

КОСМИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 681.7, 534.4

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2009 г. Г. Г. Горбунов**, доктор техн. наук; А. В. Демин***, доктор техн. наук;
Б. О. Никифоров*, доктор техн. наук; А. М. Савицкий*; Ю. С. Скворцов*;
М. Н. Сокольский*, доктор техн. наук; В. П. Трегуб*, канд. техн. наук

* ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

** НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

*** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

Описывается гиперспектральная аппаратура, основанная на использовании статистического фурье-спектрометра, для дистанционного зондирования Земли с борта космического аппарата, обеспечивающая прием информации в спектральных интервалах 0,24–1,0, 1,0–2,5, 3,0–5,0 и 8,0–11,0 мкм.

Ключевые слова: гиперспектральная система изображения, дистанционное зондирование Земли, спектрорадиометрия, фурье-спектрометрия.

Коды OCIS: 230.0230, 120.0120, 300.6300.

Поступила в редакцию 15.07.2009.

В настоящее время со стороны различных ведомств растет спрос на данные космических оптических наблюдений, прежде всего на снимки интересующих объектов и районов земной поверхности. Наблюдается быстрый рост объема продаж на международном рынке данных дистанционного зондирования Земли из космоса, а ведущие космические державы проводят дистанционное зондирование различных районов земной поверхности в коммерческих целях [1].

Существующие бортовые оптико-электронные системы (ОЭС) наблюдения, построенные по традиционной схеме, приблизились к пределу информационных возможностей обнаружения и распознавания наземных объектов. Очевидно, что при разработке высокоинформационных бортовых систем наблюдения нового поколения необходимо ориентироваться на современные оптические технологии и новые методы решения задач распознавания. К новым технологиям следует отнести гиперспектральную аппаратуру (ГСА) – систему изображения исследуемых сцен, регистрирующую одновременно в десятках и сотнях различных спектральных интервалов. Информацию о двух координатах пространства и о третьей координате, которой является длина

волны регистрируемого излучения, называют “кубом данных”. Еще в последнем десятилетии прошлого века получение гиперспектральных изображений было только областью активных исследований и использование аппаратуры, обеспечивающей их получение, было трудно доступно. Однако в настоящее время ГСА становится основной тенденцией развития приборов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Из зарубежных публикаций последнего времени очевидно преобладание ГСА, работающих в космосе и использующих метод фурье-спектрометрии. Уже появилась коммерческая полетная ГСА, проводятся запуски подобных аппаратов различных типов на космических носителях [2].

Несмотря на некоторые технические трудности, важность эксплуатации спектральной координаты при формировании изображений, прежде всего в инфракрасных (ИК) лучах, широко признается в коммерческих, научных и военных кругах всех развитых стран. Переход к многоспектральным и гиперспектральным изображениям исследуемых сцен в бортовых ОЭС и к распознаванию по спектрально-топологическим образам позволяет с помощью малых космиче-

ских аппаратов (КА) наблюдения решать многие из тех задач, которые прежде решались тяжелыми КА с крупногабаритными панхроматическими оптическими системами.

Сначала был освоен основной спектральный диапазон, соответствующий максимуму отраженного излучения большинства природных ландшафтов земной поверхности и рукотворных объектов (0,4–2,5 мкм), позволивший, в начале накопления баз данных, проводить сравнение с имеющимися панхроматическими изображениями исследуемых сцен. В настоящее время еще более интенсивно разрабатывается ГСА для работы в атмосферных окнах ИК области спектра 3–5 и 8–12 мкм, которые потребовали применения новых методов регистрации исследуемых сцен.

В спектральном диапазоне 3–5 мкм находятся спектры излучения (поглощения) большинства органических веществ, спектры “бензольных колец”, входящих в состав всех видов топлива. Большой интерес представляет и наблюдение из космоса в спектральной полосе вблизи 4,3 мкм, которая помогает идентифицировать объекты при почти полном отсутствии фона Земли. Если ранее чувствительности оптико-электронных приборов были не достаточны для регистрации полос газовых и нефтяных фракций (метан, бутан и т. д.), то появление новых высокочувствительных матричных приемников и новых методов регистрации информации в ГСА позволяет уверенно проводить регистрацию подобных спектров.

