

Обоснование технического облика бортового оптико-электронного комплекса среднего пространственного разрешения перспективного спутника дистанционного зондирования Земли

М.А. Попов¹, Н.И. Лихолит², С.А. Станкевич¹,
С.П. Ковальчук¹, В.В. Полежаев², В.М. Тягур²

¹Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины
01601 Киев, Олеся Гончара, 55^Б
E-mail: trorov@casre.kiev.ua

²Центральное конструкторское бюро "Арсенал" НКА Украины
01010 Киев, Московская, 8
E-mail: info@arsenalcdb.com.ua

Обоснован рациональный технический облик бортового оптико-электронного комплекса среднего пространственного разрешения перспективного спутника дистанционного зондирования Земли в составе модернизированного многоспектрального сканера видимого и ближнего инфракрасного диапазонов и перспективного спутникового гиперспектрометра, что позволит существенно повысить информативность системы при решении ряда природоохранных, ресурсных и научных задач.

Ключевые слова: оптико-электронный сенсор, гиперспектральная съёмка, спектральные диапазоны, пространственное разрешение, информативность, слияние данных.

Введение

В Украине изготовлен и готовится к запуску во второй половине 2010 года спутник дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) "Сич-2" с многоспектральным оптико-электронным комплексом (МОЭК) среднего пространственного разрешения (7,8 м для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов и 39,5 м – для среднего инфракрасного диапазона). Однако уже сейчас понятно, что информативность МОЭК спутника "Сич-2" недостаточна для решения некоторых тематических и специальных задач ДЗЗ [1]. Действующей Космической программой Украины предусмотрены разработка и запуск модернизированного варианта этого спутника "Сич-2М".

Цель данной работы состоит в обосновании рациональных направлений модернизации бортовых оптико-электронных сенсоров перспективного спутника ДЗЗ.

Рациональный состав бортовых оптико-электронных сенсоров перспективного спутника ДЗЗ

В состав бортовых сенсоров современных спутников ДЗЗ принципиально могут входить следующие типы иконической аппаратуры: многоспектральные оптико-механические сканеры, многоспектральные линейковые сканеры, гиперспектральные матричные сканеры, лазерные сканирующие системы, радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны, сканирующие микроволновые радиометры [2].

Мировой опыт создания спутниковых систем ДЗЗ свидетельствует о том, что лазерные сканирующие системы и РСА сильно отличаются от других сенсоров по специфике решения тематических задач, конструкции и нуждаются для размещения на специаль-

ных космических платформах, что позволяет исключить рассмотрение этих типов аппаратуры из состава бортового комплекса перспективного спутника ДЗЗ [3].

Для решения многих тематических задач применение многоспектральных линейковых сканеров является достаточно эффективным в смысле полноты и достоверности результатов. Тем не менее, во многих случаях наиболее важными являются спектральные характеристики объектов наблюдения. Распознавание объектов по спектральным признакам ослабляет требования к пространственному разрешению, что позволяет сократить массогабаритные характеристики сенсоров и уменьшить их стоимость. Появляются возможности создания группировок спутников ДЗЗ для улучшения периодичности космической съёмки с целью решения мониторинговых задач. Снижение требований к пространственному разрешению, в свою очередь, позволяет увеличить полосу обзора сенсора. Поэтому в мире сохраняется постоянный спрос на многоспектральные космические снимки среднего пространственного разрешения (5-50 м), о чём свидетельствует, в частности, успешная эксплуатация недавно запущенной группировки спутников ДЗЗ RapidEye с многоспектральным оптико-электронным сенсором среднего пространственного разрешения JSS. По нашим теоретическим оценкам [4], информативность пятизональных космических изображений JSS с номинальным пространственным разрешением 6,5 м лучше таковой для четырёхзональных космических изображений спутниковой системы Ikonos-2 с номинальным пространственным разрешением 4 м.

