

МШУ входного криоблока многоканального приёмника 8-мм диапазона для спектральных наблюдений

В. М. Миннебаев, В. В. Краснов

Представлены результаты создания малошумящих усилителей 8-мм диапазона, устойчиво работающих при температуре $T_{\text{ОКР}} = 20\text{-}30\text{ K}$ в четырёхканальном входном криоблоке многоканального приёмника для спектральных наблюдений РТ-22 ФИАН. Работы проводились в рамках программы модернизации приёмного комплекса РТ-22 ФИАН. Разработанные МШУ обладают шумовой температурой $T_{\text{ш}} \leq 50\text{ K}$ при коэффициенте усиления $K_p = 29,5 \pm 2\text{ дБ}$ в полосе рабочих частот $\Delta F = 34\text{-}37,5\text{ ГГц}$ при $T_{\text{ОКР}} = 22\text{ K}$. Во входном криоблоке формируются четыре независимых канала приёма информации, что увеличит информативность радиотелескопа после ввода в эксплуатацию нового преобразовательного блока в 4 раза при наблюдениях молекулярных радиолиний и в 8 раз при наблюдениях рекомбинационных радиолиний.
Ключевые слова: малошумящий усилитель, многоканальный приёмник, криотемпература, радиотелескоп, рекомбинационная радиолиния

LNA for multichannel receiver 8-mm range input kriblok for spectral observations

V. M. Minnebaev, V. V. Krasnov

The results of the creation of low-noise amplifiers 8-mm range, stable operating temperature $T_{\text{AMB}} = 20\text{-}30\text{ K}$ in quad input kribloke multichannel receiver for spectroscopic observations of the RT-22 FIAN. Work was carried out within the framework of the modernization program receiving complex RT-22 FIAN. Designed LNA noise temperature $T_{\text{ш}} \leq 50\text{ K}$ have a gain $\text{GAIN} = 29,5 \pm 2\text{ dB}$ in operating frequency band $\Delta F = 34\text{-}37,5\text{ GHz}$ at $T_{\text{AMB}} = 22\text{ K}$. In the input kribloke formed four independent channels of receiving information that will increase the information content of the radio telescope after the commissioning of the new converter unit 4 times during observations of molecular radio lines and 8 times for observations recombination radio lines.

Keywords: low noise amplifier, multichannel receiver, krio temperature, radio telescope recombination radio lines

Введение

Целью модернизации охлаждаемых приёмников РТ-22 ФИАН [1] является существенное повышение эффективности наблюдений, в частности, спектральных наблюдений в диапазоне 8-мм – на порядок величины.

Наиболее важным параметром приёмного устройства, определяющим эффективность проведения наблюдений, является его чувствительность, которая определяется минимальным обнаруживаемым сигналом, равным по величине приведённой ко входу приёмника среднеквадратичной ошибке измерений. Охлаждаемые приёмники РТ-22 ФИАН это приёмники модуляционного типа с симметричной диаграммой модуляции, позволяющей существенно ослабить влияние излучения атмосферы и других распределённых источников шумовых сигналов на показания радиометра.

Для модуляционного приёмника формула определения чувствительности имеет вид:

$$\Delta T = 2 * T_{\text{ш}} / \sqrt{\Delta f * t},$$

где шумовая температура системы $T_{\text{ш}}$ складывается из шумов приёмника, антенны и атмосферы, Δf – полоса пропускания приёмника до детектора, t – время накопления сигнала.

Очевидно, важнейшим направлением повышения эффективности является снижение шумовой температуры $T_{\text{ш}}$ системы. С другой стороны, для спектральных приёмников полоса пропускания до детектора определяется требуемым частотным разрешением. Кроме того, остаётся возможность методически увеличить время накопления сигнала t ,

вводя дополнительные каналы приёма информации.

