

УДК 537.962: 621.382.32 В. И. ПОДЪЯЧИЙ, А. М. КОРОЛЕВ,
В. В. МЫШЕНКО, В. М. ШУЛЬГА
Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: k_w_m@ukr.net

ПРИЕМНЫЙ МОДУЛЬ 2-ММ ДИАПАЗОНА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЛИНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА НА ЧАСТОТЕ 142.2 ГГц

Для наблюдений линии излучения атмосферного озона на частоте 142.2 ГГц разработан малошумящий неохлаждаемый приемник. Получены значения двуполосной шумовой температуры приемника около 350 К в полосе частот 130 ÷ 150 ГГц. Описаны критически важные особенности конструкции базовых узлов: смесителя, усилителя промежуточных частот и диплексера. Шумовые характеристики приемника являются лучшими в классе неохлаждаемых гетеродинных приемников в 2-мм диапазоне длин волн.

Ключевые слова: миллиметровые волны, псевдоморфный транзистор с высокой подвижностью электронов, смеситель, атмосферные газы

1. Введение

Мониторинг мезосферного и стратосферного озона (O_3) дает важную информацию для определения энергетического и температурного баланса атмосферы Земли. Преимущества, в силу очевидных обстоятельств, имеют методы исследования атмосферного O_3 , основанные на дистанционном зондировании с поверхности Земли. Первичная информация о состоянии озона и других компонент атмосферы содержится в аппаратурно фиксируемых параметрах их спектральных линий в основном в диапазоне электромагнитных волн выше 100 ГГц [1–3].

В последнее десятилетие из тематики мониторинга O_3 выделилось направление, связанное с исследованием быстро протекающих процессов, например, суточных вариаций высотного распределения озона в мезосфере, горизонтального ветра в средней атмосфере и т. п. [4].

Для исследования быстрых динамических и иных “тонких” процессов стали применяться различные типы спектрометров с высоким частотным разрешением (десятки килогерц) [5–7]. С уменьшением ширины спектрального канала при неизменной чувствительности приемника необходимо пропорционально увеличивать время интегрирования (накопления) сигнала, чтобы при наблюдениях получить необходимое отношение сигнал/шум. Но при монито-

ринге быстрых процессов временной интервал накопления сигнала ограничен сверху (часы). В этом случае желательно использовать более чувствительные приемники и выбирать для наблюдений спектральные линии большой интенсивности. Большинство ранее построенных озонметрических станций, использующих приемники с шумовой температурой порядка 1000 К и линию 110.8 ГГц, имеют весьма ограниченный потенциал для исследования быстро протекающих процессов.

Для диагностики озона очень перспективна линия вблизи частоты 142.2 ГГц [8]. Это 2-мм диапазон, в котором по сравнению с более коротковолновым диапазоном тропосферное затухание еще относительно слабое. Соответственно, есть возможность использовать приемник-спектрометр для проведения круглосуточных и практически всепогодных наблюдений на любой высоте над уровнем моря. При этом интенсивность линии 142.2 ГГц (около 40 К) на порядок превышает интенсивность более низкочастотных линий 3-мм диапазона (103 ГГц, 110 ГГц, ...). Негативным фактором, ограничивающим использование указанной линии, является более высокий уровень шума приемных систем.

В целом малошумящая приемная аппаратура коротковолновой части миллиметрового диапазона востребована и активно совершенствуется в весьма широком спектре радиоастрономических (и не только) приложений. Но в контексте астрономической задачи не все технические под-

ходы к снижению шумов приемлемы. Так, для целей непрерывного мониторинга, даже стационарного, а тем более мобильного, очень неудобны криогенно охлаждаемые системы, несмотря на их отличные шумовые параметры. Приемники с входными транзисторными усилителями, даже их лучшие лабораторные образцы, на частотах более 130 ГГц имеют шумовую температуру не меньше 600 К, т. е. вдвое выше, чем в диапазоне 3 мм, при высокой стоимости.

Опираясь на длительный успешный опыт разработки и эксплуатации приемных систем в диапазоне до 120 ГГц, мы разработали высокочувствительный приемный модуль 2-мм диапазона со смесителем на диоде с барьером Шоттки (ДБШ). Устройство предназначено для проведения наблюдений линии излучения атмосферного озона на частоте 142.2 ГГц, но может использоваться для решения целого ряда радиоастрономических и аэрономических задач в диапазоне 130 ÷ 150 ГГц.

В настоящей статье представлены основные подходы к разработке, особенности конструкции и результаты тестирования созданного приемного модуля.

