

НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ

© 2005 г. Г. Г. Горбунов*, доктор техн. наук; Д. Н. Еськов**, канд. техн. наук; Н. В. Рябова**;
А. Г. Серегин*, канд. техн. наук

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

** Филиал ЦНИИ "Комета", Санкт-Петербург

Рассматриваются преимущества фурье-спектрометров с многоэлементными приемниками по сравнению с дисперсионными спектрометрами для получения видеоспектрометрической информации. Приводятся примеры использования подобной аппаратуры, главным образом, для дистанционного зондирования Земли.

Коды OCIS: 230.0230, 120.0120, 300.6300.

Поступила в редакцию 22.02.2005.

Введение

Вся история развития спектрального приборостроения – это поиски путей увеличения потока информации, получаемой с помощью прибора за единицу времени, при сохранении или уменьшении габаритов и массы прибора. Информацией спектрального прибора являются сигналы в аналоговом либо цифровом виде, определяющие спектральное, а в некоторых случаях и пространственное разрешение, охватываемый спектральный диапазон, пороговую чувствительность, отношение сигнал/шум и точность регистрации измеряемых величин. В настоящее время различают так называемые классические спектральные приборы, осуществляющие кодировку пространства длинами волн, – дисперсионные устройства (призмы, решетки), и новые приборы, кодирующие длинами волн электрические частоты (фурье-спектрометры и адамар-спектрометры) [1]. Среди последних наиболее успешно развиваются фурье-спектрометры.

Замечательное изобретение Майкельсона – двухлучевой интерферометр, за которое он получил Нобелевскую премию, дало первый толчок к использованию такого интерферометра для расшифровки спектров. В 1887 году Майкельсон совместно с Морли использовал интерферометр для исследования сверхтонких линий ртути, натрия и других источников по кривым видности, характеризующим изменение контраста интерференционной картины при изменении разности хода. Принцип нового метода был впервые сформулирован Н.Г. Бахшиевым [2] как возможность кодирования длинами волн электрических частот, а не пространства, что было свойственно всем известным до того времени спектральным приборам. Основы нового направления и преимущества метода были сформулированы П. Жакино, Ж. Фелжетом, П. Конном и Ж. Конн [3, 4].

Особенности фурье-спектрометров

Значительные преимущества приборов, построенных на этом принципе, по сравнению с классическими спектрометрами были сформулированы как в самом начале их развития [3, 4], так и на более поздней стадии [5]:

- большая светосила ΩS – большой телесный угол Ω , в пределах которого с площади кодирующего устройства S может собираться исследуемое излучение при том же относительном спектральном разрешении $R = \lambda/d\lambda$;
- мультиплексность – одновременность регистрации всех спектральных интервалов m ;
- высокая точность привязки шкалы волновых чисел $\sigma = 1/\lambda$ по одному внутреннему эталону;
- большой диапазон реализуемых спектральных разрешений $d\sigma$, определяемых только величиной реализованной разности хода в плечах интерферометра;
- большая ширина одновременно регистрируемого спектрального интервала $\Delta\sigma$, ограничиваемая только пропусканием оптики и чувствительностью приемника;
- отсутствие влияния рассеянного света;
- однозначность конструкторских и методических решений при построении приборов с различными спектральным диапазоном и спектральным разрешением.

Фактор многоканальности приемников

В последнее десятилетие быстрое продвижение технологий матричных приемников и компьютерных методов обработки сигнала привели к созданию гиперспектральных изображающих спектрометров ($d\lambda/\lambda = 0,01$, где $d\lambda$ – спектральный разрешаемый интервал, λ – длина волны исследуемого спектра), так

