

## Видеоспектрометрическая аппаратура на основе метода фурье-спектрометрии для обнаружения малых газовых примесей в атмосфере

А.В. Афонин<sup>1</sup>, Г.Г. Горбунов<sup>1</sup>, В.Б. Шлишевский<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «НПК «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»»

199034, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, 12

<sup>2</sup> Сибирская государственная геодезическая академия  
631108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10

Поступила в редакцию 24.05.2007 г.

Рассмотрены сферы применения гиперспектральных видеоспектрометров и основные преимущества видеоспектрометров, основанных на применении метода фурье-спектрометрии с использованием многоэлементных приемников. Описан фурье-спектрометр, применяющий глубоководохлаждающий приемник, имеющий две линейки по 14 элементов в каждом. Прибор предназначается для обнаружения малых газовых примесей в атмосфере.

*Ключевые слова:* видеоспектрометр, дистанционное зондирование, многоэлементный приемник излучения, светосила спектрометра, спектральное разрешение, фурье-спектрометр.

### Введение

Дистанционное зондирование (ДЗ) является одним из основных методов изучения окружающей среды и контроля ее состояния. Быстрое, начиная с 80-х гг., лавинообразное развитие ДЗ как единого многодисциплинарного направления исследований в науке и технике обусловлено его большой информативностью, возможностью многоцветного наблюдения за большими территориями. Эти характерные особенности позволяют исследовать новые процессы и явления, происходящие на поверхности Земли и в атмосфере, изучать их динамику, экономить значительное время и средства.

ДЗ широко применяется при решении задач экологического мониторинга и чрезвычайных ситуаций, при этом фундаментом получения достоверной экологической информации во многих случаях служат оптические технологии. Большой ассортимент загрязняющих веществ и многообразие условий их распространения и влияния на окружающую среду сформировали структуру приборно-методического обеспечения экологических исследований. Так, по данным природоохранных организаций, в разряде средств инструментального контроля качества окружающей природной среды принято выделять три большие группы методов (аппаратуры) анализа: лабораторные, экспрессные и автоматические. Высокий уровень использования оптических технологий характеризуют такие цифры:

среди лабораторных методов анализа они составляют свыше 50%, а среди экспрессных и автоматических — от 40 до 100%.

В настоящее время стратегически важными и наиболее приоритетными направлениями развития аппаратуры для ДЗ становятся разработка и применение многоспектральных (с числом элементов спектрального разложения в пределах нескольких десятков) и гиперспектральных (с числом элементов спектрального разложения от 100 и более) систем наблюдения — видеоспектрометров [1, 2], обеспечивающих получение высокодетальных изображений местности в относительно узких участках оптического диапазона спектра.

Сочетание много- или гиперспектральных изображений сцен в различных спектральных интервалах с независимыми пространственными и спектральными (поляризационными) характеристиками с высокоточной радиометрической калибровкой, одновременной коррекцией влияния параметров атмосферы на измерения современными методами моделирования и анализа данных (сжатием, обработкой на борту) позволяет отнести видеоспектрометры к разряду наиболее совершенных и перспективных технических средств ДЗ.

Первые разработки гиперспектральных видеоспектрометров были использованы на спутниках с целью получения гиперспектральных изображений подстилающей поверхности Земли сначала в спектральном диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм, а далее и в диапазонах 3–5 и 8–12 мкм [3].

Значимость работ, связанных с проектированием подобных приборов, отражена, в частности, в «Концепции развития российской космической

\* Александр Васильевич Афонин; Георгий Георгиевич Горбунов (leader@soi.spb.ru); Виктор Брунович Шлишевский (svb\_dom@ngs.ru).

системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года» [4], где в качестве одной из тенденций развития космических технологий зондирования названо «...появление и расширение областей применения сверхмногоспектральных съемок (видеоспектрометрических, гиперспектральных) с числом каналов 256 и более». Начинается разработка и полевых наземных гиперспектральных видеоспектрометров.

Основным элементом много- или гиперспектральных видеоспектрометров, безусловно, является устройство, производящее кодирование спектральной информации, т.е. собственно спектрометрический блок. Как правило, для этой цели используются дисперсионные (призмные и дифракционные) полихроматические системы, которые, обладая существенными ограничениями по светосиле и спектральной разрешающей способности [5], не всегда могут обеспечить получение качественной информации, необходимой для однозначной идентификации исследуемых объектов. В то же время из всех направлений оптического спектрального приборостроения в мире наиболее интенсивно и динамично развивается фурье-спектрометрия [6, 7], представляющая собой продукт самых высоких технологий и соединяющая в себе прецизионную оптику и механику, высокоинформативную электронику и вычислительные устройства с оригинальными алгоритмами и программами управления и обработки.

