

УДК 536.48:629.785

Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли

В. Г. Колобродов, П. В. Бородийчук, В. И. Микитенко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Надійшла до редакції 12.05.97

Проаналізовано сучасний стан розвитку оптичних систем видеоспектрометрів дистанційного зондування поверхні Землі. Значну увагу приділено аналізу функціонування та технічним характеристикам розробок. Розглядаються системи авіаційного та космічного базування, розроблені за останні десятиріччя.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Концепция практического использования оптических методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) начала свое развитие с 1970-х годов, когда произошел качественный скачок в технологии полупроводниковых материалов, чувствительных к излучению оптического диапазона спектра. На смену традиционным оптическим системам, использующим в качестве носителя информации пленку со слоем галогенидного серебра, пришли твердотельные опто-электронные преобразователи на основе Si, InSb, GaInAs, CdHgTe. Параллельно с усовершенствованием оптических компонентов были реализованы методы получения изображения в реальном масштабе времени с помощью многоэлементных приемников излучения на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) и зарядовой инжекцией (ПЗИ).

Среди большого разнообразия сфер использования информации опτικο-електронных систем (ОЭС) прежде всего следует выделить направления экологического мониторинга [2]:

— исследование динамики изменения нижней атмосферы Земли (тропосферы), в том числе изменения концентрации газов, вызывающих

«парниковый эффект» (CO_2 , CH_4 , O_3 , NO , CFCl_3 , CF_2Cl_2);

— проблемы загрязнения промышленных городов в связи с повышением содержания в атмосфере окисей углерода и азота;

— проблемы кислотных дождей, вызванных локальными источниками, т. е. окисями серы и азота;

— проблема снижения стратосферного озона.

Кроме того, развитие ОЭС ДЗЗ вызывается необходимостью изучения:

— количественного и качественного состава облачного покрова, состава и динамики атмосферного столба от поверхности планеты до тропопauses;

— процессов глобальной циркуляции воздушных и океанических течений, распределения входной и выходной из планеты энергии;

— физико-биологической структуры, состояния и динамики изменения суши, включая поверхностные и наземно-водные экосистемы;

— главных источников биохимических процессов;

— динамики ледников, полос снега и льда, распределения осадков;

— динамических движений земной коры, включая вращение и кинематические движения тектонических плоскостей.

Актуально использование ОЭС ДЗЗ для нужд сельского хозяйства и рыбной промышленности [9].

ОЭС ДЗЗ можно классифицировать по следующим признакам.

1. По типу зондирования:
 - активные (с лазерной системой);
 - пассивные;
 - смешанные.
2. По использованию спектрального состава излучения:
 - интегральные;
 - спектральные:
 - УФ-области (UV);
 - видимой и ближней ИК-областей (VNIR);
 - коротковолновой ИК-области (SWIR);
 - средневолновой ИК-области (MWIR);
 - длинноволновой, или тепловой ИК-области (LWIR, TIR).
3. По принципу функционирования:
 - видеоспектрометры;
 - спектрорадиометры;
 - радиометры;
 - поляриметры;
 - измерители рассеянного излучения;
 - телекамеры;
 - альтиметры (измерение топографии поверхности);
 - тепловизионные системы.
- 4) По использованию сканирования:
 - несканирующие;
 - сканирующие:
 - вращательного сканирования;
 - линейного сканирования:
 - а) механического типа (Whisk-Broom);
 - б) электронного типа (Push-Broom).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА, ЕГО ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Видеоспектрометр (Imaging Spectrometer — изображающий спектрометр) (ВС) относится к пассивным спектральным сканирующим ОЭС. Принцип его функционирования объясняет новая оптическая техническая дисциплина — изображающая спектрометрия (ИС). Главной особенностью ИС в отличие от многоспектрального изображения (МСИ) является возможность получения изображений в более чем ста спектральных каналах, тогда как устройства МСИ обеспечивают до десяти полос [5]. Использование ИС предполагает быструю запись спектров для каждой части изображения; принцип МСИ основан на интегрировании спектров, полученных в пределах достаточно широких областей.

ВС предназначены в основном для работы в видимой и ближней ИК-областях спектра (0.38... 2.45 мкм). Получаемая информация представляет

собой пространственно-спектральное распределение энергии на просматриваемой поверхности, причем каждому пикселу (части, ограниченной линейным мгновенным полем зрения) соответствует определенный набор спектров, а фиксированной длине волны — совокупность пикселов в пределах поля обзора ВС. Таким образом, увеличение количества одновременно записываемых каналов спектра оптимизирует возможность идентификации материалов покрытия поверхности благодаря существенным различиям оптических свойств (отражения, излучения) объектов и фонов в пределах очень узкого интервала длин волн (от сотых долей до единиц нанометров). Речь идет об увеличении контраста объектов.

Поскольку в диапазоне 0.4 ... 2.4 мкм воспринимаемой ВС энергией является солнечная энергия, отраженная поверхностью Земли, то качественная информация в i -м канале возникает из-за различия спектральной отражающей способности объекта ρ_{oi} и фона ρ_{bi} .

ВС является потенциально полезным в других областях оптического диапазона. Так, ВС TIRS успешно использует при работе тепловую ИК-область, а ВС SCIAMACHY — УФ-, видимую, ближнюю и коротковолновую ИК-области.

Системный взгляд на ВС позволяет выделить следующие основные их характеристики.

