

УДК 551.510+621.382.2

МАЛОШУМЯЩИЙ ПРИЁМНИК ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ОЗОНОМЕТРИИ

*С. Б. Розанов*¹, *А. С. Завгородний*¹, *С. В. Логвиненко*¹, *А. Н. Лукин*¹, *А. М. Штанюк*²,
*О. С. Большаков*²

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва;

² Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Представлено описание малошумящего супергетеродинного приёмника со смесителем на диоде с барьером Шоттки для нового передвижного микроволнового озонметра на частоту 142,2 ГГц, предназначенного для измерений вертикального распределения концентрации озона в стратосфере и мезосфере. Приведены расчётные и экспериментальные характеристики входных квазиоптических узлов приёмника на гауссовых пучках, результаты измерений диаграммы направленности антенны приёмника и его шумовой температуры.

ВВЕДЕНИЕ

Озоновый слой атмосферы не только защищает жизнь на Земле от ультрафиолетового излучения Солнца, но и значительно влияет на тепловой баланс и динамику атмосферы и, следовательно, на климат нашей планеты [1]. Содержание и пространственное распределение озона O_3 зависят как от естественных физико-химических процессов в атмосфере и интенсивности солнечного излучения, так и от недостаточно контролируемых техногенных загрязнений. Сохранение озонового слоя является одной из наиболее важных глобальных задач, стоящих перед человечеством.

Вертикальное распределение озона в широком интервале высот от нижней стратосферы до мезосферы наряду с другими методами измеряется с поверхности Земли на миллиметровых волнах (микроволнах) [2, 3]. Преимуществами наземного микроволнового дистанционного зондирования озона и других малых газовых составляющих атмосферы перед традиционными наземными оптическими (спектрометры ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов, лидары) и контактными (с шаров-зондов, метеоракет, самолётов) методами являются:

- 1) возможность непрерывных круглосуточных измерений;
- 2) широкий диапазон зондируемых высот, включая труднодоступные слои атмосферы выше 35÷40 км;
- 3) возможность зондирования при различных погодных условиях, в том числе в отсутствие оптической видимости (облачность, туман, снегопад);
- 4) экологическая безопасность (метод не использует зондирующих сигналов).

Для осуществления эффективного наземного мониторинга озонового слоя требуется глобальная сеть станций, оснащённых надёжными микроволновыми спектрометрами — озонometрами [1, 4].

В данной работе дано описание и представлены результаты испытаний в широкой полосе частот малошумящего приёмника, входящего в состав нового передвижного автоматизированного озонметра с улучшенными характеристиками, предназначенного для наземных измерений на частоте 142,2 ГГц вертикального распределения озона в стратосфере и мезосфере и перспективного для использования в сети станций мониторинга состава атмосферы. Работы по созданию нового озонметра проводились в ФИАН в содружестве с ведущими российскими организациями: ИПФ РАН, СПбГПУ, НИИПП, ИРЭ РАН, СКБ ИРЭ РАН и др. [5, 6].

1. ПРИЁМНИК ПЕРЕДВИЖНОГО ОЗОНОМЕТРА НА ЧАСТОТУ 142 ГГц

Блок-схема передвижного озонметра, предназначенного для регистрации спектральной линии атмосферного озона с центральной частотой 142,175 ГГц, показана на рис. 1. Прибор включает в себя малошумящий супергетеродинный модуляционный приёмник, состоящий из оптического и сверхвысокочастотного (СВЧ) блоков, широкополосный 1000-канальный акустооптический спектроанализатор (АОС, разработка СПбГПУ [7]) с полосой анализа около 450 МГц и разрешением 1 МГц, узкополосный 50-канальный фильтровой анализатор спектра (ФАС, разработка ИПФ РАН [5, 6]) с полосой анализа 10,8 МГц и разрешением в центре полосы 0,1 МГц и управляющий компьютер с необходимыми интерфейсами и программным обеспечением. Предполагается также работа озонметра с 96-канальным широкополосным фильтровым анализатором спектра (разработка ИПФ РАН [5, 6]) и с цифровым анализатором спектра [8].

Отличительными особенностями нового озонметра по сравнению с действующим сейчас озонметром ФИАН [9] являются:

- 1) транспортабельность в сочетании с высокой чувствительностью приёмника;
- 2) использование в приёмнике твердотельного гетеродина с большим ресурсом работы вместо лампы обратной волны;
- 3) возможность быстрого выбора оптимального зенитного угла наблюдений;
- 4) применение в оптическом блоке приёмника внеосевых фокусирующих зеркал вместо линз с целью минимизации стоячих волн;
- 5) установка модулятора длины пути луча во входном тракте приёмника для исключения влияния стоячих волн на форму измеряемых спектров озона;
- 6) заполнение зеркальной полосы частот смесителя холодным чернотельным излучением для снижения шумовой температуры приёмника;
- 7) плавное изменение яркостной температуры опорного чернотельного излучателя в широких пределах 100 ÷ 300 К.

