

О возможности создания гетеродинного спектрометра высокого разрешения для ближнего ИК диапазона на основе перестраиваемого диодного лазера

А.Ю.Климчук, А.И.Надеждинский, Я.Я.Понуровский, Ю.П.Шаповалов, А.В.Родин

Представлены результаты гетеродинирования широкополосного излучения в ближнем ИК диапазоне. В качестве локального осциллятора использовался стабилизированный DFB-лазер, а в качестве источника широкополосного излучения – DFB-лазер, возбуждаемый током накачки, меньшим его порогового значения. Дуплексором служил Y-образный волоконный разветвитель на основе одномодового кварцевого волокна. Излучение, смешанное в одномодовом волокне, попадало на фотодетектор, роль которого выполнял p–i–n-диод. Сигнал фотодиода усиливался с помощью предусилителя с сопротивлением обратной связи 240 кОм и шириной полосы ~1 МГц и далее оцифровывался 16-разрядным АЦП. Развертка по частоте осуществлялась перестройкой частоты излучения локального осциллятора. Разработанная система регистрации обеспечивает чувствительность ~1.4% от величины дробового шума при времени накопления ~40 мин.

Ключевые слова: гетеродинирование, диодный лазер, ближний ИК диапазон.

1. Введение

Спектроскопия высокого разрешения является чрезвычайно мощным аналитическим методом, широко применяемым в космических исследованиях, астрофизических наблюдениях, в прикладных задачах контроля состояния окружающей среды и производственных процессов и т. п. Наиболее востребованы спектроскопические методы высокого разрешения в задачах анализа разреженных молекулярных газов, где относительное однородное уширение вращательных линий в ИК диапазоне составляет не более 10^{-5} . Многие актуальные задачи глобального мониторинга климата, в частности дистанционное измерение содержания парниковых газов с орбиты искусственного спутника Земли (ИСЗ), могут быть решены лишь с помощью приборов, разрешающих отдельные вращательные линии в ближнем ИК диапазоне спектра [1].

Высокое спектральное разрешение ($\lambda/\delta\lambda \sim 10^7 - 10^8$) позволяет проводить прямые измерения поля скоростей в потоках газа, а также в атмосферах Земли и других планет по доплеровскому смещению линий. Это реализовано пока лишь в небольшом числе приборов как на Земле, так и на ИСЗ [2–4]. Таким образом, потребность в компактной и недорогой аппаратуре для спектральных измерений с разрешающей силой 10^7 и выше в ближнем и

среднем ИК диапазонах спектра, которая может быть использована в различных фундаментальных и прикладных исследованиях, чрезвычайно велика.

При повышении спектрального разрешения снижается интенсивность излучения, регистрируемого в одном спектральном канале, что при прямых измерениях неизбежно приводит к снижению отношения сигнал/шум. Единственным известным методом, позволяющим избежать снижения регистрирующей способности аппаратуры при увеличении разрешающей силы, является гетеродинный прием, суть которого сводится к переносу исследуемого частотного интервала в область промежуточных частот за счет сложения регистрируемого сигнала с излучением эталонного источника (локального осциллятора (ЛО), или гетеродина) на нелинейном детекторе (смесителе). В этом случае шумы принимаются регистрирующей системой также в относительно узком диапазоне промежуточных частот, что дает возможность получать удовлетворительные шумовые характеристики при высоком спектральном разрешении.

Если в микроволновом и терагерцевом диапазонах спектра гетеродинный прием сигнала широко распространен и является основным методом спектрального анализа сигнала, то в оптическом диапазоне он применяется значительно реже, несмотря на доступность высокостабильных лазеров, которые могут использоваться в качестве ЛО. В первых работах по лазерному гетеродинированию [5] в качестве ЛО применялись обычно CO₂-лазеры, а в последние два десятилетия получили распространение диодные лазеры (ДЛ), позволившие существенно увеличить спектральный диапазон регистрации полезного сигнала [6, 7].