2. Конструкция приемного модуля

На рис. 1 показана фотография разработанного приемного модуля, включающего диплексер, смеситель и предварительный усилитель промежуточной частоты (ПУПЧ). Ко входу диплексера подключена рупорная антенна. Штатный гетеродин приемника – генератор Ганна 6-мм диапазона с фазовой автоподстройкой и последующим устроением частоты.

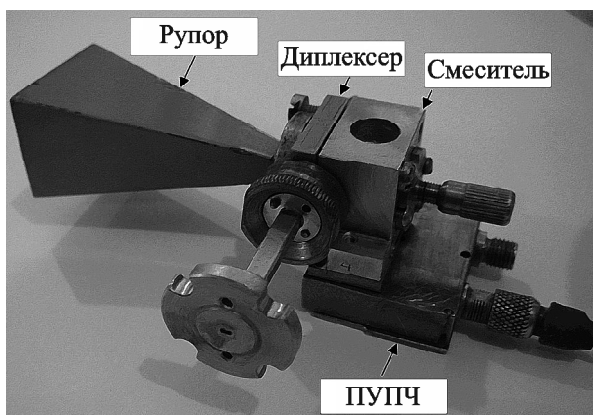


Рис. 1. Фотография разработанного приемного модуля

Ниже представлено описание основных узлов приемного модуля.

2.1. Смеситель

В отсутствие входного усилителя чувствительность супергетеродинного приемника определяется в основном характеристиками смесителя, и его разработке было уделено особое внимание. В миллиметровом диапазоне в качестве нелинейных элементов смесителей используются ДБШ, которые имеют меньшие значения паразитных параметров, чем у других типов диодов. Паразитные параметры диода – его последовательное сопротивление R_s и емкость барьера при нулевом смещении C_{j0} – определяют критическую частоту ДБШ f_{c0} и минимальные паразитные потери диода по входу L_{\min} на частоте сигнала f_s :

$$f_{c0} = \frac{1}{2\pi R_s C_{j0}}, \quad L_{\min} = 1 + 2 \frac{f_s}{f_{c0}}.$$

Минимальные потери реализуются при входном сопротивлении смесительного диода $R_d = 1/(2\pi f_s C_{j0})$. Учет паразитных потерь ДБШ на выходе смесителя не ведет к заметному изменению полученного результата для оптимального входного сопротивления диода [9].

Смесительная камера приемного модуля была разработана на основе стандартного волновода 2-мм диапазона с размерами 1.6×0.8 мм и конструктивно аналогична описанным ранее камерам 3-мм диапазона [9–12]. В настоящей работе исследованы характеристики смесителей с двумя типами бескорпусных GaAs ДБШ, преимущества которых не были заранее очевидны. С использованием первого типа, Т1, ранее были получены предельно низкие значения собственных шумов приемных систем 3-мм диапазона [9]. Второй тип, 1Т9(14), исходно был предназначен для применения в субмиллиметровом диапазоне. Оба типа диодов имеют высокое значение критической частоты, что позволяет реализовать низкий уровень паразитных потерь, но существенно различаются по значениям R_s и C_{j0} . Диод Т1 имеет низкое значение последовательного сопротивления (не более 4 Ом), но достаточно большую емкость барьера (около 10 фФ). Диод 1Т9(14) имеет C_{j0} , с учетом паразитной емкости контак-

тной иглы, не более 2.5 фФ и $R_s = (12 \pm 1)$ Ом в зависимости от качества контакта. Расчет показывает, что уровень минимальных паразитных потерь этих ДБШ практически одинаков, но требуемые для реализации таких потерь значения R_d отличаются в несколько раз за счет различия емкостей барьера этих диодов. Шунтирующее действие последних усложняет также согласование нелинейного элемента с волноводом, особенно на высокочастотном краю его рабочего диапазона [9]. Оценка эффективности согласования ДБШ с волноводом была выполнена методом измерения реакции смесителя на мощность гетеродина. На рис. 2 представлены зависимости выпрямленного тока смесителя от частоты для двух типов ДБШ при подведении к нему мощности гетеродина 0.9 мВт.

Из рисунка видно, что максимальное значение выпрямленного тока диода Т1 приблизительно на 20 % больше, чем максимальное значение 1Т9(14), что объясняется меньшим значением его последовательного сопротивления. В то же время по полосе рабочих частот этот ДБШ существенно уступает диоду с меньшим значением емкости барьера. Наши эксперименты, проведенные ранее в 3-мм диапазоне, показали, что на диоде Т1 возможно реализовать предельно низкий уровень шума смесителя, но в узкой полосе частот [9]. В 3-мм диапазоне удалось немного продвинуться к более высоким частотам за счет снижения высоты волновода смесительной камеры. Это сопровож-

далось небольшой потерей чувствительности приемника за счет увеличения затухания в сигнальном тракте смесителя. Использование аналогичного решения в 2-мм диапазоне не привело к успеху из-за существенного увеличения затухания в волноводе, с 0.3 до 1 дБ. В результате смеситель с пониженной высотой волновода показал значительно худшие результаты как по реакции на мощность гетеродина, так и по шум-фактору, поэтому мы их здесь не приводим. Шумовые характеристики приемных модулей со смесителями на основе стандартного волновода с диодами Т1 и 1Т9(14) приведены в разделе 3.