- Геометрические параметры:
 - поле зрения (ПЗ) (угловое или линейное);
 - мгновенное поле зрения (МПЗ).
- Спектральные параметры:
 - рабочий спектральный диапазон $\Delta\lambda$;
 - спектральное разрешение (интервал спектральной выборки) $\delta\lambda$;
 - количество спектральных каналов N_λ .
- Оптические параметры:
 - сканер (Whisk-Broom):
 - а) габариты $L_{sc} \times B_{sc}$;
 - б) угловая скорость ω_{sc} ;
 - в) угловой диапазон $\pm \alpha_m$;
 - г) оптическое пропускание $\tau_{sc}(\lambda)$.
 - зеркало перенацеливания (Push-Broom):
 - а) габариты $L_{dm} \times B_{dm}$;
 - б) диапазон углов перенацеливания вдоль $\pm \alpha_{al}$ и поперек $\pm \alpha_{ac}$ траектории маршрута;
 - в) точность перенацеливания $\delta\alpha$;
 - г) оптическое пропускание $\tau_{dm}(\lambda)$.
 - входной объектив:
 - а) фокусное расстояние f_{ent} ;
 - б) эффективное диафрагменное число k_{eff} ;
 - в) оптическое пропускание $\tau_{ent}(\lambda)$.
 - полевая диафрагма (входная щель):
 - а) тип (пропускающая, зеркальная);

Характеристики известных зарубежных разработок ВС

Название, начало эксплуатации	$\Delta\lambda$, мкм	$\delta\lambda(\delta\lambda)$, нм	ПЗ(Н), км/град	МПЗ, м/град	Кол-во каналов N_{λ}	Параметры оптики	Приемник излучения	Скорость данных, Бит/с	Отрасль применения
NIMS, 1980 г.	0.7—5.2	0.025 (0.7—1.0) 0.013 (1.0—5.2)	100/10 (10.000 км)	50000/ 0.5	204	$f'_{ent} = 800$ мм, $f'_{ent}/3.5$; плоская ДР, 12 углов установки; $\Gamma = 0.53$	17 состык. ФД; 2(SD), 15(InSb)	11.5 к	Исследование атмосферы и геохимии Юпитера и его спутников
VIMS, 1985 г.	0.4—5.2	10.0 (0.4—3.2) 20.0 (3.2—5.2)	6.6° (361 км)	650/1.8	320	$f'_{ent} = 210$ мм, $f'_{ent}/3.6$; плоская ДР, 4 угла блеска; $\Gamma = 0.536$	2 линейки, 64-эл. (SD), 256-эл. (InSb)	1000 к (внутр.), 32 к (телеметр.)	Наблюдение поверхности Марса
AIS-1, 1982 г.	1.2—2.4	10.6	7.3° (6 км)	12.3/2	128	$f'_{ent} = 70$ мм, $f'_{ent}/3.0$; плоская ДР; $\Gamma = 0.5$	матрица 64×64 (KPT)	394 к	Исследование земных ресурсов
AVIRIS, 1987 г.	0.4—2.4	10.0	30° (20 км)	20/1	224	$f'_{ent} = 197.6$ мм, $f'_{ent}/1.36$; 4 решетки	ПЗС-линейки: одна 32-эл. (SD), три 64-эл. (InSb)	19 М	Геология, минералогия Земли
SISEX, 1991 г.	0.4—2.5	10.0	2.8° (250 км)	30/0.12	192	$f'_{ent} = 416$ мм, $f'_{ent}/3.8$; 2 призмы; $\Gamma = 1$	матрицы: одна 64×104 (Si-ПЗС), три 128 ² (KPT)	621—931 М	Изучение биосферы Земли
HIRIS, 1991 г.	0.4—2.5	10.0	1.6° (824 км)	30/0.036	192	То же	матрицы: одна 64×800 (Si-ПЗС), 6×128 ² (KPT)	393 М	Изучение биосферы Земли
MERIS, 1997 г.	0.4—1.05	1.25	6×14° (824 км)	260	520	$f'_{ent} = 71$ мм, $f'_{ent}/2.53$; вогнутая ДР; $\Gamma = 1$	шесть ПЗС-матриц 770×576 ($A_d = 22.5$ мкм ²)		Исследование океана, суши, атмосферы
SCIAMACHY, 1995 г.	0.4—2.24 (8 полос) 0.24—0.295 0.29—0.405 0.4—0.605 0.59—0.81 0.79—1.055 1.0—1.7 1.94—2.04 2.265—2.28	0.22 0.22 0.4 0.44 0.52 1.4 0.2 0.22	2.3°	0.023°	1:250 2:750 3:512 4:500 5:510 6:500 7:500 8:68	внеосевая парабола, зеркала надира и лимба, восемь ДР, разделение в канале VNIR с помощью дихроичных зеркал; пропускающая щель	восемь линеек ФД: 0.24—1.0 (Si), 1.0—2.4 (InGaAs)		Исследование изменения состава атмосферы, глобального пространственного распределения атмосферных частиц
ROSIS, 1989 г.	0.43—0.96	≤ 5.0	± 16° (824 км)	250/0.56	106	зеркальная оптика; плоская ДР; пропускающая щель	Si-ПЗС матрица 512×500 эл. ($A_d = 23.5 \times 18.5$ мкм ²)	2.2 М	Определение концентрации фитопланктона
MODIS-T, 1997 г.	0.4—1.0	10.0	1513 (824 км)	1000	64	$f'_{ent}/1.25$, $D_{ent} = 282$ мм; вогнутая ДР; зеркальная щель	Si-ПЗС-матрица 64×64 эл.		Исследование характеристик биосферы Земли
MODIS-N, 1997 г.	0.4—14.2 (40 полос)	1.2; 10; 20; 50 (в зав. от полосы)	± 23° (824 км)	1000 ($\delta\lambda = 1.2$, 10 нм), 500 (20, 50 нм)		$f'_{ent} = 400$ мм, $f'_{ent}/2.0$; спектральное разделение ДЗ и фильтрами	три 16-элементные линейки ПИ	0.2 Тбит/день (для МПЗ 214 м)	Определение глобальной температуры поверхности океана, исследование облачного покрова
CASI, 1988 г.	0.4—0.94	1.4 (1.8)	1—5/35° (960 м)	2—10/1.2	288	плоская решетка, пропускающая щель	ПЗС-матрица 612×288 эл.		Обнаружение косяков рыбы, определение концентрации хлорофилла
AIRS, 2000 г.	3.74—4.61 6.20—8.22 8.80—15.40	$\lambda/\Delta\lambda >$ >1200	± 49.5°	1.1°		$f'_{ent}/1.7$, внеосевая зеркальная оптика, вогнутая ДР, 12.8 мм	17 состык. KPT-линеек по 200 эл.		Климатологические исследования, изучение океана
THIS, 1980 г.	7.5—14.0	100.0	(2438 м)	10/3.6	64	Зеркальная осевая концентрическая ОС Шварцчайльда; $f'_{ent} = 27.5$ мм; плоская ДР; спектральный фильтр	матрица 64×20 эл. $A_d = 100$ мкм ²		Обнаружение и идентификация полезных ископаемых
GERIS, 1987 г.	0.4—2.5 (3 полосы)	20.8 (0.5—1.0) 100.0 (1.0—1.7) 15.6 (2.0—2.5)	11/90° (20.000 футов)	21.7/ 3.3	64: 24 (0.5—1) 7 (1—1.8) 32 (2—2.5)	$f'_{ent} = 150$ мм, $f'_{ent}/1.4$; две решетки	три матрицы ПИ	4.0 М— 5.2 Г	Минералогия, геология, прямая картография полезных ископаемых