Основные проблемы, возникающие при реализации гетеродинного приема ИК излучения, можно разделить на две группы. К первой группе относятся проблемы создания низкошумящих и при этом малоинерционных детекторов излучения. В этой области в последние десятилетия достигнут существенный прогресс в основном благодаря развитию p–i–n-диодов, широко применяемых в телекоммуникационной сфере [8], а также созданию при-

А.Ю.Климчук. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: art.klimchuk@gmail.com

А.И.Надеждинский, Я.Я.Понуровский, Ю.П.Шаповалов. Институт общей физики РАН им. А.М.Прохорова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: nad@nsc.gpi.ru

А.В.Родин. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; Институт космических исследований РАН, Россия, 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32; e-mail: alexander.rodin@phystech.edu

Поступила в редакцию 28 октября 2011 г., после доработки – 9 декабря 2011 г.

емников на основе болометров на «горячих» электронах [9, 10]. Следует отметить, что при гетеродинном приеме ИК излучения нет необходимости в специальном нелинейном смесителе, поскольку сигнал на детекторе пропорционален поглощаемой мощности, т.е. квадрату напряженности электрического поля.

Вторая группа проблем связана с трудностями совмещения волновых фронтов сигнала и излучения ЛО. Для эффективного преобразования гетеродинного сигнала в область промежуточных частот требуется высокое качество волнового фронта, для достижения чего, как правило, используется диплексор – специальное устройство, совмещающее сигнальный пучок с излучением ЛО. Именно диплексор является наиболее тонким оптическим элементом существующих гетеродинных спектрометров оптического диапазона, и требуемое качество волнового фронта уменьшает геометрическую апертуру этих приборов до пределов дифракционного разрешения наземных телескопов [11]. В нашем случае благодаря совмещению пучков в одномодовом кварцевом волокне условие совпадения волновых фронтов выполняется автоматически.

Нам представляется актуальным исследование возможности создания гетеродинного спектрометра ближнего и среднего ИК диапазонов, который мог бы, при должных калибровке и времени накопления, измерять сигнал мощностью в доли мощности дробового шума. Демонстрация возможности построения относительно простой оптической системы, реализующей подобные характеристики и обеспечивающей спектральное разрешение не ниже 10^6 , и является основной целью настоящей работы.

2. Описание экспериментальной установки

Как указывалось выше, одна из основных проблем гетеродинирования в ближнем ИК диапазоне – жесткие требования к юстировке при совмещении фронтов сигнального излучения и излучения ЛО. Эта проблема снимается, если излучение распространяется в одномодовом волноводе, поэтому в настоящей работе используется Y-образный разветвитель на основе одномодового кварцевого волокна. Кроме того, предлагаемая схема отличается от классической отсутствием спектроанализатора промежуточных частот, поскольку, как будет показано ниже, развертка по спектру осуществляется за счет сканирования частоты ЛО. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис.1.

Установка состоит из ЛО, оптического attenuатора, источника широкополосного излучения, волоконного разветвителя и блока регистрации гетеродинного сигнала, в который входят фотодиод (ФД), предусилитель (ПУ) и АЦП.

В качестве ЛО использовался перестраиваемый DFB-лазер (NTT Electronics) с $\lambda = 1.392$ мкм и волоконным

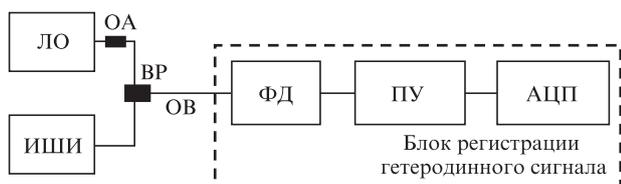


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: ИШИ – источник широкополосного излучения; ОА – оптический attenuатор; ВР – волоконный разветвитель; ОВ – одноимодовое волокно; ФД – фотодиод; ПУ – предусилитель.

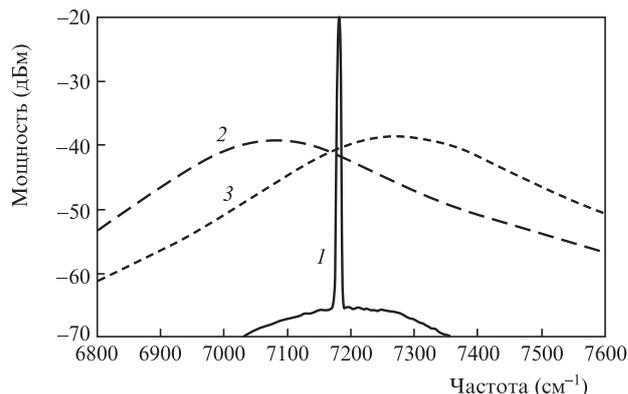


Рис.2. Спектры излучения ЛО (1), а также источников широкополосного излучения 1 (2) и 2 (3) при постоянном токе накачки.