Для обеспечения космической гиперспектральной съемки при дистанционном зондировании Земли с борта КА применяются как классические спектральные приборы с дисперсионными устройствами (КДС) типа спектральной призмы или дифракционной решетки, так и фурье-спектрометры (ФС). В литературе достаточно подробно описаны оба типа спектрометров и показаны преимущества ФС с многоэлементными приемниками по сравнению с дисперсионными спектрометрами (ДС) [3–6]. Среди основных преимуществ ФС по сравнению с КДС, имеющих большое значение при работе в составе ГСА, отмечают

- большую светосилу (ΩS), которая определяется произведением телесного угла Ω , в пределах которого может собираться исследуемое излучение при данном спектральном разрешении, на площадь S кодирующего устройства;

- мультиплексность, обеспечивающая одновременность регистрации всего исследуемого

спектрального интервала в каждой точке интерферограммы, так как в составе интерферометра, являющегося главной частью ФС, отсутствуют диспергирующие устройства;

- высокую точность привязки шкалы волновых чисел v по одному эталону, по которому определяется значение истинной разности хода в плечах интерферометра для всех точек интерферограммы;

- большой диапазон реализуемых спектральных разрешений Δv , определяемый не размерами оптических элементов, а только реализованной разностью хода δ_{\max} в плечах интерферометра;

- большую ширину одновременно регистрируемого спектрального интервала Δv , не ограниченную дифракционными порядками, как при использовании дифракционных решеток;

- надежность, возможность унификации и сравнительную простоту конструкции.

Необходимо рассмотреть два типа фурье-спектрометров, значительно отличающихся друг от друга по исполнению и предельным возможностям: динамический фурье-спектрометр (ДФС) – интерферометр, в котором один из двух отражателей подвижен (в качестве отражателя может быть применено, например, зеркало), и статический (СФС) – интерферометр с неподвижными отражателями.

Основным элементом ДФС является интерферометр Майклельсона (см. рис. 1). Излучение, поступающее от находящегося в бесконечности объекта из телесного угла Ω , светоделителем 3 делится на два пучка (два волновых фронта), которые, отразившись от сопряженных через светоделитель зеркальных отражателей 1 и 2, вновь совмещаются светоделителем 3. В фокальной плоскости объектива 4 волновые фронты от 1-го и 2-го отражателей формируют изображение объекта и при этом интерферируют между собой. Одно из плоских зеркал интерферометра, например зеркало 1, имеет возможность поступательного движения в направлении, нормальном к своей поверхности, при этом приемник излучения 5 регистрирует функцию автокорреляции входящего в интерферометр излучения – интерферограмму.

Аппаратная функция ФС, без применения добавочных функций аподизации [7], записывается как

$$D(v) = 2\delta_{\max} \operatorname{sinc}(2\pi v \delta_{\max}), \quad (1)$$

где v – волновое число, а δ_{\max} – максимальная разность хода между двумя интерферирующими фронтами, достигнутая в интерферограмме.

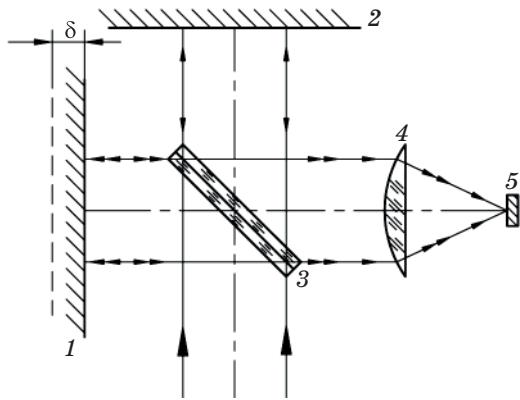


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема интерферометра Майкельсона, используемого в динамическом фурье-спектрометре. 1, 2 – зеркальные отражатели, 3 – свето делитель, 4 – объектив, 5 – приемник излучения.

