

УДК 681.785.555

В. В. Донец¹, А. Ю. Цымбал², В. В. Бровченко¹

¹ Корпорація «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ

² Публічне акціонерне товариство «Завод «Маяк», Київ

МОНОБЛОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ БОРТОВЫХ И ПОЛЕВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

Розглянуто моноблочні конструкції польових та бортових гіперспектрометрів для спектрометричного дослідження земної поверхні та підсупутникової валідації спектрометричних даних. Досягнення у приладобудуванні, які були апробовані в гіперспектрометрах AIS, ROSIS, CRISM, AVIRIS першого і другого покоління, втілюються у нових гіперспектрометрах та інших компактних спектрометричних приладах для дослідження земної поверхні.

ВВЕДЕНИЕ

Посредством дистанционного зондирования (ДЗ) собирается информация об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ним. Методы ДЗ основаны на регистрации отраженного электромагнитного излучения участков поверхности в широком спектральном диапазоне. Принято считать [3, 4, 9], что основную информацию о природе объектов на земной поверхности содержат их спектральные характеристики. Поэтому в большинстве известных алгоритмов классификации используются спектральные образы (сигнатуры) типов покрытий.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

Бортовые и полевые гиперспектральные приборы (гиперспектрометры) представляют собой датчики для регулярного сбора и предварительной обработки спектральных данных о каждом пикселе анализируемого изображения. Эта информация крайне необходима при разработке новых методов извлечения информации о состоянии исследуемого объекта, исходя из массива форм спектральных кривых (сигнатур) из гиперспектральных данных.

Класс бортовых гиперспектральных приборов начал создаваться в конце прошлого столетия в NASA (США). Первое поколение бортовых гиперспектрометров (сначала авиационного базирования) представлено инфракрасными видеоспектрометрами AIS-1 и AIS-2 (Airborne Imaging Spectrometer) [11, 14, 15, 27–29].

Бортовые гиперспектральные приборы AIS-1 и AIS-2 были выполнены по аналогии с лабораторными приборами (рис. 1). Они были испытательным полигоном как для будущих авиационных гиперспектрометров, так и космических гиперспектральных систем.

Первый полет гиперспектрометра AIS-1 был проведен в ноябре 1982 г. на борту самолета NASA/Dryden C-47, затем полеты продолжались на борту самолета NASA/Ames C-130. Прибор AIS-2 летал до 1987 г.

Несмотря на то что с помощью приборов AIS были достигнуты некоторые впечатляющие результаты, качество полученных с их помощью данных не было высоким. Соотношение «сигнал–шум» было низким (от 10:1 до 40:1), а постоянство спектрометрических параметров приемно-усилительных элементов желало быть лучшим. Сказывалось также отсутствие конструктивного подхода для стабилизации эксплуатационных параметров сложной бортовой (не лабораторной) оптико-электронной аппаратуры.

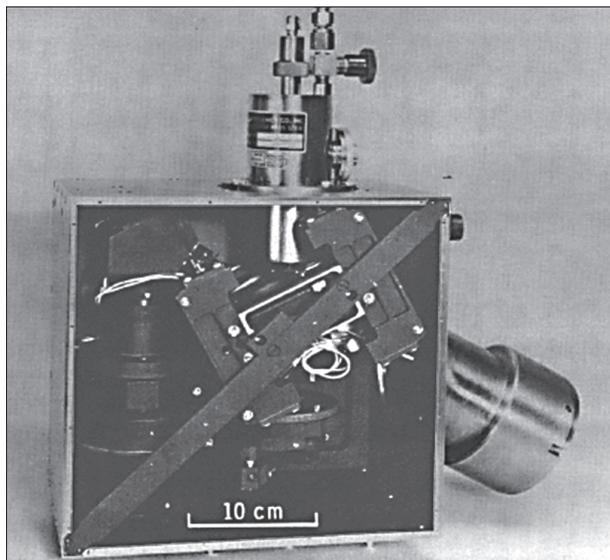


Рис. 1. Бортовой гиперспектрометр AIS-1 [11, 28]