называемых видеоспектрометров, в которых для каждого пиксела изображения наблюдаемой сцены в матричном приемнике регистрируется непрерывный спектр с высоким разрешением и в широком спектральном диапазоне. Таким образом, к обычным двум пространственным координатам изображения объекта добавляется третья, спектральная, координата, и выходной сигнал формируется в виде так называемого гиперспектрального куба – “куба данных”. Видеоспектрометры позволили радикально увеличить информационные способности приборов формирования изображения прежде всего в такой важной и многоотраслевой области, как дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), где они получили наибольшее распространение. Представилась возможность каждый наблюдаемый объект идентифицировать по его спектральному “отпечатку”. В большинстве гражданских (экологических, гидрометеорологических, картографических) и особенно военных программ всех высокоразвитых стран обязательно присутствуют разработки гиперспектральных видеоспектрометров ДЗЗ для наземных, воздушных и космических носителей.

На период 2000–2002 гг. пришелся пик разработок широкого разнообразия конструкций видеоспектрометров разного класса – фильтровых, дисперсионных и фурье-спектрометров, и к 2005 г. прошел уже 10-й Международный конгресс по видеоспектрометрии с освещением вопросов разработки, эксплуатации, калибровки и обработки информации [6]. Развитие подобной аппаратуры идет в направлении определения наиболее перспективных способов получения спектральной информации, повышения чувствительности, спектрального диапазона и разрешения, увеличения точности привязки шкалы длин волн при сокращении габаритов и массы, введении унифицированных узлов аппаратуры и т. п. При этом необходимо обеспечить возможность

борьбы с ухудшением качества изображения из-за движения носителя (смазом) и обработку информации в реальном времени.

Первоначально был освоен спектральный диапазон 0,4–2,5 мкм при разрешении $d\lambda/\lambda = 0,1$ (много-спектральный) и $d\lambda/\lambda = 0,01$ (гиперспектральный), затем и атмосферные окна ИК области спектра 3–5 и 8–12 мкм. Преимущественно использовались дисперсионные видеоспектрометры. К настоящему времени большое развитие получили и фурье-спектрометры, которые способны одновременно получать и высокое пространственное, и высокое спектральное разрешение $d\lambda/\lambda < 0,001$ (ультраспектральные) в широком спектральном диапазоне [7].

Различные физические принципы кодирования спектральной информации и различные режимы получения пространственной информации в обоих типах видеоспектрометров, а также некоторые разночтения определяющих характеристик качества систем, связанных с использованием фотоприемных матриц (ФПМ), вызвали дискуссию по сравнительной оценке обоих типов приборов [8, 9], к участию в которой присоединяются и авторы данной статьи.

Сравнительный анализ

Проведем сравнение обнаружительных способностей гиперспектральных видеоспектрометров, использующих фурье-спектрометры с ФПМ, и традиционных гиперспектральных видеоспектрометров, использующих в качестве кодирующего элемента призмы или дифракционные решетки и имеющих те же многоэлементные приемники.

На рис. 1 представлена блок-схема получения гиперспектрального куба – “куба данных” исследуемой сцены в дисперсионном видеоспектрометре. Съемка сцены проводится в режиме построчного сканирования (pushbroom). Изображение сцены

