

УДК 681.785.555

**В. В. Донец**

Корпорація «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ

## **АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ СОЗДАНИЯ БОРТОВОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА AVIRIS ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

---

*Анализируются особенности конструкции и характеристики гиперспектрометра авиационного базирования AVIRIS первого поколения для спектрометрического исследования земной поверхности и подспутниковой валидации спектрометрических данных, физические и технологические аспекты его создания и использования. Достижения передовых технологий, которые были апробированы в нем, были реализованы в космических гиперспектрометрах — сначала в SISEX (1990) и HIRIS (1994), а потом в гражданском HYPERION, военном ARTEMIS, а также в компактных приборах M3 и CRISM для исследования поверхности Луны и Марса и в авиационном гиперспектрометре AVIRIS нового поколения AVIRISng*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Спектрометрия изображения (Imaging Spectrometry) [2, 6], которую называют также «гиперспектрометрия», определяется как одновременное получение изображений в большом количестве смежных спектральных диапазонов (полос) с формированием так называемого информационного «гиперспектрального куба».

Спектрометрия изображения представляет большой интерес в качестве нового подхода к дистанционному зондированию Земли. За последние три десятилетия в мировой практике аэрокосмического мониторинга земной поверхности наблюдается все более активная разработка и внедрение методов гиперспектрометрии изображений и средств для гиперспектральной съемки [6] с регистрацией количественных параметров изображения с помощью бортовых гиперспектрометров («видеоспектрометров»).

Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства (НАСА, США) имеет специальные самолеты и системы датчиков, в том числе и гиперспектральных, предназначенные для валидации (заверки) данных исследований путем дистанционного

зондирования Земли (ДЗЗ). Они обеспечивают многоуровневую исследовательскую платформу для НАСА — сбор данных об атмосферных, наземных и океанических процессах [5, 16, 17].

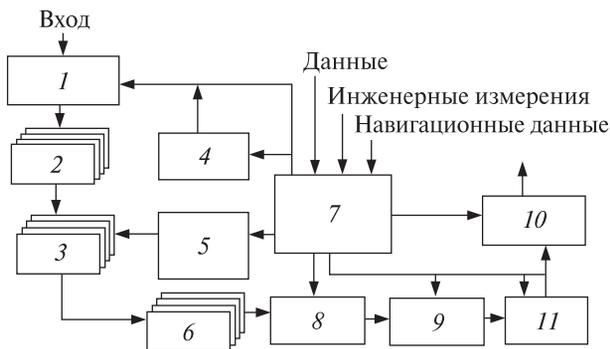
Авиационные гиперспектральные системы имеются также и в других высокоразвитых странах (Канада, Финляндия, Австралия, Китай, Россия и др.) [1–3].

Наша работа посвящена обзору основных технических характеристик уникальной гиперспектральной оптико-электронной аппаратуры с некоторыми ее особенностями конструкции на примере уникального авиационного гиперспектрометра AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer). Ранее в обзоре [2] мы рассматривали гиперспектрометр AIS.

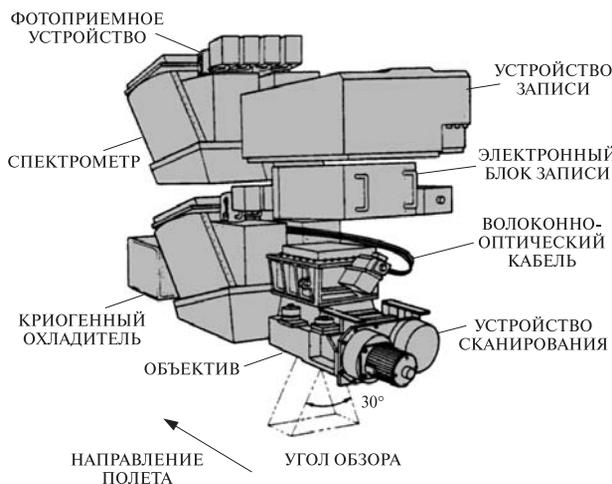
### **ГИПЕРСПЕКТРОМЕТР AVIRIS**

Авиационный гиперспектрометр AVIRIS с внутренней калибровкой, разработанный в Naval Research Laboratory (NRL) Калифорнийского технологического института (НАСА), оказался наиболее удачным проектом. Он является вторым после AIS [2, 8] в серии бортовых гиперспектрометров изображения высокого класса.

AVIRIS был задуман в качестве бортовой системы для регулярного и оперативного сбора спектральных изображений поверхности Земли.



**Рис. 1.** Блок-схема гиперспектрального сканера AVIRIS [5]: 1 — блок входной оптики, 2 — составные спектрометры, 3 — CCD-приемники, 4 — бортовой калибратор, 5 — шина управления детекторами, 6 — предварительные усилители, 7 — центральный процессор, 8 — устройство коррекции смещения, 9 — аналого-цифровой преобразователь, 10 — устройство записи и хранения информации, 11 — буфер данных



**Рис. 2.** Сенсорный блок AVIRIS первого поколения [7, 11, 13, 14]

Блок-схема гиперспектрального сканера AVIRIS первого поколения [5] на основе сенсорного блока с системами ввода излучения, его спектрометрической регистрации, обработки и хранения информации приведена на рис. 1. Внешний вид гиперспектрального сканера AVIRIS первого поколения [7, 11, 13, 14] с сенсорным блоком, системами обеспечения, обработки и хранения информации приведена на рис. 2 и 3.

AVIRIS как воздушный гиперспектрометр был впервые поднят в воздух (на самолете NASA/Lockheed U-2) в 1986 г. Первые научные данные были получены уже летом 1987 г., а в полном объеме этот приборный комплекс эксплуатируется с 1989 г. по сей день.

В июне-июле 1991 г. гиперспектральные исследования были выполнены с помощью прибора AVIRIS также на многих европейских полигонах.