При разработке входных квазиоптических узлов приёмника использовались соотношения гауссовой оптики [10]. Схема оптического блока более подробно показана на рис. 2. Поворотное плоское зеркало антенны 1 обеспечивает изменение зенитного угла наблюдений в пределах $40^\circ \div 100^\circ$. Диаметр апертуры антенны равен 134 мм. Механический однолопастный модулятор 4 с частотой 30 Гц переключает вход приёмника с антенны на опорный излучатель (ОИ), состоящий из двух чернотельных нагрузок: тёплой 6 и охлаждённой жидким азотом 5, и поляризационной проволочной сетки 7 (С6 на рис. 1). Поворотами сетки 7 в пределах $0^\circ \div 90^\circ$ яркостная температура опорного излучателя $T_{\text{ОИ}}$ в поляризации, регистрируемой приёмником, плавно регулируется от $T_{\text{Н}} \approx 100$ К до $T_0 \approx 300$ К. По тёплой чернотельной нагрузке 3 и опорному излучателю, поочерёдно устанавливаемому в крайние положения, проводится периодическая калибровка приёмника.

С помощью перископической конструкции из поляризационной сетки 10 (С5 на рис. 1) и стоящего над ней зеркала (на рис. 2 не показано) в тракт приёмника в поляризации, ортогональной сигналу, постоянно вводится холодное чернотельное излучение с яркостной температурой $T_{\text{Н}}$ от нагрузки 5. Однополосный фильтр приёмника представляет собой интерферометр Мартина—Паппетта (поляризационный интерферометр Майкельсона) [11]. Он состоит из проволочной сетки 11, ориентированной под углом 45° к поляризации входящего пучка, и двух уголкового зеркал 12 и 13. Интерферометр, вращающий плоскость поляризации входящего в него излучения, настроен так, что на его выходе сигнал от неба или опорного излучателя в полосе частот вблизи 142,175 ГГц и холодный фон в зеркальной полосе приёма вблизи частоты 134,625 ГГц имеют одинаковую поляризацию. Заполнение зеркальной полосы холодным фоном позволило заметно