б) размеры $l \times b$.
— спектрометр:

- а) тип (призмный, дифракционный);
- б) параметры дисперсионного элемента;

в) фокусы и диафрагменные числа
объективов спектрометра;

г) оптическое пропускание $\tau(\lambda)$.

— модуляционно-передаточная функция (МПФ)

оптической системы.

- Параметры приемника излучения:
 - а) тип (линейка, матрица);
 - б) количество, размеры и материал элементов;
 - в) спектральная чувствительность $S_d(\lambda)$ либо удельная обнаружительная способность D^* .

Кроме этого, выделим параметры функционирования ВС на борту носителя.

- Общие параметры ВС:
 - масса;
 - объем;
 - потребляемая мощность;
 - скорость передачи данных на Землю.
- Параметры электроники и системы калибровки.
- Параметры орбиты носителя:
 - тип (солнечно-синхронная, геостационарная);
 - высота орбиты H ;
 - скорость движения подспутниковой точки v_{ssp} .
- Параметры наблюдения:
 - зенитный угол Солнца θ_0 ;
 - зенитный угол наблюдения θ ;
 - азимутальный угол наблюдения ϕ .
- Спектральная характеристика наблюдаемой местности $\rho_\lambda(\theta_0, \theta, \phi)$.

ОБЗОР ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Единство многообразных схмотехнических решений ВС авиационного и космического базирования представлено в таблице. Системы сравниваются по спектральному диапазону $\Delta\lambda$; спектральному разрешению $\delta\lambda$; геометрическим параметрам (ПЗ, МПЗ); характеристикам оптической системы (ОС) и приемников излучения (ПИ); скорости передачи данных; области научно-хозяйственного применения [1, 3, 4, 6—8, 10, 11].

ОБОБЩЕННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ВС

Основные типы сканирования поверхности ВС. Все существующие ВС можно разделить на две группы, отличающиеся принципом сканирования: механическим (МС) или электронным (ЭС). ВС МС (Whisk-Broom) используют линейки, а ВС ЭС (Push-Broom) — матрицы в качестве приемников излучения.

При использовании принципа Whisk-Broom [NIMS, VIMS, AVIRIS, SCIAMACHY, MODIS-N, GERIS] линейка располагается в плоскости изображения (рис. 1) для записи спектра от пиксела поверхности (т. е. линейного размера МПЗ) своей

длинной стороной вдоль дисперсии. Сканирующее зеркало обеспечивает просмотр поверхности поперек пути носителя, т. е. по координате x , причем ось вращения зеркала совпадает с вектором скорости носителя.

Сканирование по координате y (вдоль пути) осуществляется посредством движения самого носителя ВС. Линейка ПИ считывается один раз для каждого пиксела. По окончании формирования строки зеркало возвращается в исходную позицию. Обратный ход чаще всего используется для спектральной и радиометрической калибровки прибора.

Принцип Push-Broom [AIS, SISEX, HIRIS, MERIS, MODIS-T, ROSIS, CASI, TIIS] (рис. 2) дает возможность производить одновременную запись спектров множества пикселей поверхности, которое составляет полосу обзора. Это достигается использованием двумерных, матричных приемников с электронным сканированием по спектру λ и по координате x (кадровые матрицы); необходимость механического сканирования зеркалом отпадает. Для обеспечения значительных полос обзора такие ВС должны иметь крупноформатные матрицы. Однако увеличение количества чувствительных элементов приводит к неравномерности и снижению облученности, а также качества изображения по полю, что ужесточает требования к оптике. Зеркало перенацеливания при фиксации своего углового положения дает возможность обозреть очень большие площадки (тысячи км).

Весомым преимуществом Push-ВС над Whisk-ВС является увеличение времени интегрирования строки t в m раз, где m — количество пикселей в полосе обзора по оси x , а также улучшение отношения сигнал/шум SNR в $m^{1/2}$ раз.

Компоненты оптической системы ВС. Оптическая система ВС содержит рабочий и калибровочный каналы. Калибровочный канал необходим для устранения выдачи ложной видеoinформации, что имеет место при временном или/и спектральном изменении чувствительности ПИ в процессе функционирования аппаратуры. ОС такого канала содержит несложную проекционную оптику и эталонные источники калибровки. Радиометрическая калибровка осуществляется при помощи Солнца, Луны, интегрирующей сферы, спектральная — с помощью калибровочных ламп, дающих выходные линии излучения в пределах рабочего спектра. Кроме того, используемые нейтральные светофильтры позволяют изменять уровни контрольного сигнала.

Обобщенная оптическая схема рабочего канала ВС (рис. 1, 2) включает входную оптику, полевую диафрагму, спектрометр и приемник излучения.

Входная оптика содержит зеркало сканирова-

ния/перенацеливания и объектив, предназначенный для формирования изображения поверхности Земли в плоскости установки диафрагмы. В обратном ходе лучей объектив проецирует диафрагму на зондируемую поверхность. Его фокусное расстояние определяет линейное МПЗ, в то время как диаметр входного зрачка влияет на величину энергии, поступающей в прибор. Относительное отверстие оказывает влияние на полезный выходной сигнал с приемника.

Щель определяет входную апертуру спектрометра. Ее конфигурация диктуется принципом сканирования. Для Whisk-BC с линейкой ПИ она имеет форму одиночного пиксела. При этом размеры щели соответствуют (через увеличение) размерам элемента ПИ. ЭС всегда использует диафрагму в виде линии (строки). По виду различают пропускающую и зеркальную щель. Второй вид используется реже из-за сложной технологии изготовления и негативного влияния дефектов и загрязнения плоскости щели на качество сигнала.