Вес прибора AVIRIS составляет 340 кг [9]. Носителями, так называемыми платформами, гиперспектрометра AVIRIS являются четыре модели самолетов:

- турбовинтовые Twin Otter Platform (рис. 4, а), работающие на высоте 4 км со скоростью около 130 км/ч, и Douglas DC-8;

- турбореактивные New Capability (рис. 4, б), работающие на средних высотах от 5 до 8 км;

- высотные турбореактивные ER-2 фирмы Lockheed, S-модель известного высотного самолета-разведчика U-2 (рис. 4, в), работающие на больших высотах около 20 км со скоростью 730 км/ч.

Все самолеты оснащены современными навигационными системами, которые могут непрерывно записывать кроме основных данных, GPS-местонахождение и данные платформы.

AVIRIS считается первым рабочим гиперспектральным инструментом. Прибор имеет внутреннюю спектральную и радиометрическую калибровку [16, 17]. AVIRIS является уникальным оптическим сенсором (датчиком), обеспечивающим получения достоверной гиперспектральной информации в цифровом формате об отраженной и рассеянной солнечной энергии с поверхности Земли и атмосферы в 224 смежных спектральных диапазонах от 400 до 2500 нм [16, 17] с высоким пространственным ( $< 20 \times 20$  м) и спектральным разрешением ( $\Delta\lambda \leq 10$  нм). Эти результаты крайне нужны как для научных исследований поверхности земли, водной среды, атмосферы и климата, так и в разведывательных целях.

Спектрометр AVIRIS до сих пор является приборным комплексом мирового класса. Он в течение 25 лет выдержал ряд модификаций, а с 2011 г. постепенно заменяется на современный

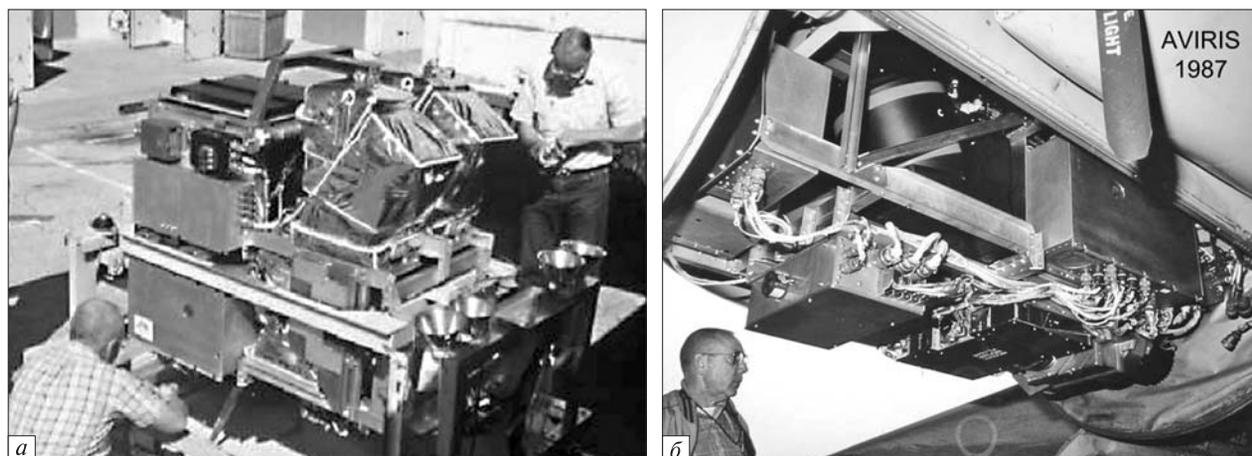


Рис. 3. Сенсорный блок AVIRIS: а — перед установкой в самолет [10], б — установленный в самолет (вид снизу)[12]



Рис. 4. Носители гиперспектрометра AVIRIS: а — самолет Twin Otter (рабочая высота полета 4 км), б — самолет New Sarability (рабочая высота полета от 5 до 8 км), в — самолеты ER-2 (рабочая высота полета до 20 км)

гиперспектрометр нового поколения (новой генерации) AVIRISng.

**Принцип действия гиперспектрального сенсора AVIRIS.** Принцип действия бортового гиперспектрометра AVIRIS первого поколения (рис. 5) базируется на конфигурации формирования и считывания аэрокосмоизображений — «whiskbroom» [1, 13].

Технология «whiskbroom» [1] (венчиком метлы — по дорожке, поперек трека сканера) в гиперспектральном исполнении базируется на использовании гиперспектрометра с входной зеркальной оптической системой со сканером, зеркало которого осуществляет механическое сканирование в пределах угла поля зрения (для AVIRIS — 30°, слева направо) анализируемого участка поверхности Земли поперек направления движения (траектории) носителя сканера и отражает каждый элемент участка через диспергирующий узел на линейный многоэлементный сенсор, который в ги-

перспектрометре регистрирует один элемент (пиксел) разложенного в спектр изображения участка одновременно всеми элементами сенсора. Мгновенное поле зрения (IFOV) прибора AVIRIS составляет  $\beta \sim 1$  мрад, при этом частота сканирования составляет 12 Гц [14, 15].

**Состав бортового авиационного гиперспектрального сенсора AVIRIS первого поколения.** Состав бортового авиационного гиперспектрального сенсора AVIRIS первого поколения показан на блок-схеме (рис. 1) [5].