Ширина аппаратной функции [8] является одной из основных характеристик спектрометра, определяет разрешаемый спектральный интервал и измеряется расстоянием между ее нулевыми значениями, расположенными с двух сторон от центрального максимума

$$dv = \frac{1}{2\delta_{\max}}. \quad (2)$$

Следовательно, число спектральных интервалов M , регистрируемых фурье-спектрометром, определяется как

$$M = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{dv} = 2(v_{\max} - v_{\min})\delta_{\max}. \quad (3)$$

В ДФС изменение разности хода происходит во времени и синхронно с изменением разности хода снимается интерферограмма исследуемого излучения. Серийно выпускаемые приборы подобного типа практически полностью заменили лабораторные спектральные приборы классического типа, основанные на применении дифракционных решеток. Подавляющее большинство спектрорадиометров, предназначенных для установки на КА, также используют метод динамической фурье-спектрометрии. Огромный диапазон спектральных разрешений, реализованных в подобных приборах, охватывает от 100 до $0,001 \text{ см}^{-1}$.

СФС используют пространственное расположение интерферограммы [9], фокусируемой на фотоприемник (чаще всего либо на линейный, либо на матричный). Отсутствие подвижных

элементов легко позволяет использовать подобные приборы даже в ультрафиолетовом диапазоне спектра. Кроме того, прибор становится гораздо надежнее в эксплуатации, что позволяет использовать его на разных носителях. Однако спектральное разрешение подобных приборов ограничивается числом пикселов N линейки приемников, где фиксируется интерферограмма. Как правило, относительное спектральное разрешение не может превышать значения $N/2$. Требуемое число разрешаемых спектральных интервалов в большинстве гиперспектральных систем лежит в пределах 200–400, что легко может быть достигнуто с помощью СФС. Таким образом, СФС в настоящее время становится основным узлом большинства современных ГСА.

Во всех типах ФС, использующихся в ГСА, изображение исследуемой сцены переносится на приемную матрицу. На каждый пиксель приемной матрицы попадает излучение всего спектрального диапазона исследуемой сцены, прошедшее через прибор. Поэтому при одностороннем движении носителя в этих приборах может быть осуществлен режим съемки интерферограммы, позволяющий производить значительное накопление сигнала (режим windowing) [10]. В этом случае матрица фотоприемников располагается, например, таким образом, что столбцы матрицы оказываются параллельными, а строки перпендикулярны одностороннему движению носителя. Тогда, в статическом интерферометре изменение разности хода проводится вдоль столбцов.

При движении носителя интерферограмма последовательно снимается с каждого пикселя столбца матрицы при перемещении исследуемой точки пространства на поверхности Земли вдоль столбца с пикселя на пиксель. Таким образом, время съемки каждой интерферограммы увеличивается на число пикселов N используемом столбце матрицы, а отношение сигнал/шум (с/ш) в полученной интерферограмме (спектрограмме) – на \sqrt{N} . Эти режимы считывания можно организовать только в ФС, что обеспечивает им еще одно значительное преимущество, кроме вышеперечисленных, – возможность накопления сигнала за время прохода исследуемого объекта по всему столбцу матрицы приемников.

Для реализации принципа СФС используют интерферометр сдвига, в котором интерферирующие фронты сдвинуты не вдоль оптической оси, а в плоскости, перпендикулярной ей [9]. Особенностью такой схемы является то, что кон-

траст интерференционных полос, локализованных в фокальной плоскости объектива, в первом приближении не зависит от размеров входного зрачка объектива. В качестве интерферометра сдвига чаще всего используется интерферометр Саньяка [11].

В нашем случае для уменьшения размеров и обеспечения стабильности параметров прибора использован интерферометр Майкельсона с “крышеобразными” концевыми отражателями, смещенными относительно друг друга на $t/2$ (см. рис. 2).