2.2. Усилитель промежуточных частот

Требования к усилителю промежуточной частоты (УПЧ) радиоастрономического приемника со смесителем на входе имеют свою специфику. В первую очередь, важны высокая долговременная и температурная стабильность коэффициента усиления и низкая эквивалентная температура шумов T_{if} . Последняя характеристика имеет особое значение для устройств, не подвергающихся глубокому охлаждению. Дополнительно надо заметить, что требования к шумовым характеристикам УПЧ, в плане минимизации T_{if} при заданных полосе частот и импедансе источника, растут синхронно со снижением потерь преобразования смесителя. В предельном случае “идеального” преобразователя шум-фактор приемника и шум-фактор УПЧ совпадают [13].

Опираясь на проведенные ранее исследования, и в соответствии с задачами настоящей работы мы выбрали в качестве базовой двухмодульную конструкцию УПЧ с предварительным усилителем (ПУПЧ) на гетероструктурных полевых транзисторах [14]. Внесенные изменения, имевшие целью предельное снижение T_{if} при работе с конкретным источником сигнала, касаются исключительно ПУПЧ и кратко описаны ниже.

На рис. 3 показана принципиальная схема входной согласующей цепи ПУПЧ с транзистором первого каскада. Отличительной особенностью используемой нами конструкции тракта промежуточной частоты (ПЧ) приемника [9] является объединение в один модуль смесителя и ПУПЧ. Это позволяет проектировать сквозную согласующую цепь ДБШ – транзистор с минимальным количеством реактивных элементов и, соответственно, диссипативных потерь.

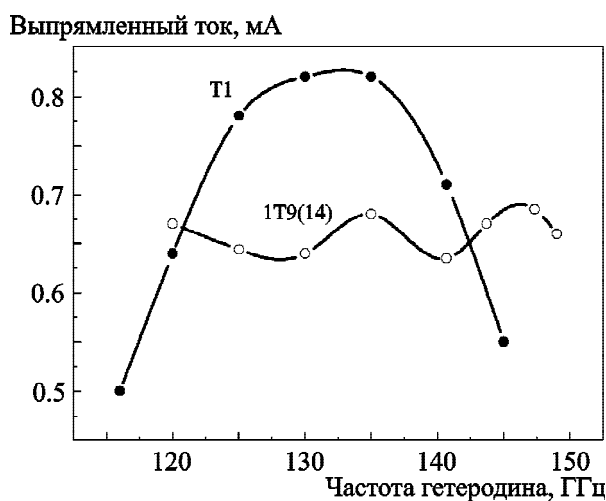


Рис. 2. Зависимость выпрямленного тока смесителя от частоты для двух типов ДБШ. Подводимая к смесителю мощность гетеродина составляла 0.9 мВт

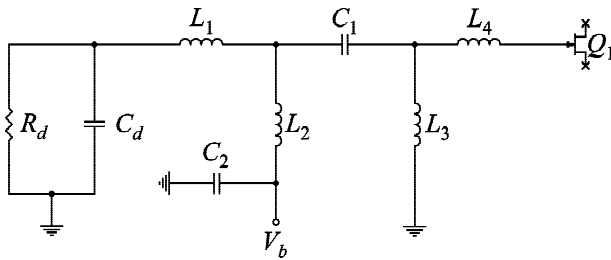


Рис. 3. Принципиальная схема согласующей цепи смесителя (представлен эквивалентной схемой R_d , C_d) и транзистора первого каскада УПЧ Q_1

На рис. 3 смесительный диод представлен эквивалентной схемой для ПЧ. Значение внутреннего сопротивления диода R_d близко к 300 Ом в актуальном режиме смещения при подводимой мощности гетеродина 0.9 мВт. Конденсатор C_d (1 пФ) включает емкость коаксиального фильтра ПЧ. Элементы L_1, \dots, L_4 и C_1 выбраны так, чтобы приведенный к транзистору импеданс был близок к оптимальному для выбранного типа транзистора. Для сверхмаломощного транзистора ATF38143 (AVAGO) в центре диапазона ПЧ (1.5 ГГц) оптимальное значение импеданса составляет $35 + j55$ Ом. Собственная добротность элементов L_1, \dots, L_4 на частоте 1.5 ГГц – порядка 300, и вносимый ими тепловой шум не превышает 5 К.