Многоканальная структура приёмника

Выигрыш по времени накопления в два раза достигается за счёт модернизации системы модуляции. До настоящего времени наблюдения проводились методом диаграммной модуляции, при которой на вход приёмника поочередно подключаются рупорные облучатели, симметрично вынесенные из касегреновского фокуса радиотелескопа. В этом случае через один облучатель принимается излучение от источника, через второй – от области сравнения, отстоящей на 23 угл. мин по азимуту. При замене установленного на входе переключателя «У»-типа на «Х» можно одновременно принимать излучение от обоих облучателей, когда каждый полупериод частоты модуляции информация от объекта будет поступать в один из каналов приёмника.

В новом входном криоблоке реализован приём обеих поляризаций космического радиоизлучения. Поскольку каждая из поляризаций поступает на «свой» переключатель «Х»-типа, всего формируется 4 канала независимого приёма (рис. 1).

Эксплуатация МШУ в составе многоканального криоблока, охлаждаемого микрокриогенной системой замкнутого цикла водородного уровня охлаждения (с заданной хладпроизводительностью и, соответственно, габаритными ограничениями), накладывает дополнительные требования на создаваемые МШУ.

Малозумящие транзисторные криоусилители 8-мм диапазона

К основным задачам, решаемым в рамках проекта модернизации МШУ в составе многоканального криоблока, следует отнести:

- 1) выбор активной элементной базы МШУ, устойчиво работоспособной при криотемпературах;
- 2) повторяемость (воспроизводимость) шумовых и амплитудно-частотных характеристик модулей МШУ при криотемпературах;
- 3) подавление зеркального канала приёма с целью снижения уровня шумовой мощности, поступающей на вход детекторов сигнала;

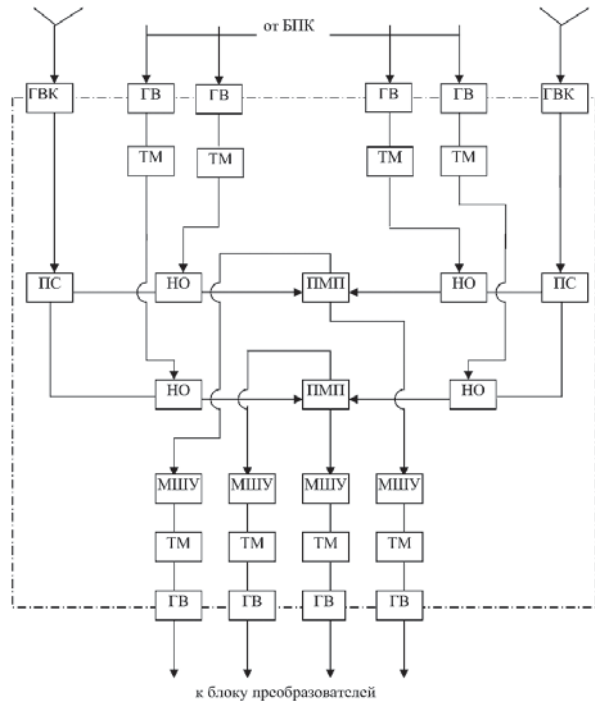


Рис. 1

Структурная схема входного криоблока:

- ГВК – гермоввод круглого сечения,
- НО – направленный ответвитель,
- ПМП – переключатель с магнитной памятью,
- ПС – поляризационный селектор,
- МШУ – малозумящий усилитель,
- ТМ – тепловой мост,
- БПК – блок подшумливания и калибровки

- 4) минимизация энергопотребления модулей с целью, во-первых, минимизации времени выхода криоблока на стационарный режим и, во-вторых, снижения собственной температуры модулей МШУ;
- 5) минимизация габаритных размеров модулей МШУ для снижения теплового сопротивления и снижения габаритов криоблока.