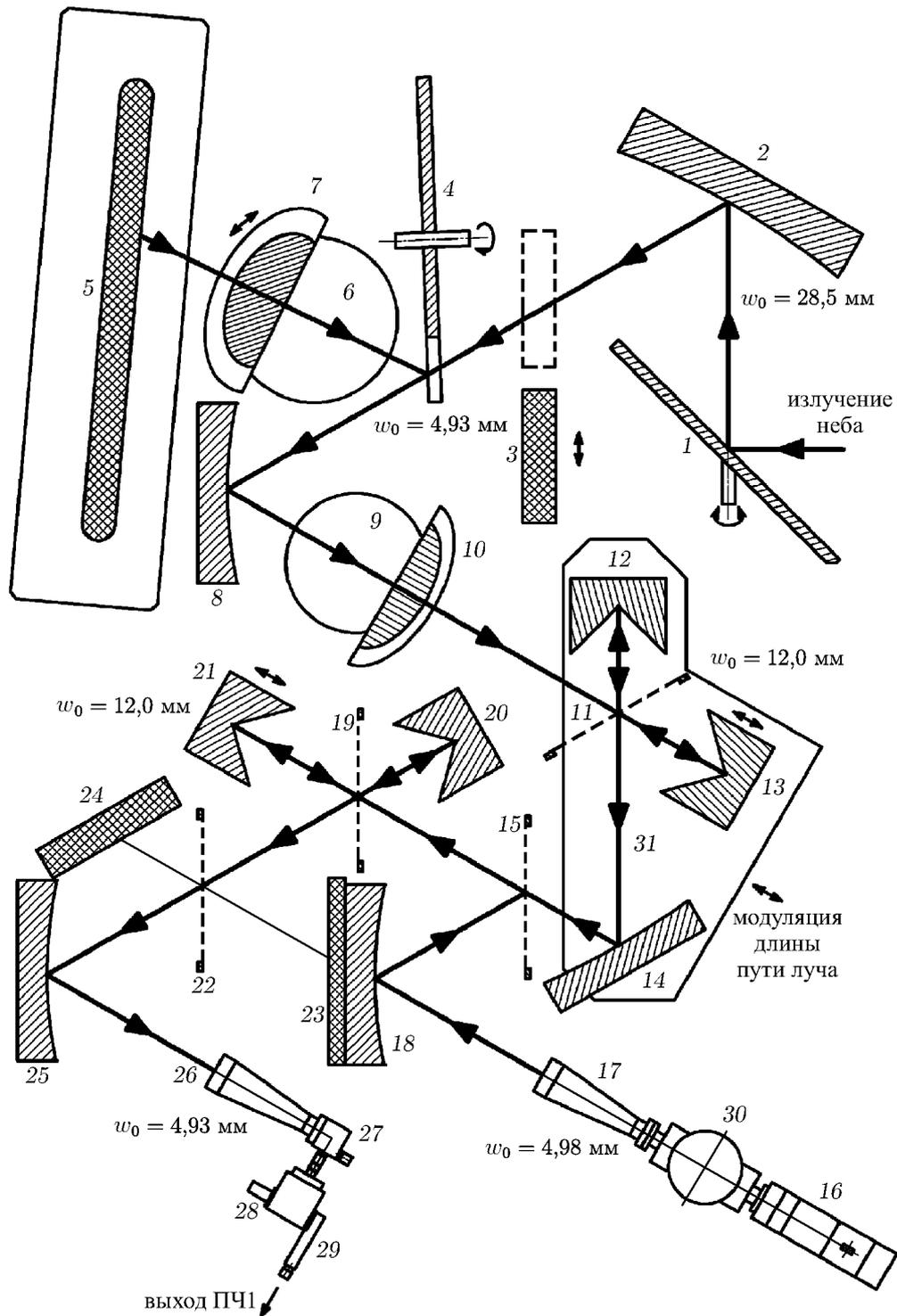


Рис. 2. Оптическая схема оптического блока приёмника: 1 — антенна, 2 — параболическое зеркало, 3, 6, 9, 23, 24 — тёплые излучатели/поглотители, 4 — диск модулятора, 5 — холодный излучатель, 7, 10, 11, 15, 19, 22 — проволочные сетки, 8, 14, 18, 25 — эллиптические зеркала, 16 — гетеродин, 17, 26 — рупорные облучатели, 27 — смеситель, 28 — ферритовый вентиль, 29 — предварительный усилитель ПЧ1, 30 — аттенюатор, 31 — подвижный столик. Эллиптическое зеркало, стоящее над сеткой 10 для ввода в тракт холодного фона от излучателя 5, на схеме не показано

Для фокусировки гауссовых пучков использованы внеосевые зеркала — параболическое 2 и эллиптические 8, 14, 18, 25 и зеркало перископа. На рис. 2 указаны расчётные значения w_0 радиусов перетяжек пучков в оптической системе, они лежат в пределах $4,9 \div 28,5$ мм. Диаметры апертур зеркал и сеток составляют не менее $4,5w$, что обеспечивает малость потерь, связанных с дифрактированием пучков. Здесь w и w_0 — соответственно текущее и минимальное (в перетяжке) значения параметра поперечного распределения поля основной моды осесимметричного гауссова пучка [10].

Похожая оптическая схема ранее была использована в приборе MIRA-2 [13], предназначенном для регистрации спектров малых газовых составляющих атмосферы в диапазоне частот $268 \div 280$ ГГц. В рассматриваемом здесь приёмнике предложено более рациональное пространственное расположение оптических элементов, что позволило уменьшить число зеркал в схеме и сделать её более компактной. Углы падения пучков на внеосевые зеркала выбраны равными $i = 30^\circ$ вместо конструктивно более удобного значения $i = 45^\circ$, принятого в спектрометре MIRA-2 [13], а также ещё в ряде приборов для исследований озона и других малых газовых составляющих атмосферы (OZORAM [14], SOMORA [15, 16], RAMAS [17], KIMRA [18]). Это позволило втрое снизить потери в оптической системе, связанные с образованием на внеосевых зеркалах гауссовых мод высших порядков и кросс-поляризационных составляющих, поскольку, как показано в [19], величина этих потерь пропорциональна $\text{tg}^2 i$. Оценки, сделанные с использованием соотношений, приведённых в [10, 19], показывают, что общие потери мощности сигнала в зеркальной системе приёмника, связанные с дифрактированием пучков на апертурах, образованием высших мод и кросс-поляризационных компонент, составляют $0,4 \div 0,5$ дБ.

Излучатели и поглощающие нагрузки приёмника изготовлены из вспененного радиопоглощающего материала C-RAM LF-73, выпускаемого фирмой Cuming Microwave [20]. Коэффициент отражения для этого материала, измеренный в диапазоне частот $129,2 \div 142,8$ ГГц, составляет $0,3 \div 2\%$ при нормальном падении излучения и сильно варьируются по площади материала в указанных пределах.

Волноводный смеситель [21] выполнен на планарном диоде Шоттки AA138B-3. Предварительный усилитель первой промежуточной частоты (ПЧ1) $3,5 \div 4,0$ ГГц на НЕМТ-транзисторах 29 имеет шумовую температуру около 45 К и усиление около 30 дБ.

Юстировка квазиоптических узлов приёмника выполнялась с использованием гелий-неонового лазера, луч которого вводился в приёмник со стороны антенны. Апертуры зеркал закрывались плоскими оптическими зеркалами, а сетки заменялись тонкими (0,3 мм) стеклянными пластинками. Установка каждого из зеркал по азимуту и углу места обеспечивалась двумя эксцентриками в его опоре. Точность позиционирования лазерного пучка на зеркалах была не хуже $0,3 \div 0,5$ мм. Общий вид оптического блока приёмника со снятыми передней стенкой и верхними крышками показан на рис. 3.