Но использование многоспектральных данных линейковых оптико-электронных сенсоров ведёт к фрагментации спектральных характеристик объектов космической съёмки. Для решения этой проблемы в последние годы в мире активно ведутся научные исследования и технологические разработки в направлении создания гиперспектральных спутниковых систем ДЗЗ. При этом очень важными являются объективные и всесторонние оценки возможностей подобных систем, обоснование их рациональной конструкции и оптимальных технических характеристик [5, 6]. Для детальных космических исследований типовых естественных и антропогенных объектов суши в оптическом диапазоне 0,4-14,0 мкм от бортового МОЭК требуется обеспечение высокого пространственного разрешения 1-5 м, высокого спектрального разрешения 5-10 нм в десятках-сотнях спектральных каналов и полосы обзора около 100 км. Однако в настоящее время не существует спутниковых систем ДЗЗ, которые одновременно удовлетворяли бы совокупности этих требований. Решение заключается в комплексировании материалов много- и гиперспектральной космической съёмки [7].

В рациональный состав бортовых оптико-электронных сенсоров перспективного спутника ДЗЗ рекомендуется включить модернизированный многоспектральный оптико-электронный линейковый сканер видимого и ближнего инфракрасного спектральных диапазонов среднего пространственного разрешения, созданный на основе многоспектрального сканера спутника “Сич-2”, и новый гиперспектральный матричный сенсор видимого, ближнего и среднего инфракрасных спектральных диапазонов среднего пространственного разрешения.

Модернизация многоспектрального сканера видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

Бортовой многоспектральный оптико-электронный сканер среднего пространственного разрешения, устанавливаемый на спутник ДЗЗ “Сич-2”, является законченным

техническим изделием, и поэтому возможности его модернизации крайне ограничены. Изменение основных конструктивных параметров оптической системы и фотоприёмного устройства при сохранении массогабаритных характеристик без коренной переработки конструкции практически невозможны. Также нежелательно радикально увеличивать объём потока данных и энергопотребление сканера вследствие ограничений бортовой радиолинии и аппаратуры электроснабжения спутника. Фактически, единственным возможным направлением модернизации многоспектрального оптико-электронного сканера остаётся получение одного-двух дополнительных зональных изображений, для чего имеются определенные технические возможности.

Регистрация спектральных характеристик растений и растительных группировок составляет основу дистанционных методов оценки состояния растительного покрова для решения разнообразных прикладных тематических задач: прогноза урожайности сельскохозяйственных культур, картирования и расчёта биомассы лесных массивов, оценивания экологического состояния и биоразнообразия, выявления повреждений растительности различными болезнями и вредителями и т.п.

При модернизации бортового многоспектрального оптико-электронного сканера среднего пространственного разрешения преимущество необходимо отдать введению дополнительного спектрального диапазона “красного края” (0,69-0,79 мкм). После этого, при наличии технической возможности, следует рассмотреть вопрос о введении дополнительного синего спектрального диапазона (0,45-0,52 мкм). Такой выбор дополнительных спектральных диапазонов, кроме прочего, обеспечит непрерывность спектра регистрации сенсора в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, в отличие от оптико-электронного сканера спутника “Сич-2”, в котором присутствует “разрыв” спектра как раз в диапазоне “красного края”.

Разработка перспективного спутникового гиперспектрометра ДЗЗ

Целью включения в состав МОЭК перспективного спутникового гиперспектрометра является повышение информативности результатов космической съёмки при решении большинства тематических задач за счёт анализа тонких спектральных признаков природных образований и искусственных объектов на поверхности Земли.

Проведенный анализ конструктивных особенностей и технических характеристик существующих изображающих видеоспектрометров позволил специалистам ЦКБ “Арсенал” разработать технический проект гиперспектрометра для установки на перспективные спутники ДЗЗ; его расчётные характеристики приведены в табл. 1.