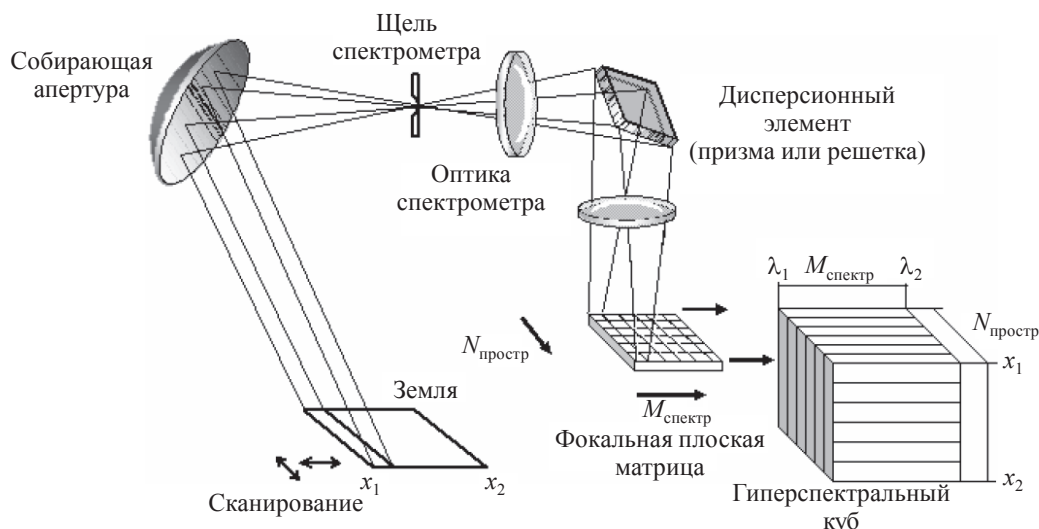


Рис. 1. Блок-схема получения “куба данных” исследуемой сцены в дифракционном видеоспектрометре.

фокусируется на входную щель спектрометра. Излучение, пропущенное через входную щель, отражается или проходит сквозь диспергирующий элемент (дифракционную решетку или призму) и далее направляется на $N \times M$ элементов фотоприемной матрицы. Таким образом, на двумерном фотоприемнике формируется пространственно-спектральное изображение. Спектральные изображения входной щели спектрометра рассредоточены по $M_{\text{спектр}}$ детекторов, расположенных перпендикулярно щели. На каждом детекторе данного столбца матрицы снимается усредненная спектральная информация $(\lambda_2 - \lambda_1)/M_{\text{спектр}}$, где λ_1 и λ_2 – длины волн в конечных точках диапазона исследуемого спектрального интервала, а $M_{\text{спектр}}$ – число детекторов в столбце матрицы видеопреобразователя, параллельном направлению сканирования спектрометра. Видеоинформация, собранная с этого столбца матрицы фотоприемника, представляет собой вертикальный срез получаемого гиперспектрального “куба данных” (рис. 1), в то время как сканирование по второй пространственной координате во времени происходит за счет движения носителя вдоль трека.

На рис. 2 представлена блок-схема получения “куба данных” исследуемой сцены в фурье-спектрометре. Сцена регистрируется в несканирующем режиме кадровой съемки. Фурье-спектрометр смотрит на изображаемую сцену сквозь динамический (изменяющий разность хода во времени) двухлучевой интерферометр Майкельсона с $N \times M$ -элементным матричным фотоприемным устройством на выходе. Передвижение зеркала интерферометра со скоростью v переводит спектральную информацию во времен-

ную интерферограмму, в которой определенные длины волн кодируют определенные электрические частоты $f = 2v/\lambda$. С каждого пиксела матрицы фотоприемников за время перемещения зеркала интерферометра снимается своя уникальная интерферограмма, представляющая функцию корреляции спектрального излучения зоны пространства, сопряженной с этим элементом. Чтобы получить конечный пространственно-спектральный “куб данных”, необходимо выполнить преобразование Фурье интерферограммы. Спектральное разрешение зависит от разности хода, достигнутой за время сканирования подвижного зеркала. Пространственное разрешение по двум координатам пространства зависит от реализованного поля зрения единичного элемента матрицы. Общее поле зрения определяется числом элементов в строках и столбцах приемной матрицы.

Из рис. 1 и 2 видно, что формирование сигнала и шумов приемника существенно различается для каждого типа прибора и в каждом случае используются различные модели сигнала и шума. В работе [8] было показано, что несмотря на существенные различия механизмов проявления шумов, если равны пространственное и спектральное разрешения, числа пикселей детектора в фокальной плоскости, равны исследуемые сцены и времена сбора информации, а ограничением является только фотонный шум, то и дисперсионные, и фурье-видеоспектрометры дают практически одинаковое отношение сигнал/шум в получаемом спектре.