СВЧ блок приёмника обеспечивает:

1) дополнительное усиление сигнала в полосе ПЧ1 и его преобразование в полосы АОС ($1,475 \div 1,975$ ГГц) и ФАС ($62,5 \div 562,5$ МГц) с использованием дополнительных гетеродинов с частотами $5,5; 5,5$ ГГц/ $2 = 2,75$ ГГц и $712,5$ МГц, охваченных системами фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ);

2) измерение среднего уровня яркостной температуры неба в широкой полосе частот $142,175 \pm \pm 0,25$ ГГц;

3) регулировку уровней сигналов, идущих к анализаторам спектра.

Для контроля возможных температурных дрейфов частотной шкалы АОС в идущий к нему шумовой сигнал через направленный ответвитель (НО) добавляется монохроматический сигнал с частотой 1,6 ГГц из кольца ФАПЧ первого гетеродина. Общий вид СВЧ блока со снятой верхней

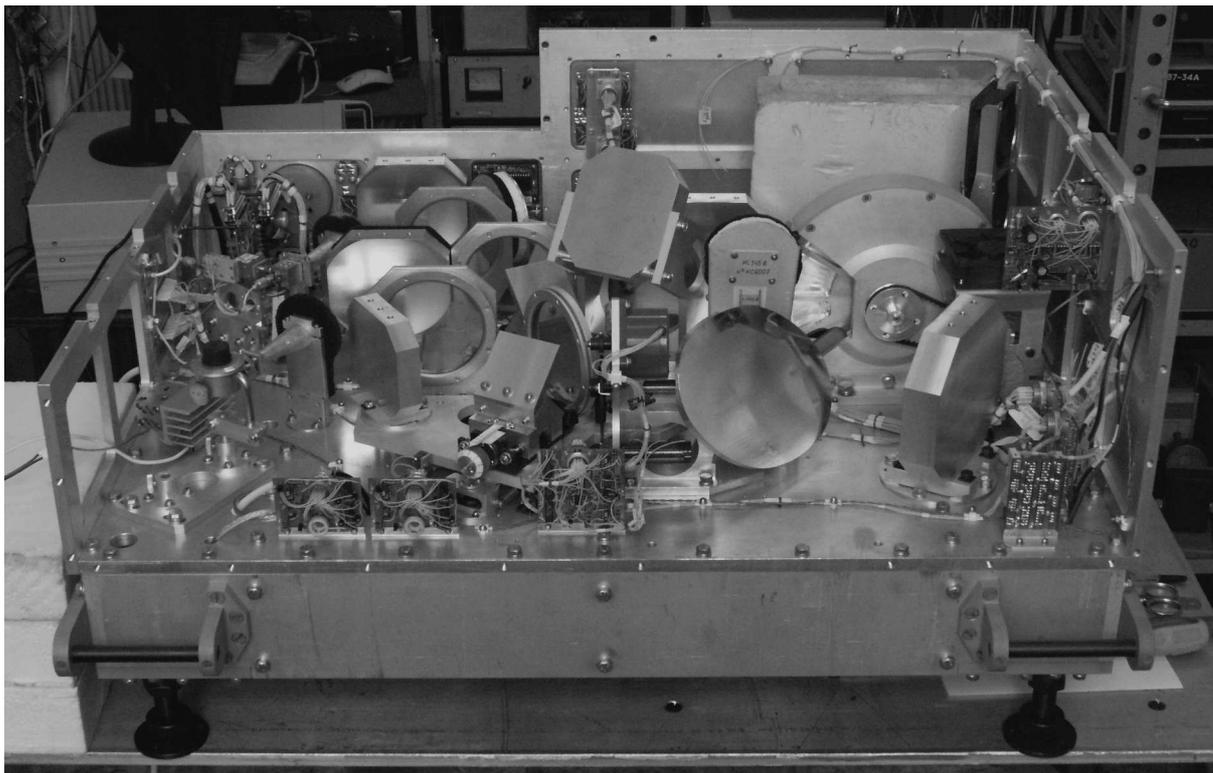


Рис. 3. Общий вид оптического блока приёмника (передняя стенка и верхние крышки сняты)