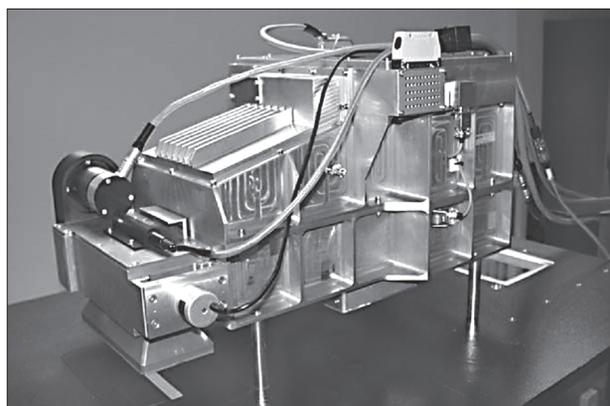


Рис. 2. Гиперспектрометр ROSIS-03 на лабораторных испытаниях [18]

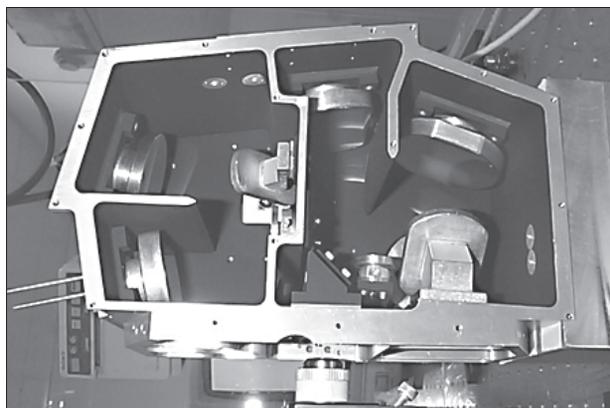


Рис. 3. Гиперспектрометр CRISM (вид сверху); видны два отдельных спектрометра [13]

В следующих поколениях бортовых гиперспектральных приборов эти недостатки были последовательно учтены. Так, в авиационных спектрометрах изображения (Imaging spectrometer) AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) [14, 16, 17, 24, 26], ROSIS-03 (Reflective Optics System Imaging Spectrometer) [18] и др., а также в гиперспектральных системах космического базирования, в том числе в комплексах для исследования поверхности Луны M3 [12] и Марса (CRISM) [13, 20], кроме узлов внутренней калибровки, были применены и новые конструктивные подходы стабилизации временных и температурных параметров оптических узлов.

НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ В БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРАХ

AVIRIS (NASA) как воздушный гиперспектрометр изображения был впервые поднят в воздух (на самолете NASA/Lockheed U-2) в 1986 г. Первые научные данные с AVIRIS были получены уже летом 1987 г., а в полном объеме этот приборный комплекс эксплуатируется с 1989 г. После полетов в 1987 г. гиперспектрометра AVIRIS обнаружилось недостатки в стабильности радиометрических и спектральных характеристик прибора AVIRIS первого поколения. Были предприняты шаги по их исправлению.

Как отмечалось выше, радиометрическая и спектральная характеристики стабильности составных спектрометров зависят от многих факторов, но главным образом — от механической и температурной стабильности взаимного расположения оптических компонентов спектрометра, особенно относительно матричного детектора.

Еще в начале разработки спектрометров AVIRIS тепловой контроль был определен как важный вопрос, поскольку несущая платформа (самолеты U-2, а затем ER-2) испытывает перепады температур от $+40^{\circ}\text{C}$ сразу же после старта до -5°C и ниже в течение долгого полета на высотах до 20 км. В приборе AVIRIS было предусмотрено автоматизированное выравнивание температур. Кроме того, все его четыре составных спектрометра были изначально изолированы от холодной среды путем использования простой системы отопления и тепловой подушки.

МОНОБЛОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗАРУБЕЖНЫХ БОРТОВЫХ И ПОЛЕВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

Компоновка оптико-электронных приборов может быть моноблочной, агрегатно-модульной или смешанной [6].

Для моноблочной компоновки оптико-электронных приборов, к которым относятся и гиперспектрометры, характерна органическая целостность основных составных частей, хотя некоторые из них могут быть выполнены и в виде модулей. Жесткая моноблочная конструкция гиперспектрометра обеспечивает повышенную долговечность и надежность прибора в целом, даже при жестких условиях эксплуатации.