Таким образом, на первый взгляд, можно сделать вывод о равных возможностях видеодисперсионных спектрометров и динамических фурье-спектрометров,

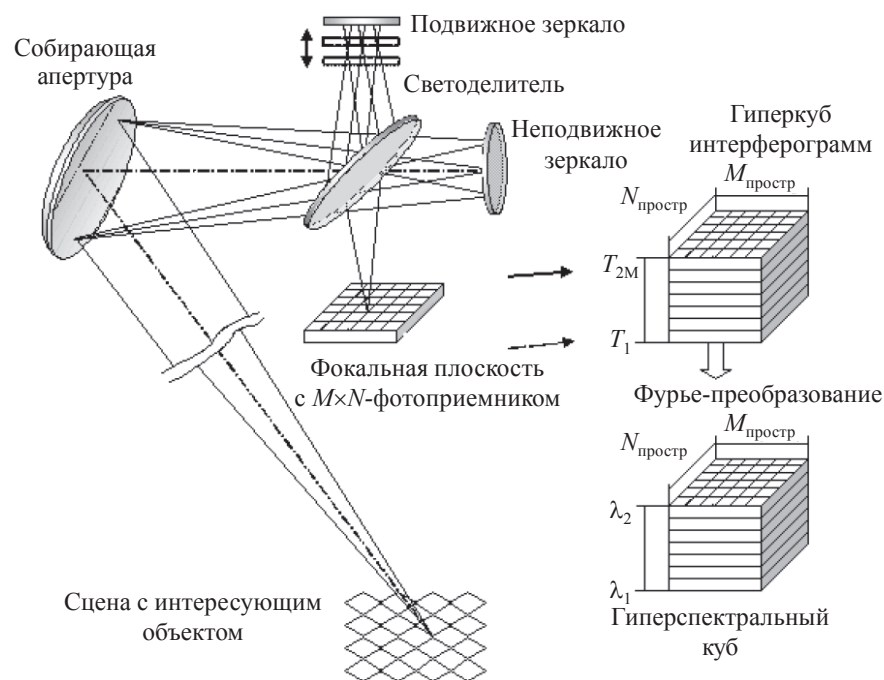


Рис. 2. Блок-схема получения “куба данных” исследуемой сцены в видеоспектрометре на основе фурье-спектрометра с матричным приемником.

что и постулируется в работе [8]. Действительно, в проводимом сравнении основополагающие, как обычно считается, преимущества фурье-спектрометров – большая светосила и мультиплексность – в видеоконструкциях с матричным приемником практически не работают. Большая светосила не может быть использована, так как для каждого отдельного пиксела при средних спектральных разрешениях она избыточна. В первом приближении не сказывается и фактор мультиплексности, так как время регистрации интерферограммы (любым единичным пикселем ФПМ) фурье-спектрометра и время регистрации спектра (столбцом ФПМ) дисперсионного спектрометра остаются одинаковыми. Поэтому, как показано в [8], отношение сигнал/шум при всех вышеперечисленных ограничениях остается одинаковым в обоих типах спектрометров.

Однако преимущества мультиплексности и светосилы в фурье-спектрометрах все-таки могут использоваться. Каждый отдельный пиксел двумерной матрицы регистрирует спектр определенной зоны наблюдаемой сцены. При перемещении зоны сцены по матрице за счет движения носителя, при подборе размеров матрицы, спектрального разрешения и скорости движения носителя, применении специального алгоритма съема информации можно значительно увеличить время регистрации отдельной интерферограммы вплоть до времени прохождения исследуемого элемента сцены через все столбцы или строки приемной матрицы.

Тем самым можно не только повысить отношение сигнал/шум (до нескольких десятков), но и уменьшить влияние “смаза” изображения, вызываемого однонаправленным движением носителя, что особенно важно при высоком пространственном разрешении и быстром движении носителя.

Большая светосила фурье-спектрометра позволяет также устанавливать его непосредственно в сходящемся пучке лучей входного телескопа без применения дополнительной фокусирующей оптики, необходимой при установке щели в дисперсионных системах, позволяя тем самым значительно уменьшить габариты и массу аппаратуры.