Общеизвестные преимущества фурье-спектрометров (ФС) по сравнению с классическими спектральными приборами [8] становятся еще более ощутимыми при применении многоэлементных фотоприемников (МФП), предопределяющих возможность создания новых типов высокоэффективных приборов для ДЗ – фурье-видеоспектрометров [9] и фурье-спектровизоров [3]. В совокупности указанные преимущества состоят в следующем:

- большая светосила (большой телесный угол, в пределах которого при том же спектральном разрешении исследуемое излучение может собираться на всю светочувствительную площадку приемника излучения), что в некоторых случаях помогает установить интерферометр ФС в сходящихся пучках телескопа и тем самым исключить дополнительную фокусирующую оптику, необходимую перед щелью классического дисперсионного монохроматора;

- одновременность регистрации всех спектральных интервалов (мультиплексность) на каждом элементе приемника излучения, что не только значительно увеличивает отношение сигнал-шум в регистрируемом спектре, но и позволяет использовать обе координаты МФП для построения исследуемой сцены и применять специальный алгоритм [3] для уменьшения влияния искажения изображения за счет движения носителя и увеличения времени регистрации одиночной интерферограммы, а следовательно, и отношения сигнал-шум;

- точность привязки шкалы волновых чисел по одному внутреннему эталону, что значительно упрощает системы калибровок аппаратуры и увели-

чивает надежность идентификации исследуемых объектов;

- возможность больших вариаций спектрального разрешения, определяемых только величиной реализованной разности хода в плечах интерферометра, что позволяет создавать видеоспектрометрическую аппаратуру, спектральное разрешение которой во время проведения эксперимента может изменяться по специальным программам для конкретных исследуемых сцен (море, лес, степь, пустыня, снег и т.д.) вдоль трассы полета, оптимизируя получаемую информацию [10];

- отсутствие переналожения дифракционных спектральных порядков и, следовательно, большая протяженность регистрируемого спектра, определяемая только светопропусканием оптических деталей и областью чувствительности приемника, что позволяет значительно сократить число разрабатываемых и запускаемых аппаратов;

- наличие дополнительной информации, получаемой из фазового спектра, показывающей перемену направления излучения системы «источник – приемник» для каждой длины волны, что особенно важно в инфракрасной области спектра при работе с неохлаждаемыми приемниками, так как это позволяет внести коррекцию в спектры и повысить надежность получаемой информации;

- возможность компенсации собственного излучения оптических деталей интерферометра за счет противофазности излучения элементов, устанавливаемых до и после светоделительного слоя [11];

- получение дополнительной информации, извлекаемой из фазовых спектров, которую можно использовать для распознавания наличия излучающего точечного подвижного объекта (в его поле зрения) и определения прихода или ухода из поля зрения [12];

- определение направления на точечный излучающий объект с погрешностью не хуже одной десятой величины единичного пиксела приемника по расчету фазового спектра интерферограммы [13];

- практически полное отсутствие влияния рассеянного света;

- однозначность конструкторских и методических решений при построении приборов в очень широком спектральном диапазоне.

Таким образом, именно ФС с МФП имеют максимальные возможности и перспективы для последующего развития и совершенствования видеоспектрометрической аппаратуры, предназначенной для ДЗ.

Идея использования МФП в ФС для получения одновременного пространственного и спектрального разложения была сформулирована в нашей стране впервые еще в 1977 г. [14]. В 1991 г. был разработан уникальный комплекс космической аппаратуры для работы на геостационарной орбите, совмещающий в себе идеи теплопеленгатора и многоэлементного ФС [15]. Однако до настоящего времени в России не разрабатывались ФС, использующие МФП и предназначенные для работы в полевых условиях. Подобные приборы, имеющие

достаточно высокое спектральное разрешение (менее  $0,5 \text{ см}^{-1}$ ), наиболее целесообразно использовать для обнаружения малых газовых примесей в атмосфере и определения их пространственных вариаций.