Оптическая схема гиперспектрометра AVIRIS со входной зеркальной оптической системой и оптическая схема отдельного спектрометра приведены на рис. 6. Для удобства на рис. 6—9 используется единая нумерация составных элементов. Этот уникальный бортовой гиперспектральный сенсор AVIRIS первого поколения имеет единую входную зеркальную оптическую систему (рис. 6, а) и оптически сопряженные с

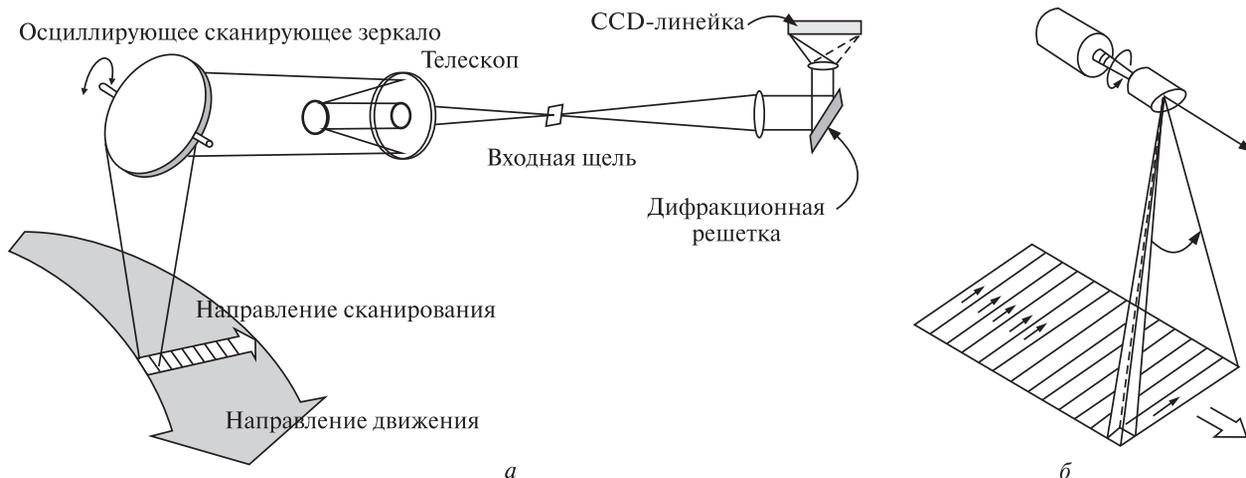


Рис. 5. Принцип действия гиперспектрального сканера AVIRIS типа «whiskbroom»: а — направление сканирования, б — порядок пошагового сканирования

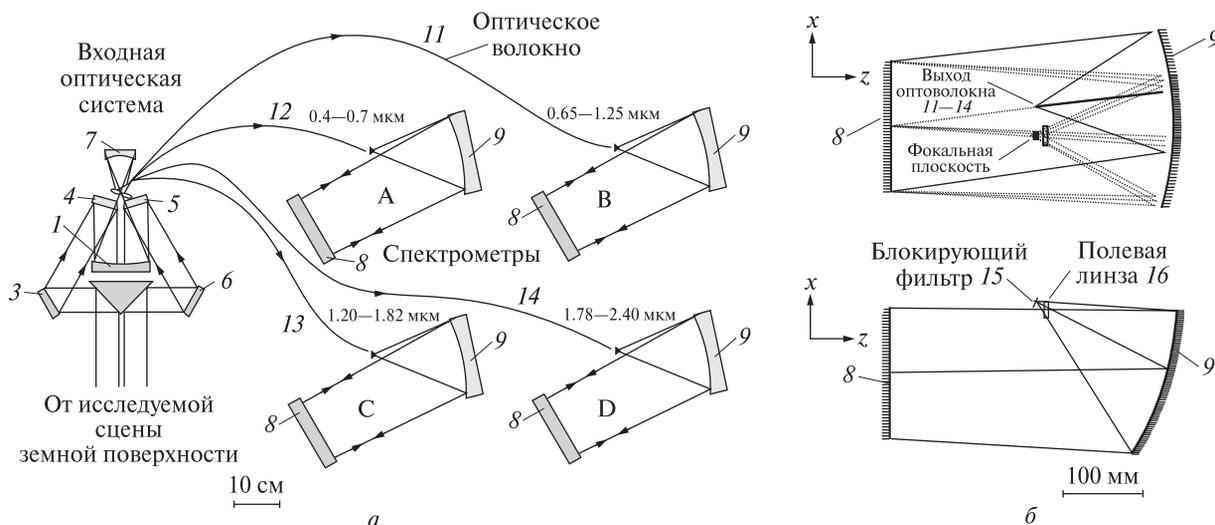


Рис. 6. Оптические схемы: а — гиперспектратора AVIRIS, б — отдельного спектрометра [13]

ней четыре полихроматора (спектрометра) А, В, С, D. Все спектрометры выполнены по схеме Литрова с внеосевым телескопом Шмидта (рис. 6, б). Расчетный спектральный диапазон гиперспектратора AVIRIS (от 0.4 до 2.4 мкм) был разделен на четыре части [7]. Такое техническое решение позволило использовать спектрометры А, В, С, D с номинальными параметрами в спектральных диапазонах 400—750, 650—1250, 1200—1820 и 1780—2400 нм соответственно совместно с индивидуальными оптическими волокнами

для покрытия широкого рабочего спектрального диапазона от 360 до 2500 нм с обеспечением допустимого соотношения «сигнал/шум» по всей области спектра. Это разделение было необходимо для поддержания дифракционной эффективности решетки в заданных спектральных поддиапазонах [13].

Входная оптическая система (рис. 6, а) предназначена для ввода излучения в каждый из четырех полихроматоров (спектрометров) А, В, С и D. Она состоит из составного входного теле-

скопического объектива на основе зеркального параболического зеркала 1, зеркального оптикомеханического сканатора 2, плоских поворотных зеркал 3–6 и эллиптического зеркального объектива 7, фокусирующего вошедшее от исследуемой сцены земной поверхности излучение на входные торцы четырех оптических волокон видимого (11–13) и инфракрасного (14) диапазонов. Полихроматоры А, В, С и D имеют асферические дифракционные решетки 8, асферические коллимирующие зеркала 9 и плоские охлаждаемые жидким азотом линейные многоэлементные сенсоры 10 (10А, 10В, 10С и 10D). AVIRIS имеет также внутренний калибратор для калибровки измерительного прибора на борту (см. рис. 9). При этом фокус параболического зеркала 1 совмещен с фокусом эллиптического зеркального объектива 7, второй фокус которого совпадает с плоскостью входных граней четырех оптических волокон 11–14.