Следующим весьма важным преимуществом фурье-спектрометров являются отсутствие переналожения спектров и, следовательно, большая ширина регистрируемого спектра. Достаточно рассмотреть два примера требований, предъявляемых к видеоспектрометрам: работа в спектральном диапазоне 2–20 мкм и работа в спектральном интервале 0,9–3,5 мкм. В обоих случаях при разработке видеоспектрометра на основе фурье-спектрометра весь спектральный диапазон может быть перекрыт одним прибором, тогда как в случае использования классического спектрометра в первом диапазоне требуется установка четырех сменных (параллель-

но работающих) дифракционных решеток и соответствующих наборов отрезающих фильтров. Это, безусловно, либо значительно увеличивает массогабаритные характеристики аппаратуры, либо ухудшает ее технические характеристики.

Использование аппаратуры, работающей в широком спектральном диапазоне, открывает дополнительные возможности селекции исследуемых объектов на фоне системы Земля–атмосфера при наблюдении из космоса. Появляется возможность одновременного наблюдения из космоса в двух и более полосах поглощения атмосферными газами (например, в полосах вблизи спектральных линий 2,7, 4,3 и 6,3 мкм), что увеличивает вероятность обнаружения особенностей исследуемых сцен на фоне помех.

Весьма важным является и отсутствие влияния рассеянного света, значительно проявляющееся в коротковолновых участках спектра. Во многих измерениях, проводимых с дифракционными решетками, зачастую именно этот фактор и определяет истинную величину шума. Отсутствие этого влияния позволяет уменьшить число элементов схемы и длину бленда, что также приводит к уменьшению массогабаритных характеристик.

Остальные вышеприведенные преимущества фурье-спектрометров практически позволяют получить новые качества разрабатываемой аппаратуры. Точное определение волнового числа (длины волны) по одному встроенному эталону значительно повышает надежность идентификации объектов (особенно в полосах поглощения) по имеющемуся банку спектрально-топологических характеристик. Возможность достаточно легкого проектирования аппаратуры с избыточным спектральным разрешением, зависящим только от реализованной разности хода, а не от размеров оптических элементов, позволяет оптимизировать при каждом эксперименте этот параметр, заранее автоматически устанавливая различные требуемые спектральные разрешения для различных исследуемых сцен. Это дает возможность адаптации аппаратуры к эксперименту. Общность конструирования аппаратуры позволяет очень легко унифицировать различные приборы, работающие в разных интервалах спектра и при разных спектральных разрешениях.

Следовательно, в фурье-видеоспектрометрах с многоэлементными приемниками заложены большие возможности для последующего развития и совершенствования подобной аппаратуры.

Динамические фурье-видеоспектрометры

Приведем некоторые примеры использования фурье-спектрометров для создания видеоспектрометрической аппаратуры.

Скорее всего, первый видеоспектрометр на основе применения интерферометра Майкельсона с матричным приемником был создан в СССР еще в самом начале 90-х годов и описан в [10].

В настоящее время в разработках гиперспектральной аппаратуры ДЗЗ лидируют США, особенно в области решения военных задач. Благодаря таким преимуществам, как высокое пропускание, одновременное измерение всех длин волн, наличие внутренней калибровки длин волн и наилучшей инструментальной формы линии, видеоспектрометры, использующие интерферометр Майкельсона, нашли наибольшее применение в ИК исследованиях целей и фонов и прежде всего газообразных сред, требующих использования самого высокого спектрального разрешения, не доступного в приборах других классов.