Спектрометр ВС состоит из коллиматора, диспергирующего элемента (ДЭ) и фокусирующего объектива. ДЭ, разлагает входной интегральный поток на спектральные потоки по углам в зависимости от длины волны.

Для получения сплошного спектра применяются системы призм (явление дисперсии) и дифракционных решеток (явление дифракции и интерференции).

Использование призм вызывает нелинейность спектра, так как показатель преломления изменяется с длиной волны нелинейно. Составные призмные системы корректируют спектр, вызывая ухудшение пропускания, радиационной чувстви-

тельности, массы и габаритов. Поляризационные эффекты отсутствуют.

Дифракционные решетки (ДР) лишены нелинейности, но вводят другую проблему — перекрытие порядков дифракции. Она минимизируется применением блокирующих фильтров. При работе ВС с ДР в ИК-области фильтры к тому же блокируют длинноволновое излучение фона. Другими нежелательными явлениями при работе с ДР являются ложные спектральные линии, поляризация, рассеянный свет.

Несмотря на видимые недостатки решеток, разработчики ОС ВС отдают свое предпочтение именно им. Так, изменение расположения штрихов и углов блеска используется для контроля угловой дисперсии и получения требуемого распределения эффективности. Размещая ПИ определенным образом, явление перекрытия порядков можно применять для работы в других (кроме обычного первого) порядках спектра.

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ ОС ВС

Картографирующий видеоспектрометр ближней ИК-области NIMS. BC NIMS является ранней разработкой, осуществленной в конце 1970-х годов, когда использовались линейки ПИ из состыкованных отдельных элементов.

Оптика NIMS показана на рис. 3. ВС использует принцип Whisk-Broom. Требование наблюдения спутников Юпитера в области спектра 0.7—5.2 мкм привело к традиционной центрированной зеркальной системе [1]. Специфика телескопа Кассегрена

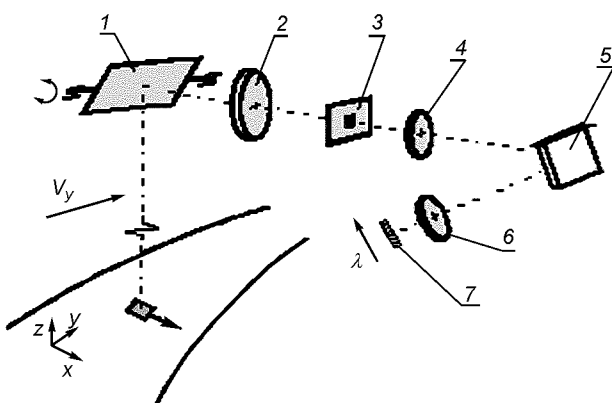


Рис. 1. Принцип сканирования Whisk Broom: 1 — сканирующее зеркало; 2 — входной объектив; 3 — полевая диафрагма; 4 — коллиматор; 5 — диспергирующий элемент; 6 — фокусирующий объектив; 7 — линейка ПИ

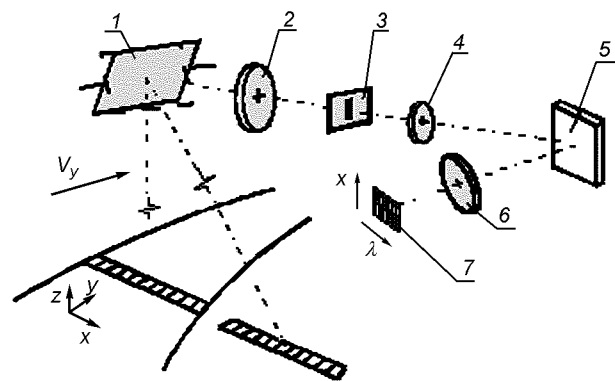


Рис. 2. Принцип сканирования Push-Broom: 1 — зеркало перенацеливания; 2 — входной объектив; 3 — полевая диафрагма; 4 — коллиматор; 5 — диспергирующий элемент; 6 — фокусирующий объектив; 7 — матрица ПИ

с диаметром входного зрачка 230 мм и фокусным расстоянием 800 мм позволяет осуществлять механическое сканирование качанием вторичного зеркала. Щель — пропускающая. Коллиматор и фокусирующий объектив построены аналогично переднему телескопу. Плоская ДР, нанесенная на зеркало, разлагает спектр, который регистрируется линейкой ПИ. Камерный объектив дает изображение, свободное от кривизны поля. Для защиты ПИ от запыления и дополнительной коррекции aberrаций служат оптические окна.

Важной особенностью работы NIMS является то, что после каждого сканирования решетка с помощью шагового двигателя перемещается на новый угол, обеспечивая следующие 17 каналов, отличные от предыдущих. 12 угловых перемещений ДР дают на выходе 204 спектральных канала.

Недостатками такой схемы являются:

- виньетирование центральной части поля зрения вторичными зеркалами;
- большое время сканирования для получения 204 каналов;
- малая скорость передачи данных.

Авиационный видеоспектрометр видимой и ближней ИК област и AVIRIS. В разработке Whisk-BC AVIRIS рабочая спектральная область составляет 0.4—2.4 мкм. ОС прибора представлена на рис. 4. Материал решетки и зеркал — алюминий. ВС состоит из поперечного сканатора, связанного оптически волокнами с четырьмя спектрометрами. Механическое сканирование реализуется вращением трехгранной призмы вокруг оси, параллельной вектору скорости носителя. При этом обеспечивается поле зрения 30° (550 пикселей) на

высоте 20 км. Параллельные пучки направляются парами отклоняющих зеркал на большое эллиптическое зеркало, фокусирующее радиацию в своем фокусе, совпадающем с фокусом вспомогательного зеркала. Оно в свою очередь перефокусирует излучение плоским зеркалом на четыре сопряженных волокна, каждое из которых вторым концом, установленным в фокусе коллиматора, соединяется с соответствующим модулем спектрометра. После разложения в спектр асферическими решетками происходит детектирование ПИ [11].