В 1988 г. были сделаны изменения для улучшения механической стабильности спектрометров AVIRIS. В частности, крепления составных спектрометров на приборной раме были изменены на жесткий монтаж, чтобы предотвратить деформацию каркаса и устранить причину искажений в каждом из спектрометров. Все эти и другие изменения и улучшения в комплексе позволили улучшить стабильность от ± 50 до ± 5 %.

На рис. 2 приведен общий вид гиперспектрометра ROSIS-03 авиационного базирования (Германия) [18]. Прибор состоит из соединенных между собой основных алюминиевых корпусов и дополнительных узлов. Конструкция моноблочна с жестко связанными дополнительными модулями. Механическая концепция прибора основана на тепловом контроле и активном выравнивании внутренней температуры.

На рис. 3 приведен вид сверху на моноблочную конструкцию узлов двух спектрометров гиперспектрометра CRISM [13]. CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) — это видимый инфракрасный спектрометр с изображениями развертываемых полей зрения. CRISM имеет два спектрометра, сопряженные по спектру, которые покрывают диапазон длин волн от 362 до 3920 нм со спектральным разрешением 6.55 нм/канал для идентификации широкого спектра полезных ископаемых на поверхности Марса [13, 20].

Поддержание точной калибровки приборов в широком диапазоне рабочих температур, особенно в условиях космоса — очень сложная

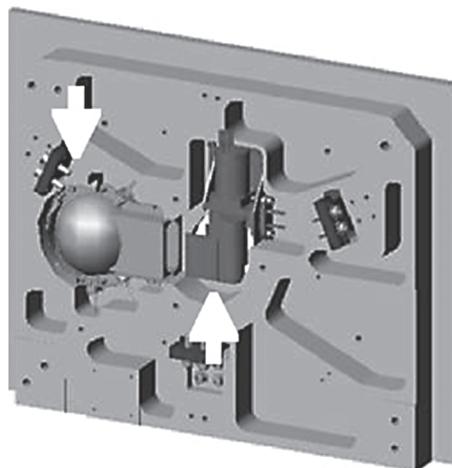


Рис. 4. Моноблочная оптическая скамья гиперспектрометра CRISM [13, 20]

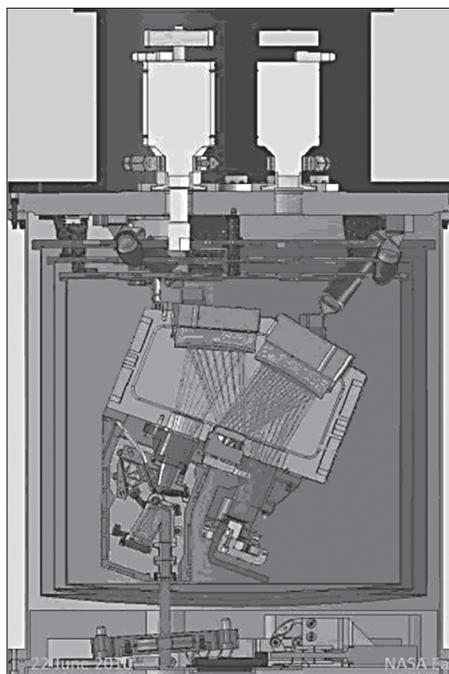


Рис. 5. Вакуумная система охлаждения и термостабилизации гиперспектрометра AVIRISng [18, 21]

задача, поскольку они становятся подвержены различным температурным условиям и накапливают облучения в пространстве. Поэтому стабильность температурных и геометрических параметров такого рода приборов становится одной из главных задач, а ее правильное конструктивное решение — залог успеха.