Поступающее на вход интерферометра Майкельсона 1 (рис. 2) излучение от регистрируемых объектов (исходный плоский волновой фронт A) делится светоделителем на два пучка (два волновых фронта). Отразившись от зеркальных (типа призма-крыша) отражателей, смещенных относительно друг друга на $t/2$, эти пучки вновь совмещаются светоделителем, формируя два плоских параллельных между собой волновых фронта 2 и 3, сдвинутых относительно друг друга на t . Фронты 2 и 3, интерферируя между собой, формируют вблизи фокальной плоскости объектива 4 интерференционную картину.

Если оси координат выбраны таким образом, что ось Y совпадает с направлением сдвига t , а ось Z – с оптической осью объектива 4, то разность хода в интерферограмме, локализован-

ной вблизи фокальной плоскости объектива 4 с фокусом F в точке с координатой y , будет соответствовать величине δ [9], значение которой при малых углах

$$\delta \approx ty/F. \quad (4)$$

Следовательно, вблизи фокальной плоскости объектива 4 локализуется интерферограмма, в сечениях которой разность хода определяется координатой y , фокусным расстоянием объектива F и сдвигом t . Если в этой плоскости расположить по оси Y линейку приемников 5, то можно снять значения интерферограммы, локализованной на этой линейке.

Как известно [8], минимальная разность хода, через которую будет сниматься интерферограмма, должна быть не более половины минимальной длины волны λ_{\min} спектрального диапазона излучения, образующего интерферограмму. Если принять, что размер одного пикселя линейки приемников по оси Y составит a , то разность хода, равная λ_{\min} , должна быть не менее $2a$, т. е. одна интерференционная полоса должна приходиться на два пикселя. При этом максимальная разность хода, которая может быть реализована на линейке приемников с N элементами, составит

$$\delta_{\max} = N\lambda_{\min}/2. \quad (5)$$

Интерференционное поле, как было отмечено выше, локализуется вблизи фокальной плоскости объектива 4 (см. рис. 2). Если по оси Y устанавливается многоэлементный фотоприемник, то интерференционная картина будет аналогична той, что получается в ДФС. Разница состоит в том, что в ДФС интерферограмма представляет собой функцию разности хода, изменяющуюся во времени, а в СФС – функцию разности хода, линейно изменяющуюся с координатой y в пространстве предмета.

Для реализации ГСА на базе СФС, работающего в режиме накопления интерферограммы, необходимо

- во первых, применение фотоприемника в виде матрицы, одна сторона которой (строка – направление X) формирует сканирующую полосу в пространстве объекта, а вторая (столбец – направление Y) – интерференционную картину;

- во вторых, смещение СФС относительно объекта, что обеспечивается движением КА.

Число кадров, необходимых для съемки одной интерферограммы, равно числу элементов (пикселов) столбца фотоприемной матрицы в направлении Y. Чем больше элементов разло-

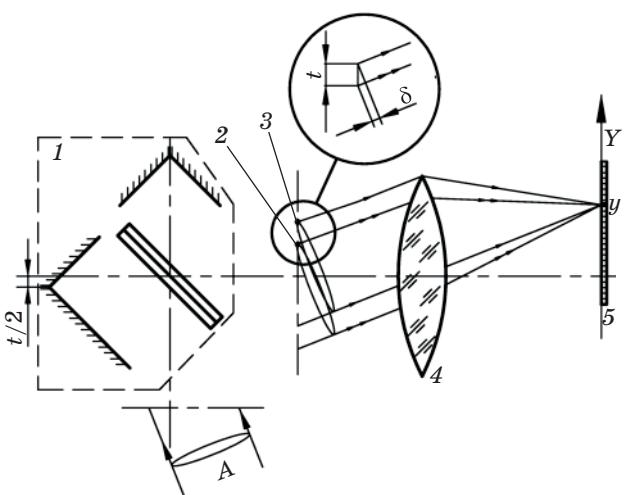


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема статического фурье-спектрометра, выполненная на основе интерферометра Майкельсона. 1 – интерферометр Майкельсона, 2 и 3 – волновые фронты, 4 – объектив. 5 – линейка приемников.

