

УДК 520.272.55

КРИОГЕННЫЙ МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И СИСТЕМ ДАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

© 2016 В. Ф. Вдовин^{1,2*}, В. Г. Грачёв³, С. Ю. Дрягин^{1,4},
А. И. Елисеев^{1,2}, Р. К. Камалетдинов³, Д. В. Коротаев^{1,4},
И. В. Леснов^{1,2}, М. А. Мансфельд^{1,4}, Е. Л. Певзнер^{1,4}, В. Г. Перминов^{1,4},
А. М. Пилипенко⁴, **Б. Д. Сапожников**³, В. П. Саурин³

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950 Россия

²Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Нижний Новгород, 603950 Россия

³Особое конструкторское бюро Московского энергетического института, Москва, 111250 Россия

⁴ОКБ развития высоких технологий, Нижний Новгород, 603155 Россия

Поступила в редакцию 5 июня 2015 года; принята в печать 11 ноября 2015 года

В работе представлено решение задачи создания предельно эффективного высоконадежного малошумящего криоэлектронного приемо-передающего тракта для крупной антенной системы, предназначенной для радиоастрономических наблюдений и связи с удаленными космическими летательными аппаратами в X-диапазоне длин волн. Описаны результаты разработки, а также серии лабораторных и натурных тестов по изучению характеристик созданного криогенного малошумящего усилителя. Приемно-передающий тракт, разработанный для обеспечения телекоммуникаций с объектами дальнего космоса (марсианские миссии, радиообсерватории в точке L2 и др.), применялся на практике для связи с действующим спутниками, в том числе с обсерваторией «Радиоастрон», находящейся на сильно вытянутой эллиптической орбите.

Ключевые слова: *аппаратура: детекторы — космические аппараты: инструменты*

1. ВВЕДЕНИЕ

Потребности дальней космической связи достаточно уникальны, однако существующие на сегодняшний день крупногабаритные наземные инструменты зачастую не оснащены приемниками, необходимыми для организации коммуникаций на расстояниях в миллионы километров. Возможны два основных пути создания коммуникационного канала для дальнего космоса: это либо наращивание мощности передающих устройств, либо снижение собственных шумов приемников. Последний подход является более перспективным, так как позволяет ценой не слишком большого повышения уровня мощности излучателя достичь надежной связи с удаленными космическими объектами. При этом как дополнительное преимущество появляется возможность ведения на том же инструменте радиоастрономических наблюдений при довольно высокой чувствительности. Одной из составляющих при осуществлении данного

подхода является создание высоконадежного малошумящего приемо-передающего тракта на основе криоэлектронных усилителей. Реализация идеи такого эффективного высоконадежного модуля для крупной антенной системы, предназначенной для решения коммуникационных задач в X-диапазоне длин волн, является чрезвычайно сложной и комплексной с точки зрения достижения предельно высокой чувствительности одновременно с присутствием мощного излучаемого сигнала в том же антенном тракте. В связи с этим мы оказываемся перед дилеммой. Прежде всего, требуется обеспечить необходимую высокую чувствительность приемника за счет максимального снижения его собственной шумовой температуры [1]. Данная задача, в том числе в X-диапазоне частот, традиционно решается за счет использования самой передовой элементной базы и криогенного охлаждения элементов входного тракта, вносящих основной вклад в общие шумы системы «приемник—антенна—атмосфера». Кроме того, важной составляющей при создании малошумящего приемо-передающего тракта явля-

*E-mail: vdovin@appl.sci-nnov.ru

ется разработка высокоэффективной, но в то же время не вносящей значимых потерь в приемник, развязки. Предельно высокая чувствительность приемника делает весьма вероятным его выход из строя под воздействием мощных, более киловатта, сигналов передающего тракта. Может сыграть драматическую роль не только прямое прохождение через развязки,¹ но и возможное просачивание сигналов через недостаточно качественно выполненные фланцевые соединения волноводов и т.п., включая механические повреждения тракта. Последнее стало причиной выхода из строя разработанного нами криогенного малошумящего усилителя (КриоМШУ) во время тестирования в составе комплекса на антенне. Представляемый в работе КриоМШУ первоначально предназначался для обеспечения телекоммуникаций с автоматической межпланетной станцией «Фобос-Грунт» в удаленной части траектории, однако в силу того, что миссия не состоялась, разработка была переадресована на иные задачи.