Использование оптических волокон 11–14 в гиперспектрометре AVIRIS с составными спектрометрами А, В, С и D имеет важное значение, поскольку позволяет выполнить независимое использование входной оптики и отдельных спектрометров в компактной упаковке, необходимых для самолетного варианта. Оптические волокна 11, 12 из кварцевого стекла с числовой апертурой 0.55 используются для работы в спектральном диапазоне от 360 до 1300 нм. А оптические стекловолокна 13, 14 из фторида циркония с оболочкой из фторида бериллия с числовой апертурой 0.55 используются для работы в спектральном диапазоне с 1300 до 2500 нм.

Эти уникальные стекловолокна из фторида циркония, разработанные специально для AVIRIS, были первыми в своем роде. Следует отметить, что волокна из фторида циркония оказались менее надежными, чем из кварца. Тем не менее, первоначальные трудности в дальнейшем были преодолены.

Плоские зеркала 3–6 имеют защищенное серебряное покрытие, а параболическое (1) и эллиптическое (7) зеркала имеют алюминиевое покрытие. Этим обеспечивается высокая отражательная способность AVIRIS в широком рабочем спектральном диапазоне.

Эллиптическое зеркало 7 используется для обеспечения мгновенного поля зрения при согласовании выхода блока входной оптики с оптическими волокнами, имеющими числовую апертуру 0.45.

Свет от входного телескопа, выполненного на основе параболического зеркала 1, сфокусированный эллиптическим зеркалом 7 (один из фокусов которого совпадает с фокусом параболического зеркала 1) на объединенные входные торцы каждого из четырех оптических волокон 11–14, поступает на входы различных спектрометров А, В, С, D. Этим обеспечивается возможность одновременного измерения интенсивностей всех спектральных составляющих светового потока в большом диапазоне длин волн при максимальной эффективности каждой из дифракционных решеток 8 и индивидуальных линейчатых фотоприемников 10.

Так, в спектрометре А используется линейчатый массив кремниевых детекторов 10 из 32 элементов 200 × 200 мкм. Этот детектор, имеющий чувствительность и в синей области спектра, работает при температуре 77 К. Температура регулируется с помощью выходного клапана, прикрепленного к сосуду Дьюара с жидким азотом. В остальных спектрометрах используются линейчатые массивы детекторов 10 из арсенид галлия-индия и антимолида индия по 64 элементов каждый (таблица). Каждый из этих спектрометров и массивы их детекторов 10 оптимизированы для соответствующего спектрального диапазона.

После выходного торца каждого из оптических волокон в индивидуальном спектрометре (А, В, С или D) установлена своя входная щель, расположенная в фокусе индивидуального асферического зеркала 9 (с радиусами 378.5, 374.42, 370.51 и 359.75 мм соответственно) [13]. Далее эти зеркала в каждом из спектрометров коллимируют и направляют параллельный световой поток на свою асферическую дифракционную решетку 8 [13], где свет раскладывается на спектральные компоненты, и в автоколлимационном режиме с помощью того же зеркала 9 фокусируется в плоскость каждого из линейных CCD-приемников 10.

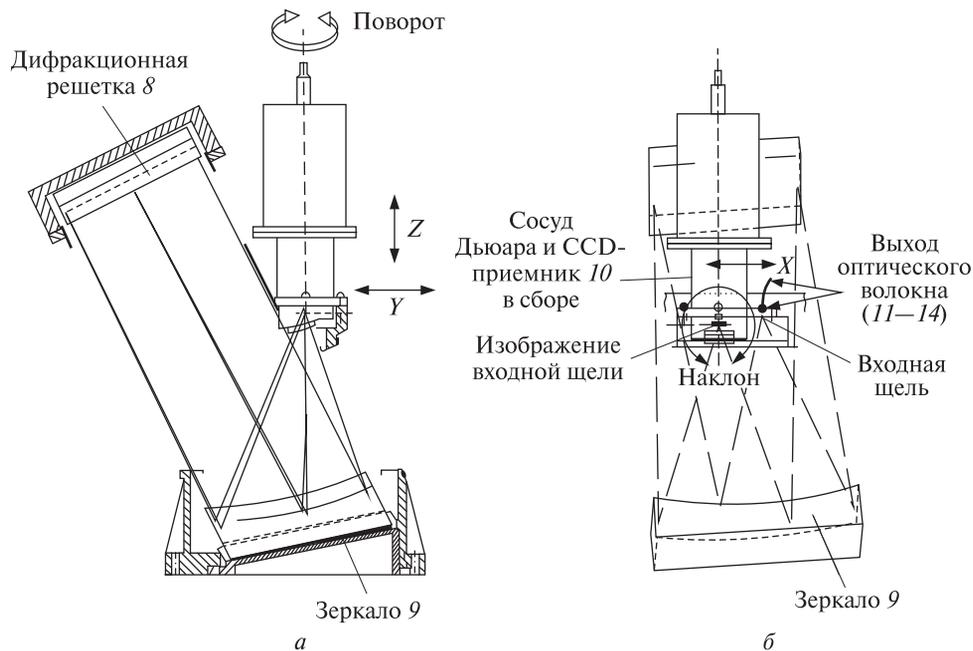


Рис. 7. Схематическое представление вращения блоков спектрометра сенсора AVIRIS при юстировке [13]

Основные и составных спектрометров гиперспектрометра AVIRIS

Характеристика	Спектрометр А	Спектрометр В	Спектрометр С	Спектрометр D
Рабочий спектральный диапазон	360—670 нм (31 полоса)	660—1280 нм (63 полосы)	1260—1880 нм (63 полосы)	1880—2500 нм (63 полосы)
Расчетный спектральный диапазон	400—750 нм	650—1250 нм	1200—1820 нм	1780—2400 нм
$\lambda_{max}$ рабочего спектрального диапазона	550 нм	950 нм	1510 нм	2090 нм
Угол падения, град	7.07	8.83	10.70	14.08
Угол дифракции, град	3.35	1.84	0.16	3.98
Обратная линейная дисперсия, лин./мм	117.65 (шаг 8.5 мкм)	128.2 (шаг 7.8 мкм)	124.2 (шаг 8.05 мкм)	128.6 (шаг 7.775 мкм)
Выделяемый спектральный интервал, нм	9.7	9.5	10.0	10.0
Радиус выпуклой асферической диф- ракционной решетки $\delta$ , мм	2447.38	3235.2	3028.47	2872.74
Радиус вогнутого асферического кол- лимирующего зеркала $\rho$ , мм	379.50	374.41	370.51	359.75
Тип CCD линейки $10$ и количество ее приемных площадок	Silicon 32	Silicon+ InGaAs (на кремниевой подложке) 64	Indium Antimonide 64	Indium Antimonide 64
Полуширина выделяемого спектраль- ного интервала, нм	9.7	9.5	10.0	10.0
Отношение «сигнал/шум» при аль- беда 0.5	> 100 ( $\lambda = 700$ нм)	н/д	н/д	> 50 ( $\lambda = 2200$ нм)