жения, тем больше время накопления информации интерферограммы и тем точнее измеряется искомая функция, необходимая для получения спектра [8].

Рассмотрим, какой выигрыш в отношении с/ш может получить ГСА, работающая на основе СФС, по сравнению с аналогичной аппаратурой, работающей на основе классических дифракционных или дисперсионных спектрометров.

ГСА, разрабатываемая на основе классических спектрометров, обеспечивает разложение в спектр узких протяженных участков земной поверхности, расположенных ортогонально трассе полета носителя и изображаемых проецирующим объективом во входной щели полихроматора (классического спектрометра с многоэлементным приемником) [3]. Движение носителя позволяет формировать полноразмерные монохроматические видеокадры в виде последовательности соответствующих монохроматических изображений узких полос на местности, распределенных непрерывно по маршруту аэросъемки поперек трассы полета носителя. В этих приборах входной проецирующий объектив строит изображение исследуемой местности в полихроматическом излучении на входе полихроматора в плоскости его входной щели. На выходе полихроматора формируется континuum монохроматических изображений его входной щели, представляющий собой многополосный спектральный кадр, каждая монохроматическая полоса которого совпадает со строкой применяемого двухкоординатного матричного приемника излучения [3]. Следовательно, на матричном приемнике, расположенном в фокальной плоскости объектива на выходе полихроматора, при снятии одного кадра (регистрация мгновенной информации со всех строк и столбцов матрицы) получаем серию монохроматических изображений узкой полосы на местности, распределенных по маршруту съемки поперек трассы полета носителя.

В ГСА, построенной на основе СФС, работающего в режиме windowing [10], на матричный приемник проецируется вся исследуемая местность (окно), размеры которой определяются фокусом объектива и числом элементов в строке (по углу крена) и в столбце (по углу места). При снятии одного кадра информации с матричного приемника мы получаем одну точку интерферограммы для всех точек исследуемой местности. Полная интерферограмма исследуемой зоны пространства составляется за время прохождения каждой исследуемой точки местности по всему

столбцу приемной матрицы, т. е. за число кадров информации, равных числу элементов столбца (числу строк) фотоприемной матрицы.

Как уже говорилось ранее, ФС обладают мультиплексностью, т. е. одновременностью регистрации всех исследуемых спектральных интервалов. Соответственно, отношение с/ш в вычисленном спектре ФС будет в \sqrt{M} раз выше (где M – число разрешаемых спектральных интервалов), чем в классическом спектрометре, имеющем такие же площадь входного объектива, спектральное разрешение, чувствительность приемника, время регистрации и коэффициент спектрального пропускания. Однако это справедливо только для тепловых приемников, шумы которых не зависят от излучения, падающего на приемник. Для фотонных приемников, шумы которых растут при увеличении потока излучения на приемник, фактор мультиплексности не повышает отношения с/ш.

Кроме фактора мультиплексности, ГСА, работающие на основе СФС в режиме windowing, обеспечивает накопление сигнала за счет увеличения времени съемки всей интерферограммы при передвижении носителя относительно исследуемого пространства. Общее увеличение отношения с/ш по сравнению с классическими спектрометрами также пропорционально \sqrt{M} . При использовании в дифракционных спектрометрах идеологии и техники растровых спектрометров также можно увеличить отношение с/ш, но это приведет к значительному усложнению как конструкции, так и программного обеспечения этих приборов.

Следовательно, суммарный выигрыш отношения с/ш СФС в режиме windowing в случае тепловых приемников будет пропорционален M , а в случае фотонных приемников – \sqrt{M} .

Оптическая схема СФС для всего спектрального диапазона 0,24–11,0 мкм построена в виде четырех каналов с независимыми оптическими системами, работающими в следующих спектральных диапазонах: 0,24–1,0, 1,0–2,5, 3,0–5,0, 8,0–11,0 мкм.