выводом излучения. Для устранения обратной связи применялся разъем FC/APC. С помощью attenuатора можно было управлять мощностью излучения, падающего на ФД.

В экспериментах использовались два источника широкополосного излучения, анализ спектров которых и является задачей предлагаемого гетеродинного спектрометра. В качестве таких источников применялись два полупроводниковых DFB-лазера с волоконным выводом излучения (NEL) с $\lambda = 1.392$ мкм (источник 1) и $\lambda = 1.357$ мкм (источник 2). Они возбуждались током накачки, меньшим его порогового значения. На рис.2 представлены спектры излучения ЛО, возбуждаемого постоянным током, и источников широкополосного излучения, измеренные с помощью лабораторного спектроанализатора Agilent 86143B с разрешением 1 нм. Мощность излучения ЛО в эксперименте составляла 10 мкВт. Заметим, что частоты излучения ЛО и источника 1 в режиме генерации совпадают, а также что область перестройки частоты излучения ЛО находится в спектральной области генерации источника 1, но далеко от области генерации источника 2.

Для управления частотой ЛО использовались два режима работы ДЛ. В первом режиме ток накачки лазера модулировался пилообразным импульсом длительностью 6 мс с периодом 10 мс, так что мертвое время составляло 4 мс. Поскольку частота излучения ДЛ зависит от тока накачки, частота излучения ЛО модулировалась квазилинейной периодической зависимостью от времени с диапазоном перестройки до 3 см^{-1} (импульсный режим) [12]. Во втором режиме работы ток накачки ЛО был постоянным (постоянный режим), а для сканирования частоты ДЛ медленно изменялась его температура. При изменении температуры от 4 до 50°C частота излучения лазера перестраивалась от 7162 до 7194 см^{-1} .

Излучения ЛО и широкополосного источника подавались на два входа Y-образного разветвителя и смешивались в выходном одномодовом волокне (см. рис.1). На выходе одномодового волокна был установлен p-i-n-диод с волоконным входом (Hewlett Packard, PDT0313-FC-A). Сигнал с ФД усиливался с помощью ПУ с сопротивлением обратной связи $R = 240 \text{ кОм}$ и шириной полосы $B = 1 \text{ МГц}$ и затем оцифровывался 16-разрядным АЦП, входящим в состав платы фирмы National Instruments, работавшей на тактовой частоте 111 кГц. Диапазон измеряемых платой напряжений составлял 0–5 В. Разработанное программное обеспечение позволяло регистрировать зависимости сигнала ФД и уровня его шумов от тока накачки (рис.3), а также проводить их усреднение. Время однократного

