

НАЗЕМНЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ГАЗОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ И УТОЧНЕНИЯ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2004 г. А. В. Афонин*; В. С. Давыдов*; Г. Г. Горбунов*; А. И. Решетников**

* ВНИЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

** Центр дистанционного зондирования атмосферы, пос. Воейково, Ленинградская обл.

Рассмотрен мобильный спектрометрический комплекс для дистанционного исследования пространственного распределения антропогенных газов в пограничном слое атмосферы, состоящий из 28-канального фурье-спектрометра на область спектра 3–14 мкм и газовизора на видимый диапазон спектра. Наряду с решением важных экологических задач измерительный комплекс может быть использован для уточнения данных спутниковых измерений.

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 15.04.2004.

Обеспечение требуемой точности определения содержания атмосферных газов с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) при наличии систематических погрешностей измерений требует подтверждения получаемых данных посредством использования наземной аппаратуры, характеризующейся существенно более высокой точностью измерений. Таким образом, одной из задач создаваемого наземного спектрометрического комплекса являлось решение вопросов калибровки и привязки спутниковых наблюдений.

Как известно, основные антропогенные источники загрязнения атмосферы находятся на земной поверхности либо вблизи нее. Поэтому их перенос, а также процессы, связанные с окислением или восстановлением продуктов антропогенной деятельности, происходят в пограничном слое атмосферы, верхняя граница которого, даже в условиях интенсивного дневного перемешивания, как правило, не превосходит одного километра. Известно несколько методов подтверждения результатов измерений содержания атмосферных газов, выполненных с помощью ИСЗ. Так, для случая измерений общего содержания парниковых газов наиболее приемлем метод, основанный на измерениях солнечных спектров исследуемых газов. Однако, как показывают результаты сравнений данных синхронных измерений таких газов, как CO и CH₄, выполненных в Институте физики атмосферы РАН, Институте экспериментальной медицины и НИИ физики Санкт-Петербургского государственного университета, различия измеренных значений общего содержания без проведения специальных работ по согласованию измерительных шкал могут достигать 15% [1]. Частично это обусловлено использованием в исследовательских группах этих учреждений различных спектральных интервалов солнечного излучения. Случайные погреш-

ности определения общего содержания водяного пара, CO и CH₄ близки друг к другу (как правило, они находятся в пределах от 4 до 6%). Таким образом, для подтверждения спутниковых измерений в тропосфере, а особенно содержания газов в пограничном слое тропосферы требуется использование метода, который обеспечил бы приемлемую точность измерений, именно в этом слое. Поэтому при создании спектрометрического комплекса помимо решения задач исследования общего содержания атмосферных газов была поставлена задача определения содержания газов в пограничном слое. Решение этой задачи предполагало использование собственного излучения тех газов атмосферы, колебательно-вращательные полосы которых достаточно интенсивны и находятся в тепловой области спектра 3,5–5,5 и 7,5–13,5 мкм, свободной от сильных линий поглощения водяного пара. Среди газов, являющихся климатообразующими, это CO₂, O₃ и CH₄, а также CO, не относящийся к парниковым газам, но играющий важную роль в химии озона и метана в тропосфере.

Для определения технических требований к аппаратуре проведены оценки динамических диапазонов спектральных яркостей для зимней и летней моделей атмосферы. Расчеты велись на основе базы данных HITRAN-96 и радиозондовых моделей атмосферы для июля и ноября, полученных в результате статистической обработки данных радиозондирования на аэрологической станции в пос. Воейково под Санкт-Петербургом за несколько лет наблюдений. Оценки спектральных яркостей, выполненные по этим моделям и приведенные в табл. 1, позволили сформулировать требования к чувствительности аппаратуры, предназначенной для измерения концентраций парниковых газов.

В колонках 3 и 4 представлены амплитуды изменений спектральной яркости на однопроцентное из-

Таблица 1. Абсолютные и относительные амплитуды вариаций спектральных яркостей при однопроцентном изменении средней концентрации газа в столбе атмосферы для моделей атмосферы ноября и июля при зенитном угле 0°

Газ	$\sigma_{\max}, \text{см}^{-1}$	$dB/dC \times 10^5, \text{Вт/м}^2 \text{ стер см}^{-1}$ ноябрь	$dB/dC \times 10^5, \text{Вт/м}^2 \text{ стер см}^{-1}$ июль	$dB/B_{\text{общ}}, \%$ ноябрь	$dB/B_{\text{общ}}, \%$ июль
Озон	1053	7,9	11,2	4,36	3,86
Водяной пар	798,5	14,8	22,7	3,79	2,80
Диоксид углерода	724,5	22,4	24,6	3,15	1,94
Закись азота	1278,5	4,9	6,3	3,95	3,15
Метан	1230/1302,5	3,4	5,3	1,60	3,79