При вращении призмы перевернутое точечное изображение поверхности Земли передается на каждый из спектрометров. Области работы четырех модулей (0.4—0.7; 0.65—1.25; 1.2—1.82; 1.78—2.4 мкм) слегка перекрываются.

Достоинства схемы:

- простые технические требования к структуре за счет использования оптических волокон, позволяющих разделить свет без дихроичного разделения пучков;
- повышенная эффективность сканирования за счет применения обратно отражающего сканатора;
- наличие асферической передней оптики, обладающей большой светосилой ($f/1.36$), которая при фокусе 197.6 мм дает линейное мгновенное поле зрения 20 м;
- наличие бортовых источников радиометрической и спектральной калибровок.

Основной недостаток схемы — усложненная конструкция сканатора, обеспечивающая мгновенную компенсацию погрешности сканатора с помощью счетно-вращающегося маховика. Зеркало движется

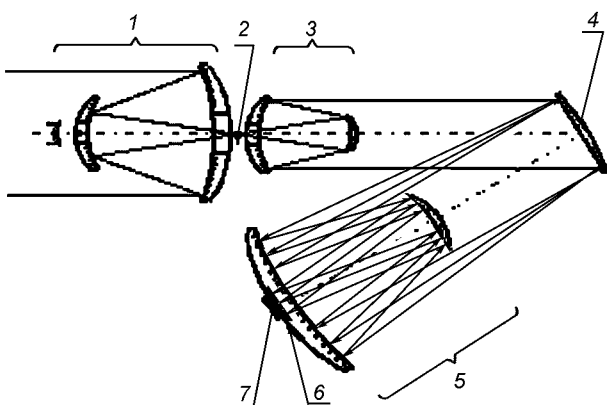


Рис. 3. Оптическая схема NIMS: 1 — зеркальный телескоп Кассегрена; 2 — полевая диафрагма; 3 — коллиматор; 4 — плоская ДР; 5 — фокусирующий объектив; 6 — оптические окна; 7 — линейка ПИ

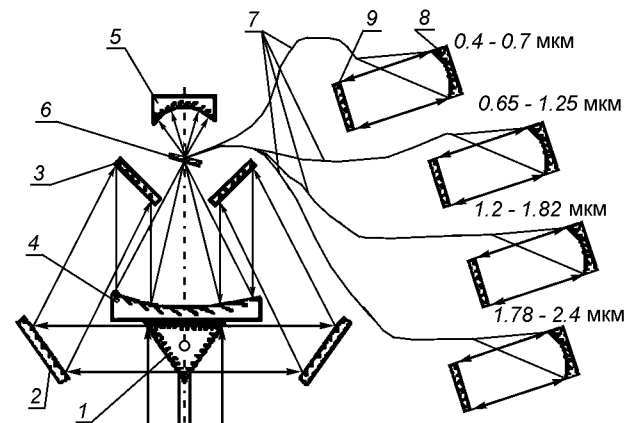


Рис. 4. Оптическая схема AVIRIS: 1 — поперечный сканатор; 2, 3 — отклоняющие зеркала; 4 — эллиптическое зеркало; 5 — вспомогательное зеркало; 6 — плоское зеркало; 7 — оптические волокна; 8 — коллиматор/фокусирующий объектив; 9 — ДР

от вращения кулачков, приводящихся в движение рычагом. Конфигурация кулачка приводит к точности установки в десятки МПЗ. Добавленное к сканатору эллиптическое зеркало усиливает изображения так, что диаметр световода 200-мкм определяет коррекцию МПЗ. Сложность состоит в выборе материала световодов. Оптимальный материал — порошковое стекло или германий. Вторая проблема — компенсация механических вибраций, вызванных сканатором.

Экспериментальный видеоспектрометр «Shuttle» SISEX. Система SISEX, развивает концепцию Push-сканирования с использованием матричных ПИ.

ОС SISEX (рис. 5) состоит из входной оптики и спектрометра. Входная оптика представляет собой асферическую децентрированную зеркальную систему, включающую зеркала перенацеливания вдоль и поперек маршрута, зеркальный корректор Шмидта и внеосевую параболу [7].

Полевая диафрагма установлена, как обычно, в переднем фокусе коллиматора, каковым является большое двухсегментное сферическое зеркало. Поворотное зеркало дает плоское поле. Параллельный пучок разделяется дихроичным зеркалом на отраженный (0.4—1.0 мкм) и пропущенный (1.0—2.5 мкм).

Функцию разложения по спектру выполняют два призмённых полихроматора двойного прохождения, состоящие из призм и зеркальных корректоров. После возврата разложенных пучков на второй сегмент коллиматора оно же фокусирует два спектра на ПИ (плоское зеркало 13 служит для удобства размещения ПИ). Большая величина фокуса (416 мм) входной оптики средней светосилы ($f/3.8$) позволяет достичь 30-м линейного МПЗ при поле зрения 12.1 км (2.8°) и высоте орбиты 250 км.

Преимущества схемы:

- многократное использование коллиматора минимизирует количество оптики;
- составные призмённые системы дают почти линейную дисперсию без переналожения порядков, и лишены поляризационных эффектов;
- внеосевая оптика в сочетании с полевым зеркалом и корректорами уменьшает aberrации ОС.

К недостаткам можно отнести снижение пропускания благодаря материалам призм, сложность регулировки взаимного расположения блоков.

Видеоспектрометр среднего разрешения MERIS. ВС MERIS имеет спектральный диапазон $\lambda\lambda$ 400 ... 1050 нм, полюсу обзора 1500 км, спектральное разрешение 1.25 нм и пространственное разрешение 260 м [4].