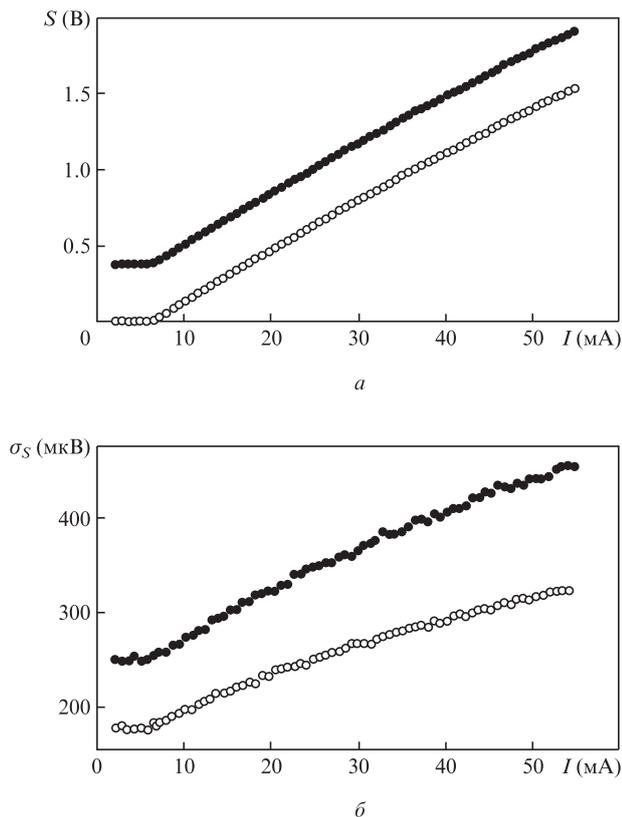


Рис.3. Зависимости от тока накачки I сигналов S (а) и их средне-квадратичных отклонений (σ) при выключенном (о) и включенном (●) источнике широкополосного излучения. ЛО работал в импульсном режиме.

измерения определялось длительностью импульса тока и было равно 10 мс. Усреднение полученных результатов могло проводиться в течение времени от 100 мс до десятков минут. При измерении шумов для каждого значения тока накачки определялась шумовая составляющая сигнала, т.е. разность регистрируемого сигнала и сигнала в отсутствие шума (усредненного). Дисперсия шумовой составляющей усреднялась по реализациям.

При токах накачки, превышающих пороговое значение 7 мА, сигнал с ФД, регистрирующего только излучение ЛО, линейно зависит от тока накачки. Включение источника широкополосного излучения, возбуждаемого постоянным током, приводит к смещению сигнала на 0.4 В.

Шумы ФД при токах ниже порогового определяются шумами блока регистрации (рис.1), а при токах, превышающих пороговый, – дробовыми шумами фототока (см. ниже). Включение источника широкополосного излучения приводит к увеличению шумов при токах как ниже, так и выше порогового.

3. Гетеродинный сигнал

Рассмотрим излучение, падающее на блок регистрации гетеродинного сигнала. Пусть E_{LO} и E_s – напряженности электрического поля когерентного и широкополосного сигнального излучения на ФД соответственно:

$$\begin{aligned}
 E_{LO} &= E_{LO\omega} \exp(-i\omega_{LO}t), \\
 E_s &= \int_0^\infty E_\omega \exp(-i\omega t) d\omega.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ФД измеряет фототок i , определяемый интенсивностью падающего на него излучения:

$$i = K[|E_{LO}|^2 + (E_{LO}E_s^* + E_{LO}^*E_s) + |E_s|^2],
 \tag{2}$$

где K – чувствительность фотодиода. Регистрируемый сигнал U определяется током ФД (2) и сопротивлением обратной связи ПУ:

$$U = Ri.
 \tag{3}$$

Первое и третье слагаемые в квадратных скобках в (2) – постоянные сигналы, обусловленные излучением ЛО и сигнальным излучением соответственно. Второе слагаемое – это аналитический гетеродинный сигнал:

$$(E_{LO}E_s^* + E_{LO}^*E_s) = \text{Re} \int_0^\infty E_{LO\omega} E_\omega \exp[-i(\omega_{LO} - \omega)t] d\omega.
 \tag{4}$$

В области достаточно низких частот полезный гетеродинный сигнал представляет собой белый шум со спектральной плотностью $E_{LO\omega} E_\omega$ (4).

Аналитический шумовой гетеродинный сигнал определяется также шириной B полосы пропускания ПУ, а его среднеквадратичное отклонение – уравнением

$$\sigma_S^{\text{het}} = RK\sqrt{B} E_{LO\omega} E_{\omega_0} = R\sqrt{B \frac{2i_{LO}i_s}{\Delta\omega}}.
 \tag{5}$$

Здесь i_{LO} – фототок, обусловленный излучением ЛО; i_s – фототок, обусловленный излучением широкополосного источника (рис.3,а); $\Delta\omega$ – эффективная ширина спектра сигнального излучения в области перестройки частоты ДЛ; E_{ω_0} определяется спектральной плотностью сигнального излучения на частоте ЛО.

Наряду с гетеродинным шумом существуют дополнительные шумы: паразитный шум блока регистрации (рис.1), дробовой шум фототока, шум излучения ДЛ.