Поскольку углы падения и дифракции разнятся между собой, то в спектрометре Шмидта, который обладает большим полем зрения, имеется возможность пространственно разнести входную щель и плоскость охлаждаемого жидким азотом линейного массива приемников 10, перед каждым из которых установлен индивидуальный блокирующий фильтр 15 и полевая линза 16 — корректор плоского поля.

Телескопы системы Шмидта [4] обладают большим полем зрения, что очень важно при использовании оптических волокон с высокой числовой апертурой. Столь большое поле получается благодаря применению так называемой коррекционной линзы с весьма сложной поверхностью. В случае составных спектрометров прибора AVIRIS эта линза заменяется коррекционным зеркалом 9. Спектрометр стал полноотражательным. Однако он очень сложен в изготовлении. Дело в том, что коррекционное зеркало 9 в таком спектрометре приходится ставить под некоторым углом к его оптической оси (рис. 7). А это приводит к асферичности его поверхности, что существенно усложняет обработку.

Эффективное фокусное расстояние входной оптики (200 мм) и диаметр входного отверстия (сердцевины) оптического волокна (200 мкм) как раз и определяют мгновенное поле обзора из датчика AVIRIS на землю.

Во входной оптической системе энергия, отраженная от последнего, эллипсоидального зеркала сканирования диаметром 200 мм увеличивается в 1.3 раза (для достижения требуемого мгновенного поля обзора  $\beta = 1$  мрад) и фокусируется на торцы четырех оптических волокон с диаметром 200 мкм. Эффективное фокусное расстояние входной оптики составляет 20 см, глубина резкости — 0.4 см.

Все четыре спектрометра прибора AVIRIS имеют одинаковые основные оптические схемы (рис. 6, б), и только угол наклона дифракционной решетки 8 существенно изменяется от спектрометра к спектрометру, как того требует рабочий спектральный диапазон каждого из спектрометров. В этой конфигурации системы Шмидта коррекционное зеркало 9 наклонено по отношению к оптической оси. Оптимальный

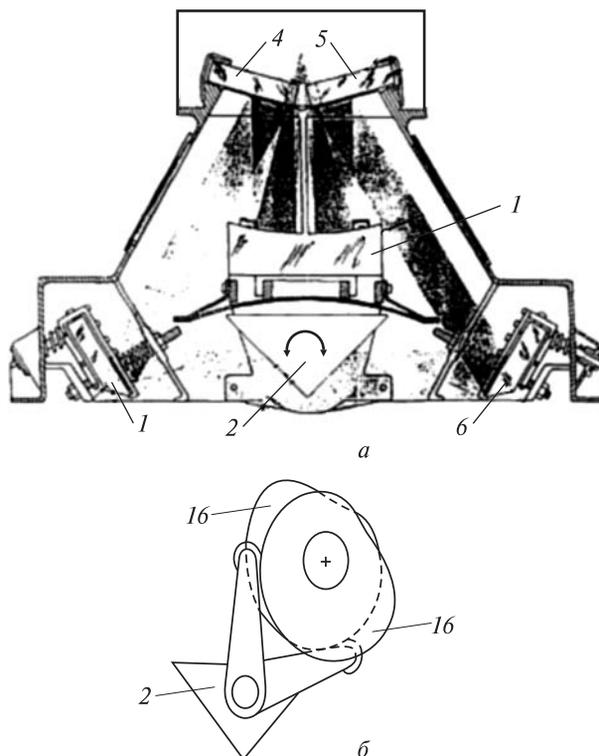


Рис. 8. Чертеж сканатора прибора AVIRIS с составным входным объективом (а) и механизмами нелинейного движения сканирующей призмы (б) [14]

показатель поверхности для данной конфигурации — аноморфные асферические поверхности.

При создании прибора AVIRIS изготовление таких поверхностей было бы слишком рискованно и дорого. Поэтому был выбран проект с вращением (рис. 8) как блока охлаждаемого приемника излучения 10 с блокирующим фильтром 15, так и выхода индивидуального оптического волокна (11—14). Этот компромисс привел лишь к незначительному ухудшению общих оптических характеристик, но все еще оставался в пределах спецификаций системы. На рис. 7 представлена схема вращения блоков спектрометра прибора AVIRIS при их юстировке. Фокусировка осуществляется осевым смещением крепления оптического волокна 11—14.

Оптические характеристики составных спектрометров AVIRIS приведены в таблице.

Для всех четырех спектрометров AVIRIS были разработаны уникальные дифракционные отра-

жающие выпуклые асферические решетки  $\delta$  второго порядка [13] с радиусами  $R$  от 2447 до 3235 мм). Уравнение, согласно которому задается поверхность решетки, приведено в [13]. Этим была выполнена коррекция поверхности. В таблице приведены и асферические коэффициенты каждой из решеток  $\delta$ , их шаг, а также углы падения и дифракции.

Шаг каждой дифракционной решетки  $\delta$  (от 7.775 до 8.05 мкм) и длина волны максимального отражения установлены для каждого из рабочих спектральных поддиапазонов составного спектрометра с учетом параметров каждого из CCD-приемников  $10$  [13].