ОС построена на модульном принципе. Достаточ-

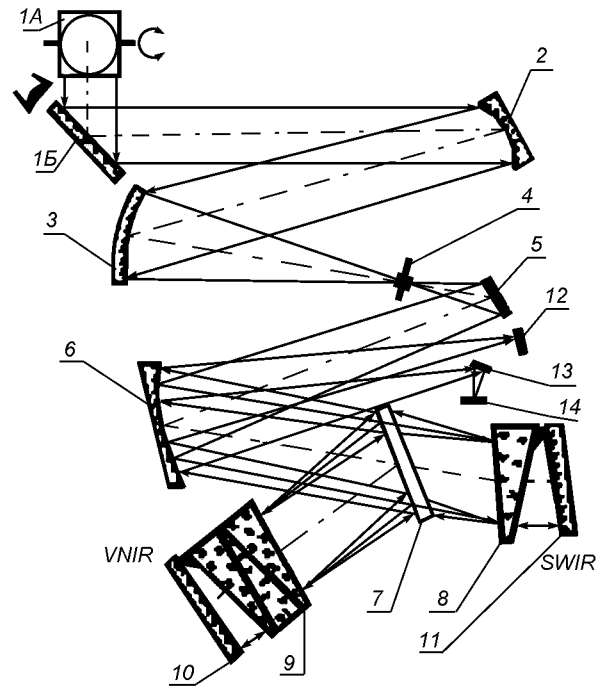


Рис. 5. Оптическая схема SISEX: 1А — зеркало продольного перенацеливания; 1В — зеркало поперечного перенацеливания; 2 — корректор Шмидта; 3 — внеосевая параболо; 4 — входная шель; 5 — поворотное зеркало; 6 — коллиматор/фокусирующий объектив; 7 — плоское зеркало; 8, 9 — призмы; 10, 11 — зеркальные корректоры; 12 — ПИ VNIR-канала; 13 — зеркало; 14 — ПИ SWIR-канала

но большое поле зрения (82°) разделено между шестью модулями, каждый из которых использует крупноформатную ПЗС-матрицу, и имеет поле зрения 14° . Перекрывание полей служит для выравнивания и калибровки.

Модули (рис. 6, а) расположены так, что оси пучков, попадающих в них, пересекаются в точке перед системой. Зондирование происходит через единую призму перенацеливания с углом 90° между входным и выходным лучом, поворот которой вокруг оси дает продольное визирование $\pm 20^\circ$. Призмой также удобно визировать внутренний источник калибровки.

Для получения минимальной поляризационной чувствительности ($< 1\%$) перед призмой установлен набор устраняющих поляризацию окон. Каждое окно расположено перпендикулярно к пути пропущенного луча. Конструктивно окно состоит из соединения двух клиньев кристаллического кварца и одного клина плавленого кремния. Кварцевые клинья обеспечивают необходимый эффект деполаризации, тогда как кремниевый клин —

параллельность внешних поверхностей окон. Кварцевые клинья переворачивают состояние поляризации пропущенного света; в зависимости от толщины клина поляризация изменяется вдоль апертуры. Поляризация остальных оптических блоков незначительно влияет на вариации пропускания пучка.

Специалистами предложены две альтернативные ОС модуля, отличающиеся системой передней оптики: линзовая осевая (рис. 6, б) и зеркально-линзовая внеосевая (рис. 6, в). В обоих случаях фокусное расстояние равно 71 мм. Передняя оптика имеет форму Петсваля, и использует стекла с возможностями аномальной дисперсии для обеспечения разрешения в заданной спектральной обла-

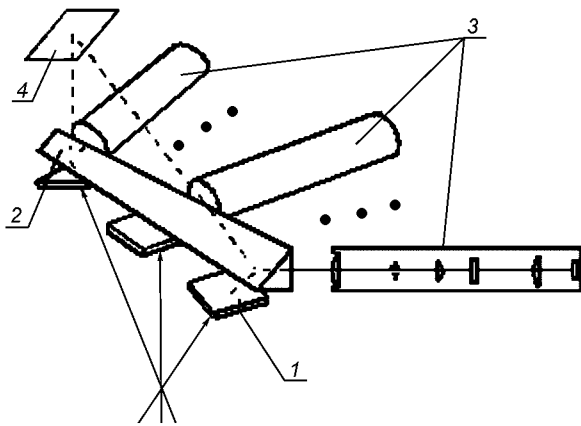


Рис. 6, а. Общий вид ВС MERIS: 1 — деполаризующие окна; 2 — призма перенацеливания; 3 — оптические модули; 4 — внутренний источник калибровки

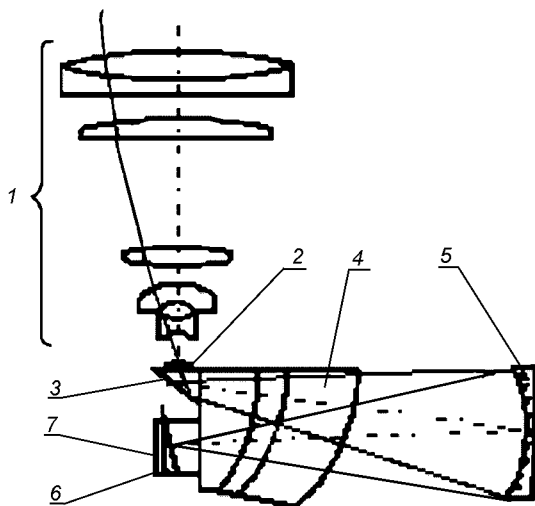


Рис. 6, б. Вариант ОС MERIS с осевой линзовой входной оптикой: 1 — входной объектив; 2 — входная щель; 3 — поворотная призма; 4 — полевой корректор; 5 — вогнутая ДР; 6 — фильтр; 7 — приемник

сти. Телецентрическая оптика выравнивает входные требования для спектрометра.

Для внеосевой катадиоптрической системы (рис. 6, в) изображение корректируется тремя большими линзовыми элементами перед первичным зеркалом, и полевыми линзами в плоскости промежуточного изображения. Материалом всех линз служит кремний. Внешний входной зрачок, расположенный на расстоянии 80 мм от полюса передней линзы, имеет прямоугольную площадь $20 \times 40 \text{ мм}^2$, тогда как осевая система — круглую площадь диаметром 28 мм.

Полевая диафрагма расположена в центре кривизны решетки, на плоской поверхности. Вторая поверхность корректора представляет собой сферу, концентрическую с решеткой.

Вогнутая решетка выбрана из-за преимуществ в получении линейной дисперсии и возможности коррекции aberrаций. Профилирование создает максимальную эффективность для длины волны 400 нм. Снижение ее для больших длин волн компенсируется увеличением чувствительности ПИ. Для ИК-волн получение необходимого уровня сигнала возможно сложением элементарных сигналов в широких полосах.