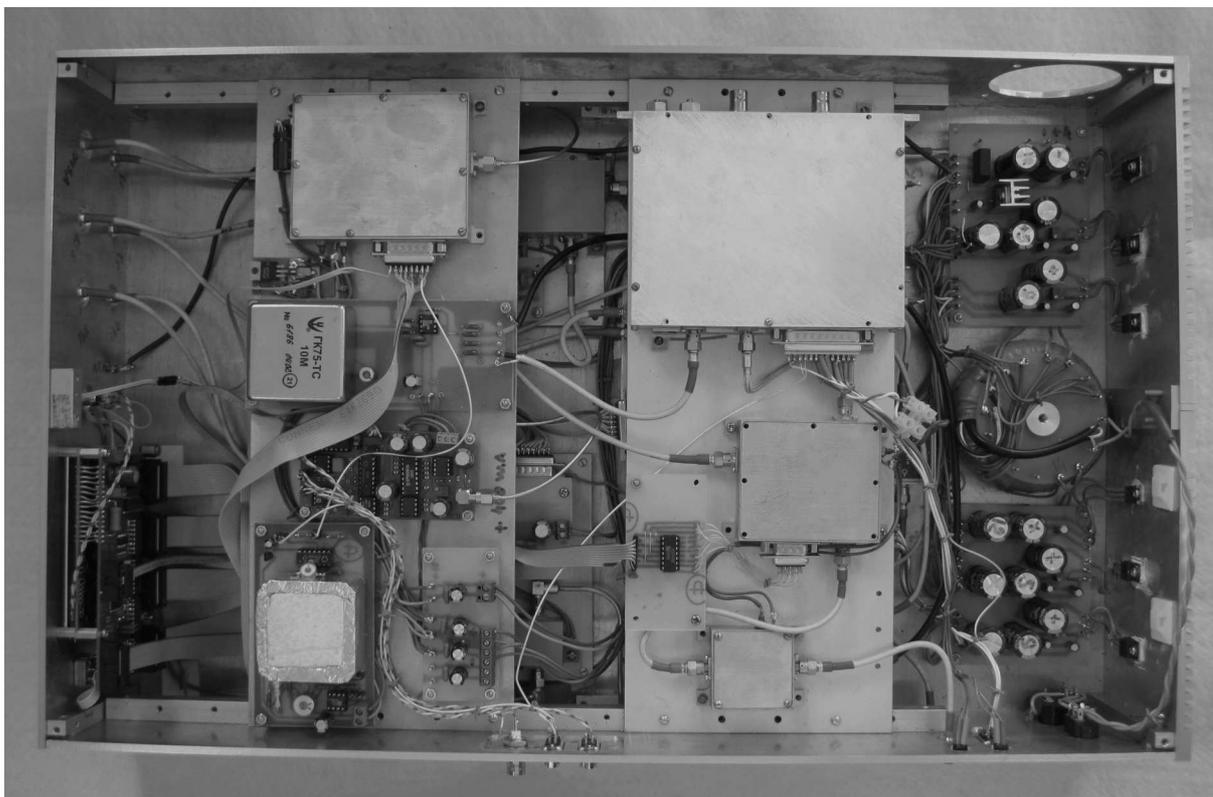


Рис. 4. Общий вид СВЧ блока приёмника (верхняя крышка снята)

крышкой показан на рис. 4.

Управление приёмником осуществляется либо автоматически от компьютера с использованием специальных программ, организующих выполнение озонометром циклов «калибровка—наблюдение», либо в ручном режиме. Для управления приёмником в автоматическом режиме используется модуль типа DAQ-2214 фирмы «AdLink» (аналого-цифрового/цифро-аналогового преобразования). СВЧ блок приёмника имеет встроенный собственный микроконтроллер, обеспечивающий в автоматическом режиме связь с компьютером через порт RS-232, а также используемый для выбора режима работы СВЧ блока при ручном управлении.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЁМНИКА

Настройка однополосного фильтра и диплексера на требуемые частоты пропускания и загашения, а также измерения частотной характеристики входного тракта приёмника выполнялась по генератору Г4-161, перестраиваемому в диапазоне частот $129,2 \div 142,8$ ГГц. Смеситель при этом заменялся квадратичным детектором. Перед антенной приёмника, направленной в горизонт, устанавливалась зеркально-линзовая антенная система предыдущей версии озонометра [22], характеристики которой слабо зависят от частоты. Эта антенная система возбуждалась от генератора через такой же скалярный рупорный облучатель, как в новом приёмнике, и формировала в апертуре антенны нового приёмника гауссов пучок с плоским фазовым фронтом и радиусом, близким к радиусу пучка новой антенны. Кроме «сигнальной» частотной характеристики, соответствующей мощности излучения, прошедшего с выхода генератора сквозь две оптические системы до фланца рупорного облучателя смесителя, записывалась «аппаратная» частотная характеристика с детектором, установленным непосредственно на выходе генератора. Отношение «сигнальной» зависимости к «аппаратной» дало суммарную зависимость пропускания от частоты для двух оптических систем (кривая 1 на рис. 5), частотные особенности которой определяются входным трактом нового приёмника.

Форма полученной частотной характеристики оказалась близка к расчётной (кривая 4 на рис. 5), равной произведению двух синусоид с периодами около 15,0 и 7,7 ГГц, описывающих парциальные частотные характеристики однополосного фильтра и диплексера соответственно (кривые 2 и 3 на рис. 5). Максимумы пропускания этих синусоид совмещены на сигнальной частоте 142,2 ГГц. Измеренная глубина подавления входного сигнала однополосным фильтром в центре зеркальной полосы на частоте 134,6 ГГц достигает 34 дБ. Из отношения пропускания для кривых 4 и 1 после исключения потерь в излучающем рупоре и зеркально-линзовой системе [22] была получена оценка потерь мощности сигнала во входном тракте нового приёмника от антенны до входа смесителя, составляющая $0,8 \pm 0,5$ дБ. Разница между этой величиной и приведённой выше расчётной оценкой потерь в зеркальной системе нового приёмника составляет $0,3 \div 0,4$ дБ, что соответствует величине потерь в рупоре смесителя. Небольшие осцилляции с периодом около 60 МГц, видимые в максимуме пропускания кривой 4 на частотах $141 \div 143$ ГГц и соответствующие длине резонатора около 2,5 м, связаны, вероятно, с интерференцией между рупорным облучателем смесителя в новом приёмнике и элементами зеркально-линзовой системы [22]. Эти осцилляции эффективно «замываются» при включении модуляции длины пути луча.