Структура согласующей цепи выбрана так, чтобы при отсутствии выпрямленного тока смесителя, в режиме перестройки частоты, ПУПЧ сохранял устойчивость. Эта функция выполняется ячейкой L_2, C_1 , сдвигающей фазу на π без трансформации, в первом приближении, реальной части импеданса смесителя. Фактором обеспечения внеполосной устойчивости является режим постоянного тока первого каскада ПУПЧ, близкий к ненасыщенному [15].

Смещение на смесительном диоде осуществляется по цепи L_1, L_2 . В эту же цепь входит многозвенный фильтр – подавитель эфирных помех, на схеме не показанный.

Расчетное значение T_{if} – не более 20 К в полосе $1.2 \div 1.7$ ГГц. Значение T_{if} , измеренное с помощью 50 Ом резистивного шумового генератора (подключен к общей точке L_2, C_1 ; L_1 – изъят), составляет (25 ± 2) К. Такое отличие вполне ожидаемо, так как согласующая цепь не оптимизировалась под 50 Ом источник сигнала.

Следует отметить, что альтернативное, традиционное решение тракта смеситель – УПЧ, предполагает раздельное приведение импедансов смесителя и усилителя к стандартному волновому сопротивлению 50 Ом и их связь через вентиль. Наше моделирование и макетирование такой схемы, равно как и имеющиеся в литературе описания (см., например, [16]), показывают, что в этом случае к T_{if} добавится около 15 К в центре рабочего диапазона ПЧ и 25 К – по краям (1.2 и 1.7 ГГц).

Характеристики стабильности усиления ПУПЧ соответствуют прототипу, представленному в работе [14]: коэффициент усиления в полосе $1 \div 2$ ГГц составляет (30 ± 0.5) дБ, воспроизводимость коэффициента усиления от включения к включению не хуже 0.1 дБ; долговременная стабильность всего УПЧ по результатам радиометрии суммарных шумов усилителя и резистивного шумового генератора на интервале времени 1 ч – не хуже 0.1 дБ. В интервале окружающих температур $0 \div 50$ °С коэффициент усиления изменяется не более чем на 1 дБ. С одноступенчатым термостатом Пельтье температурный дрейф не превышает 0.15 дБ в интервале окружающих температур $15 \div 35$ К.

Полученные шумовые и усилительные характеристики УПЧ соответствуют характеристикам наиболее современных устройств подобного назначения и вполне достаточны для решения задач настоящей работы.

2.3. Диплексер

Для сопряжения гетеродина со смесителем и фильтрации спектра гетеродина (функциональное назначение диплексера) мы выбрали волноводную конструкцию на базе крестообразного ответвителя и продольного волноводного $\pi/4$ -резонатора.

Отказ от распространенных квазиоптических конструкций, используемых на частотах выше 100 ГГц, обусловлен двумя причинами. Во-первых, предлагаемый приемный модуль – неохлаждаемый, а значит, минимизация генерируемых во входной цепи тепловых шумов возможна только методом прямой редукции диссипативных потерь. Расчет показывает, что потерям 0.25 дБ соответствует добавка к шумовой температуре приемника около 15 К. С учетом назначения

приемного модуля диапазон $15 \div 20$ К – максимально допустимый уровень дополнительных шумов. Технологически задача по обеспечению потерь менее 0.5 дБ в неохлаждаемом зеркально-линзовом квазиоптическом тракте очень сложна, и в целом возможность ее решения не очевидна.

Вторая причина отказа от квазиоптических конструкций состоит в стремлении к сокращению длины волноведущего тракта и внутренних переотражений в нем. Наличие таких переотражений неизбежно уже в силу ненулевых коэффициентов отражения смесителя и антенны, а температурная и временная нестационарности картины стоячих волн (так называемый “риплей” на амплитудно-частотной характеристике приемника) накладывают ограничения на точность калибровки. В конечном счете ограничивается адекватность воспроизведения фиксируемых спектральных линий даже при вполне удовлетворительном соотношении сигнал/шум.

Проблема стоячих волн во входном тракте спектрометров хорошо известна, и в литературе можно найти множество технико-методических вариантов ее специфических решений.