Шум сигнала (3), обусловленный дробовым шумом фототока, определяется уравнением [13]

$$\sigma_S^{\text{SN}} = R\sqrt{ei_{LO}B},
 \tag{6}$$

где e – заряд электрона. Напряжение дробового шума имеет такую же зависимость от сопротивления обратной связи, ширины полосы ПУ и, главное, от мощности излучения ЛО, как и напряжение гетеродинного шума (5). Следовательно, параметры экспериментальной установки должны быть подобраны таким образом, чтобы шум сигнала определялся главным образом дробовым шумом [14].

На рис.4 приведены зависимости среднеквадратичных отклонений тока различных составляющих шума сигнала от фототока для оптимальных параметров установки (см. ниже). Видно, что при больших значениях фототока i шум сигнала, пропорциональный фототоку, начинает преобладать над дробовым шумом. При малых значениях i преобладает шум блока регистрации, который не зависит от фототока. Таким образом, оптимальным диапазоном, в котором преобладает дробовой шум фототока, является диапазон $i = 2-20$ мкА (соответствует области кривых внутри эллипса на рис.4), что отвечает мощности излучения ЛО на ФД 2–20 мкВт. При типичной мощности ДЛ, равной 20 мВт, это означает, что на ФД должно поступать

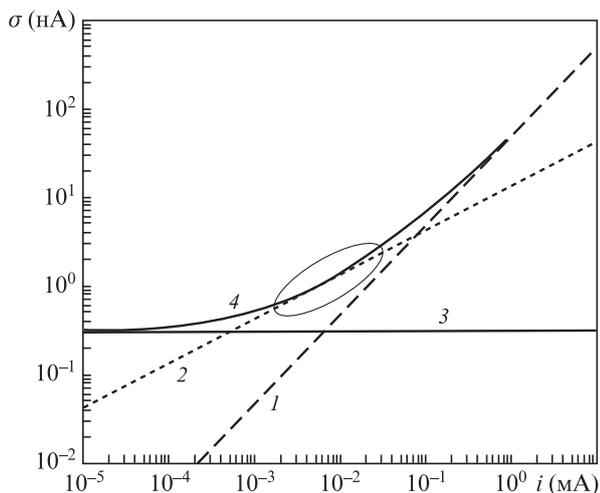


Рис.4. Зависимости от фототока среднеквадратичных отклонений тока шума излучения ЛО (1), дробового шума фототока (2), шума блока регистрации (3), а также суммарного шума системы (4).

0.01%–0.1% излучения ДЛ. Для его ослабления в эксперименте используется аттенуатор (рис.1).

Рассмотрим различные составляющие шума блока регистрации: шум ФД, обусловленный его темновым током, шум дискретности АЦП, тепловой шум сопротивления обратной связи ПУ, шумы тока и напряжения микросхемы, используемой в данном ПУ, а также дробовой шум фототока.

На рис.5 представлены спектральные плотности напряжений шумов G оптимизированного ПУ, рассчитанные для установки со следующими параметрами: мощность ЛО $P = 10$ мкВт, фототок $i = 10$ мкА, ширина полосы пропускания ПУ $B = 1$ МГц. В табл.1 приведены напряжения различных составляющих шума блока регистрации гетеродинного сигнала.

Из результатов моделирования видно, что основной вклад в шумовые характеристики установки вносит, как и планировалось, дробовой шум фототока. Таким образом, при узкой полосе приема (10^6 Гц) поддается изме-

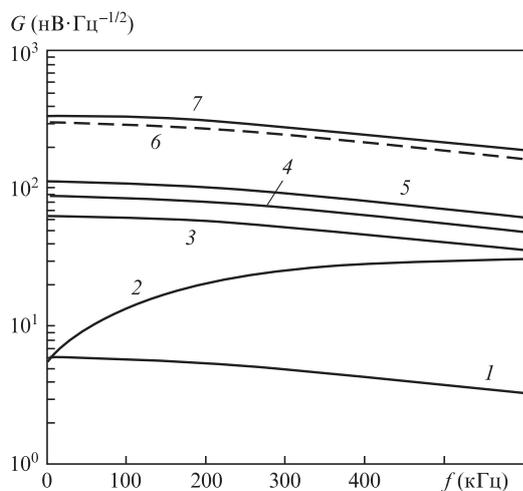


Рис.5. Результаты моделирования спектральных плотностей напряжений различных составляющих шума блока регистрации гетеродинного сигнала: шума ФД (1), шума напряжения микросхемы (2), теплового шума сопротивления обратной связи (3), шума тока микросхемы (4), шума интенсивности ЛО (5), дробового шума фототока (6) и суммарного шума блока регистрации (7).