менение концентрации всего профиля соответствующего газа, в колонках 5 и 6 представлены относительные изменения спектральной яркости при нормированном изменении концентрации газа, выраженные в процентах, где $B_{\text{общ}}$ – спектральная энергетическая яркость атмосферы при конкретном волновом числе σ . Для большинства газов положение волнового числа, соответствующего максимуму чувствительности, не зависело от модели за исключением CH_4 , для которого для летних условий наблюдений рекомендовался переход от измерений при $\sigma_{\max} = 1230 \text{ см}^{-1}$ на измерения при $\sigma_{\max} = 1302,5 \text{ см}^{-1}$, соответствующем максимальной интенсивности излучения в области Q-ветви фундаментальной полосы метана.

Как следует из табл. 1, наибольшее изменение энергетического потока на входе фотодетектора при однопроцентном изменении общего содержания озона в столбе атмосферы составляет около 4%, а наименьшее для CO_2 – около 2%.

Требования к чувствительности газовизора для выделения NO_2 и SO_2 приведены в работе [2].

В основу наземного газоаналитического комплекса положены аппаратные разработки ВНЦ ГОИ последних лет для исследования пространственного распределения газовых примесей в приземной атмосфере. Наземный измерительный оптический комплекс размещается на микроавтобусе и включает многоканальный фурье-спектрометр (МФС) с системой наведения и сканирования через верхний люк автомашины, видеоспектрорадиометр-газовизор, размещаемый на треноге при выносе из автомашины, генератор сетевого напряжения с блоками питания, ЭВМ Notebook для управления и наведения оптических приборов, а также регистрации и обработки информации.

В связи с необходимостью реализации широкого спектрального диапазона, высокой чувствительности и получения в некоторых задачах дистанционного зондирования пространственной картины

распределения газов в качестве измерительного средства был разработан МФС на охлаждаемых двух линейках по 14 приемников излучения в каждой. Выбор линеек приемников был обусловлен отсутствием в настоящее время надежных и недорогих высокочувствительных охлаждаемых матриц, работающих в длинноволновом диапазоне.

МФС является классическим фурье-спектрометром на основе интерферометра Майкельсона с подвижным и неподвижным зеркалами и объективом, расположенным между интерферометром и приемником излучения [3]. Кратко суть его действия заключается в следующем.

Исследуемое излучение, направляемое на вход прибора сканирующим зеркалом с приводом от шагового двигателя, поступает в интерферометр основного канала. Пройдя интерферометр, излучение исследуемой области пространства с помощью ИК объектива собирается на соответствующем элементе многоэлементного фотоприемника. Интерферометр Майкельсона с одним подвижным зеркалом является интерференционным модулятором. Движение зеркала интерферометра осуществляется с помощью электродинамического привода. На каждом элементе фотоприемного устройства (ФПУ) формируется интерферограмма, зависящая от спектрального состава излучения исследуемого пространства, соответствующего полю зрения каждого чувствительного элемента приемника излучения. В интерферограмме содержатся все электрические частоты, кодирующие входную спектральную информацию. Каждой длине волны соответствует частота $f = 2\nu/\lambda$, где ν – скорость перемещения подвижного зеркала, а λ – длина волны исследуемого излучения. Электрический сигнал интерферограммы проходит соответствующий тракт усиления, состоящий из широкополосного предусилителя и полосового усилителя, попадает через коммутатор на 14-разрядный АЦП и квантуется по разности хода с помощью сиг-

нала референтного канала. Далее информация через интерфейс по определенной программе поступает в ЭВМ. В ЭВМ формируются массивы всех 28 интерферограмм с каждой чувствительной площадки приемника для их последующей обработки и получения спектров излучения.