Фильтры перед ПИ служат для блокировки рассеянного излучения, а также устранения переналожения соседних порядков спектра.

Разработка на основе вогнутой ДР почти идеальна для использования в системах ВС с ПЗС. Она дает хорошее разрешение по пространственной и спектральной координатам, корректирует дисторсию (т. е. дает малую кривизну спектрального

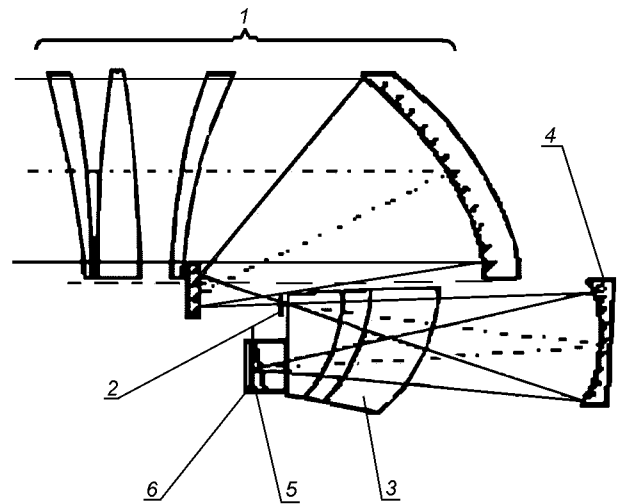


Рис. 6, в. Вариант ОС MERIS с внеосевой зеркально-линзовой входной оптикой: 1 — входной объектив; 2 — входная щель; 3 — полевой корректор; 4 — вогнутая ДР; 5 — фильтр; 6 — приемник

изображения щели и малую кривизну в линейном спектре для любой полевой точки).

Видеоспектрометр с зеркальной оптической системой ROSIS. Это компактный ВС, использующий матричный ПЗС-приемник. Оптика полностью состоит из зеркальных компонентов [8].

Изображение поверхности (одна строка перпендикулярно к направлению полета) (рис. 7) транслируется через зеркало перенацеливания. Задачей зеркала есть смещение строки сканирования вперед/назад для избежания попадания прямого луча Солнца. Поворот зеркала осуществляется с помощью шагового двигателя. Для защиты ВС от загрязнения служит система входных окон. Зеркала первичного телескопа фокусируют изображение строки на пропускающую входную щель спектрометра. Созданный последующими сферическими зеркалами параллельный пучок попадает на решетку. Спектральные пучки на выходе ДР фокусируются теми же зеркалами через отклоняющее зеркало на ПИ.

Главными зеркалами служат асферические эллиптические зеркала, разработанные так, что их остаточная кривизна компенсирует остаточную кривизну щели (искривленное изображение щели). Результирующий максимум дисторсии каждого канала остается ниже 0.2 размера пиксела даже в пределах поля зрения.

Не исключена возможность включения в конструкцию SWIR-канала 1.4 ... 2.5 мкм, что позволит применять ВС в геологическом исследовании, более широких изучениях состояния растительности, атмосферных измерениях, анализах льда и снега и т. д. В этом случае ПИ будут матрицы из Pd-Si с барьером Шоттки, либо гибридные плоскости из InSb, CdHgTe. Реально также использование каналов MWIR и TIR.

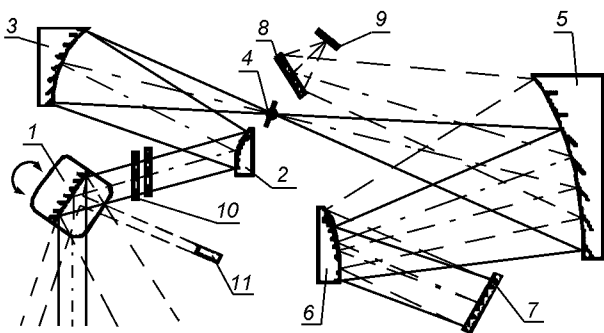


Рис. 7. Оптическая схема ROSIS: 1 — зеркало перенацеливания; 2, 3 — зеркала первичного телескопа; 4 — входная щель; 5, 6 — сферические зеркала; 7 — решетка; 8 — отклоняющее зеркало; 9 — ПИ; 10 — входные окна; 11 — лазерный диод

Видеоспектрометр тепловой ИК-области и TIS. Авиационный ВС TIS работает в области λ 7.5 ... 14 мкм, и представляет собой модификацию AIS-II [10].

ОС (рис. 8) состоит из сферических элементов во избежание лишней сложности в изготовлении и юстировке.

Оптика объединяет три системы Шварцчайльда с одинаковыми фокусными расстояниями 27.5 мм. Все они удовлетворяют условию концентричности: $R_1 = 1.236f'$, $R_2 = 3.236f'$, $s = 2f'$, и поэтому вклады сферической аберрации главного и вторичного зеркал равны и противоположны по знаку. Фокус был выбран для получения поле зрения 3.6 мрад/пиксел для выбранного размера плоскости ПИ (64 столбца×20 строк элементов площадью 100 мкм²). Радиусы зеркал первой системы 2 равны 34 и 89 мм при $s = 55$ мм.

Решетка работает в первом порядке при угле падения 58.2°. При перпендикулярности осей угол дифракции для центральной длины волны 10.75 мкм составляет -31.8°. При частоте 30.2 штр/мм, базе 41 мм и длине штриха 30 мм ДР профилируется на угол блеска 12.33° для $\lambda = 10$ мкм. Дисперсия составляет 0.036 мрад/нм при эффективности более 50 %. Разрешающая способность равна 1238.

Все зеркала сделаны из позолоченого алюминия, с защитным покрытием для усиления отражения при 10.75 мкм.