Табл.1. Напряжения различных составляющих шума блока регистрации гетеродинного сигнала.

Составляющая шума	Напряжение шума (мкВ)
Шум фотодиода	7
Шум напряжения микросхемы	49
Шум дискретности АЦП	34
Тепловой шум сопротивления	73
Шум тока микросхемы	106
Дробовой шум	335
Суммарный шум	362

рению шумовая компонента. Однако в этом случае для регистрации более широких спектров необходимо обеспечить перестройку частоты излучения ЛО (5). В связи с этим и использовался DFB-лазер, возбуждаемый пилообразным импульсом тока накачки.

Метод регистрации гетеродинного сигнала в узкой полосе частот ПУ (~ 1 МГц) является относительно новым в оптическом гетеродинировании и позволяет значительно упростить схему эксперимента, т. к. не требует анализа спектра промежуточных частот.

С использованием формул (5) и (6) найдем выражение для отношения сигнал/шум:

$$\frac{D^{\text{het}}}{D^{\text{SN}}} = 2 \frac{i_s}{e \Delta \omega}, \quad (7)$$

где D^{het} и D^{SN} — дисперсии гетеродинного и дробового шумов соответственно. Из (7) видно, что мощность гетеродинного сигнала можно измерять в единицах мощности дробового шума. Дисперсия напряжения шума, в отличие от среднеквадратичного отклонения напряжения, линейно зависит от тока накачки и поэтому будет использоваться при анализе экспериментальных результатов.

Минимальный детектируемый сигнал определяется шириной «шумовой дорожки» кривой на рис.3,б (темные точки), которая уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из времени накопления. Таким образом, оптимизируя время накопления, можно измерять сигналы, для которых отношение (7) значительно меньше единицы, т. е. можно преодолеть фундаментальный предел измерений, определяемый дробовым шумом фототока.

4. Результаты эксперимента

Сканирование частоты излучения ДЛ, как уже отмечалось выше, может осуществляться за счет изменения его температуры (постоянный режим) или тока накачки (импульсный режим).

На рис.6,а приведен спектр излучения источника 1, полученный при гетеродинном приеме в постоянном режиме работы ЛО. Температура активной зоны ЛО изменялась от 4 до 50 °С, что позволяло изменять частоту его излучения на 22 см⁻¹. Шкала частот была прокалибрована с помощью нескольких известных линий поглощения воды, положение которых было установлено методами диодно-лазерной спектроскопии [15]. Мощность гетеродинного сигнала приведена в единицах мощности дробового шума. Видно, что она составляет 15%–40% мощности дробового шума. Спектральная плотность мощности входного излучения при этом равна $\sim 10^{-20}$ Вт/Гц.

Кроме того спектр излучения источника 1 был измерен с помощью лабораторного спектроанализатора