Основополагающим параметром СФС является отношение с/ш, значение которого желательно иметь не менее 200 [12]. Проведенный энергетический расчет, учитывающий излучение Солнца, коэффициенты отражения различных природных и искусственных объектов, собственное излучение Земли, пропускание атмосферы при различных углах визирования, показал, что при чувствительности выбранных приемников для получения удовлетворитель-

ного отношения с/ш расчетной спектрограммы достаточно выбрать размер входного окна интерферометра 40×40 мм.

Как уже говорилось ранее, для уменьшения размера оптической части прибора был использован интерферометр сдвига, построенный по схеме интерферометра Майкельсона (рис. 2). При этом схема каждого спектрального диапазона содержит интерферометр Майкельсона с установленным после него объективом, а именно

- для диапазона 0,24–1,0 мкм это апохроматическая зеркально-линзовая система,
- для диапазонов 1,0–2,5, 3,0–5,0, 8,0–11,0 мкм это линзовье объективы.

В качестве приемников используются:

- для диапазона 0,24–1,0 мкм матрица 1024×384 (число столбцов на число строк) с размерами элемента 14×14 мкм (типа Hamamatsu [13]),
- для остальных трех диапазонов матрицы 320×256 с размерами элементов 30×30 мкм и соответствующими холодильными машинами (типа MARS [14]).

Эквивалентное фокусное расстояние объектива в диапазоне 0,24–1,0 мкм соответствует 264 мм, в других спектральных диапазонах 220 мм.

Расположив нулевую разность хода на 350-й строке матрицы первого канала и на 220-й стро-

ке матриц других каналов, получим частично одностороннюю интерферограмму, а также достаточное количество точек симметричной интерферограммы, необходимой для получения фазового спектра [8].

В табл. 1 приведены основные параметры оптических систем всех четырех спектральных каналов, в табл. 2 – сравнительные параметры КДС и СФС.

Расчеты показывают, что при одинаковых входных параметрах оптических систем КДС и СФС выигрыш в отношении с/ш при использовании СФС весьма значителен.

Конструктивно каждый канал СФС выполнен в виде отдельного оптико-механического модуля с блендоидом (см. рис. 3), что позволяет применять СФС в любой комплектации – от одного до четырех каналов (см. рис. 4). Вес каждого из модулей около 8 кг.

Конструктивно каждый модуль состоит из следующих основных частей: интерферометра, объектива, узла фотоприемника и бленды для защиты аппаратуры от попадания на фотоприемное устройство прямых солнечных лучей.

Конструкция собственно интерферометра для всех спектральных диапазонов принципиально одинакова, но отличается материалом, из

Таблица 1. Основные параметры СФС

Параметры для высоты орбиты 550 км	Спектральный диапазон канала, мкм			
	0,24–1,0	1–2,5	3–5	8–11
Фокусное расстояние объектива, мм	264	220	220	220
Относительное отверстие	1:4,5	1:3,9	1:3,9	1:3,9
Поле зрения, град	3	2,5	2,5	2,5
Число пикселов ФПУ	1024×384	320×256	320×256	320×256
Размер пикселя, мкм	14×14	30×30	30×30	30×30
Пространство земной поверхности, размер которого охватывается одним пикселям приемника, м ²	29×29	75×75	75×75	75×75
Номер строки, на которой разность хода $\delta = 0$	350	220	220	220
Изменение разности хода δ в соседних строках, мкм	0,1	0,5	1,5	4
Максимальная разность хода δ_{\max} , мкм	35	110	330	880
Число M регистрируемых спектральных интервалов	220	130	86	60
Спектральное разрешение $d\lambda$ (нм) для длины волны λ (мкм)	$d\lambda$	λ	$d\lambda$	λ
	1,3	0,3	4,6	1,0
	3,6	0,5	10,4	1,5
Объем снимаемой информации, МГбит/с	1200	115	115	115
Время, с число кадров для формирования одной интерферограммы	1,6 384	2,5 256	2,5 256	2,5 256

Таблица 2. Сравнительные параметры ГСА, построенных на основе КДС и СФС для спектрального диапазона 0,24–11,0 мкм