При предварительных исследованиях проведено конструктивное и схемотехническое проектирование, а также макетирование охлаждаемых МШУ на базе арсенид-галлиевых дискретных транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) [2]. Выбор СВЧ элементной базы обусловлен, прежде всего, повторяемостью СВЧ характеристик и устойчивой работоспособностью МИС в широком диапазоне температур и, что особенно важно, при криотемпературах. Решением задачи № 1 и № 2, а именно выбор элементной базы, подтверждение

работоспособности и воспроизводимости характеристик при $T = 20 \text{ K}$, стало использование в качестве активного элемента в составе модулей МШУ МИС XL1000 (ф. MimixBroadband) [2, 3]. Проведённые ранее исследования показали, что:

1) МИС XL1000 – является работоспособной при криотемпературах;
2) МИС XL1000 – устойчиво работоспособна при входной и выходной нагрузках в виде полосно-пропускающего фильтра;

3) микрополосковые вентили 1МС-37.5-4-37BW8.1 (ЗАО «Аргус-ЕТ»), являясь широкополосными устройствами, незначительно изменяют свои характеристики при криотемпературах, что позволяет заменить межкаскадные и выходные волноводные вентили, составлявшие значительную часть габаритов МШУ.

Конструкция модуля МШУ была отработана в соответствии с требованиями, определёнными авторами на основе многолетнего опыта проектирования устройств, функционирующих при температурах водородного уровня:

1) конструкция должна обеспечить передачу СВЧ сигнала от волновода соответствующего сечения к кристаллу МИС (например, волноводно-микрополосковые переходы) [4, 5];

2) наличие в составе МШУ цепей фильтрации и подачи питания (а, соответственно, и вторичных источников питания, находящихся вне объёма криоблока);

3) включение в состав СВЧ трактов модулей МШУ цепей согласования входных и выходных импедансов МИС – эти цепи необходимы в виду того, что кристаллы МИС обладают волновыми сопротивлениями отличными (порой значительно) от импедансов стандартных СВЧ трактов;

4) расположение микрополосковых линий передачи и активных элементов в запердельных волноводах, позволяющих успешно противостоять распространению высших типов колебаний и, как следствие, снижающих возможность возникновения условий самовозбуждения, что особенно опасно при снижении рабочих температур корпуса, так как при этом значительно возрастает внутренняя крутизна СВЧ транзисторов;

5) использование микрополосковых вентиляей, с целью обеспечения регуляро-

ности СВЧ тракта и минимизации габаритных размеров модулей МШУ.

Отметим, что при одинаковой надёжности собственно транзисторов (НЕМТ), надёжность МШУ на основе ГИС с дискретными НЕМТ существенно ниже МШУ с использованием МИС ввиду большего количества микросоединений, изготовление которых связано с профессиональным умением операторов сборки и настройки. Это касается и воспроизводимости характеристик многокаскадных МШУ миллиметрового диапазона.

Представленные соображения показывают неочевидность преимущественного использования дискретных НЕМТ с точки зрения окончательных СВЧ характеристик (шумовая температура $T_{ш}$, коэффициент усиления K_p , неравномерность коэффициента усиления ΔK_p) охлаждаемого МШУ. В тоже время использование МИС упрощает процессы сборки и настройки интегральных схем и повышает эксплуатационную надёжность усилителя в целом.

Обеспечение подавления зеркального канала приёма в составе МШУ обеспечивается за счёт применения микрополоскового полосно-пропускающего фильтра (ППФ), изготовленного на кварцевой подложке толщиной 200 мкм по тонкоплёночной технологии. Предварительное электромагнитное моделирование амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ППФ с максимально плоской характеристикой в среде Microwave Office показывает возможность реализации требуемых характеристик [2]. Внешний вид микрополоскового ППФ, а также его расчётные и измеренные АЧХ в волноводной оснастке с вентилями и без них, представлены на рис. 2 и рис. 3.