2. СУЩЕСТВУЮЩИЙ МИРОВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЗАДЕЛ (СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК НА ТЕКУЩИЙ МОМЕНТ)

Специфика X-диапазона длин волн обусловлена наличием высокоэффективной элементной базы усилительной техники, на сегодняшний день это прежде всего так называемые НЕМТ (High Electron Mobility Transistors) — транзисторы с высокой подвижностью электронов, относящиеся к полевым транзисторам [2, 3] и НВТ (Heterostructure Bipolar Transistors) — биполярные транзисторы на гетероструктурах [4, 5]. Биполярные структуры активно развиваются в последнее время, и есть основания ожидать, что вскоре они превзойдут по своим параметрам полевые. Однако обширный научно-технический задел трех последних десятилетий развития НЕМТ на текущий момент обеспечивает их полную конкурентоспособность и возможность достижения уровня собственных шумов криогенного МШУ X-диапазона порядка 4–8 К.

Особенности транзисторной элементной базы (в отличие, к примеру, от сверхпроводниковой) диктуют довольно мягкие требования к криогенному обеспечению. Необходимо создать уровень криостатирования, достаточный для достижения предельных параметров используемых транзисторных сборок. Он весьма умерен по современным понятиям [6] и обеспечивается криорефрижераторами

замкнутого цикла водородного уровня температур: 5–15 К. Широкий круг производителей (Leybold, Janis, Sumitomo, Cryomech, Air Liquid и др.) предлагают обширный спектр коммерческих газовых криогенных машин (ГКМ). Типичная ГКМ [7] работает по принципу пульсационной трубы и обладает весьма низким уровнем механических вибраций.

Использование газовых криорефрижераторов предпочтительнее альтернативных вариантов криостатирования [8], в частности, варианта с применением криоаккумуляторов на базе жидких криоагентов. Жидкий азот относительно дешев и доступен, однако даже при откачке паров не в состоянии обеспечить охлаждение ниже температуры тройной точки азота, или 65 К, что явно недостаточно для достижения предельных параметров транзисторных МШУ X-диапазона длин волн. Жидкий водород, способный обеспечить нужный уровень температуры криостатирования, представляет собой довольно взрывоопасный газ и требует особых условий эксплуатации, поэтому также является неподходящим вариантом для охлаждения КриоМШУ. Жидкий гелий потенциально с запасом перекрывает требование по уровню температуры криостатирования, однако его стоимость и ограниченная доступность делают подобную схему неконкурентоспособной по сравнению с существующими системами криостатирования на базе криорефрижераторов или ГКМ. Последние, разумеется, требуют более значительных стартовых вложений в оборудование (стоимость криостата с ГКМ вдвое–втрое выше, чем заливного криоаккумулятора), которые, однако, быстро окупаются за счет меньших расходов на эксплуатацию и ее удобства.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО СВЧ-ТРАКТА X-ДИАПАЗОНА

Разработанная структурная схема приемно-передающего СВЧ-тракта X-диапазона показана на рис. 1.

Характеристики созданного макетного образца приемно-передающего СВЧ-тракта:

- диапазон рабочих частот 8.4–8.5 ГГц;
- эквивалентная шумовая температура входа охлаждаемого усилителя при температуре охлаждения 15 К не более 3.5 К;
- эквивалентная шумовая температура блока без полосно-пропускающего фильтра не более 6 К;
- коэффициент усиления блока не менее 30 дБ;

¹Здесь возникает очевидная техническая проблема конструирования и изготовления соответствующей специализированной элементной базы.