Для каждого спектрометра были созданы уникальные блокирующие фильтры  $15$  [13] для подавления света от длин волн, которые уже не соответствуют рабочему диапазону каждого из спектрометров. Так, в спектрометре  $D$  этот специализированный фильтр уменьшает шум в рабочем диапазоне спектрометра от 1800 до 2500 нм и подавляет фотоны вне его рабочего диапазона. Этим достигается увеличение отношения «сигнал/шум», которое при значении альbedo 0.5 превышало 100 в спектрометре  $A$  (на длине волны  $\lambda = 700$  нм) и 50 в спектрометре  $D$  (на длине волны  $\lambda = 2200$  нм) [19].

Каждый спектр (в пределах каждого положения мгновенного поля зрения) измеряется и регистрируется последовательно, во время пошагового сканирования (рис. 5, б) с частотой развертки 12 Гц [14, 15]. Для выполнения такого сканирования и был разработан специальный сканатор, который включает в себя подвижную зеркальную призму  $2$  и механическую систему на основе четырех нелинейных кулачков  $16$  [14]. Сканирующее зеркало призмы  $2$  размером  $10 \times 20$  см имеет эффективный диаметр 14.5 см [7, 14].

На рис. 8 показаны оптическая схема и чертеж сканатора прибора AVIRIS с составным входным объективом (а), механизм нелинейного движения сканирующей призмы  $2$  (б).

Эффективность привода AVIRIS сканирования приближается к 70 %, поскольку осциллирующая с частотой 12 Гц отражающая (в пределах угла  $30^\circ$ ) плоскость призмы  $2$  находится в поло-

жении сканирования поверхности Земли около 70 % времени. За остальные 30 % времени она должна вернуться для сканирования следующей строки изображения [14].

Большим преимуществом whiskbroom-сканера является то, что свет для каждого пространственного элемента проходит тот же путь из оптической системы. Это дает исключительную однородность для 614 пространственных кросстрекков в каждой линии сканирования изображения AVIRIS. При этом имеются значительные механические усилия, необходимые для отработки пошагового сканирования зеркальной плоскости развертки — линейно через  $30^\circ$  (что соответствует 10.4 км при номинальной высоте 19800 м) поля обзора, а затем вернуться назад с удвоенной скоростью, чтобы начать сканирование следующего изображения.

В работе [14] описана разработка сканатора, расчет производительности механизма сканирования, обсуждаются компромиссы между различными подходами и выбором привода кулачков  $16$  (рис. 8, б). Описаны конструкция и исполнение приводного механизма сканирования, причины для выбора конкретного кулачка  $16$ , метод проверки конструкции привода и измерения производительности, а также эффективность полученных результатов.

**Принцип работы гиперспектрального сенсора AVIRIS первого поколения [7, 14].** Световой поток, отраженный от исследуемой сцены земной поверхности, входит в спектрометр изображений (сенсор) AVIRIS через оптический люк (иллюминатор), расположенный в днище самолета (рис. 3, б). Иллюминатор толщиной 2.54 см, выполненный из плавленого кварца, имеет средний коэффициент пропускания не хуже 0.95 по всему рабочему спектральному диапазону.

Световой поток после прохода через иллюминатор проходит через оптический затвор, отражается от двух граней сканирующего зеркала призмы  $2$ , изменяет свое направление с помощью набора плоских зеркал  $3-6$ , затем фокусируется с помощью параболического (1) и эллиптического (7) зеркал входной оптической системы на массив из четырех информационных оптических волокон  $11-14$  с числовой апертурой 0.45

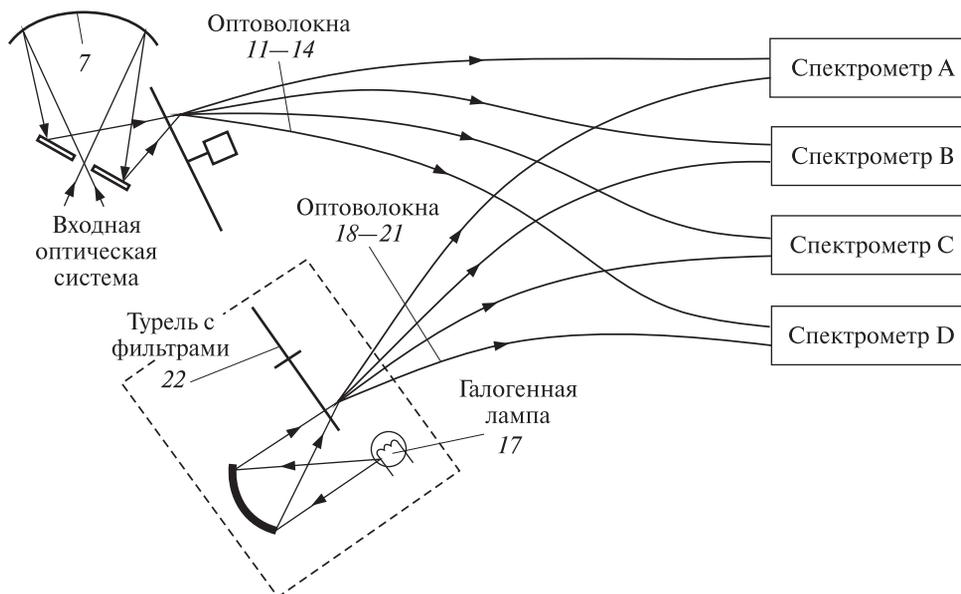


Рис. 9. Принцип действия бортового калибратора гиперспектрометра AVIRIS

(0.55 — для ИК-волокна 14) и диаметром сердцевины 200 мкм в каждом. Каждое из этих волокон передает световой поток из входной оптической системы на входные щели каждого из четырех составных спектрометров (А, В, С и D), которые используются для покрытия спектральном диапазоне от 360 до 2500 нм.

Как указано выше,  $\beta \approx 1$  мрад. Это составляет 19.8 м по земле с высоты 19800 м (рис. 8, б). Далее, при использовании технологии сканирования «whiskbroom» выполняются 614 шагов последовательного сканирования пространственных элементов. Таким образом, формируется одна строка изображения земной поверхности (рис. 5) [14].