Для удовлетворения основных требований по чувствительности, предъявляемых к фурье-спектрометру, О.Г. Романовым был разработан и изготовлен оригинальный двухспектральный фоторезистивный охлаждаемый многоэлементный приемник на основе германия, легированного ртутью. В случае применения в разрабатываемом фурье-спектрометре фоторезисторов GeHg реализуется ряд существенных преимуществ перед приемниками других типов, в том числе перед CdHgTe, заключающихся в широком рабочем спектральном диапазоне чувствительности (3–14 мкм), возможности формирования в единой фокальной плоскости нескольких линеек фоточувствительных элементов (ФЧЭ) с различными спектральными зонами чувствительности, определяемыми оптическими охлаждаемыми фильтрами, накладываемыми непосредственно на линейки ФЧЭ. Кроме того, эти приемники обладают высокой обнаружительной способностью, близкой в каждом выбранном спектральном диапазоне к теоретическому пределу, высокой квантовой эффективностью (более 0,5), высоким уровнем выходных сигналов, что облегчает борьбу с помехами вибрационного, электрического и электронного происхождения, возможностью реализации линеек с любыми размерами ФЧЭ в диапазоне от 30 до 200 мкм, а также относительно небольшой стоимостью. Особенностью приемников из германия, легированного ртутью, является низкий уровень рабочей температуры (~30 К), что требует использования газовой криогенной машины (ГКМ) мощностью ~0,35 кВт, работающей по обратному циклу Стirlinga с рабочим ресурсом более 2000 ч. Основные технические характеристики МФС приведены в табл. 2.

Вся поверхность светоделиителя и компенсатора защищена от воздействия влаги специальным влагозащитным покрытием, разрабатываемым на основе каучука, не имеющим полос поглощения в рабочей области спектра и дающим хорошую адгезию. На светоделителе нанесены три зоны светоделительных покрытий. Средняя зона работает в спектральном диапазоне 3–14 мкм. Крайние зоны работают в спектральном диапазоне 0,6–0,7 мкм и рассчитаны для пропускания сигнала референтного канала, использующего в качестве источника He-Ne-лазер ($\lambda = 0,6328$ мкм).

Спектральная характеристика коротковолнового канала 1 формируется полосовым охлаждаемым

Таблица 2. Основные технические характеристики многоканального фурье-спектрометра

Характеристика	Содержание
Спектральный диапазон, мкм	
канал 1	3–5,5
канал 2	3–14
Спектральное разрешение, см ⁻¹	0,75
Светоделитель и компенсатор	
Материал	KCl
Диаметр, мм	70
Толщина, мм	10±0,3
Отношение отражения к пропусканию светоделителя	1±0,15
Диаметр входного зрачка МФС, мм	30
Световой диаметр ИК объектива, мм	34
Относительное отверстие	1:1
Общее поле зрения, рад/град	0,1/6
Поле зрения единичной площадки ФПУ, угл. мин/мрад	26×13/7×3,5
Приёмник излучения	Германий, легированный ртутью
Температура охлаждения, К	35
Обнаружительная способность, см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	
канал 1	8×10 ¹⁰
канал 2	2×10 ¹⁰
Кол-во фоточувствительных элементов в каждом канале	14
Размер чувствительной площадки, мкм	200×100
Рабочий диапазон частот полосового усилителя, Гц	
канал 1	400–900
канал 2	200–600
Подавление вне полосы пропускания фильтров, дБ/окт	20
Длительность интерферограммы, с	4,3
Кол-во отсчётов в интерферограмме	10 ⁴
Динамический диапазон регистрации интерферограммы	10 ⁴
Количество разрядов АЦП	14
Порог чувствительности в максимуме спектральной чувствительности, Вт/м ² ср см ⁻¹	
1 канал на 4,8 мкм (2082 см ⁻¹)	9,3×10 ⁻⁶
2 канал на 11,8 мкм (870 см ⁻¹)	3,4×10 ⁻⁵

фильтром на подложке из лейкосапфира. Требования к обнаружительной способности ФЧЭ в приемных каналах были заданы из условий фотонного ограничения, близкого к теоретическому пределу.

Для полного устранения влияния вибрационных помех на работу спектрометра при измерении пороговых сигналов в ФПУ предусмотрен режим функционирования с выключенным компрессором ГКМ. Для его реализации в конструкцию ФПУ введен аккумулятор холода, обеспечивающий сохранение параметров ФЧЭ (в пределах 90% от номинала) при отключенном ГКМ на время до 3 мин, а так-

же возможность повторения такого цикла через интервал, не превышающий 50 с.

Сигналы с выхода ФПУ поступают в автоматическую систему измерения информации (АСИ) для последующей оцифровки и записи измерительной информации. АСИ построена на базе стандартного Notebook AMLIO Pentium III с применением модуля E-440 для ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в персональных IBM PC совместимых компьютерах.