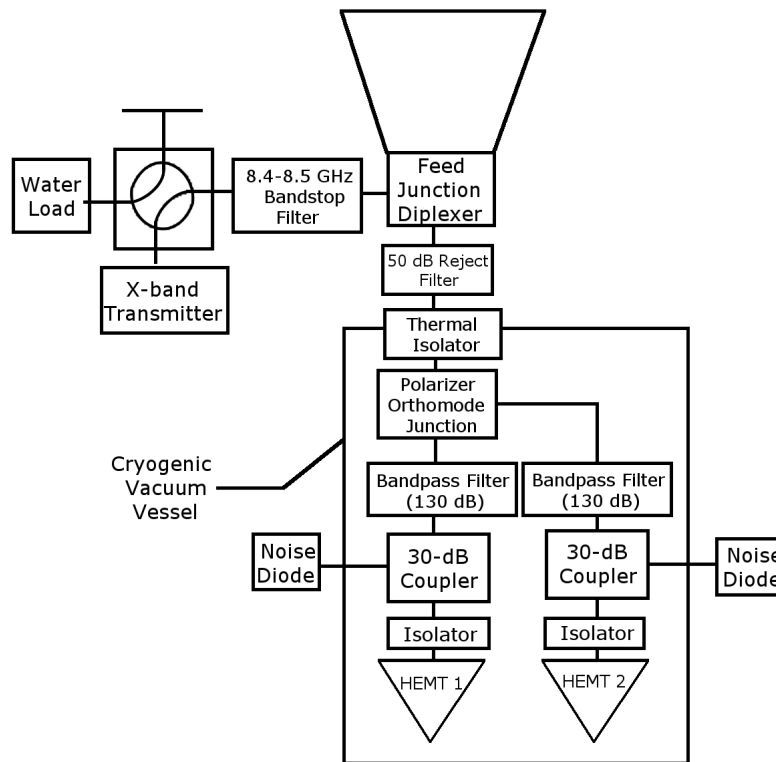


Рис. 1. Структурная схема приемно-передающего тракта X-диапазона.

— интервал температур охлаждения, в котором сохраняется работоспособность охлаждаемого усилителя, 4–300 К.

Удобство эксплуатации рефрижератора замкнутого цикла делает систему пригодной для режима полуавтономной эксплуатации в составе аппаратного комплекса и практически не требует текущего сервиса, необходимого, к примеру, для заливных систем криостатирования, и лишь ограничивается проблемой обслуживания компрессорных установок в соответствии с предписанным регламентом.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение шумовой температуры осуществлялось на едином эталоне методом «Y-фактор» при изменении температуры эталона от температуры окружающей среды до температуры жидкого азота. Лабораторные тесты показали высокую эффективность и удовлетворительные шумовые и эксплуатационные характеристики КриоМШУ, собственная шумовая температура МШУ не превышает 6 К. Вслед за лабораторными тестами были выполнены испытания на телескопе ТНА-1500 в Медвежьих Озерах (Московская область). Схема установки КриоМШУ на ТНА-1500 представлена на рис. 2.