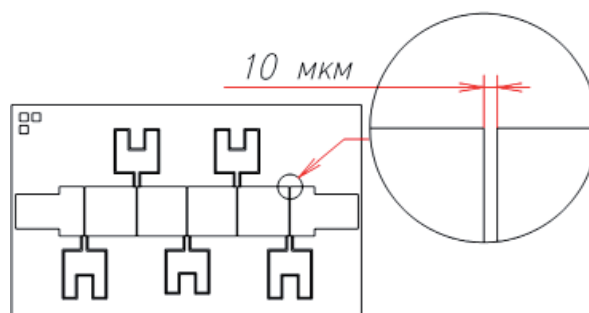


Рис. 2

Топология микрополоскового ППФ

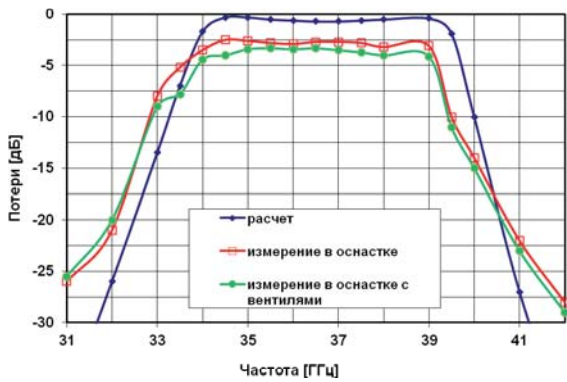


Рис. 3

АЧХ микрополоскового ППФ

Отличие в АЧХ расчётного и измеренного фильтров может быть объяснено несколькими причинами:

- 1) реальный критический размер зазора (10 мкм) составил $12 \pm 1,2$ мкм;
- 2) ширина микрополосковых индуктивностей составила $32 \pm 1,5$ мкм вместо 26 мкм при расчёте;
- 3) наличие неидеальности («бахрома») микрополосковых линий в области критических размеров: зазор и индуктивность;
- 4) дополнительные потери в СВЧ оснастке.

Тем не менее, поскольку в целом требования к АЧХ ППФ в целом удовлетворяют поставленной задаче, авторами было принято решение об их использовании в составе проектируемого МШУ. Кроме того, микрополосковый ППФ имеет габариты в 20-30 раз меньше нежели волноводный фильтр с аналогичными характеристиками, что позволяет решать задачу № 5.

Вышеизложенное позволило изготовить криоМШУ в односекционном варианте, что существенно уменьшило габариты изделия (рис. 4) и 4-х канального криоблока в целом.

Измеренные при $T_{OKP} = 22$ К АЧХ и шумовые характеристики каждого из четырёх криоМШУ представлены на рис. 5. Красной линией отмечена шумовая температура $T_{ш} = 50$ К, а красным прямоугольником – область допустимого изменения неравномерности коэффициента МШУ $K_p = 3$ дБ. Полученные экспериментальные результаты подтверждают удовлетворение граничным условиям и показывают возможность

использования изготовленных МШУ в составе четырёхканального входного криоблока. Комплект включает в себя четыре МШУ, обладающих $T_{ш} \leq 50$ К, $K_p = 29,5 \pm 2$ дБ, $\Delta F = 34-37,5$ ГГц при $T_{OKP} = 22-30$ К.

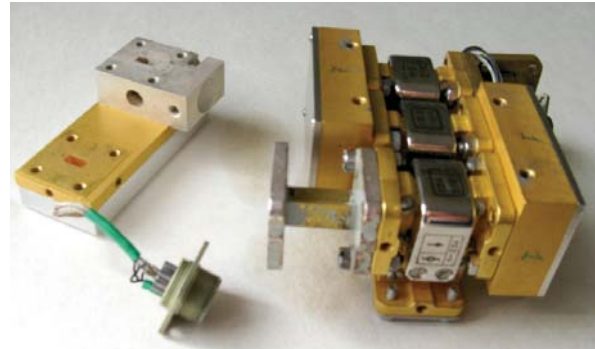


Рис. 4

МШУ на базе МИС XL1000: односекционный (слева), заменивший двухсекционный (справа), ранее работавший в одноканальном входном криоблоке