Сложной проблемой при гиперспектральной съёмке является отбор информативных спектральных каналов, важных для решения той или иной тематической задачи. Информативность гиперспектральных космических изображений описывается объёмом или долей полезной информации в полном её объёме – информационной ёмкости изображения [8]. Полезность информации, содержащейся в космическом изображении, определяется её значимостью для решения конкретной тематической задачи.

Решение типовой тематической задачи складывается из классификации требуемых объектов по спектральным и пространственным характеристикам. Общая схема оценки возможностей решения типовых тематических задач ДЗЗ с помощью гиперспектральной космической съёмки должна включать два этапа: наложение ограничений решения тематической задачи по геометрическим характеристикам объектов съёмки исходя из про-

пространственных показателей гиперспектрального сенсора и вычисление информативности гиперспектральных космических изображений по спектральным характеристикам объектов тематической задачи исходя из состава спектральных каналов оцениваемого гиперспектрального сенсора [9].

Таблица 1. Расчётные технические характеристики перспективного гиперспектрометра

<i>Характеристика</i>	<i>Значение</i>
Конструктивный принцип	изображающий Фурье-спектрометр
Количество конструктивных блоков	2 (VNIR и SWIR)
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,4 – 2,5
Спектральное разрешение, нм	6 – 40
Количество спектральных каналов регистрации	150 – 175
Высота съёмки, км	668
Пространственное разрешение на местности, м	46,8
Ширина полосы обзора, км	46,6
Спектральный диапазон VNIR, мкм	0,4 – 1,0
Количество спектральных каналов VNIR	100 – 130
Спектральное разрешение VNIR, нм	6 – 12
Спектральный диапазон SWIR, мкм	1,0 – 2,5
Количество спектральных каналов SWIR	15 – 45
Спектральное разрешение SWIR, нм	20 – 40

Если по спектральным характеристикам объектов съёмки λ обеспечивается итоговая информативность $C_0(\lambda)$, то пространственные характеристики наложат на неё ограничения по пространственному разрешению на местности d и ширине полосы обзора B . Ограничение информативности по пространственному разрешению описывается вероятностью правильного выявления объекта съёмки, а ограничение по ширине полосы обзора описывается частью площади необходимого района съёмки, которую регистрирует гиперспектрометр. Итоговая информативность гиперспектральной съёмки C составит [10]:

$$C = \frac{B}{B_0} C_0(\lambda) \exp \left[\ln \alpha \frac{w_{\max}}{\Delta w} \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

где B – ширина полосы обзора, d – пространственное разрешение на местности, B_0 – поперечный размер объекта, w – радиометрическая разрядность, d_0 – характерная детальность тематической задачи, α – обеспечиваемая достоверность (уровень значимости).

Информативность по спектральным характеристикам может быть описана как [13]:

$$C_0(\lambda) = \frac{D(\lambda)}{4d^2} \log_2 [1 + \psi(\lambda)] \quad (2)$$

где $D(\lambda)$ – дивергенция Кульбака-Лейблера между вероятностными распределениями спектральных сигналов, $\psi(\lambda)$ – эквивалентное отношение “сигнал-шум”.

Соотношения (1) и (2) позволяют оценивать информативность каждого спектрального диапазона в отдельности. Однако следует отметить, что путём совместного использования нескольких определённым образом отобранных спектральных диапазонов можно обеспечить уровень информативности значительно более высокий, нежели тот, что рассчитывается по обычному аддитивному правилу [11].

Оптимизация выбора подмножества спектральных диапазонов – математическая задача нахождения лучшего в смысле критерия (2) набора спектральных диапазонов λ . При заранее известных спектральных сигнатурах объектов это задача аналитической безусловной дискретной оптимизации. Для оптимизации набора спектральных диапазонов гиперспектрометра используется мультистарт псевдоградиентного поиска на регулярной решётке в пространстве бинарных векторов выбора спектральных диапазонов [12].