Для определения возможности получения пространственного распределения газовых примесей в атмосфере был построен двухканальный ФС на основе двух охлаждаемых линеек приемников, содержащих по 14 фоточувствительных элементов (ФЧЭ) каждая. Выбор линеек приемников обусловлен отсутствием надежных и высокочувствительных отечественных охлаждаемых матриц для длинноволнового диапазона. Рабочий спектральный диапазон 1-го канала охватывает область длин волн от 3,0 до 5,5 мкм, 2-го канала — от 3,0 до 14,0 мкм; спектральное разрешение прибора не хуже  $0,5 \text{ см}^{-1}$ , общее поле зрения  $6 \times 6^\circ$ , поле зрения единичных ФЧЭ  $13 \times 26$  угл. мин.

Принципиально прибор является классическим ФС на базе интерферометра Майкельсона, на каждом ФЧЭ МФП которого в пределах его поля зрения формируется интерферограмма, зависящая от спектрального состава излучения исследуемого пространства. Электрический сигнал проходит соответствующий тракт усиления, состоящий из широкополосного предусилителя и полосового усилителя, попадает через коммутатор на 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь и квантуется по разности хода с помощью сигнала референтного канала. Далее информация через интерфейс по определенной программе поступает в ЭВМ, где формируются массивы всех 28 интерферограмм для их последующей обработки и получения спектров излучения.

Для реализации высокой пороговой чувствительности в ФС использован специально разработанный оригинальный фоторезистивный охлаждаемый МФП на основе германия, легированного ртутью [16]. Применение этого материала для изготовления фоточувствительных элементов дает ряд существенных преимуществ по сравнению с приемниками, изготовленными из других материалов (в том числе по сравнению с приемниками на основе  $\text{CdHgTe}$ ), — в первую очередь широкий рабочий диапазон (3–14 мкм) и возможность формирования в единой фокальной плоскости нескольких линеек ФЧЭ с различными спектральными зонами чувствительности, определяемыми оптическими фильтрами, накладываемыми непосредственно на линейки ФЧЭ.

Кроме того,  $\text{GeHg}$ -приемники обладают высокой обнаружительной способностью (близкой в каждом выбранном спектральном диапазоне к теоретическому пределу), высокой квантовой эффективностью (более 50%), высоким уровнем выходных сигналов (вольт-ваттная чувствительность составляет в среднем  $\approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ В/Вт}$ , 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. Однако достигается все это только при

низком уровне рабочей температуры (около 30 К), что требует использования газовых криогенных машин, усложняющих эксплуатацию прибора и увеличивающих его энергопотребление.

В итоге порог чувствительности ФС с МФП в максимуме в первом канале составил  $9,3 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$  (для 4,8 мкм), а во втором —  $3,4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$  (для 11,8 мкм).

В работе [16] приведены оценки динамических диапазонов спектральных яркостей для зимней и летней моделей атмосферы для озона, водяного пара, диоксида углерода и метана. Амплитуды изменений спектральной яркости этих газов на однопроцентное изменение концентрации всего профиля соответствующего газа лежат в пределах  $(3 \div 20) \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$ . Указанные значения пороговой чувствительности ФС с МФП близки вариациям спектральной яркости при однопроцентном изменении средней концентрации этих газов в столбе атмосферы в соответствующем спектральном диапазоне, что свидетельствует о возможности использования прибора для исследования подобных малых газовых примесей в атмосфере и получения пространственной картины их распределения, а также, скорее всего, и для определения концентрации многих антропогенных газов, спектр излучения которых находится в области длин волн 3,5–14,0 мкм. В необходимых случаях измерений с Земли при наблюдении в зенит чувствительность может быть дополнительно повышена за счет накопления и статистической обработки интерферограмм визируемой области пространства (облака, газового шлейфа).

В настоящее время прорабатывается возможность построения матричного ФС с числом ФЧЭ МФП до  $512 \times 512$ , что позволит получить одновременно пространственное и спектральное разрешение еще большей площади исследуемой сцены.