Спектральная пороговая чувствительность фурье-спектрометра близка к вариациям спектральной яркости при однопроцентном изменении средней концентрации газа в столбе атмосферы в соответствующем спектральном диапазоне, что позволяет использовать разработанную аппаратуру для решения поставленных задач для парниковых газов, а также для определения концентрации многих антропогенных газов, спектр излучения которых находится в области спектра 3,5–14 мкм. В необходимых случаях измерений с земли при наблюдении в зенит недостаток чувствительности может быть восполнен за счет накопления и статистической обработки интерферограмм визируемой области пространства.

Видеоспектрорадиометр (ВСП)-газовизор дает возможность контролировать пространственную картину распределения газов типа SO_2 в УФ и NO_2 в видимом диапазоне поочередно. Как было показано в [4, 5], для определения концентраций вредных газов в приземной атмосфере необходимо получать изображения газовых облаков на фоне естественных и промышленных ландшафтов, а также на фоне чистого и облачного неба. Контролируемые концентрации примесей вредных газов очень малы и в соответствии с предельно допустимыми санитарными нормами составляют 10^{-7} – 10^{-6} объема воздуха. Выделение малых примесей газов происходит на фоне газовых составляющих естественной атмосферы, содержание которых варьируется в пространстве и во времени. В УФ области спектра основным мешающим газом является озон, а в видимой – водяной пар. Кроме того, мешающими факторами, вызывающими появление ложных контрастов, являются аэрозоль и спектральные вариации альbedo подстилающей поверхности и облачных образований.

Принципы построения газовизоров на УФ и видимый диапазоны, обеспечивающие максимальную чувствительность к регистрируемым газам, предложены в [4] и обоснованы в работах [2, 5], а их оптические схемы – в работе [6]. Проведенные оценки параметров аппаратуры показали, что для реализации требуемой пороговой чувствительности ВСП в УФ и видимой областях спектра при регистрации газов типа NO_2 и SO_2 с помощью спектрорадиомет-

ров на базе многоэлементных ПЗС-приемников излучения необходимо создать светосильную оптическую систему с относительным отверстием не хуже 1:2, обеспечить условия накопления сигналов на фоточувствительной матрице для каждого элемента изображения от 0,1 до 20 с. В отличие от спутникового, ВСП для самолетных и наземных измерений должен иметь пространственное разрешение порядка $3'$ и угловое поле зрения не менее 20° (см. табл.3).

Совершенно очевидно, что применение классических спектрометров, позволяющих записать одновременно детальный спектр излучения объекта съемки и пространственное распределение яркости, неприемлемо из-за малых уровней выделяемых спектральных контрастов, требующих большого времени измерений. Поэтому основные требования к аппаратуре можно реализовать, только используя спектрорадиометрический принцип параллельного измерения всех элементов изображения в выбранных спектральных диапазонах. Очевидно, что для повышения чувствительности к обнаруживаемому газу и уменьшения чувствительности к мешающим факторам необходимо формировать фильтры, имеющие высокую корреляцию со структурой полос поглощения газов. Такие устройства в УФ и видимой областях могут быть реализованы на основе интерференционно-поляризационных фильтров (ИПФ), имеющих периодическую структуру полос пропускания. Следовательно, система спектральной фильтрации газовизора должна содержать ИПФ для выделения одинаковых спектральных особенностей поглощения газа и узкополосный интерференционный фильтр (УИФ) для выделения области спектра, совпадающей с полосой поглощения регистрируемого газа и подавления фонового излучения в остальной области чувствительности ПЗС-матрицы [7]. Для подавления фонового излучения в системе спектральной фильтрации ВСП необходимо использовать дополнительную спектральную фильтрацию излучения с помощью цветных стекол, что рассмотрено в работе [8].

Определение параметров фильтров проводилось с точки зрения максимального отношения сигнал/помеха на основе математического моделирования контраста яркости изображений подстилающей поверхности Земли или неба, полученных в максимумах и минимумах полос поглощения обнаруживаемых газов с использованием программы для расчетов яркости спектрального излучения атмосферы по методу *line by line* на основе каталога HITRAN.

Требуемая спектральная функция чувствительности УИФ достигается с помощью расположения фильтра в телецентрическом ходе лучей. При этом угол схождения пучка лучей практически одинаков по полю зрения прибора, что приводит также к одинаковому уширению полосы пропускания УИФ по всему полю зрения.