С помощью этого метода были получены усреднённые оценки информативности оптимальных комбинаций спектральных каналов перспективного гиперспектрального сенсора среднего пространственного разрешения при решении типовых тематических задач. Она составляет от 16 до 90 бит на пиксел, что в 30-50 раз превышает информационные возможности МОЭК “Сич-2”.

Гармонизация технических характеристик бортовых оптико-электронных сенсоров перспективного спутника ДЗЗ

Наибольшая эффективность МОЭК достигается при комплексном использовании бортовых оптико-электронных сенсоров ДЗЗ. Исторически сложилось так, что разработка бортовых оптико-электронных сенсоров и способов обработки и интерпретации материалов космической съёмки развивались порознь, первых – в рамках инженерно-конструкторских технологий, вторых – в системе фотограмметрии, радиометрии, иконики, геоинформационного анализа. Тем не менее, очевидная потребность в комплексировании изображений разных оптико-электронных сенсоров требует принятия соответствующих конструкторских решений уже на этапе их разработки.

Основными направлениями комплексирования данных бортовых оптико-электронных сенсоров перспективного спутника ДЗЗ могут быть повышение пространственного разрешения гиперспектральных изображений (40-50 м на местности) до пространственного разрешения многоспектральных изображений (7,8 м на местности); повышение спектрального разрешения многоспектральных изображений (4-5 спектральных диапазонов) до спектрального разрешения гиперспектральных (100-200 спектральных отсчётов) и совместная обработка много- и гиперспектральных космических изображений при анализе материалов космической съёмки.

Базовым требованием эффективной совместной обработки данных от разных бортовых оптико-электронных сенсоров является точное геометрическое совмещение их исходных изображений. Проблема точного совмещения цифровых изображений является фундаментальной для интеграции данных ДЗЗ и может решаться двумя основными способами: прецизионной юстировкой бортовых оптико-электронных сенсоров или наземной фотограмметрической обработкой получаемых снимков. В случае дистанционной съёмки с общего носителя первый способ более предпочтителен, поскольку ресемплинг в процессе фотограмметрического трансформирования цифровых изображений неизбежно вносит в них искажения.

Поэтому крайне желательно, чтобы зональные изображения многоспектрального и гиперспектрального бортовых оптико-электронных сенсоров перспективного спутника ДЗЗ были согласованы по полосам обзора и подготовлены к по-пиксельному анализу, т.е. имели кратные геометрические размеры пикселов. При этом за основу должны быть взяты геометрические характеристики уже имеющегося бортового многоспектрального сканера видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

Выводы

Предложенный технический облик бортового МОЭК перспективного спутника ДЗЗ в составе модернизированного (до пяти спектральных каналов вместо трёх) много-спектрального сканера видимого и ближнего инфракрасного диапазонов и перспективного спутникового гиперспектрометра (150-175 спектральных каналов видимого, ближнего и среднего инфракрасных диапазонов) среднего пространственного разрешения (46,8 м) вместо одноканального сканера среднего инфракрасного диапазона обеспечит повышение информативности космической съёмки в среднем в 30-50 раз, что позволит дополнительно решить 10-30 % типовых тематических задач по сравнению со спутником “Сич-2”.

По предварительным теоретическим оценкам, информативность перспективного МОЭК спутника “Сич-2М” при решении тематических задач ДЗЗ в таких отраслях, как геология и геологоразведка, сельское хозяйство, экосистемы и лесное хозяйство, гидрография и водные ресурсы, и, отчасти, чрезвычайные ситуации, будет сопоставимой с информативностью лучшей на сегодняшний день космической оптико-электронной системы ДЗЗ среднего пространственного разрешения RapidEye, а с учётом комплексирования гиперспектральных данных – и превзойдёт последнюю.