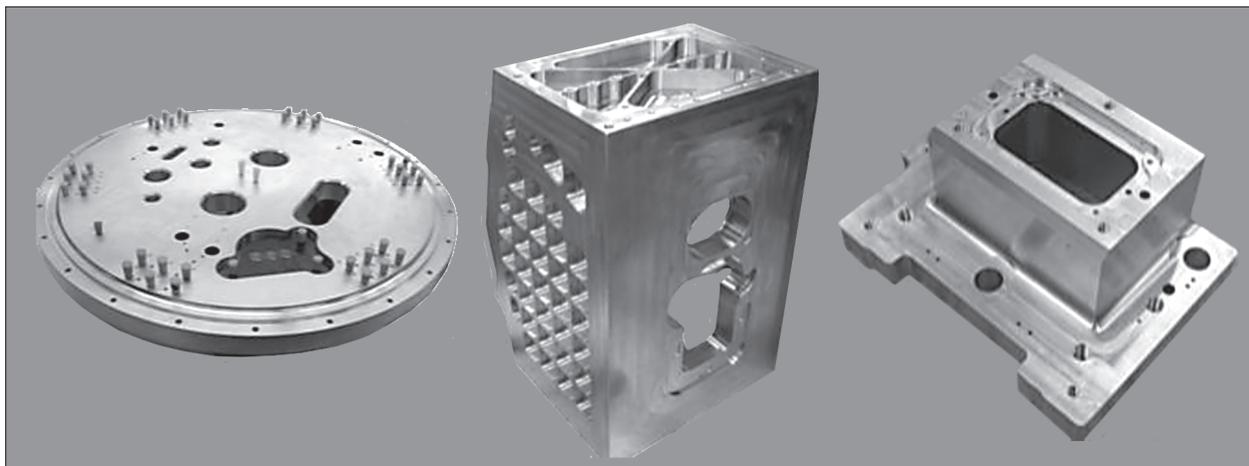
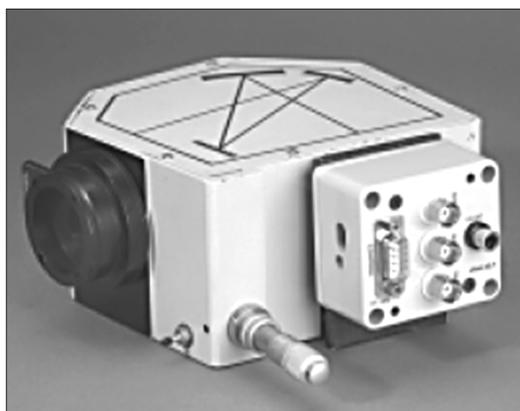
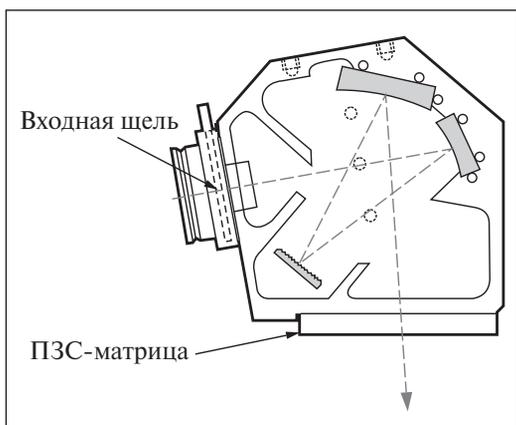


Рис. 6. Моноблочные узлы и детали гиперспектрометра AVIRISng (дно, средняя и верхняя части корпуса [18])



а



б

Рис. 7. Спектрограф MS125™ 1/8 m (а) и его оптическая схема (б) [22]



Рис. 8. Рабочее место для настройки матричного фотоприемного узла гиперспектрометра [23]

На рис. 4 показана жесткая моноблочная конструкция оптической скамьи гиперспектрометра CRISM [13, 20], на которой смонтированы телескоп с механизмом затвора (в центре), узлы двух спектрометров и узел калибровки с интегрирующей сферой (слева).

Спектрометр изображения AVIRIS до сих пор является приборным комплексом мирового класса. Он в течение 25 лет эксплуатации выдержал ряд модификаций, а с 2011 г. будет постепенно за-

менен современным гиперспектрометром нового, второго поколения (новой генерации) AVIRISng [18, 21], в котором были использованы последние достижения мировой науки и техники (см. ниже). Первый успешный полет нового прибора AVIRISng был осуществлен 26 октября 2010 г.

На рис. 5 показан гиперспектрометр AVIRISng в вакуумированном корпусе с тройной системой охлаждения и активной термостабилизации основных узлов.