Измерение газа проводится с помощью регистрации изображения пространства в двух спектральных системах фильтрации, одна из которых (канал № 1) настроена на области слабого поглощения газа, а другая (канал № 2) – на области сильного поглощения одной и той же полосы поглощения газа. Далее по зарегистрированным изображениям определяется относительный контраст, величина которого связана с концентрацией в столбе газа на линии визирования прибора. Система спектральной фильтрации для регистрации газов типа NO_2 и SO_2 используется в ВСП-газовизоре наземного комплекса, предназначенном для работы на фоне дневного неба с земли; здесь два канала работают параллельно, а не последовательно, как в спутниковой системе [4, 5] с отслеживанием сюжета съемки. Параллельная регистрация позволяет минимизировать погрешности, связанные с временной изменчивостью сюжета, например вследствие движения облачных образований.

Система регистрации и обработки информации включает две ПЗС-матрицы в спектральных каналах газовизора № 1 и 2, блок питания и управления ПЗС-матрицами и сопряжения с ЭВМ Notebook. Эта система была создана на НПО "Электрон" на основе ПЗС-камеры типа S1-8M.

Предлагаемый мобильный комплекс для дистанционных измерений позволяет решить ряд важных экологических задач, связанных с определением пространственного распределения антропогенных и парниковых газов в приземной атмосфере, а именно:

определение содержания антропогенных и парниковых газов в пограничном слое атмосферы, в том числе для подтверждения спутниковых измерений, проведенных с помощью спутников;

определение структуры пространственного распределения газовых примесей, распространяющихся от крупномасштабных промышленных центров в прилегающие к ним районы, в том числе в пригородные и курортные зоны, удаленные на десятки километров от эпицентра;

дистанционное определение состава и концентрации газов в шлейфах труб промышленных предприятий и теплоэнергетических центров, пространственного распределения выбросов загрязняющих газов промышленными предприятиями;

контроль распределения газовых загрязнений атмосферы, создаваемых очистительными сооружениями и полигонами захоронения бытовых и промышленных отходов;

получение оперативной информации о состоянии и последствиях выброса в атмосферу загрязняющих газов при чрезвычайных ситуациях.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра по проекту № 2274.

Таблица 3. Основные технические характеристики видеоспектрорадиометра-газовизора

Характеристика	Содержание
Рабочая длина волны, нм	
NO_2	439
SO_2	308
Поле зрения, град	20
Диаметр входного зрачка, мм	9,7
Фокусное расстояние, мм	19,87
Угловое разрешение, угл. мин	3,8
Тип ПЗС-матрицы с виртуальной фазой	ISD048A
Кол-во пикселей	386×290
Размер пиксела, мкм	22×22
Температура охлаждения приёмника, °C	-40
Чувствительность по концентрации NO_2 в приземной атмосфере толщиной 500 м при отношении сигнал/шум, равном 10, и выдержке 1 с	1 ПДК _к

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашин Ф.В., Каменоградский Н.Е., Гречко Е.И., Джолла А.В., Поберовский А.В., Макарова М.В. Сравнение различных методик наземных спектроскопических измерений общего содержания метана в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 3. С. 339–345.
2. Давыдов В.С., Афонин А.В. Газовизор и его применение для исследования пространственного распределения антропогенных газов в приземной атмосфере // Оптический журнал. 1999. № 8. С. 13–18.
3. Горбунов Г.Г., Мошкин Б.Е. Фурье-спектрометры для исследования планетных атмосфер // Оптический журнал. 2000. № 5. С. 69–75.
4. Davydov V.S., Afontin A.V., Reshetnikov A.I. On the possibility to determine harmful technical gas spatial distribution // Proc. SPIE. 1993. V. 2049. P. 364–365.
5. Давыдов В.С., Афонин А.В., Решетников А.И. Принципы построения видеоспектрорадиометров-газовизоров для наблюдения с ИСЗ распределения антропогенных газов в приземной атмосфере // Оптический журнал. 1997. № 3. С. 99–102.
6. Летуновский А.А., Афонин А.В., Грамматин А.П., Цуканова Г.И. Оптические системы видеоспектрорадиометров-газовизоров на УФ и видимую области спектра // Оптический журнал. 1997. № 3. С. 53–55.
7. Афонин А.В., Давыдов В.С., Виноградова Т.А., Казанский В.В. Система спектральной фильтрации в видеоспектрорадиометрах-газовизорах для регистрации NO_2 и SO_2 // Оптический журнал. 2001. № 12. С. 50–55.
8. Афонин А.В., Казанский В.В. Подавление фонового излучения в системах спектральной фильтрации в видеоспектрорадиометрах-газовизорах для регистрации NO_2 и SO_2 // Оптический журнал. 2001. № 12. С. 56–59.