1. Шилин Б.В., Груздев В.Н., Марков А.В., Мочалов В.Н. Использование видеоспектральной аэросъемки для экологического мониторинга // Оптич. ж. 2001. Т. 68. № 12. С. 41–49.
2. Красавцев В.М., Семенов А.Н., Чиков К.Н., Шлишевский В.Б. Видеоспектрометры — новая перспективная аппаратура для дистанционных исследований: Сб. мат-лов // III Междунар. конгресс «ГЕО-СИБИРЬ-2007». Новосибирск, апрель, 2007. Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4. Ч. 1. С. 89–94.
3. Горбунов Г.Г., Еськов Д.Н., Рябова Н.В., Серегин А.Г. Новые применения фурье-спектрометров с многоэлементными приемниками // Оптич. ж. 2005. Т. 72. № 8. С. 71–77.
4. Федеральное космическое агентство. «Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года» // <http://www.gisa.ru/file/file766.doc>.
5. Миберн Дж. Обнаружение и спектрометрия слабых источников света. М.: Мир, 1979. 304 с.
6. Вагин В.А., Гершун М.А., Жижин Г.Н., Тарасов К.И. Светосильные спектральные приборы. М.: Наука, 1988. 264 с.
7. Горбунов Г.Г., Егорова Л.В., Еськов Д.Н. и др. Новые применения фурье-спектрометров // Оптич. ж. 2001. Т. 68. № 8. С. 81–86.

8. Белл Р.Дж. Введение в фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975. 384 с.
9. Горбунов Г.Г., Шлишевский В.Б. О возможности построения гиперспектральной аппаратуры на основе метода фурье-спектроскопии для обнаружения скрытых объектов в полевых условиях: Сб. мат-лов // III Междунар. конгресс «ГЕО-СИБИРЬ-2007». Новосибирск, апрель, 2007. Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4. Ч. 1. С. 74–79.
10. Кравцова В.И. Дистанционное зондирование Земли в первой четверти XXI века // ГИС-ассоциация: Информ. бюл. 2002. № 3.
11. Горбунов Г.Г., Киселев Б.А., Лазарев А.И., Мурашов В.В. Анализ влияния теплового излучения быстросканирующего фурье-спектрометра при работе с низкотемпературными излучателями: Вестн. Сиб. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 1978. Сер. X. Вып. 128. С. 8–13.
12. Горбунов Г.Г., Камышенцев А.Д. Вычисление спектров излучения подвижных точечных объектов в многоканальной фурье-спектрорадиометрии: Вестн. Сиб. ун-та. Сер. X. Вып. 196. С. 58–61.
13. Бурмистров Б.Н., Воронич В.Б., Горбунов Г.Г., Дубков В.И. Пространственные свойства сигнала в сканирующем двухлучевом интерферометре при малоразмерном источнике излучения // Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 70. Вып. 1. С. 208–210.
14. Горбунов Г.Г., Киселев Б.А., Лазарев А.И., Мурашов В.В. О новых возможностях фурье-спектроскопии: Вестн. Сиб. ун-та. Сер. X. Вып. 114. С. 16–17.
15. Горбунов Г.Г., Лазарев А.И., Малютин В.Н., Джаракян А.Л. Комплекс обзорно-спектрометрической аппаратуры МФС-Б // Оптик. ж. 2000. Т. 67. № 5. С. 61–67.
16. Афонин А.В., Давыдов В.С., Горбунов Г.Г. Наземный спектрометрический комплекс для исследования содержания антропогенных газов в пограничном слое атмосферы и уточнения данных спутниковых измерений // Оптик. ж. 2004. Т. 71. № 11. С. 73–77.

*A.V. Afonin, G.G. Gorbunov, V.B. Shlishevsky. The videospectrometer instrumentation on the basis of a Fourier transform spectrometry method for detection of small gas impurity in the atmosphere.*

Spheres of application of hyperspectral videospectrometers and the basic advantages of the videospectrometers based on application of a Fourier transform spectrometry method with the use of multielement photodetectors are considered. The Fourier-spectrometer using the deeply chilled photodetector, having two rulers with 14 elements in each is described. The device is intended for detection of small gas impurity in the atmosphere.

**ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА . Т. 21. № 9. 2008**

Редактор **А.В. Лисевич**  
 Технический редактор **Н.М. Шпагина**  
 Корректор **Г.Г. Иванова**  
 Верстка оригинала-макета **Л.К. Болотовой, Т.В. Исаевой**

Лицензия ИД № 03420 от 05.12.2000 г.

Сдано на верстку 18.06.2008 г. Подписано к печати 18.08.2008 г. Формат 60 × 84%. Печать офсетная.

Бумага типогр. № 1. Гарнитура «Кудряшов». П. л. 10. Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 9,35.

Изд. № 237. Тираж 250 экз. Заказ № 58.

Журнал зарегистрирован в Комитете РФ по печати 5.04.96 г. Регистрационный № 01337.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.  
 Тираж отпечатан в типографии Издательства ИОА СО РАН.  
 634021, Томск, пл. Академика Зуева, 1.