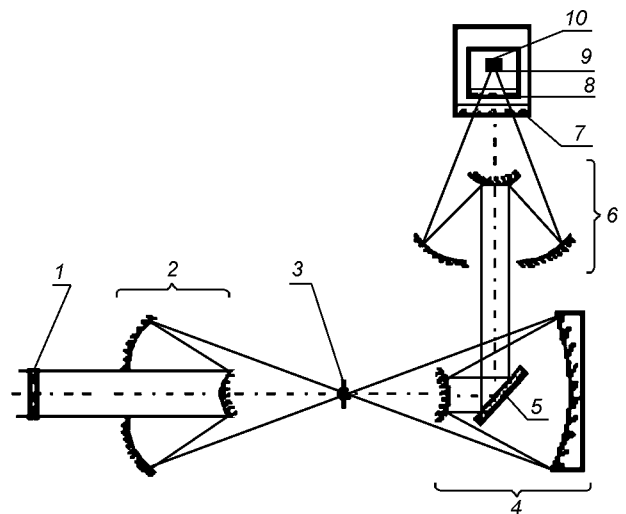


Рис. 8. Оптическая схема TIS: 1 — входное окно; 2 — входной объектив; 3 — входная щель; 4 — коллиматор; 5 — ДР; 6 — фокусирующий объектив; 7 — окно ограждения вакуума; 8 — окно промежуточно охлаждения; 9 — фильтр линейного изменения; 10 — ПИ

В близости от ПИ расположен фильтр линейного изменения (LVF), многослойный интерференционный фильтр на кремниевой основе с узким спектрально-полосовым пропусканием 1 мкм/мм. Каждая часть фильтра шириной 100 мкм пропускает спектральную полосу шириной 250 нм. Главная функция фильтра состоит в блокировании фонового излучения 300 К, позволяющем работать с оптикой комнатной температуры.

Пропускающими компонентами также являются входное окно \varnothing 38 мм \times 3 мм, окно ограждения вакуума \varnothing 51 мм \times 3 мм, и окно промежуточного охлаждения до 80 К \varnothing 38 мм \times 3 мм, выполненные из сульфида цинка ZnS, которые будут иметь антизеркальные покрытия для длинноволновой прозрачности.

Существенной особенностью схемы есть получение хорошего качества изображения, с номинальным значением МПФ 0.835 (на оси) и 0.798 (на краю), а также высокая точность изготовления оптики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ развития видеоспектрометрических систем позволяет сделать вывод о том, что существуют два основных пути проектирования систем такого типа, а именно:

1. Видеоспектрометры с высоким пространственным разрешением и малым полем зрения, с полосой обзора 30—60 км, размером пиксела 30—50 м, спектральным разрешением $\delta\lambda \leq 10$ нм (например, HRIS в планировании Европейского Космического Агентства (ESA), HIRIS в планировании NASA).

2. Видеоспектрометры со средним пространственным разрешением и большим полем зрения, с полосой обзора 1000—1500 км, размером пиксела $\delta\lambda \leq 5$ нм (например MERIS в планировании ESA, MODIS в планировании NASA).

В общем случае, принцип Whisk-Broom предлагается для больших полос обзора и относительно больших линейных МПЗ, а принцип Push-Broom — для обеспечения меньших МПЗ, либо малых полос обзора с перенацеливанием. Известны случаи проектирования ОС Push-BC на основе зеркального Шмидта [6], которые дают сравнительно широкую полосу обзора, но разработка таких систем представляет большие трудности из-за значительных габаритов оптических элементов и искривленной плоскости изображения.

Успешная разработка ВС нуждается в достаточно светосильной оптике ($f_{\text{ent}}/1.0 - f_{\text{ent}}/3.0$). Во многих

случаях рабочий спектральный диапазон является широким, что влияет на требования к ОС по пропусканию [3]. Поэтому чаще всего оптика строится на зеркальных системах, исключая входные окна ПИ, линзы исправления кривизны поля, фильтры, призмы, которые работают на пропускание, а не на отражение. Особое внимание следует уделять обеспечению необходимого спектрального, пространственного и радиометрического разрешения. Также необходимо предусмотреть коррекцию основных aberrаций методами включения линзовых корректоров и взаимной компенсации aberrаций компонентов схемы.

1. Aptaker I. M. A Near-infrared mapping spectrometer for the investigation of Jupiter & its satellites // Proc. SPIE.—1983.—395.—P. 133—148.
2. Asrar G., Dozier J. EOS. Science strategy for the Earth Observing System. AIP Press, NASA, July 1994.
3. Aumann H. H., Pagano R. J. Atmospheric infrared sounder on the Earth observing systems // Opt. Eng.—1994.—33, N 3.—P. 776—784.
4. Baudin G., Bessudo R., Cutter M., Lobb D., Bery J.-L. Medium resolution imaging spectrometer (MERIS) // Proc. SPIE.—1991.—1490.—P. 102—113.
5. Breckinridge J. B. Imaging spectrometry for the mission to planet Earth // Proc. SPIE, Conf. on imaging Spectrometry II, Denver, Aug. 1996.—1490.—P. 3—7.
6. Breckinridge J. B., Page N. A., Shannon R. R., Rogers J. M. reflecting schmidt imaging spectrometers // Appl. Optics.—1983.—22.—P. 1175—1180.
7. Herring M., Page N. A. Development of imaging spectrometer for shuttle & space platform applications // Proc. SPIE.—1985.—589.
8. Kunkel B., Blechinger F., Lutz R. ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer) — A candidate instrument for polar platform missions // Proc. SPIE.—1987.—868.—P. 134—141.
9. Leslie L. Thompson. Overview of the potential instrument payload for the EOS system // Proc. SPIE.—1990.—1300.—P. 134—139.
10. Mahoney C., Labaw C., Sobel H., Kahle A. Thermal Infrared Imaging Spectrometer: an advanced optics technology instrument // Proc. SPIE.—1990.—1298.—P. 87—92.
11. Vane G., Crisp M. The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS): An advanced tool for Earth remote sensing // Proc. 1984 IEEE Geosci. & Rem. Sens. Symp., SP 215.—1984.—P 751—757.

OPTICAL SYSTEMS OF IMAGING SPECTROMETERS FOR THE REMOTE SENSING OF THE EARTH

V. G. Kolobrodov, P. V. Borodiichuk, and V. I. Mikitenko

We present an overview of the development of optical systems for imaging spectrometers designed for remote sensing of the Earth. Technical characteristics are given for airborne as well as spaceborne imaging systems which were developed in recent years. Particular emphasis on peculiarities of optical system design including scanning subsystem, entrance optics, and spectrometer.