В середине 90-х годов Министерство обороны США для решения задач обнаружения ракет и ракетных двигателей программы "SBIRS" ПРО начали работы по проекту IRIS (IR Imaging Spectroradiometers), проведя проектирование и анализ нескольких технических подходов к ИК измерениям пространственно-спектральных характеристик различных военных целей [11, 12]. Исследовались все основные типы видеоспектрометров, в том числе использующие принцип фурье-спектрометрии. Разработки экспериментальных приборов для военных летательных аппаратов были поручены Исследовательской лаборатории BBC в программе продвинутых технологий SPIRITT (Spectral IR Remote Imaging Transition Testbed), нацеленной на решение проблем обнаружения и идентификации сложных целей, особенно скрытых и замаскированных, и наведения на них. Установка полетного образца прибора планировалась на конец 2005 г. [13].

В 1996 г. выполнены первые летные эксперименты с воздушных и спутниковых носителей по использованию ИК фурье-спектрометров при обнаружении военных целей на фоне окружающего естественного пейзажа [14]. В том же 1996 году видеоспектрометр, использующий фурье-спектрометр на основе интерферометра Майкельсона (разработка университета штата Юта, США), летал в составе ИК аппаратуры в известном военно-космическом эксперименте MSX BMDO по сбору данных наземных и небесных фонов и целей программы SBIRS. Спектрометр размещался в фокусе ИК внеосевого телескопа SPIRIT-III диаметром 35 см и работал в диапазоне 2,5–30 мкм в разных режимах сканирования разности хода (изменяющих реальное спектральное разрешение), для измерения которой использовался опорный He–Ne-лазер [15].

В 2000 году США запустили два космических аппарата (КА) с устройствами фурье-спектромет-

рии – MTI (Multispectral Thermal Imager) двойного назначения [16] и специальный экспериментальный спутник Mightysat-II [17–19]. В последнем испытывался статический фурье-спектрометр (изменяющий разность хода в пространстве и не имеющий подвижных элементов), разработанный фирмой Kestrel, Мичиганским технологическим институтом и Исследовательской лабораторией BBC по схеме интерферометра Саньяка. Этот спектрометр предназначен для классификации объектов ДЗЗ, демонстрации качества работы в условиях космоса, съемки в режиме строчного сканирования линейкой в 1024 пиксела и имеет следующие характеристики: 150 спектральных каналов в диапазоне 475–1100 нм, спектральное разрешение 85,4 см⁻¹, пространственное разрешение 30 м, полоса захвата 6,5×26 км и 15×20 км для видимого и ближнего ИК диапазонов соответственно. Спутник Mightysat по своим параметрам считается первой космической рабочей системой гиперспектральной съемки.

К 2003 г. NASA провела самолетные испытания прототипа геостационарного видеоспектрометра на основе фурье-спектрометра GIFTS (Geostationary Imaging Fourier Transform Spectrometer), предназначенного для установки на погодный спутник EO-3, создаваемый по программе демонстрации новых технологий New Millenium. На его основе в 2005 г. планируется осуществить запуск рабочего спутника двойного назначения. Спектрометр разработки BAE Systems и университета штата Юта имеет несколько сот спектральных каналов в ИК диапазонах 4,4–6,1 и 8,85–14 мкм, спектральное разрешение 0,3 см⁻¹, пространственное разрешение 4 км, две ФПМ 128×128 (размер пикселей 60 мкм).

Аппаратура на спутнике будет определять состав и свойства атмосферы, перенос загрязнений в атмосфере с высоким разрешением и обеспечивать точные прогнозы погодных условий [20].

В июле 2004 г. NASA запустила на полярную орбиту спутник Aura по программе EOS (Earth Observing System) исследований глобальных изменений климата с аппаратурой, включающей ИК фурье-спектрометр, использующий интерферометр Майкельсона TES для измерения излучения атмосферы и картирования тропосферного озона. Основные характеристики спектрометра: спектральный диапазон 3,2–15,4 мкм, разрешение 0,025 см⁻¹, пространственное разрешение 0,5×5 км. Для контроля выборки интерферограмм применен твердотельный Nd:YAG-лазер, более стабильный и точный, чем He–Ne-лазер [21, 22].

Применение динамических фурье-спектрометров исследуется в перспективных проектах NASA космических миссий исследования планет Солнечной системы и других миров [23, 24].