Диаграмма направленности антенны приёмника измерялась на рабочей частоте 142,2 ГГц (длина волны $\lambda = 2,11$ мм) в азимутальной и угломестной плоскостях для луча, направленного в горизонт, на расстоянии около 7 м от приёмника, много большем характерного продольного масштаба расходимости гауссова пучка антенны $Z_c = \pi w_0^2 / \lambda = 1,2$ м [10] (для антенны $w_0 = 28,5$ мм, см. рис. 2). При измерениях диаграммы направленности сигнал от генератора Г4-161, установленного на поворотной платформе рядом с приёмником, по гибкому диэлектрическому волноводу

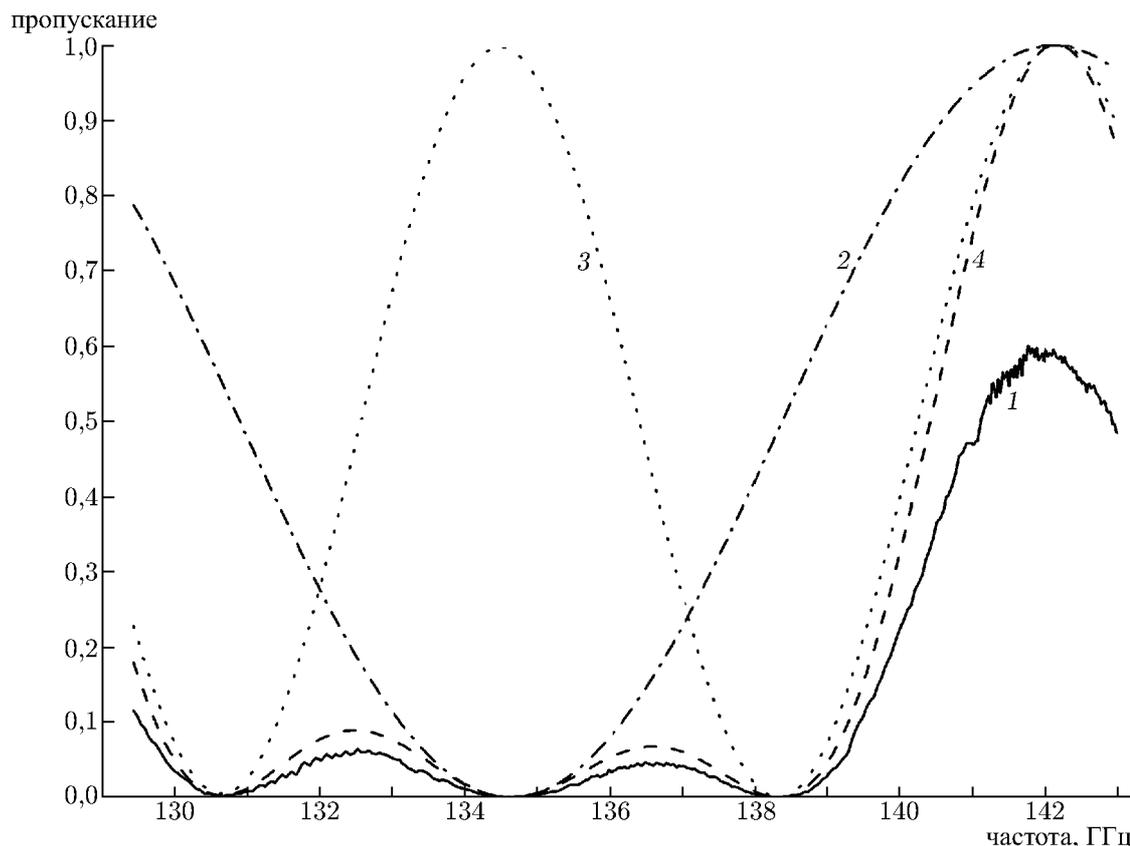


Рис. 5. Частотные характеристики входного тракта приёмника и его составных частей: 1 — экспериментальная частотная характеристика, 2 — расчётная частотная характеристика однополосного фильтра, 3 — расчётная частотная характеристика диплексера, 4 — расчётная частотная характеристика входного тракта озонметра в целом, равная произведению характеристик 2 и 3

подводился к фланцу рупорного облучателя смесителя. Полученная диаграмма направленности оказалась близка к расчётной осесимметричной гауссовой диаграмме до уровня примерно -17 дБ, без боковых лепестков до уровня -30 дБ (см. рис. 6). Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ составляет $1,5^\circ$. Небольшая асимметрия диаграммы направленности в азимутальной плоскости и видимый на ней с одной стороны боковой лепесток ниже уровня -30 дБ связаны, вероятно, с наличием в распределении поля на антенне несимметричных гауссовых мод высших порядков, возникающих при отражениях от внеосевых зеркал [19].