Электрические сигналы от охлаждаемых жидким азотом линейных датчиков 10, расположенных на выходе каждого из спектрометров, усиливаются в индивидуальном предварительном усилителе и оцифровываются блоком электроники, который тоже охлаждается из сосуда Дьюара. Полученная с помощью прибора AVIRIS информация оцифровывается в 12-битный сигнал и записывается как данные 224 спектральных каналов. (Каждая оцифрованная сцена с высоты 20 км имеет размер на земле 11 × 9 км). Затем

информационные цифровые сигналы объединяются с сигналами управления, навигационными данными и усиленными темновыми сигналами приемников. Навигационные данные включают позиции X, Y и Z платформы от GPS, а также крена, тангажа и рыскания с интервалами в одну секунду. Этот поток данных затем записывается на 10.4-Гб накопитель высокой плотности (в первых приборах — цифровой ленточный магнитофон, со скоростью записи 20.4 Мб/с).

Механическая шторка (оптический затвор) расположена на выходе из входной оптики перед волоконной оптикой. Затвор автоматически открывается только тогда, когда происходит сканирование изображения по спектру и закрывается как во время сканирования обратного хода, так и для определения темнового тока и во время калибровки — в начале и в конце снятия данных. Шестьдесят четыре значения темнового сигнала усредняются для каждой строки развертки. Такое усреднение необходимо для подавления шума при измерении на темном фоне. Оптический затвор в нерабочем состоянии закрыт для защиты сканирующего зеркала и входной оптики.

**Бортовой калибратор.** Бортовой калибратор, имеющийся в составе прибора AVIRIS

предназначен для спектральной и радиометрической калибровки гиперспектрометра на борту самолета [7, 13, 16]. Он проверяет спектральное соответствие и радиометрическую устойчивость спектрометров до и после каждого запуска гиперспектрометра на регистрацию данных для обеспечения данных с необходимой точностью.

Источником опорного сигнала в бортовом калибраторе служит кварцевая галогенная лампа 17 (10 Вт), рассчитанная на 5000 ч горения со стабилизированной интенсивностью излучения, с узкополосным фильтром, имеющим рабочую длину волны в максимуме пропускания  $\lambda = 543.5$  нм. Он оптически связан через четыре оптоволоконна 18–21 со спектрометрами (рис. 9).

Для улучшения стабильности температура всего бортового калибратора (+40 °С) поддерживается с помощью контроллера температуры (на рис. 9 не показан).

Калибратор прибора AVIRIS включается до и после каждого полета. Свет от бортового калибратора передается последовательно через восемь различных фильтров, расположенных на турели 22, обеспечивающих как радиометрическую, так и спектральную калибровку. Турель 22 с фильтрами имеет два нейтральных фильтра, пять узкополосных фильтров с различными рабочими длинами волн и темную позицию для регистрации темновых токов CCD-приемников 10.

Гиперспектрометр AVIRIS и встроенный в него калибратор системы калибруются в лаборатории до и после каждого полетного сезона. Во время лабораторных испытаний спектральная, радиометрическая и геометрические характеристики прибора AVIRIS определяются по отношению к лабораторным стандартам.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены и проанализированы основные физические и технологические аспекты, а также особенности конструкций семейства гиперспектрометров авиационного базирования AVIRIS для спектрометрического исследования земной поверхности.

Проведенный анализ показал, что научно-технический уровень разработок семейства борто-

вых гиперспектрометров авиационного базирования AVIRIS первого поколения соответствует современным требованиям.

При создании этих уникальных приборов были внедрены и апробированы достижения передовых технологий. Основные из них:

- асферическая оптика во входном телескопе;
- асферические зеркала в составных спектрометрах;
- асферические зеркальные дифракционные решетки;
- охлаждаемые жидким азотом линейные CCD-фотоприемники видимого и ближнего ИК-диапазонов;
- индивидуальные блокирующие фильтры в каждом спектрометре для увеличения отношения сигнал/шум;
- полевые линзы, выравнивающая плоскость изображения на линейных ПЗС-приемниках;
- нелинейный механизм привода сканирующего зеркала;
- уникальные инфракрасные оптические световолокна из фторида циркония с оболочкой из фторида бериллия для оптоволоконного ввода излучения в составные спектрометры (наряду с использованием кварцевых волокон);
- термостабилизированный (+40 °С) бортовой калибратор в оптоволоконном тракте;
- оригинальный многопозиционный бортовой калибратор, обеспечивающий как радиометрическую, так и спектральную калибровку;
- бортовой вычислитель с накопителями информации до нескольких ТераБайт.

Гиперспектрометр авиационного базирования AVIRIS до сих пор является приборным комплексом мирового класса. Он в течение 25 лет выдержал ряд модификаций, а с 2011 г. постепенно заменяется на гиперспектрометр нового поколения (новой генерации) AVIRISng.

Передовые технологии, апробированные в авиационных комплексах AVIRIS, были внедрены в космических гиперспектральных комплексах: общего назначения SISEX, HIRIS, HYPERION, военного применения ARTEMIS, в компактных приборах для спектрометрического исследования поверхности Луны и Марса, а также в авиационном гиперспектрометре нового

поколения AVIRISng. Некоторые из них могут и сейчас использоваться при создании перспективных бортовых мульти- и гиперспектральных комплексов для дистанционного исследования земной поверхности из-за их большой информативности и возможности использования для решения различных тематических задач.