Ряд других стран, планирующих системы ДЗЗ нового поколения, ведут обширные разработки гиперспектральных датчиков, в том числе видеоспектрометров Фурье. Например, французским космическим агентством CNES разработан динамический фурье-спектрометр программы глобальных исследований окружающей среды и измерения характеристик атмосферы на КА Metop. Инструмент имеет спектральный диапазон 3,6–15 мкм, скорость сканирования разности хода 27,36–0,02 см/с, отсчет разности хода выполняется с использованием опорного He–Ne-лазера [25].

Оригинальная конструкция широкопольного ИК динамического видеоспектрометра разработана специалистами Италии и Великобритании для космического носителя. Оптика интерферометра имеет средства полной компенсации наклонов волнового фронта и измеряет обе плоскости поляризации источника одним детектором [26].

Статические фурье-видеоспектрометры

Хотя основное внимание в данной статье уделено динамическим фурье-спектрометрам, использующим интерферометр Майкельсона, нельзя не отметить ряд интересных конструкций статических фурье-видеоспектрометров разного назначения, проектируемых на основе схем интерферометров Саньяка и поляризационных интерферометров Волластона и Саварра. Они обладают большей компактностью и большей механической стабильностью, что особенно важно для воздушных носителей, но существенно меньшим спектральным разрешением, чем фурье-спектрометры, использующие интерферометр Майкельсона, и работают в режиме построчного пространственного сканирования наблюдаемой сцены аналогично дисперсионным спектрометрам. Фурье-видеоспектрометры на основе интерферометра Саньяка исследуются в США [17–19], в том числе спектрополяриметры военного назначения [27], а также в Европе (проведено сравнение с дисперсионными) [28, 29] и Японии [30]. На основе интерферометра Волластона выполнены статические фурье-спектрометры в США [31], а в Японии [32] и Китае [33] – на основе полярископа Саварра.

Заключение

Перечень различных разработок гиперспектральной аппаратуры может быть продолжен гораздо дальше, включая конструкции в целом и элементы аппаратного и программного исполнения. Приведенные примеры показывают важность и интенсивность проводимых в мире разработок гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования

Земли на основе методов фурье-спектроскопии, которые пока используют далеко не все преимущества последних.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толмачев Ю.А. Новые спектральные приборы. Принципы работы. Л.: Наука, 1976. 125 с.
2. Бахшиев Н.Г. Новый принцип спектрометрии // Опт. и спектр. 1957. Т. 2. С. 816–818.
3. Конн Ж., Делуи Э., Конн П. и др. Инфракрасная спектроскопия высокого разрешения. Сб. статей / Под ред. Жижина Г.Н. М.: Мир, 1971.
4. Vanasse G. Spectrometric techniques. N. Y.: Academic Press, 1981.
5. Горбунов Г.Г., Киселев Б.А. Фурье-спектроскопия: состояние и тенденции развития // Оптический журнал. 1993. Т. 60. № 12. С. 3–6.
6. Imaging Spectrometry X // Proc. SPIE. 2001. V. 5546.
7. Горбунов Г.Г., Киселев Б.А., Лазарев А.И., Мурашов В.В. О новых возможностях фурье-спектроскопии // Вестник СВН. Сер. X. 1977. В. 114. С. 16–17.
8. Schumann L.W., Lomheim T.S. Infrared hyperspectral imaging Fourier transform and dispersive spectrometers: comparison of signal-to-noise based performance // Proc. SPIE. 2002. V. 4480. P. 1–14.
9. Sellar R.G., Boreman G.D., Kirkland L.E. Comparison of signal collection abilities of different classes of imaging spectrometers // Proc. SPIE. 2002. V. 4816. P. 389–396.
10. Горбунов Г.Г., Джарабян А.Л., Лазарев А.И., Малютин В.Н. Комплекс обзорно-спектрометрической аппаратуры МФС-Б // Оптический журнал. 2000. Т. 67 № 5. С. 61–67.
11. Rapp R.J., Register H.I. IR Spectroradiometer Program Overview // Proc. SPIE. 1995. V. 2480. P. 314–321.
12. Wall R. Hyperspectral reconnaissance USAF interest // AWST. 2001. V. 154. № 4. P. 55–56.
13. ARRL hyperspectral testbed // Jane's IDR. 2001. V. 34. № 3. P. 15.
14. Schwartz C.R., Cederquist J.N., Eismann M.T. Target detection using IR spectral sensors // Proc. SPIE. 1996. V. 2819. P. 182–194.
15. Sargent S.G., Greeman M.E., Hansen S.M. et al. Resampling algorithm for the Spatial IR Telescope (SPIRIT-III) Fourier transform spectrometer // Proc. SPIE. 1998. V. 3437. P. 71–82.
16. Аганов В. На орбите новый КА наблюдения // Новости космонавтики. 2000. № 5. С. 22–23.
17. Rafert J.B., Otten L.J. et al. Satellite sends hyperspectral imaging from space // Laser Focus. 2001. № 5. P. 181–183.
18. Otten L.J., Jones B.A., Edwards A. et al. Space-based hyperspectral imagery of the Moon and Earth limb // Proc. SPIE. 2001. V. 4540. P. 88–99.