Измерения шумовой температуры приёмника, усреднённой по полосе ПЧ1 $3,5 \div 4,0$ ГГц, выполнялись стандартным методом по тёплому и холодному (охлаждённому жидким азотом) чернотельным излучателям. Однополосная шумовая температура приёмника составила 1200 К с холодной (имеющей яркостную температуру $T_N \approx 100$ К) нагрузкой в зеркальной полосе. При замене холодной нагрузки в зеркальной полосе на тёплую (с яркостной температурой $T_0 \approx 300$ К) шумовая температура приёмника увеличивалась примерно на 100 К, что указывает на эффективность использованного способа снижения шумовой температуры приёмника. Полные потери преобразования сигнала от антенны до выхода ПЧ1 смесителя составили около 7 дБ. Исключение потерь во входном тракте приёмника даёт значение однополосных потерь преобразования смесителя около 6 дБ.

Реализованные параметры приёмника нового озонметра находятся на уровне лучших известных результатов для неохлаждаемых приёмников 2-миллиметрового диапазона со смесителями

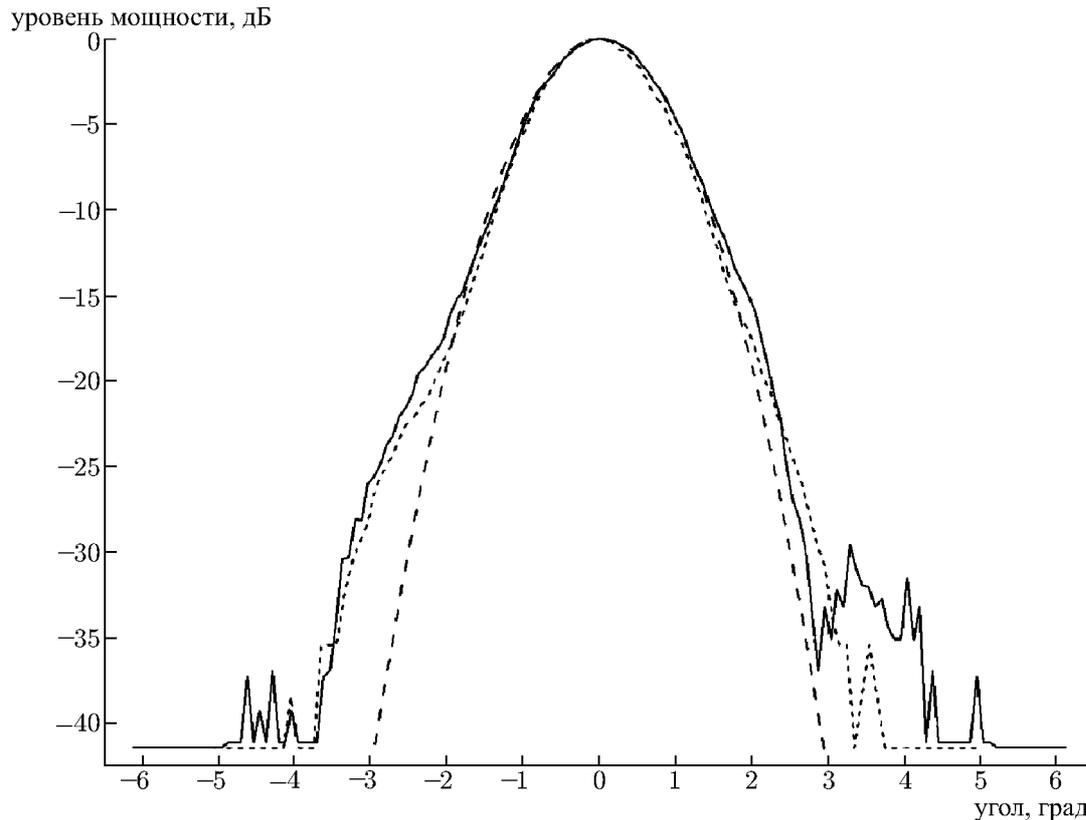


Рис. 6. Диаграмма направленности антенны приёмника: пунктирная кривая — результат расчёта, сплошная кривая — измерения в азимутальной (горизонтальной) плоскости, точечная кривая — измерения в угломестной (вертикальной) плоскости