На рис. 6 показаны основные моноблочные узлы и детали гиперспектрометра (дно, средняя и верхняя части корпуса).

На рис. 7 приведены фото спектрографа MS125™ 1/8 m (фирмы ORIEL Instrument) и его оптическая схема, где видна моноблочная конструкция прибора [22].

На рис. 8 приведены фото рабочего места для автоматизированной настройки моноблочного фотоприемного узла гиперспектрометра, где видна ПЗС-матрица [23].

МОНОБЛОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ В НАШИХ РАЗРАБОТКАХ БОРТОВЫХ И ПОЛЕВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

Наши технические решения при разработке гиперспектральной аппаратуры также базировались на использовании моноблочных конструкций при создании полевых специализированных аппаратурно-программных комплексов

подспутникового обеспечения для дистанционного спектрометрического зондирования растительности в полевых условиях [4, 5, 7, 25].

На рис. 9 показаны два варианта полевых спектральных приборов, входящих в автоматизированный спектральный комплекс [4, 7, 25], в которых жесткий моноблочный корпус способствует температурной стабильности геометрических и оптических параметров полихроматоров, а наличие встроенной системы спектральной калибровки по линии поглощения атмосферного кислорода позволяет повысить надежность и достоверность результатов измерительного комплекса.

При последующих разработках гиперспектральной аппаратуры был также использован принцип жесткой моноблочной конструкции.

После анализа технических требований и окончательного выбора варианта создаваемого прибора выполнялся расчет его оптической схемы с помощью специализированной программы ZEMAX-EE [30]. Затем следовали этапы разработки, изготовления и стендовой настройки основных узлов работающего макета гиперспектрометра с помощью нестандартного оборудования. Далее выполнялась разработка конструкторской документации для изготовления образцов моноблочного гиперспектрометра на дифракционной решетке и ПЗС-матрице с помощью программных пакетов AutoCAD и SolidWorks (рис. 10), а также изготовление, сборка и настройка самого образца гиперспектрометра.



Рис. 9. Общий вид полевых спектральных приборов [4, 7]

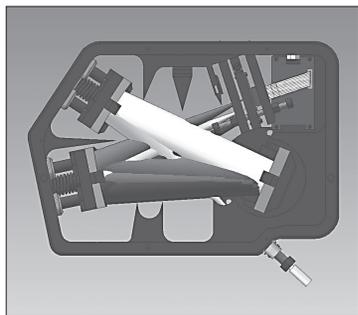


Рис. 10. Компоновка моноблочного варианта гиперспектрометра на дифракционной решетке и ПЗС-матрице

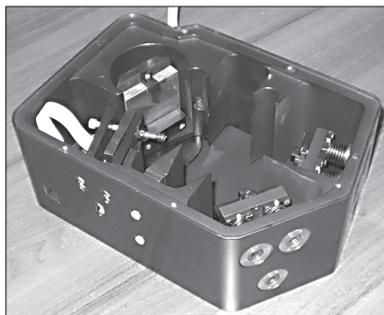


Рис. 11. Моноблочный гиперспектрометр на дифракционной решетке и ПЗС-матрице (без крышки)

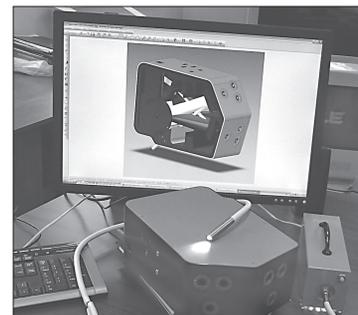


Рис. 12. Образец моноблочного гиперспектрометра (внизу) и его компьютерный вариант (на экране монитора)