Наиболее радикальный способ решения указанной проблемы заключается в сокращении длины волноведущего тракта, так чтобы волновой процесс образования стоячих волн был невозможен принципиально. В идеале для этого необходимо сократить длину сигнального плеча до полуволновой и менее. В нашем случае (рис. 4) длина сигнального плеча диплексера составляет 4 мм (волновод сечением 1.6×0.8 мм). Длина всего тракта – от смесительного диода до

рупора – не более 8 мм. Несложно установить, что в полосе ПЧ, особенно в пределах спектральной линии, перепад уровней сигнала за счет стоячей волны будет несущественным. Сокращение длины позволило также обеспечить проходные потери не превышающие 0.2 дБ.

Гетеродинное плечо диплексера (см. рис. 4) образовано отрезком волновода 1 сечением 1.6×0.8 мм, диафрагмой с центральным круглым отверстием 2, отверстиями связи 4 и короткозамыкающим поршнем 3. Толщина межволноводной стенки составляет 0.1 мм. Сформированный резонатор (на моде H_{01n}) имеет длину 12 мм, шаг резонансных частот – около 10 ГГц. При собственной добротности порядка 500 и нагруженной около 250 резонатор обеспечивает режекцию шумов гетеродина не менее 20 дБ на ПЧ выше 1 ГГц. Значение переходного затухания между гетеродином и смесителем в основном определяется диаметром отверстия в диафрагме (2), в меньшей степени – диаметрами отверстий связи (4). В данном конкретном случае эти диаметры равны 0.7 и 0.6 мм соответственно, переходное затухание составляет 14 дБ.

Требования к техническому исполнению элементов диплексера в целом традиционны для устройств такого рода: высокое качество поверхности волноводов и короткозамыкающего поршня, сглаженные кромки отверстий связи и др. Диплексер обеспечивает удовлетворительное постоянство характеристик в диапазоне $130 \div 150$ ГГц. При ПЧ выше 1 ГГц вклад шумов гетеродина, даже в случае лампового источника, не превышает 10 К.

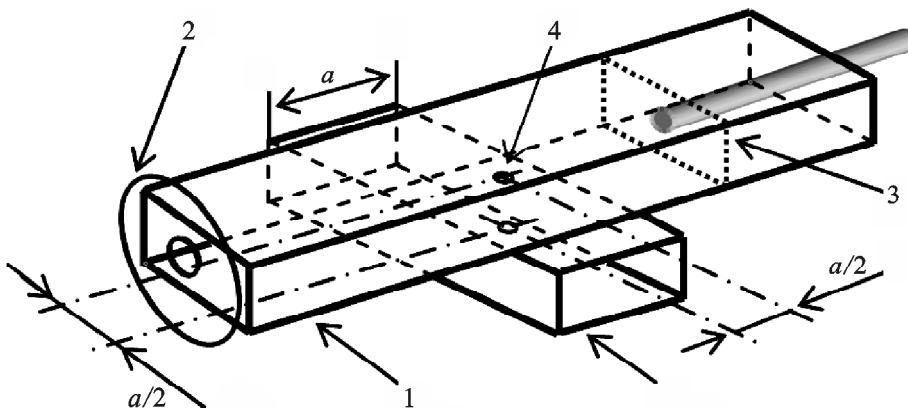


Рис. 4. Конструкция диплексера

3. Шумовые характеристики приемного модуля

Значения двухполосной (DSB) шумовой температуры приемного модуля измерялись известным Y-методом с использованием входной согласованной нагрузки при комнатной температуре и температуре жидкого азота. При перестройке частоты гетеродина диплексер и смеситель настраивались на максимум выпрямленного тока с помощью короткозамыкающих поршней. На рис. 5 представлены зависимости DSB шумовой температуры приемного модуля от частоты гетеродина для двух типов ДБШ.

Видно, что минимальные значения шумовой температуры на диоде Т1 получены в узкой полосе от 130 до 132 ГГц. Это соответствует диапазону частот, в котором реализован максимум выпрямленного тока (см. рис. 2). Ниже 130 ГГц измерения не проводились, так как эти частоты не являлись объектом нашего интереса. С переходом на частоту гетеродина около 141 ГГц (близко к линии излучения озона) шумовая температура увеличивалась приблизительно в 1.5 раза и продолжала рост далее. С уменьшением индуктивности контактной иглы минимум шумовой температуры на этом диоде смещался к более высоким частотам, но при этом существенно возрастало его значение.

