и фильтром ослабления второй гармоники.

Отметим, что такое схематическое решение приводит к наличию более чем 100 узлов, однако при традиционной, пюблочной, сборке (когда отдельные узлы соединяются между собой волноводными трактами и коаксиальными кабелями) подобное устройство будет иметь недопустимо большие для внутренних габаритов РПС массогабаритные характеристики.

В результате БПЧ-*Ka* был спроектирован как целостный модуль в виде двухэтажной конструкции, которая имеет множество микрополосковых СВЧ-переходов с одного этажа на другой, соединяющих отдельные узлы блока между собой, что позволило разместить в объеме 172×113×12,3 мм более 100 элементов. Фотография модуля, частично открытого со стороны сигнального тракта, приведена на рис. 6. Здесь видно, что между волноводным трактом и разделителем сигнала на три субканала находится входная маломощная часть, которая после настройки закрывается «радиогерметичными» крышками.

Преимуществом данной конструкции является отсутствие кабельных и волноводных соединений. При этом сигнальный вход приемника – волноводный, имеет сечение 7,2×3,4 мм, входы гетеродинов и выход сигнала промежуточной частоты – коаксиальные.

**Заключение**

Все конструктивные и технологические решения рассмотренных проблем, возникших при создании РПС для антенн малого диаметра, были не только апробированы на макетах, но и успешно реализованы в трех комплектах радиометрических систем современных радиоа-

строномических комплексов. Кроме того, описанный подход к решению указанных проблем рекомендован к широкому применению международной службой РСДБ.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пилипенко А. М., Сундучков И. К., Чмил В. В. и др. Радиометрический приемный комплекс и пути снижения вносимой им погрешности в радиометрические измерения // Технология и конструирование в электронной ап-

паратуре. — 2015. — № 5–6. — С. 14–21. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.14>

2. Теплоизоляционный материал, [www.tsmceramic.com.ua](http://www.tsmceramic.com.ua)

3. Провод с низкой теплопроводностью. [http://www.lakeshore.com/Documents/LSTC\\_wire\\_1.pdf](http://www.lakeshore.com/Documents/LSTC_wire_1.pdf)

Дата поступления рукописи  
в редакцию 05.04 2016 г.

Е. М. ГЛУШЕЧЕНКО, О. М. ПИЛИПЕНКО, Е. В. СЛОНІН,  
І. К. СУНДУЧКОВ, В. В. ЧМІЛЬ

Україна, м. Київ, НВП «Сатурн»  
E-mail: [chmil@nbi.com](mailto:chmil@nbi.com)

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ  
ПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МАЛИХ РАДІОТЕЛЕСКОПІВ

*Наведено нові технологічні рішення та конструктивні підходи щодо проектування радіометричної приймальної системи радіоастрономії для антен малого діаметру. Сформульовано проблеми, які необхідно подолати при реалізації подібних систем. Детально розглянуто конкретні рішення, що пройшли апробацію та пропонуються для реалізації систем такого класу.*

*Ключові слова: радіометрична приймальна система, антена, холодопровід, хвилевід, S/X/Ka-діапазон, перетворювач частоти.*

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.21  
UDC 621. 396. 677:621. 396. 965

Е. N. GLUSCHECHENKO, А. M. PYLYPENKO,  
Е. V. SLONIN, І. K. SUNDUCHKOV, V. V. CHMIL

Ukraine, Kyiv, “Saturn” Research and Development Company PJSC  
E-mail: [chmil@nbi.com](mailto:chmil@nbi.com)

FEATURES OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS  
FOR RECEIVING SYSTEM OF SMALL RADIO TELESCOPES

*The article presents new technological solutions and structural approaches for design of radiometric receiving systems for small diameter antennas. Problems which need to be dealt with in the process of realization of such systems are formulated. All of the considered problems, both structural and technological, encountered when creating radiometric receiving systems for small diameter antennas, were not only tested on the mockups, but also successfully implemented in three sets of radiometric systems of modern radio astronomy facilities. In addition, the described approach to solving these problems is recommended for the wide application by the international VLBI service.*

*Keywords: radiometric receiving system, antenna, cold finger, waveguide, frequency transformer, S/X/Ka-range.*

## REFERENCES

1. Pylypenko A. M., Sunduchkov I. K., Chmil V. V., Chmil V. M., Yatsyk P. O. [Radiometric receiving complex and ways to reduce the radiometric measurements error]. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature,

2015, no. 5-6, pp. 14-21. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.14>

2. [www.tsmceramic.com.ua](http://www.tsmceramic.com.ua)

3. [http://www.lakeshore.com/Documents/LSTC\\_wire\\_1.pdf](http://www.lakeshore.com/Documents/LSTC_wire_1.pdf)