Литература

1. Попов М.О., Лихолит М.И., Полежаев В.В., Станкевич С.А., Тягур В.М. Досягнення і проблеми розвитку аерокосмічних оптико-електронних сенсорів ДЗЗ // Матеріали доповідей Першої Всеукраїнської конференції “Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки України”.- Київ: Наукова думка, 2008.- С.23-26.
2. Попов М.О., Станкевич С.А., Молдован В.Д. Гіперспектральна аерокосмічна інформація у виявленні та спостереженні об’єктів // Наука і оборона, 2006.- № 3.- С.25-35.
3. Даргейко Л.Ф., Боднар Е.Н., Козлов З.В., Федоровский А.Д. Системная стратегия выбора перспективного варианта развития космической системы ДЗЗ // Системні дослідження та інформаційні технології, 2006.- № 4. - С.46-51.
4. Попов М.О., Станкевич С.А. Вплив статистичних характеристик об’єктів аерокосмічного знімання на еквівалентну просторову розрізненність багатоспектральних цифрових зображень // Праці Державного науково-дослідного інституту авіації. - Вип.9. - Київ: ДНДІА, 2006.- С.186-193.
5. Попов М.А., Лихолит Н.И., Станкевич С.А., Полежаев В.В., Ковальчук С.П. К вопросу создания отечественного спутникового видеоспектрометра в интересах решения задач дистанционного зондирования Земли // Тезисы докладов 2-ой международной конференции “Передовые космические технологии на благо человечества”. - Днепропетровск: КБ “Южное”, 2009.- С.29.
6. Попов М.А., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Лихолит Н.И., Полежаев В.В., Тягур В.М. Возможности спутниковых гиперспектрометров при решении тематических задач природопользования, экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций // Збірник наукових праць 8 Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях”.- Рибаче: ПНБ при РНБО України, 2009.- С.50-65.
7. Popov M.A., Starovoitov V.V., Stankevich S.A., Monich Y. Multispectral Imagery Fusion for Future Belarusian and Ukrainian Remote Sensing Satellites // Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP’2009).- Minsk: Belarusian State University, 2009.- P.359-363.
8. Станкевич С.А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аерокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі // Доповіді НАН України, 2006.- № 10.- С.136-139.

9. Кононов В.И., Станкевич С.А. Сравнительная оценка информативности цифровых аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения // Учёные записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского, 2004.- Т.17.- № 2.- С.88-95.
10. Станкевич С.А. Уточнення відомої емпіричної формули оцінки імовірності правильного дешифрування об'єктів на аерокосмічному зображенні // Праці Наукового центру ВПС України. - Вип.7. - Київ: НЦ ВПС, 2004. - С.242-246.
11. Попов М.А., Станкевич С.А. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализ данных дистанционного зондирования Земли // Сборник “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Вып. 3. Т. 1, 2006, Москва, РАН ИКИ, с. 106-112.
12. Станкевич С.А. Оптимизация состава спектральных каналов гиперспектральных аэрокосмических изображений при решении тематических задач ДЗЗ // Космічна наука і технологія, 2007. – Т. 13. - № 2. – С. 25-28.

Justification the technical structure of the spaceborne medium spatial resolution electro-optic imagers suite for the upgraded remote sensing satellite

**Mikhail A. Popov¹, Nicolay I. Likholt², Sergey A. Stankevich¹,
Sergey P. Kovalchuk¹, Victor V. Polezhaev², Vladimir M. Tyagur²**

¹*Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth IGS NAS of Ukraine
55-B, Oles Gonchar str., Kiev, 01601, Ukraine
E-mail: mpopov@casre.kiev.ua*

²*Arsenal central design bureau NSA of Ukraine
8, Moscowska str., Kiev, 01010, Ukraine
E-mail: info@arsenalcdb.com.ua*

The rational technical structure of the spaceborne medium spatial resolution electro-optic imagers suite for the advanced remote sensing satellite is justified. This one includes both the VNIR upgraded multispectral scanner and advanced hyperspectral satellite imager. It will enhance essentially the system informativity for the some nature protection, resource and scientific tasks.

Keywords: electro-optic imager, hyperspectral imaging, spectral bands, spatial resolution, informativity, data fusion.