Результаты, полученные на диоде 1Т9(14), демонстрируют высокое постоянство шумовой

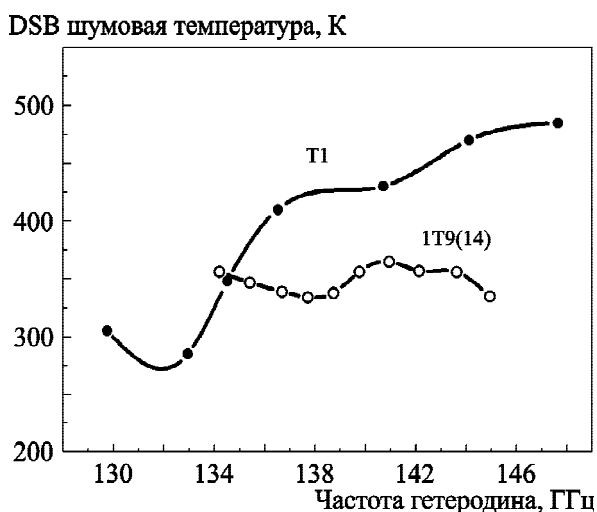


Рис. 5. Зависимость двухполосной (DSB) шумовой температуры приемного модуля от частоты гетеродина для двух типов смесительных диодов

температуры приемника в исследованной полосе частот. Незначительные изменения шумов приемника (меньше 10 %) можно объяснить наличием стоячей волны на участке между входом рупора и смесительным диодом. Из рис. 5 видно, что минимальные значения шумовой температуры, полученные на ДБШ 1Т9(14), превышают полученные для диода Т1 приблизительно на 50 К, хотя критическая частота Т1 несколько ниже, чем у 1Т9(14). Это является свидетельством неполной реализации потенциальных возможностей диода 1Т9(14), т. е. просматривается направление будущих исследований.

4. Выводы

Представлены результаты разработки приемного модуля 2-мм диапазона для наблюдений линии излучения атмосферного озона на частоте 142.2 ГГц. Найдены значения DSB шумовой температуры приемного модуля – от 335 до 365 К – в полосе частот гетеродина 134 ÷ 145 ГГц. Для получения этих результатов были проведены комплексные исследования и оптимизация базовых узлов гетеродина приемника: диплексера, смесителя и УПЧ. Измерены и проанализированы характеристики двух типов смесительных диодов и определены условия их оптимального согласования с целью реализации минимально возможных потерь преобразования смесителя в широкой полосе частот гетеродина. При конструировании УПЧ приемного модуля были предприняты специальные усилия для предельного снижения его собственных шумов (до 20 К), повышения стабильности коэффициента усиления и устойчивости. Затухание в сигнальном плече диплексера было снижено до 0.2 дБ при подавлении шума гетеродина на 20 дБ (при отстройке 1 ГГц).

В целом по своим шумовым характеристикам представленный усилительно-преобразовательный модуль – лучший в классе неохлаждаемых гетеродинных приемников в 2-мм диапазоне длин волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beig G., Keckhut P., Lowe R. P., Roble R. G., Mlynczak M. G., Scheer J., Fomichev V. I., Offermann D., French W. J. R., Shepherd M. G., Semenov A. I., Remsberg E. E., She C. Y., Lübken F. J., Bremer J., Clemesha B. R., Stegman J., Sigmund F., and Fadnavis S. Review of mesospheric temperature trends // Rev. Geophys. – 2003. – Vol. 41, No.4. – P. 1015–1055. DOI:10.1029/2002RG000121
2. Косцов В. С., Тимофеев Ю. М. Озон в мезосфере по данным спутникового эксперимента CRISTA-1: 2.