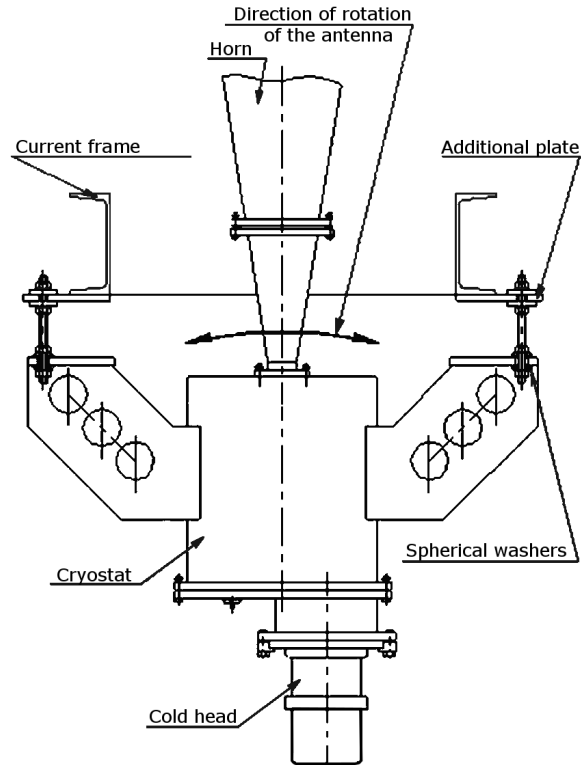


Рис. 2. Схема установки КриоМШУ на ТНА-1500.

Данные измерений

Параметр	Канал 1	Канал 2
Рабочий диапазон частот, ГГц	8.4–8.5	8.4–8.5
Коэффициент усиления по мощности в рабочем диапазоне частот (не менее), дБ	9	29
Эквивалентная шумовая температура входа в диапазоне рабочих частот при охлаждении усилителя до 7 К (не более), К	4.9	5.7
Неравномерность коэффициента усиления по мощности в рабочем диапазоне частот (не более), дБ	0.5	0.5

Натурные тесты на телескопе дали оценку шумовой температуры системы, включая шумы антенны, менее 20 К. Данные измерений представлены в таблице.

По результатам тестирования на телескопе было установлено, что добротность антенного комплекса ТНА-1500 с центральным облучателем при угле места 70° – 72° и положении всех четырех опор 45 мм составляет $Q_1 = 53.7 \pm 0.5$ дБ, $Q_2 = 56.7 \pm 0.5$ дБ. Добротность антенного комплекса ТНА-1500 с облучателем № 4 (оптимальный рупор) при угле места 13° – 15° $Q_1 = 58.4$ дБ. Добротность антенного комплекса ТНА-1500 с облучателем № 4 (оптимальный рупор) при угле места 90° $Q_1 = 59.5$ дБ. При подготовке комплекса КриоМШУ на телескопе ТНА-1500 к вводу в эксплуатацию также были выполнены следующие работы.

(1) Измерение шумовой температуры системы «Антенна + Приемник» ($T_a + T_r$) при углах места 12° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 72° . Это даёт возможность получить экспериментальную зависимость «Температура системы–угол места» методом интерполяции. В частности, значение ($T_a + T_r$) в зените превышает измеренное значение ($T_a + T_r$) на угле 72° примерно на 10%.

(2) Точная юстировка антенной системы после установки передатчика X-диапазона по проекту «Фобос-Грунт» [9], что обеспечило увеличение коэффициента усиления антенны ТНА-1500 на 10%.

(3) Замена теплого МШУ (39 К) с теплым СВЧ-трактом (ТСВЧ-тракт) (переход + селектор поляризации) (7 К) и волноводного переключателя (ТВП) (14 К) на штатный, полностью охлаждаемый тракт и МШУ без волноводного переключателя, в результате чего суммарная

температура приемной системы на центральном рупоре прямо-передающего тракта уменьшилась до величины 6 К.