19. *Freeman J.* Mightysat-II soars beyond experimental objectives: prelinamary results // AIAA Space-2001 Conf. and Exposition. P. 696–706.
20. *Stobie J.A., Hairston S.P., Tobin S.P. et al.* Imaging sensor for the Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS) // *Proc. SPIE.* 2002. V. 4818. P. 213–218.
21. *Beer R., Glavich T.A., Rider D.M.* Tropospheric emission spectrometer (TES) for the Earth Observing system's Aura Satellite // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. № 9. P. 1450–1458.
22. *Sarkissian E., Bowman K.W.* Application of nonuniform spectral resampling in Fourier-transform spectrometry // *Appl. Opt.* 2003. V. 42. № 6. P. 1122–1131.
23. *Cageao R.P., Blavier J.-F., McGuire J.P. et al.* High-resolution Fourier transform UV spectrometer for the measurement of atmospheric trace species: application to OH // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. № 12. P. 2024–2030.
24. *Kendrick R.L., Smith E.H., Duncan A.L.* Lockheed-Martin Imaging Fourier transform spectrometry with a Fizeau Interferometer // *Proc. SPIE.* 2003. V. 4852. P. 657–662.
25. *Henault F., Buil C., Chidaine B. et al.* Spaceborn IR interferometer of the IASI instrument // *Proc. SPIE.* 1998. V. 3437. P. 192–202.
26. *Carli B., Barbis A., Harries J.E. et al.* Design of an efficient broadband far-IR Fourier-transform spectrometer // *Appl. Opt.* 1999. № 18. P. 3945–3952.
27. *Tye J.S., Turner T.S.* Variable-retardance Fourier-transform imaging spectropolarimeters for visible spectrum remote sensing // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. № 9. P. 1450–1458.
28. *Barducci A., Marcoionni P., Pippy I. et al.* Simulation of performance of stationary imaging interferometer for high-resolution monitoring of the Earth // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4540. P. 112–121.
29. *Barducci A., de Cosmo V., Marcoionni P. et al.* ALISEO: a new stationary imaging interferometer // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5546. P. 262–270.
30. *Zhan G.* Static Fourier-transform spectrometer with sperical reflectors // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. № 3. P. 560–563.
31. *Komisarek D., Reichard K., Merdes D. et al.* High-performance nonscanning Fourier-transform spectrometer that uses a Wollaston prism array // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. № 20. P. 3983–3988.
32. *Zhan G., Oka K., Ishigaki et al.* Static Fourier-transform spectrometer on Savart polariscope // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4480. P. 198–203.
33. *Zhang C., Zhao B., Xiangli B.* Wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. № 33. P. 6090–6094.