- Пространственные распределения и суточные вариации // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41, № 2. – С. 72–83.
3. Pardo J. R., Cernicharo J., and Pagani L. Ground-based spectroscopic observations of atmospheric ozone from 142 to 359 GHz in southern Europe // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 10, Is. D6. – P. 6189–6202. DOI: 10.1029/97JD03628
 4. Rufenacht R., Kämpfer N., and Murk A. First middle-atmospheric zonal wind profile measurements with a new ground-based microwave Doppler-spectro-radiometer // *Atmos. Meas. Tech.* – 2012. – Vol. 5, No. 11. – P. 2647–2659. DOI: 10.5194/amt-5-2647-2012
 5. Burrows S. M., Martin C. L., and Roberts E. A. High-latitude remote sensing of mesospheric wind speeds and carbon monoxide // *J. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112, Is. D17. – id. D17109. DOI: 10.1029/2006JD007993
 6. Palm M., Hoffman C. G., Golchert S. H. W., and Northolt J. The ground-based MW radiometer OZORAM on Spitsbergen – description and status of stratospheric and mesospheric O₃-measurements // *Atmos. Meas. Tech.* – 2010. – Vol. 3. – P. 1533–1545. DOI: 10.5194/amt-3-1533-2010
 7. Forkman P., Christensen O. M., Eriksson P., Urban J., and Funke B. Six years of mesospheric CO estimated from ground-based frequency-switched microwave radiometry at 57° N compared with satellite instruments // *Atmos. Meas. Tech.* – 2012. – Vol. 5. – P. 2827–2841. DOI: 10.5194/amt-5-2827-2012
 8. Rozanov S. B., Lukin A. N., and Solomonov S. V. Low-noise cooled planar Schottky diode receivers for ground-based spectral ozone measurements at 142 GHz // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1998. – Vol. 19, No. 2. – P. 195–222.
 9. Piddyachiy V., Korolev A., and Shulga V. A very low-noise integrated 3mm-wave Schottky diode mixer and PHEMT IF amplifier // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 2005. – Vol. 26, No. 10. – P. 1381–1388.
 10. Piddyachiy V., Shulga V., Korolev A., and Myshenko V. High doping density Schottky diodes in the 3mm wavelength cryogenic heterodyne receiver // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 2005. – Vol. 26, No. 9. – P. 1307–1315.
 11. Forkman P., Piddyachiy V., Korolev A., Myshenko V., Myshenko A., and Shulga V. An uncooled very low noise Schottky diode receiver front-end for middle atmospheric ozone and carbon monoxide measurements // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 2006. – Vol. 27, No.1. – P. 25–35.
 12. Piddyachiy V., Shulga V., Myshenko V., Korolev A., Myshenko A., Antyufeyev A., Poladich A., and Shkodin V. 3-mm wave spectroradiometer for studies of atmospheric trace gases // *Radiophys. Quantum Electron.* – 2010. – Vol. 53, No. 5,6. – P. 326–333.
 13. А. Ван дер Зил. Шум. Источники, описание, измерение. – М: Сов. радио, 1973. – 228 с.
 14. Королев А. М. Усилитель промежуточной частоты супергетеродинного радиоастрономического приемника // *Приборы и техника эксперимента.* – 2011. – № 1. – С. 88–90.
 15. Королев А. М., Шульга В. М. Ненасыщенный режим как альтернативный метод обеспечения устойчивости малошумящих усилителей на полевых транзисторных гетероструктурах // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2011. – Т. 16, № 4. – С. 433–439.
 16. А. М. Королев, В. М. Шульга. Режим сверхнизких шумов в широкополосном неохлаждаемом усилителе на PHEMT в дециметровом диапазоне // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 21–27.

REFERENCES

1. BEIG, G., KECKHUT, P., LOWE, R. P., ROBLE, R. G., MLYNCZAK, M. G., SCHEER, J., FOMICHEV, V. I., OFFERMANN, D., FRENCH, W. J. R., SHEPHERD, M. G., SEMENOV, A. I., REMSBERG, E. E., SHE, C. Y., LÜBKEN, F. J., BREMER, J., CLEMESHA, B. R., STEGMAN, J., SIGERNES, F. and FADNAVIS, S., 2003. Review of mesospheric temperature trends. *Rev. Geophys.* vol. 41, no. 4, pp. 1015–1055. DOI: 10.1029/2002RG000121
2. KOSTSOV, V. S. and TIMOFEYEV, YU. M., 2005. Mesospheric ozone according to data of satellite experiment CRISTA-1: 2. Spatial distribution and diurnal variations. *Izvestia RAN. Fizika atmosfery i okeana.* vol. 41, no. 2, pp. 72–83 (in Russian).
3. PARDO, J. R., CERNICHARO, J. and PAGANI, L., 1998. Ground-based spectroscopic observations of atmospheric ozone from 142 to 359 GHz in southern Europe. *J. Geophys. Res.* vol.103, no. D6, pp. 6189–6202. DOI: 10.1029/97JD03628
4. RUFENACHT, R., KÄMPFER, N., and MURK, A., 2012. First middle-atmospheric zonal wind profile measurements with a new ground-based microwave Doppler-spectro-radiometer. *Atmos. Meas. Tech.* vol. 5, no. 11, pp. 2647–2659. DOI: 10.5194/amt-5-2647-2012
5. BURROWS, S., MARTIN, C. and ROBERTS, E., 2007. High-latitude remote sensing of mesospheric wind speeds and carbon monoxide. *J. Geophys. Res.* vol. 112, no. D17, id. D17109. DOI: 10.1029/2006JD007993
6. PALM, M., HOFFMAN, C. G., GOLCHERT, S. H. W., and NORTHOLT, J., 2010. The ground-based MW radiometer OZORAM on Spitsbergen – description and status of stratospheric and mesospheric O₃-measurements. *Atmos. Meas. Tech.* vol. 3, pp. 1533–1545. DOI: 10.5194/amt-3-1533-2010
7. FORKMAN, P., CHRISTENSEN, O. M., ERIKSSON, P., URBAN, J. and FUNKE, B., 2012. Six years of mesospheric CO estimated from ground-based frequency-switched microwave radiometry at 57° N compared with satellite instruments. *Atmos. Meas. Tech.* vol. 5, pp. 2827–2841. DOI: 10.5194/amt-5-2827-2012
8. ROZANOV, S. B., LUKIN, A. N. and SOLOMONOV, S. V., 1998. Low-noise cooled planar Schottky diode receivers for ground-based spectral ozone measurements at 142 GHz. *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* vol. 19, no. 2, pp. 195–222.
9. PIDDYACHIY, V., KOROLEV, A. and SHULGA, V., 2005. A very low-noise integrated 3mm-wave Schottky diode mixer and PHEMT IF amplifier. *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* vol. 26, no. 10, pp. 1381–1388.
10. PIDDYACHIY, V., SHULGA, V., KOROLEV, A. and MYSHENKO, V., 2005. High doping density Schottky diodes in the 3mm wavelength cryogenic heterodyne receiver. *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* vol. 26, no. 9, pp. 1307–1315.
11. FORKMAN, P., PIDDYACHIY, V., KOROLEV, A., MYSHENKO, V., MYSHENKO, A., and SHULGA, V., 2006. An uncooled very low noise Schottky diode receiver front-end for middle atmospheric ozone and carbon monoxide