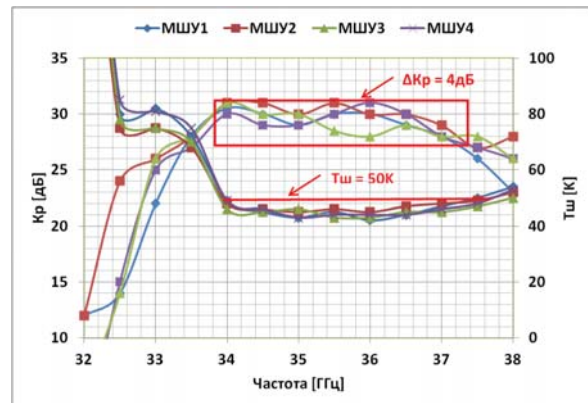


Рис. 5

АЧХ и шумовые характеристики криоМШУ

Эксплуатация 4-х канального входного криоблока в составе штатного приёмника 8-мм диапазона РТ-22 ФИАН

Шумовая температура приёмника с охлаждённой до криогенных температур входной частью определяется не только шумами малошумящего усилителя, но и потерями СВЧ сигнала в элементах входного тракта приёмника до МШУ. Для приведённой на рис. 1 схемы построения входного блока модуляционного радиометра эти потери весьма существенны, необходимо комплексное захлаживание всех СВЧ трактов до криогенных темпе-

ратур. Для количественной оценки значимости шумового вклада СВЧ узлов входного тракта приёмника приведём расчётную таблицу шумовых температур нового криоблока.

Как видно из таблицы, шумовой вклад узлов СВЧ тракта, работающих при криогенных температурах, оказывается незначителен. Определяющими шумовую температуру приёмника являются шумы ТРУ.

Поскольку шумовой вклад входных трактов прямо зависит от их физической температуры, вышесказанное справедливо, когда криосистема обеспечивает требуемые рабочие температуры узлов приёмника. Проведённые измерения подтвердили теплофизический расчёт входного криоблока: суммарные теплопритоки не превышают штатной производительности микрокриогенных систем замкнутого цикла (МКС ЗЦ) производства «Сибкриотехника» (около 3 Вт).

В результате шумовая температура модуляционного радиометра, приведённая ко входу круглого гермоввода, составила $T_{ш.вх} \leq 150$ К по худшему из плеч любого канала, с учётом необходимого «подшумливания».

При проведении летом 2014 года в ПРАО АКЦ ФИАН первых спектральных наблюдений с новым входным криоблоком сигнал с выхода одного из каналов поступал в блок преобразователей, обеспечивающий параллельный приём двух спектральных линий в рабочем

диапазоне 34-37,5 ГГц [6]. Разнос по частоте двух принимаемых участков входной полосы может варьироваться от 0 до 1,9 ГГц. Представлены результаты наблюдений двух рекомбинационных радиолиний (РРЛ) водорода H56 α и H57 α на частотах 36,466 и 34,596 ГГц (рис. 6), хорошо согласующиеся с ожидаемой расчётной чувствительностью многоканального приёмника с новым входным криоблоком.

В настоящее время в ПРАО АКЦ ФИАН создаётся новый 4-канальный по входу и 8-канальный по выходу блок преобразователей, с которым будут задействованы все 4 канала входного криоблока.

Выводы

1. Разработаны и изготовлены охлаждаемые мал шумящие усилители с $T_{ш} \leq 50$ К, $K_p = 29,5 \pm 2$ дБ в полосе рабочих частот $\Delta F = 34-37,5$ ГГц при $T_{окр} = 22$ К, установленные в четырёхканальном входном криоблоке приёмника 8-мм диапазона РТ-22 ФИАН. При этом вклад приёмника в шумовую температуру системы снизился на 50 К по сравнению с одноканальным входным криоблоком.

2. Во входном криоблоке формируются четыре независимых канала приёма информации, что увеличит информативность радиотелескопа после ввода в эксплуатацию нового преобразовательного блока в 4 раза при наблюдениях молекулярных радиолиний и в 8 раз при наблюдениях РРЛ.