Параметр	КДС	СФС
Кол-во каналов (приборов)	7	4
Кол-во объективов на один канал	3	1
Отношение сигнал/шум в спектральном диапазоне		
0,24–1,0 мкм	~10	~100
1–2,5 мкм	~12	~1400
3–5 мкм	1	~65
8–11 мкм	~22	~1400
Калибровка каждого спектрального диапазона	По 3–7 длинам волн	По одной длине волны
Влияние рассеянного света на точность	Сильное	Отсутствует

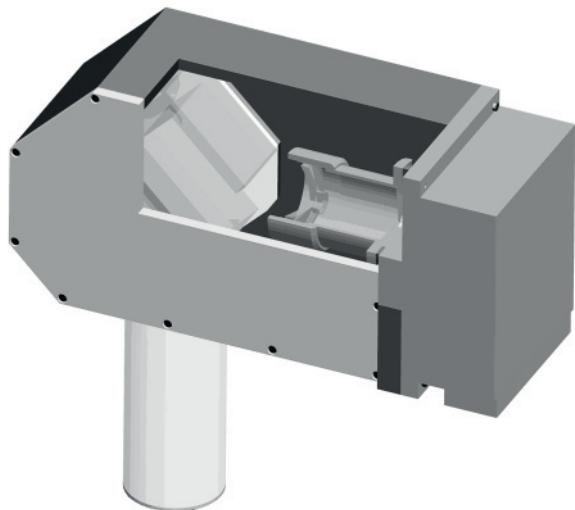


Рис. 3. Общий вид одноканального СФС.

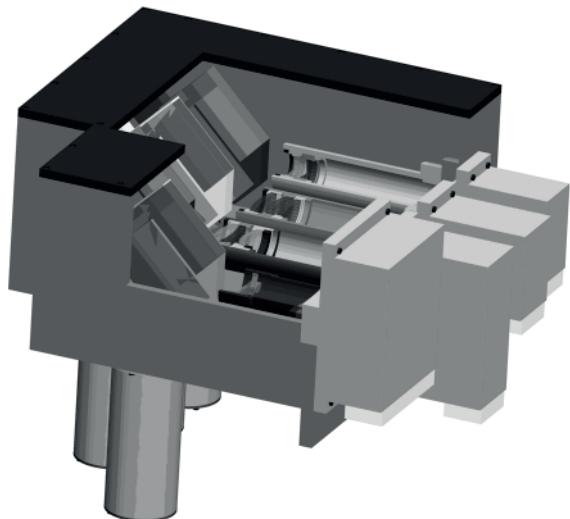


Рис. 4. Общий вид четырехканального СФС.

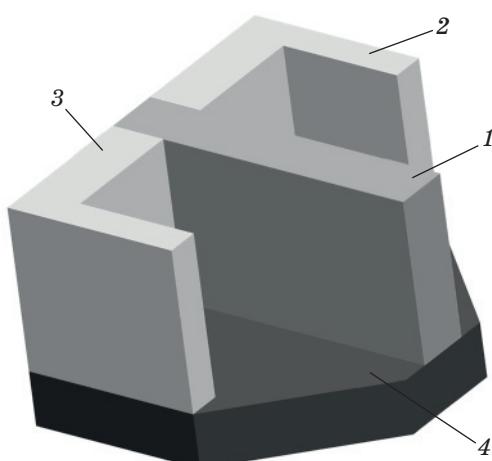


Рис. 5. Общий вид интерферометра сдвига на основе интерферометра Майкельсона.

которого изготовлены его оптические детали. Собственно интерферометр (рис. 5) состоит из полупрозрачной пластины 1 и двух отражателей 2 и 3 (каждый из отражателей это призма-крышка типа БР-180°), расположенных относительно оптической оси системы так, чтобы образовать требуемый сдвиг t интерферирующих пучков. Полупрозрачная пластина и отражатели прикреплены к общему основанию 4, изготовленному из материала с коэффициентом линейного расширения, близким к коэффициенту линейного расширения материала полупрозрачной пластины и отражателей.

Объектив, как и фотоприемное устройство, крепится к задней стенке корпуса (см. рис. 3), что обеспечивает стабильность их взаимного положения.