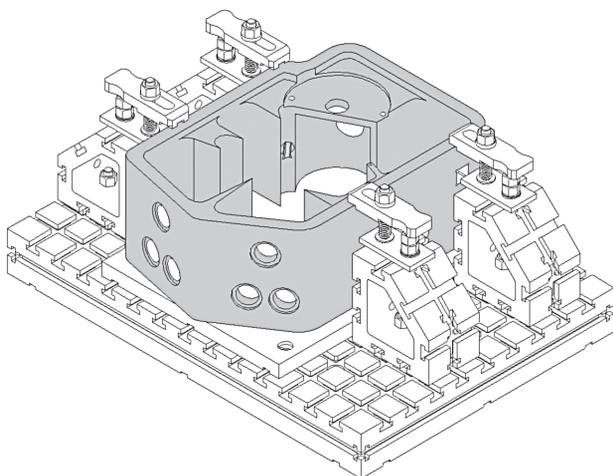


Рис. 13. Станочное приспособление для крепления моноблока

На рис. 11 приведен моноблочный гиперспектрометр на дифракционной решетке и ПЗС-матрице (без верхней крышки).

На рис. 12 приведен образец моноблочного гиперспектрометра с волоконным входом и его компьютерный вариант (на экране монитора).

Корпус гиперспектрометра был изготовлен из сплава Д16 (Al-Cu-Mg) в искусственно состаренном состоянии Т1. Этот сплав имеет повышенную коррозионную стойкость, высокие прочностные свойства и низкий коэффициент относительного удлинения [1], что позволяет использовать его в широком температурном диапазоне.

Учитывая хорошую обрабатываемость сплавов системы Al-Cu-Mg, а также высокоточное

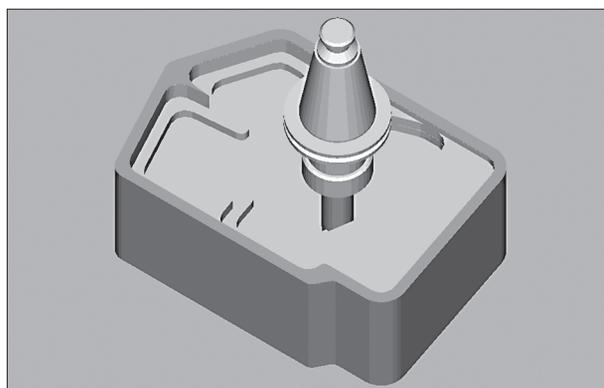


Рис. 14. Симуляция обработки моноблока гиперспектрометра в модуле NC Verify

и сложное взаимное расположение внутренних поверхностей корпусной детали, её обработку целесообразно производить на станках с ЧПУ. Технологические возможности оборудования с ЧПУ, соответствующая оснастка и современный режущий инструмент обеспечивают возможность обработки поверхностей практически любой конфигурации [2].

Нами был разработан технологический процесс, позволяющий обработать все внутренние контуры детали за две установки и тем самым ликвидировать погрешности базирования для исполнительных размеров.

На рис. 13 представлена конструкция станочного приспособления, позволяющего производить предварительную установку моноблочного

корпуса гиперспектрометра вне станка (что увеличивает производительность), а также позволяет обработать сложные внутренние контуры детали с необходимой погрешностью. Кроме того, данное приспособление не требует дополнительных гидро- или пневмосистем.

Моноблочное решение конструкции гиперспектрометра, выбор в качестве материала корпуса сплава Д16 в искусственно состаренном состоянии, а также использование станков с ЧПУ позволили получить моноблочный корпус гиперспектрометра требуемой точности, с высоким качеством поверхности, хорошо выдерживающим температурные колебания, гарантирующим в полевых условиях стабильность взаимного расположения в нем оптических узлов созданного гиперспектрального прибора. Разработка управляющей программы для станков с ЧПУ и расчет режимов резания производился в САМ модуле системы ADEM VX8.2 с последующей верификацией полученного кода.

На рис. 14 показана симуляция процесса фрезерной обработки моноблочного корпуса гиперспектрометра в модуле NC Verify.

ВЫВОДЫ

Последние разработки систем наблюдения Земли и систем подспутниковой валидации (бортовых платформ авиационного базирования и наземных систем) продемонстрировали, что гиперспектральные системы и приборы являются ценным инструментом для количественной оценки соответствующих параметров, поддерживающих процессы для наземных экосистем.

Немалую роль для обеспечения нормальной стабильной работы каждой гиперспектральной измерительной системы играет стабильность как временных, так и температурных параметров оптических трактов и узлов этих оптико-электронных приборов. Даже наличие узлов внутренней калибровки без применения правильных конструктивных подходов не позволяет достичь положительных результатов по улучшению стабильности измерительных систем и увеличению достоверности выдаваемых результатов.