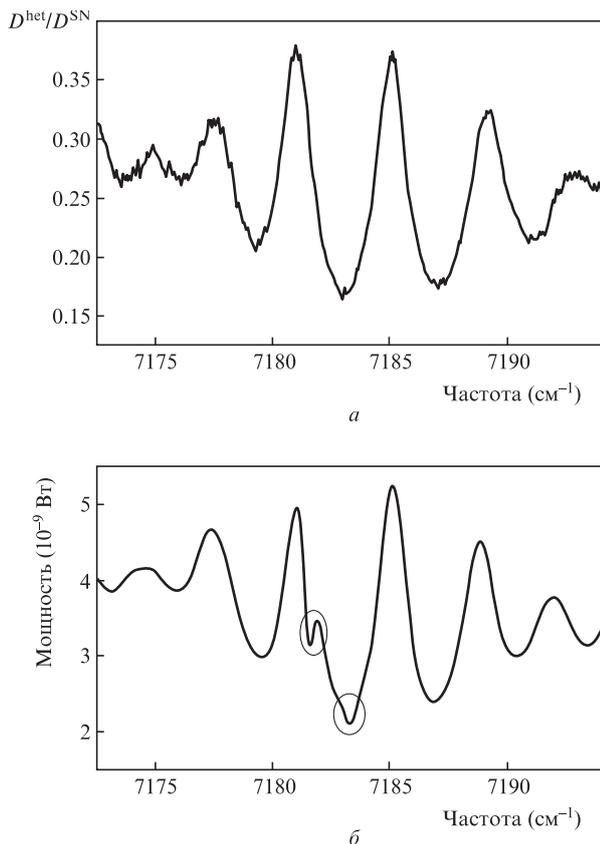


Рис.6. Спектры излучения источника 1, полученные при гетеродинном приеме в постоянном режиме ЛО (а) и с помощью лабораторного спектроанализатора (б). Эллипсами отмечены линии поглощения паров воды, присутствующей в объеме спектроанализатора.

(рис.6,б) с разрешением 0.06 нм. Видно, что спектр гетеродинного сигнала полностью повторяет спектр источника 1. Наблюдаемый спектр отражает модовую структуру излучения источника, проявляющуюся даже в допороговом режиме его работы.

Для дальнейшего изучения описанного метода использовался источник 2, спектральная область генерации которого находилась вне области перестройки частоты ЛО. Таким образом, влияние модовой структуры излучения источника было сведено к минимуму. Измерения проводились в импульсном режиме работы ДЛ, при этом диапазон перестройки частоты ЛО составлял ~ 0.8 см⁻¹. Сначала дисперсия напряжений шумов измерялась при выключенном источнике излучения, а потом при включенном. Результаты эксперимента представлены на рис.7, где показаны зависимости дисперсий напряжений шумов от сигнала ФД, линейно связанного с током накачки (см. формулу (7)). Видно, что полученные зависимости являются прямолинейными. Это подтверждает тот факт, что дисперсии и гетеродинного сигнала, и дробового шума линейно зависят от величины сигнала (см. формулы (5) и (6)).

Наличие постоянного сигнального излучения приводит к смещению начала прямой вправо на 0.3 В (рис.7). При этом дисперсия дробового шума определяется фототоком и описывается той же сплошной прямой. Если интенсивность излучения ЛО близка к нулю, то напряжения шумов, измеренные при включенном источнике, должны совпадать с напряжениями дробовых шумов. Иными словами, начало кривой, описывающей измерения при

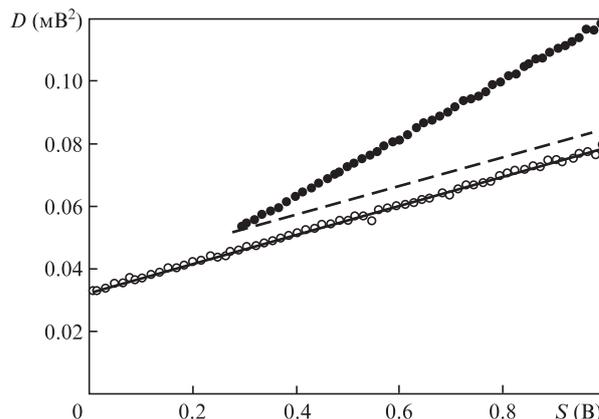


Рис.7. Зависимости дисперсий напряжений шумов D от сигнала ФД при выключенном (○) и включенном (●) источнике 2 широкополосного излучения. Сплошная кривая – расчет по модели дисперсии дробового шума, штриховая кривая – расчет по модели, учитывающей дробовой и гомодинный шум широкополосного излучения.

включенном источнике, должно лежать на прямой, соответствующей дробовому шуму. Видно, что это не так. Следовательно, наблюдаемое несоответствие связано с присутствием дополнительной шумовой компоненты. По-видимому, это гомодинный шум широкополосного сигнального излучения. Такой шумовой механизм дает постоянную составляющую относительно дробового шума. Штриховая прямая на рис.7 описывает суммарную дисперсию дробового шума фототока и гомодинного шума сигнального излучения. Наличие гетеродинного сигнала приводит к увеличению угла наклона экспериментальной прямой. Его дисперсию можно найти, вычитая из данных эксперимента данные, полученные с использованием модели, учитывающей дробовой и гомодинный шум.