Каждый из четырех каналов СФС снабжен двумя видами калибровочных устройств, периодически вводимых в канал интерферометра:

- для диапазонов спектров 0,24–1,0 и 1,0–2,5 мкм это солнечное излучение и излучение одиночных линий полупроводниковых лазеров;
- для диапазонов спектров 3,0–5,0 и 8,0–11 мкм это излучение встроенного в прибор черного тела.

Опрос матрицы приемников происходит с частотой около 230 Гц в первом диапазоне и около 100 Гц в других диапазонах. Разрядность преобразователя – 14 двоичных разрядов. При съемке 384 кадров в первом диапазоне и 256 в

других каналах строятся (по одной интерферограмме для каждого пикселя первой строки приемной матрицы) "отслеживающие" проходящие в поле фотоприемника изображения объектов на поверхности Земли (за счет одностороннего движения носителя) за время около 1,6 (2,5) секунды, что позволяет значительно увеличить отношение сигнал/шум получаемого спектра. Далее строится непрерывный "куб данных" исследуемых объектов пространства, попавших в поле зрения матрицы.

Следовательно, при использовании статического фурье-спектрометра, имеющего входное окно размером 40×40 мм, практически во всех спектральных диапазонах можно получить удовлетворительное отношение сигнал/шум всех исследуемых сцен и достаточное количество разрешаемых спектральных интервалов, количество которых определяется числом строк применяемой фотоприемной матрицы.

В заключение необходимо отметить, что в ходе выполнения совместных работ ОАО "ЛОМО", ФГУП НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова" и СПбГУ ИТМО разработаны принципиальные решения, рассчитана оптическая схема и проработаны конструктивные решения статического фурье-спектрометра для обеспечения космической гиперспектральной съемки при дистанционном зондировании Земли с борта космического аппарата в спектральном диапазоне 0,24–11,0 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агапов В. На орбите новый КА наблюдения // Новости космонавтики. 2000. № 5. С. 22–23.
2. Hardin R.W. Hyperspectral Imaging: How Much is Hype? // Photonic Spectr. 1997. № 7. Р. 82–92.

3. Гуд В.В., Красавцев В.М., Сандаков А.Н., Чиклов К.Н. Видеоспектрометрические космические комплексы для исследования Земли и планет Солнечной системы // Оптический журнал. 1995. № 8. С. 67–72.
4. Горбунов Г.Г., Киселев Б.А., Лазарев А.И., Муратов В.В. О новых возможностях фурье-спектроскопии // Ведомственный сборник. 1977. В. 114. С. 16–17.
5. Горбунов Г.Г., Киселев Б.А. Фурье-спектрометрия: состояние и тенденции развития // Оптический журнал. 1993. Т. 60. № 12. С. 3–6.
6. Горбунов Г.Г., Еськов Д.Н., Рябова Н.В., Серегин А.Г. Новые применения фурье-спектрометров с многоэлементными приемниками // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 8. С. 71–77.
7. Светосильные спектральные приборы // Сб. статей под редакцией Тарасова К.И. М.: Наука, 1988. С. 145–263.
8. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы Фурье-спектрорадиометрии. М.: Наука, 2006. 284 с.
9. Гиль С.В., Егорова Л.В., Лещева И.Е., Строгонова А.Ю. Исследование интерференционного поля статического Фурье-спектрометра // ОМП. 1988. № 1. С. 10–15.
10. Sellar R.G., Boreman G.D. Comparison of relative signal-to-noise ratios of different classes of imaging spectrometers // Appl. Opt. 2005. V. 44. № 9. Р. 1614–1624.
11. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: МГУ, 1972. 348 с.
12. Горбунов Г.Г., Яшков Д.А. Фазовая коррекция интерферограмм Фурье-спектрометра в присутствии случайного шума // Вестник СГГА. 1998. В. 3. С. 129–136.
13. Проспект фирмы Hamamatsu. Back thinned TDI-CCD.
14. Проспект фирмы SOFRADIR Headquarters MARS.