на диодах Шоттки [23, 24]. Сравнение с другими наземными озонметрами, работающими на частоте 142 ГГц, показывает, что достигнутая с новым приёмником шумовая температура 1 200 К оказывается почти вдвое меньше, чем у неохлаждаемого прибора SOMORA (2 200 К, Университет Берна, Швейцария, прибор установлен в Альпах [15, 16]) и близка к шумовой температуре прибора OZORAM, приёмник которого охлаждается до температуры 70 К (1 100 К, Университет Бремена, Германия, прибор установлен на Шпицбергене [14]).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний приёмника для нового передвижного автоматизированного озонметра 2-миллиметрового диапазона показали, что его входная квазиоптическая система обеспечивает требуемые частотные характеристики, близкие к расчётным, при малых потерях и глубоком подавлении зеркальной полосы приёма. Диаграмма направленности антенны приёмника шириной $1,5^\circ$ по уровню -3 дБ также близка к расчётной и не имеет боковых лепестков до уровня -30 дБ. Однополосная шумовая температура приёмника составляет 1 200 К, что соответствует уровню лучших известных устройств такого типа. Достоинствами нового приёмника являются использование в нём твердотельного гетеродина с большим ресурсом, быстрый выбор оптимального зенитного угла наблюдений и возможность работы с различными анализаторами спектра. В настоящее время новый озонметр, перспективный для применения в сети станций мониторинга состава атмосферы, проходит лабораторные испытания в ФИАН.

Авторы выражают глубокую благодарность С. В. Соломонову (ФИАН) за плодотворные обсуждения работы и замечания, сделанные при подготовке статьи.

Работа поддержана программами ОФН РАН «Проблемы радиофизики» и «Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека», а также РФФИ (гранты 10–02–05004 и 10–02–02100).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Environmental Effects of Ozone Depletion: 2010 Assessment, United Nations Environment Programme. http://ozone.unep.org/Assessment_Panels/EEAP/eeap-report2010.pdf.
2. Atmospheric remote sensing by microwave radiometry / Ed. by M. A. Janssen. New York: J. Wiley and Sons, 1993.
3. Соломонов С. В. // Успехи соврем. радиоэлектрон. 2003. № 1. С. 9.
4. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (GAW). Strategic Plan: 2008–2015. WMO techn. doc. No. 1384. http://www.wmo.ch/pages/prog/arep/gaw/documents/gaw172_sp_15may.pdf.
5. Розанов С. Б., Собельман И. И., Божков В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 857.
6. Розанов С. Б., Божков В. Г., Вдовин В. Ф. и др. // Труды XXII Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн», Лоо, 22–26 сентября 2008 г. Т. 3. С. 67.
7. Есепкина Н. А., Кропоткина Е. П., Круглов С. К. и др. // Успехи соврем. радиоэлектрон. 2003. № 1. С. 52.
8. Логвиненко С. В., Венгер А. П., Ильин Г. Н. и др. // Астрофиз. бюлл. 2008. Т. 63, № 2. С. 205.
9. Соломонов С. В., Игнатъев А. Н., Кропоткина Е. П. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 2. С. 138.
10. Goldsmith P. F. // Proc. IEEE. 1992. V. 80, No. 11. P. 1729.
11. Martin D. H., Puplett E. // Infrared Phys. 1969. V. 10. P. 105.
12. Божков В. Г., Геннеберг В. А., Куркан К. И., Перфильев В. И. // Электронная промышленность. 2001. № 5. С. 77.
13. <http://www-imk.fzk.de/asf/mira/index.html>.
14. Palm M., Hoffmann C. G., Golchert S. H. W., Notholt J. // Atmos. Measurement Techn. 2010. V. 3. P. 1533.
15. Calisesi Y. The stratospheric ozone monitoring radiometer SOMORA: NDSC application document. Res. rep. No. 2003-11. Univ. of Bern, Institute of Applied Physics, 2003.
16. <http://www.iap.unibe.ch/publications/download/613/en>.
17. http://www.iup.uni-bremen.de/ram/index_ramas.html.
18. <http://spider.irf.se/program/afp/mm>.
19. Murphy J. A. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1987. V. 8, No. 9. P. 1165.
20. <http://www.cumingmw.com>.
21. Розанов С. Б. // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41, № 3. С. 362.
22. Соломонов С. В., Розанов С. Б., Кропоткина Е. П., Лукин А. Н. // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45, № 12. С. 1519.
23. Egu I. I. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1994. V. 15, No. 7. P. 1315.
24. Божков В. Г., Геннеберг В. А., Фригер А. Д. // Сб. отчетов по науч. проектам МНТП России «Физика микроволн» за 1995 г. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. Т. 2. С. 237.

Поступила в редакцию 17 июня 2011 г.; принята в печать 21 июля 2011 г.

LOW-NOISE RECEIVER FOR MICROWAVE OZONE MEASUREMENTS

S. B. Rozanov, A. S. Zavgorodniy, S. V. Logvinenko, A. N. Lukin, A. M. Shtanyuk, and O. S. Bol'shakov

We present description of a low-noise Schottky-diode heterodyne receiver for a new transportable microwave ozonometer operating at 142.2 GHz, which is designed for measuring vertical profile of ozone distribution in stratosphere and mesosphere. Calculated and experimental performance of the input quasioptical units of receiver at the Gaussian beams and measured results for the receiver antenna pattern and its noise temperature are presented.