Таблица

Расчётные значения вклада шумов узлов криоблока в шумовую температуру приёмника

Узел СВЧ тракта	Коэффициент передачи, дБ	Физическая температура, К	Вклад в $T_{ш}$ приёмника, К
Гермоввод с тепловым мостом (нержавеющая сталь)	- 0,3	295	23
ПС	- 0,3	50	5
НО	- 0,15	50	2
Волноводный тракт	- 0,15	40	2
ПМП	- 0,4	40	6
МШУ	30	30	62*
Всего			100

*Шумовая температура усилителя: 45 К.



Рис. 6

Результаты наблюдения РРЛ водорода H56 α и H57 α от источника «Орион А». Синие кривые – одиночные спектры, накопление 200 с, красные кривые – усреднение 16 спектров, верхнее окно – канал А (спектр H56 α 36466.27 МГц), нижнее окно – канал В (спектр H57 α 34596.38 МГц)

Литература

1. Краснов В. В. Охлаждаемые твердотельные приёмники миллиметрового диапазона РТ-22 ФИАН // Труды ФИАН Радиоастрономическая техника и методы. – Том 229. – Москва, 2000. – С. 61-75.
2. Краснов В. В., Миннебаев В. М. Опыт разработки криогенных малошумящих усилителей мм-диапазона для приёмников РТ-22 // Тезисы докладов Радиоастрономической конференции «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов», 22-27 сентября 2008 г., РФ, п. Н. Архыз, Карачаево-Черкессия. – С. 50.
3. Краснов В. В., Миннебаев В. М. Криогенный малошумящий усилитель 8-мм диапазона на базе МИС XL1000 // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2008. – Вып. 2. – С. 30-33.
4. Дорофеев А. А., Миннебаев В. М. Патент на изобретение №2206940 «Интегральная микро-

схема КВЧ диапазона» – Бюллетень изобретений № 17, 20.06.2003, 812 с.

5. Миннебаев В. М. Свидетельство на полезную модель № 23012 «Контактодержатель КВЧ диапазона» – Бюллетень изобретений № 17, 20.06.2003, 819 с.

6. Краснов В. В., Гусев В. А., Девяткин В. Я., Миннебаев В. М. 4-х канальный входной криоблок радиометра 8-мм диапазона РТ-22 ФИАН // Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии», 22-26 сентября 2014 г., РФ, г. Пушино. – С. 104.

References

1. Krasnov V. V. Cooled solid-state millimeter-wave receivers RT-22 FIAN. *Trudy FIAN Radioastronomicheskaya tekhnika i metody* (Proc. FIAN Radio Astronomy techniques and methods), 2000, vol. 229, pp. 61-75.

2. Krasnov V. V., Minnebaev V. M. Experience in the development of cryogenic low noise amplifiers of mm-band for RT-22 receivers. *Tezisy докладov Radioastronomicheskoy konferentsii «Povyshenie effektivnosti i modernizatsiya radioteleskopov»* (Abstracts of Radio Astronomy conference «Improving the efficiency and modernization of telescopes»), 22-27 September 2008, Russia, N. Arkhyz, Karachay Cherkessia, p. 50.

3. Krasnov V. V., Minnebaev V. M. Cryogenic low noise amplifier of 8-mm range based MIS XL1000. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2008, no. 2, pp. 30-33.

4. Dorofeev A. A., Minnebaev V. M. Patent for an invention № 2206940 «IC chip of EHF range». Bulletin of Inventions № 17, 20.06.2003, 812 p.

5. Minnebaev V. M., The certificate for a utility model № 23012 «Contact clip of EHF range». Bulletin of Inventions № 17, 20.06.2003, 819 p.

6. Krasnov V. V., Gusev V. A., Devyatkin V. Ya., Minnebaev V. M. *Tezisy докладov Vserossiiskoy astronomicheskoy konferentsii «Radioteleskopy, apparatura i metody radioastronomii»* (Abstracts Russian astronomical conference «Radio telescopes, instruments and techniques of radio astronomy»), 22-26 September 2014, RF, Pushchino, p. 104.