- measurements. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. vol. 27, no. 1, pp. 25–35.
12. PIDDYACHYI, V., SHULGA, V., MYSHENKO, V., KOROLEV, A., MYSHENKO, A., ANTYUFEYEV, A., POLADICH, A. and SHKODIN, V., 2010. 3-mm wave spectroradiometer for studies of atmospheric trace gases. *Radiophys. Quantum Electron*. vol. 53, no. 5,6, pp. 326–333.
 13. ALDERT VAN DER ZIEL, 1970. *Noise. Sources, characterization, measurement*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentis-Hall.
 14. KOROLEV, A. M. 2011. An intermediate frequency amplifier for a radio astronomy superheterodyne receiver. *Instruments and Experimental Techniques*. vol. 54, no. 1, pp. 81–83.
 15. KOROLEV, A. M. and SHULGA, V. M., 2011. Unsaturated Regime as Alternative Method to Provide Stability of Low-Noise Amplifier on High-Electron-Mobility Transistors. *Radiofizika i Radioastronomia*. vol. 16, no. 4, pp. 433–439 (in Russian).
 16. KOROLEV, A. M. and SHULGA, V. M., 2003. Ultra-Low-Noise Operation of Broadband Uncooled PHEMT Amplifier in Ultrahigh-Frequency Band. *Radiofizika i Radioastronomia*. vol. 8, no. 1, pp. 21–27 (in Russian).

V. I. Pidtyachiy, A. M. Korolev, V. V. Myshenko,
and V. M. Shulga

Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

THE 2-MM RANGE RECEIVING MODULE FOR OBSERVATIONS OF ATMOSPHERIC OZONE EMISSION LINE AT 142.2 GHz

A low-noise uncooled receiver was designed and constructed for measurements of the atmospheric ozone spectral line at 142.2 GHz. The design has shown the double-sideband

(DSB) receiver noise temperature of about 350 K within 130 to 150 GHz. Critical construction features of the basic units (mixer, intermediate frequency amplifier, and diplexer) are described. Noise characteristics showed by the receiver are the best in the class of uncooled heterodyne receivers of the 2-mm wavelengths.

Key words: mm-waves, pseudomorphic high electron-mobility transistor (PHEMT), mixer, atmospheric gases

V. I. Піддячий, О. М. Корольов, В. В. Мищенко,
В. М. Шульга

Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

ПРИЙМАЛЬНИЙ МОДУЛЬ 2-ММ ДІАПАЗОНУ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЛІНІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНУ НА ЧАСТОТІ 142.2 ГГц

Для спостережень лінії випромінювання атмосферного озону на частоті 142.2 ГГц розроблено мал шумливий неохолоджуваний приймач. Отримано значення двополосної шумової температури приймача близько 350 К у смузі частот 130 ÷ 150 ГГц. Описано критично важливі особливості конструкції базових вузлів: змішувача, підсилювача проміжних частот і дуплексера. Шумові характеристики приймача є кращими в класі неохолоджуваних гетеродинних приймачів у 2-мм діапазоні довжин хвиль.

Ключові слова: міліметрові хвилі, псевдоморфний транзистор з високою рухливістю електронів, змішувач, атмосферні гази

Стаття постуила в редакцію 18.06.2015