Измеренное значение добротности комплекса ТНА-1500 обеспечивает технические требования к необходимому уровню потенциала радиолинии и для проекта «Фобос-Грунт» [10], и для китайского микроспутника УН-1. В результате выполнения заключительных работ ожидаемая величина добротности ТНА-1500 на центральном рупоре с приемопередающим трактом на угле места 90° составит величину 58 дБ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как лабораторные тесты, так и тесты, выполненные на антенне, продемонстрировали высокую эффективность и удовлетворительные шумовые и эксплуатационные характеристики КриоМШУ: собственная шумовая температура МШУ не превышает 6 К, что обеспечивает шумовую температуру системы менее 20 К. КриоМШУ X-диапазона длин волн установлен на телескопе и успешно работает. Также успешно данная разработка использовалась на практике для сопровождения миссии «Радиоастрон» [11]. Планировалось её использование для проекта «Фобос-Грунт» [9, 10] — первого после длительного перерыва российского проекта, связанного с дальним космосом. В связи с неудачным запуском миссии «Фобос-Грунт» данная разработка оказалась временно невостребованной, так как в настоящий момент у России нет проектов, связанных с дальним космосом. Однако принятые решения о повторении миссии к Марсу [12] дают основание надеяться на актуальность данной разработки в перспективе. Имеются предварительные договоренности о включении инструмента с представленным здесь КриоМШУ в серию международных проектов, связанных с миссиями дальнего космоса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны сотрудникам радиотелескопа ТНА-1500 за содействие в выполнении натурных экспериментов, а производственникам ИПФ РАН за оперативную и качественную работу по изготовлению узлов и элементов КриоМШУ. Авторы посвящают эту работу светлой памяти нашего дорогого коллеги и давнего партнера А. Б. Берлина, недавно ушедшего от нас, чей любезно предоставленный обзор по современным КриоМШУ лег в основу обзорной части настоящей статьи. Его дельные советы за долгие годы сотрудничества, начавшегося в далекие 70-е годы, позволили авторам выйти на нынешний уровень

развития разработок аппаратуры для радиоастрономических наблюдений. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 3.2054.2014/К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. V. Kalashnikov, A. V. Khudchenko, and V. P. Koshelets, *Bull. Rus. Acad. Sci. Physics* **77**, 28 (2013).
2. A. A. Andreev, M. L. Znaveskin, I. O. Mayboroda, et al., *J. Radio Electronics*, No. 1 (2014); <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/4/text.html>
3. L. Shen, S. Heikman, B. Moran, et al., *Electron Device Lett.* **77**, 457 (2002).
4. H. Yu, S. Choi, S. Jeon, and M. Kim, *Electronics Lett.* **50**, 377 (2014).
5. S. P. Watkins, O. J. Pitts, C. Dale, et al., *J. Crystal Growth* **221**, 59 (2000).
6. V. F. Vdovin, A. I. Eliseev, I. I. Zinchenko, et al., *J. Communications Technology and Electronics* **50**, 1118 (2005).
7. V. F. Vdovin, *Radiophysics and Quantum Electronics* **48**, 779 (2005).
8. G. Ventura and L. Risegari, *The Art of Cryogenics: Low-Temperature Experimental Techniques* (Elsevier, Amsterdam, 2008).
9. Г. А. Аванесов, Б. С. Жуков, Е. Б. Краснопецева, М. М. Железнов, Препринт № 2128 (Институт космических исследований РАН, Москва, 2006).
10. В. С. Авдеевский, Э. Л. Аким, М. Я. Маров и др., *Космонавтика и ракетостроение* **19**, 8 (2000).
11. N. S. Kardashev, *Phys. Uspekhi* **52**, 1127 (2009).
12. <http://rus.postimees.ee/803704/>

Cryogenically Cooled Low-Noise Amplifier for Radio-Astronomical Observations and Centimeter-Wave Deep-Space Communications Systems

V. F. Vdovin, V. G. Grachev, S. Yu. Dryagin, A. I. Eliseev, R. K. Kamaletdinov, D. V. Korotaev, I. V. Lesnov, M. A. Mansfield, E. L. Pevzner, V. G. Perminov, A. M. Pilipenko, **B. D. Sapozhnikov**, and V. P. Saurin

We report a design solution for a highly reliable, low-noise and extremely efficient cryogenically cooled transmit/receive unit for a large antenna system meant for radio-astronomical observations and deep-space communications in the X band. We describe our design solution and the results of a series of laboratory and antenna tests carried out in order to investigate the properties of the cryogenically cooled low-noise amplifier developed. The transmit/receive unit designed for deep-space communications (Mars missions, radio observatories located at Lagrangian point L2, etc.) was used in practice for communication with live satellites including “Radioastron” observatory, which moves in a highly elliptical orbit.

Keywords: *instrumentation: detectors—space vehicles: instruments*