В данной работе рассмотрены как общий подход к проблеме, так и особенности использова-

ния моноблочных конструкций в зарубежных и отечественных полевых и бортовых гиперспектрометрах наземного, авиационного и космического базирования (AIS-1, AIS-2, ROSIS-03, CRISM, AVIRIS первого и второго поколений и др.) для подспутниковой валидации спектротрических данных, спектротрического исследования земной поверхности, а также в компактном приборе типа CRISM для исследования поверхности Марса.

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

1. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение. Справочник / Под ред. И. Н. Фридляндера. — Киев: «КОМИНТЕХ», 2005. — 365 с. — Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/231427/>
2. Виноградов Д. В. Высокопроизводительная обработка металлов резанием. — М.: Полиграфия, 2003. — 301 с. — Режим доступа: http://tbmr.ru/wp-content/uploads/tech_doc/Vysokoproizv-ya_obr-ka_met-lov_rez-m.pdf
3. Дмитриев А. Н., Шитов А. В. Введение в геоинформационное картирование: Учебно-метод. пособие. — Горно-Алтайск: Горно-Алтайский госун-т, 2001. — Режим доступа: <http://www.gasu.ru/resour/eposobia/posob/7.html>
4. Донец В. В. Обґрунтування структури апаратно-програмного комплексу для дистанційного зондування рослинності в польових умовах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2010. — 19 с.
5. Мальчевський І. А. Вископродуктивне сільське господарство з переліку завершених розробок установ НАН України, створених в рамках реалізації найважливіших напрямів наукових досліджень і розробок // Головний портал НАН України: Інноваційна діяльність. — Київ, 2011. — С. 90—97. — Режим доступа: http://www.nas.gov.ua/Activity/InnovationActivity/Documents/5_8.pdf
6. Рагузин Р. М. Принципы системного проектирования оптических приборов: Учеб. пособие. — СПб: ИТМО, 2006. — Ч. II. — 282 с.
7. Річний звіт Національного космічного агентства України за 2008 рік. — Київ: Нац. косміч. агентство України, 2008. — С. 16—17. — Режим доступа: http://www.nkau.gov.ua/pdf/NSAU_report_2008.pdf
8. Рус У. Г. Основы дистанционного зондирования. — М.: Техносфера, 2006. — 336 с.
9. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. — М.: Техносфера, 2010. — 560 с.
10. Яценко В. О. Виготовлення польового спектрофотометра для тестування стану рослинності // Головний