В нашем эксперименте отношение дисперсии гетеродинного шума к дисперсии дробового шума (7) равно 0.5. Использование процедуры накопления уменьшает разброс данных, представленных на рис.7. При времени накопления 40 мин ширина «шумовой дорожки» составляет 1.4% от величины дробового шума. Таким образом, анализируемая система регистрации гетеродинного сигнала обеспечивает чувствительность $\sim 1.4\%$ от величины дробового шума (или $\sim 10^{-21}$ Вт/Гц).

Современные системы, работающие в дальнем и среднем ИК диапазонах, не достигли «дробового предела». Типичный уровень аппаратных шумов в 3–6 раз превышает уровень дробовых шумов [6, 7].

5. Заключение

Описанный в работе эксперимент показал эффективность использования одномодового волоконного разветвителя в качестве диплексора при гетеродинировании широкополосного излучения в ближнем ИК диапазоне спектра. В простейшей схеме гетеродинного приема сканирование спектрального диапазона может осуществляться за счет модуляции частоты излучения ЛО, в качестве которого использовался перестраиваемый DFB-лазер. Источниками излучения служили DFB-лазеры, возбуждаемые током накачки, меньшим его порогового значения (для возникновения генерации). Это позволило рассматривать гетеродинный сигнал как шумовой и значительно упростить схему эксперимента по сравнению с клас-

сическим подходом, в котором требуется анализировать спектр промежуточных частот. На построенной экспериментальной установке методом гетеродинамирования измерен спектр источника излучения, который хорошо совпадает со спектром, полученным с помощью лабораторного спектроанализатора. Ожидается, что спектральное разрешение, определяемое шириной линии излучения и стабильностью генерации ЛО, составит ~ 2 МГц, что эквивалентно относительной разрешающей силе спектральных измерений $\lambda/\delta\lambda \sim 10^8$. Простота разработанной схемы открывает широкие возможности для спектральных измерений с высоким разрешением.

Разработанная система регистрации гетеродинного сигнала обеспечивает чувствительность $\sim 1.4\%$ от величины дробового шума, что соответствует спектральной плотности входного излучения $\sim 10^{-21}$ Вт/Гц при времени накопления ~ 40 мин. Это позволяет измерять молекулярное поглощение на уровне $\sim 1\%$. Таким образом, предложенная схема может с успехом использоваться при анализе газовых примесей с малыми концентрациями.

Работа поддержана программой развития МФТИ как научно-исследовательского университета (НИУ) и грантом Минобрнауки № 11.634.31.0074.

1. Butz A., Guerlet S., Hasekamp O., et al. *Geophys. Res. Lett.*, **38** (14), L14812 (2011).
2. Goldstein J.J., Mumma M.J., Kostiuk T., et al. *Icarus*, **94**, 45 (1991).
3. Sornig M., Livengood T., Sonnabend G. *Planet. Space Sci.*, **56** (10), 1399 (2008).
4. Oberheide J., Wu Q., Killeen T.L., et al. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **69** (17-18), 2203 (2007).
5. Parvitte B., Thomas X., Courtois D. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **16** (9), 1533 (1995).
6. Schmulling F., Klumb B., Harter M., Schieder R., Vowinkel B., Winnewisser G. *Appl. Opt.*, **37**, 5771 (1998).
7. Weidmann D., Wysocki G. *Opt. Express*, **17** (1), 248 (2009).
8. Derickson D. *Fiber Optic Test and Measurement* (New Jersey: Prentice Hall, 1997, p.672).
9. Gol'tsman G.N. *Infrared Phys. Technol.*, **40** (3), 199 (1999).
10. Annunziata A.J., Quaranta O., Santavicca D.F. *J. Appl. Phys.*, **108** (8), 084507 (2010).
11. Sonnabend G., Sornig M., Krötz P., et al. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **109** (6), 1016 (2008).
12. Nadezhdinskii A. *Spectrochim. Acta A*, **52**, 959 (1996).
13. *Физическая энциклопедия*. Под ред. А.М.Прохорова (М.: Советская энциклопедия, 1990, с. 20).
14. McElroy J.H. *Appl. Opt.*, **11**, 1619 (1972).
15. Кузьмичев А.С., Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я. *Квантовая электроника*, **41** (7), 650 (2011).