*Работа поддержана и ведется в рамках проекта УНТЦ № 5240.*

1. *Донец В. В., Муравский Л. И.* Особенности применения приемников излучения в бортовых гиперспектрометрах // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 3. — С. 20—37.
2. *Донец В. В.* Особенности конструкций бортовых гиперспектрометров AIS // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 5—11.
3. *Попов М. О., Пионтківський П. М., Гринюк С. В.* Стан і перспективи розвитку гіперспектральних систем аерокосмічної розвідки [Электронный ресурс] // Наука і оборона. — 2012. — № 2. — С. 39—47. — Режим доступа: <http://www.nio.mil.gov.ua/pdf/2012-2.pdf>
4. *Товмасын Г. М.* Ультрафиолетовые телескопы на орбите [Электронный ресурс] // Новое в жизни, науке, технике. Сер. космонавтика, астрономия. — 1989. — № 5. — Режим доступа: <http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/znan/1989/5/5-uf-tel.html>
5. *AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer)* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/airborne-sensors/aviris>
6. *Goetz A. F. H.* Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view Alexander F. H. Goetz // Remote Sens. Environ. — 2009. — **113**. — P. S5—S16. — Режим доступа: [ftp://laspftp.colorado.edu/pub/harvey/Gamblin/IDL\\_code/Geotz\\_2009.pdf](ftp://laspftp.colorado.edu/pub/harvey/Gamblin/IDL_code/Geotz_2009.pdf)
7. *Green R. O., Eastwood M. L., Sarture C. M., et al.* Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) [Электронный ресурс] // Remote Sens. Environ. — 1998. — **65**. — P. 227—248. — Режим доступа: <http://www.utsa.edu/lrsg/Teaching/ES6973/AVIRIS.pdf>
8. *Fay M. E.* An analysis of hyperspectral imagery data collected during operation Desert Radiance [Электронный ресурс]. — 1995. — P. 9—13. — Режим доступа: [www.nps.edu/faculty/olsen/Student\\_theses/Fay\\_Jun\\_1995.pdf](http://www.nps.edu/faculty/olsen/Student_theses/Fay_Jun_1995.pdf)
9. *The AVIRIS Instrument* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ltid.inpe.br/html/pub/docs/html/instr.htm>
10. *Green R. O.* Green and the Imaging Spectroscopy Team [Электронный ресурс] // Measurement of the Earth's Terrestrial Ecosystems from Space: Concept for a 21st Century Global Biochemistry and Biodiversity Mission 2011. — Режим доступа: <http://www.fapesp.br/-14330-week2011/media/pres/green.pdf>
11. *Green R. O., Eastwood M. L., Sarture C. M., et al.* Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/20277/1/98-1179.pdf>
12. *MacDonald J., Ustin S. L., Chaepman U., Schaepman M. A.* Review of the contributions of Dr. Alexander F. H. Goetz to imaging spectrometry [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.wageningenur.nl/upload\\_mm/5/8/1/ca27ce44-6549-4f9f-b85f-5ce3bef6634d\\_MacDonald\\_GoetzAchievements.pdf](http://www.wageningenur.nl/upload_mm/5/8/1/ca27ce44-6549-4f9f-b85f-5ce3bef6634d_MacDonald_GoetzAchievements.pdf)
13. *Macenka S. A., Chrisp M. P.* Infrared imaging spectrometer (AVIRIS) spectrometer design and performance // 1987. — N 88. — P. 14327 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1988SPIE..834..32M>
14. *Miller D. C.* AVIRIS scan drive design and performance, Proc. SPIE 0834, Imaging Spectroscopy II, 55 (January 1, 1987).
15. *Martinez P. J., Hermosel D., Green R. O., et al.* An improved data structure for AVIRIS-type imaging spectrometer measurements // 13th JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena, California, May 24-27, 2005. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/39590/1/05-0851.pdf>
16. *Sarture C. M., Chovit C. J., Faust J. A., et al.* High altitude hyperspectral remote sensing with AVIRIS [Электронный ресурс] // California Institute of Technology. — Режим доступа: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/33488/1/94-1397.pdf>
17. *Sensor systems of the NASA airborne science program* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://asapdata.arc.nasa.gov/sensors.doc>
18. *Vane G.* First results from the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) // Proc. SPIE. — 1987. — **834**. — P. 166—174. — (Imaging Spectroscopy II / Ed. by G. Vane).
19. *Vane G., Porter W. M., Reimer J. H., et al.* AVIRIS performance during the 1987 flight season: an AVIRIS project assessment and summary of the NASA-sponsored performance evaluation // Proceedings of the AVIRIS performance Evaluation Workshop. — 1988. The Jet Propulsion Laboratory. JPL 83-88. S. 1—20.

Стаття надійшла до редакції 10.06.13

*В. В. Донец*

АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
АСПЕКТІВ СТВОРЕННЯ БОРТОВОГО  
ГІПЕРСПЕКТРОМЕТРА AVIRIS  
ПЕРШОГО ПОКОЛІННЯ

Аналізуються особливості конструкції та характеристики гіперспектрометра авіаційного базування AVIRIS першого покоління для спектрометричного дослідження земної поверхні та підсупутникової валідації спектрометричних даних, фізичні і технологічні аспекти його створення та використання. Досягнення передових технологій, які були апробовані в ньому, було реалізовано в космічних гіперспектрометрах — спочатку в SISEX (1990) та HIRIS (1994), а потім в цивільному HYPERION, військовому ARTEMIS, а також в компактних приладах M3 та CRISM для дослідження поверхні Місяця та Марса і в авіаційному гіперспектрометрі AVIRIS нового покоління AVIRISng.

*V. V. Donets*

AN ANALYSIS OF PHYSICAL  
AND TECHNOLOGICAL ASPECTS  
OF AIR-BASED HYPERSPECTROMETER AVIRIS  
OF THE FIRST GENERATION

We considered some design features and characteristics of on-board air-based 1<sup>st</sup> generation hyperspectrometer AVIRIS for spectrometric remote sensing of the Earth's surface and for hyperspectrometer satellite data validation. Physical and technological aspects of the elaboration and use of the hyperspectrometer were analysed. The technological advances realized and approved in the case of the hyperspectrometer were used for the space-based hyperspectrometers SISEX (1990) and HIRIS (1994), for the civil-based hyperspectrometer HYPERION, army-based hyperspectrometer ARTEMIS, compact instruments M3 and CRISM for remote sensing of the Moon's and Mars' surface, and for the aviation-based AVIRIS hyperspectrometer of new generation, AVIRISng.