- портал НАН України: Науково-технічні (інноваційні) проекти НАН України. — Київ, 2008. — Режим доступу: <http://www.innovations.nas.gov.ua/Years/2008/802>
11. *Bergman S. M.* The utility of hyperspectral data to detect and discriminate actual and decoy target vehicles // Lieutenant, United States Navy V. A., University of New Mexico. — 1989. — Режим доступу: http://www.nps.edu/faculty/olsen/Student_theses/bergman.pdf
 12. *Clark R. N., Boardman J., Mustard J., et al.* Mineral mapping and applications of imaging spectroscopy // IGARSS. — August 1, 2006. — Режим доступу: http://webdocs.dow.wur.nl/internet/grs/Workshops/Environmental_Applications_Imaging_Spectroscopy/9_Clark_Mineral/Clark_Mineral.pdf
 13. *CRISM* (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://crism.jhuapl.edu/instrument/innoDesign.php>
 14. *Fay M.* An analysis of hyperspectral imagery data collected during operation desert radiance [Електронний ресурс] // Naval Postgraduate School, Monterey, California. — 1995. — Режим доступу: http://www.nps.edu/faculty/olsen/Student_theses/Fay_Jun_1995.pdf
 15. *Goetz A. F. H., Vane G., Solomon J. E., Rock B. N.* Imaging spectrometry of Earth remote sensing // Science. — 1985. — **228**, N 4704. — P. 1147—1153.
 16. *Green R. O., et al.* Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer AVIRIS // Remote Sens. Environ. — 1998. — **65**. — P. 227—248. — Режим доступу: <http://www.utsa.edu/lrsg/Teaching/ES6973/AVIRIS.pdf>
 17. *Green R. O., Eastwood M. L., Sarture C. M., et al.* Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) // Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA. — Режим доступу: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/20277/1/98-1179.pdf>
 18. *Hamlin L., Green R. O., Mouroulis P., et al.* Imaging Spectrometer Science Measurements for Terrestrial Ecology: AVIRIS and the Next Generation AVIRIS Characteristics and Development Status // NASA Earth Science Technology Forum, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology Pasadena, CA. — 2010. — Режим доступу: http://esto.nasa.gov/conferences/estf2010/presentations/Hamlin_Green_ESTF2010_B4P4.pdf
 19. *Kim N., Schnatz G.* The Airborne Imaging Spectrometer ROSIS // German Aerospace Center, Management System Standard, Schnieringshof. — 2008. — Режим доступу: <http://www.opairs.aero/media/download/pdf/rosis-description.pdf>
 20. *Murchie S., et al.* Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars reconnaissance orbiter (MRO) // J. Geophys. Res. — 2007. — **112**. — Режим доступу: <http://www.planetary.brown.edu/pdfs/3554.pdf>
 21. *Green R. O., et al.* Next Generation Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRISng) // JPL Earth Science Airborne Program, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA. — Режим доступу: <http://airbornescience.jpl.nasa.gov/avirisng/>
 22. *ORIEL INSTRUMENTS MS125™ 1/8 m Spectrograph, 1/8 m, Grating and Slit Ordered Separately* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://search.newport.com/?x2=sku&q2=77400>
 23. *Peschel Th., Damm Ch., Gebhardt A., et al.* Opto-mechanical design of spectrometers [Електронний ресурс] // Fraunhofer Institut Angewandte Optik und Feinmechanik. — Режим доступу: http://spectronet.de/portals/visqua/story_docs/vortraege_2008/080311_optical_spectrometer/080312_10_peschel_fhgiof.pdf
 24. *Sarture C. M., Chovit C. J., Faust J. A., et al.* High Altitude Hyperspectral Remote Sensing with AVIRIS [Електронний ресурс] // Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology 4800 Oak Grove Drive Pasadena, California. — Режим доступу: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/33488/1/94-1397.pdf>
 25. *Semeniv O., Yatsenko V., Khandriga P., Shatokhina I.* A hyperspectrometer for remote sensing of biochemical components in the vegetation [Електронний ресурс] // 37th COSPAR Scientific Assembly. 13-20 July 2008, in Montréal, Canada. — P. 2806. — Режим доступу: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008cosp...37.2806S>.
 26. *Sensor Systems of the NASA Airborne Science Program* [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://asap-data.arc.nasa.gov/sensors.doc>.
 27. *Vane G., Goetz A. F. H., Wellman J. B.* Airborne imaging spectrometer: a new tool for remote sensing // Proc. 1983 Int'l. Geoscience and Remote Sensing Symp., IEEE Cat N 83 CH1837-4.
 28. *Vane G., Goetz A. F. H., Wellman J. B.* Airborne Imaging Spectrometer: A new tool for earth remote sensing // IEEE Trans, on Geoscience and Remote Sensing. — GE-22. — 1984. — **6**. — P. 546—549.
 29. *Vane G., Goetz A. F. H.* Terrestrial imaging spectroscopy // Remote Sens. Environ. — 1988. — **24**. — P. 1—29.
 30. *ZEMAX: Software for Optical System Design* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.zemax.com>.

Надійшла до редакції 13.02.12

V. V. Donets, A. Yu. Tsymbal, V. V. Brovchenko

MONOBLOCK CONSTRUCTIONS OF ON-BOARD AND FIELD HYPERSPECTROMETERS

We consider monoblock constructions of field and on-board hyperspectrometers for the spectrometric study of the Earth's surface and for the spectrometric data subsatellite validation. Some achievements in the device production which were tested in the hyperspectrometers AIS, ROSIS, CRISM, and AVIRIS of the first and second generations are implemented in new hyperspectrometers and other compact spectrometric devices for investigations of the Earth's surface.