

ПЕРЕДАЧА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ВИДЕОДАНЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПО РАДИОКАНАЛАМ С ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Г. Н. Мальцев^а, доктор техн. наук, профессор

И. А. Козин^а, канд. техн. наук, доцент

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: использование гиперспектральной съемки одновременно в сотнях спектральных каналов является устойчивой тенденцией развития космических систем дистанционного зондирования Земли. Оно приводит к опережающему росту информативности бортовых оптико-электронных систем наблюдения по отношению к пропускной способности радиоканалов передачи информации с космических аппаратов. В результате возникает проблемная ситуация, состоящая в том, что современные радиотехнические системы передачи информации с ограниченной пропускной способностью не позволяют передавать полные объемы зарегистрированных гиперспектральных видеоданных как при непосредственной оперативной передаче, так и при воспроизведении из бортового запоминающего устройства. Отсюда следует необходимость разработки технологий сокращения (сжатия) потока гиперспектральных видеоданных для их передачи на наземные пункты приема информации с использованием спутниковых радиотехнических систем передачи информации с ограниченной пропускной способностью. **Результаты:** анализ информационной производительности существующих бортовых гиперспектральных оптико-электронных систем показал, что она достигает единиц гигабит в секунду и в перспективе будет увеличиваться, при этом пропускная способность радиоканалов передачи видеоданных с космических аппаратов с учетом возможностей используемых диапазонов частот и ограничений технической реализации не превышает нескольких сотен мегабит в секунду. Для сокращения объемов передаваемой информации обосновано совместное использование программных алгоритмов сжатия видеоданных в каждом спектральном канале и выбора для передачи ограниченного числа наиболее информативных спектральных каналов из всех зарегистрированных гиперспектральных видеоданных. Это обеспечивает сокращение объема передаваемой информации в несколько десятков раз и согласование информационной производительности оптико-электронных систем наблюдения с пропускной способностью радиоканалов передачи видеоданных. Определены достижимые коэффициенты сжатия гиперспектральных видеоданных при совместном использовании различных программных методов сжатия и методов выбора наиболее информативных спектральных каналов. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при проектировании и применении космических систем дистанционного зондирования Земли с гиперспектральной съемкой для выбора технологий и режимов передачи с космических аппаратов данных наблюдения по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью.

Ключевые слова — дистанционное зондирование Земли, гиперспектрометр, спектральный канал, скорость передачи информации, сокращение избыточности, сжатие видеоданных.

Введение

Современные космические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) характеризуются большим разнообразием, в их составе используются космические аппараты (КА), которые ведут съемку в различных диапазонах электромагнитного спектра с разрешением от нескольких километров до нескольких десятков сантиметров [1–5]. В настоящее время одной из ведущих тенденций развития космических систем ДЗЗ является переход к широкому использованию бортовых многоспектральных и гиперспектральных оптико-электронных систем (ОЭС), работающих в видимом и ИК-диапазонах и осуществляющих съемку в сотнях спектральных каналов [4–7]. Гиперспектральные ОЭС наблюдения являются результатом эволюционного развития многоспектральных систем. Принятое деление ОЭС наблюдения на многоспектральные и гиперспектральные основывается на числе ка-

налов регистрации видеоданных: у многоспектральных систем — десятки, у гиперспектральных систем — сотни спектральных каналов.

Гиперспектральная аппаратура наблюдения — гиперспектрометры; они представляют собой инновационный тип приборов ДЗЗ для исследования природных ресурсов, охраны окружающей среды, предупреждения и ликвидации последствий природных катастроф и техногенных аварий, решения задач метеорологии, климатологии и многих других областей [4, 5]. При этом создание гиперспектральных ОЭС отражает одну из тенденций развития информационных систем и технологий, связанную с опережающим увеличением производительности систем сбора информации по сравнению с увеличением пропускной способности систем передачи информации. Несмотря на то что в многоспектральных и гиперспектральных ОЭС возможен «обмен» пространственного разрешения на спектральное, объемы данных наблюдения, которые

необходимо передавать с КА, ведущих многоспектральную и гиперспектральную съемку, резко возрастают, и остро встает проблема оперативной передачи гиперспектральных данных по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью. В настоящей статье приводятся результаты оценки информационной производительности КА ДЗЗ с бортовыми гиперспектральными ОЭС и рассматриваются возможности уменьшения объемов передаваемых гиперспектральных видеоданных за счет сжатия и выбора для передачи ограниченного числа наиболее информативных спектральных каналов.

Анализ информативности гиперспектральных данных космических систем ДЗЗ

Широкие возможности ДЗЗ с использованием гиперспектральных ОЭС открываются благодаря совместному анализу пространственных (топологических) и спектральных характеристик наблюдаемых объектов, процессов и явлений. При этом используется «гиперкуб» данных, определяющий трехмерную матрицу пространственного (по двум координатам) и спектрального (по третьей координате) распределения яркостей регистрируемого излучения. Это создает условия для обнаружения и распознавания по топологическим и спектральным признакам различных объектов атмосферы, океана, суши, геологической среды, оценки их физико-химических свойств и определения других значимых характеристик. Однако данные наблюдения необходимо передавать на наземные пункты приема информации (ППИ), в ряде случаев — оперативно, в масштабе времени, близком к реальному, и существенную роль приобретает соотношение между информационной производительностью аппаратуры ДЗЗ и пропускной способностью используемых радиоканалов передачи информации.

При рассмотрении информационных характеристик бортовых гиперспектральных ОЭС и систем передачи с КА видеоданных будем понимать под ДЗЗ наблюдение из космоса как земной поверхности и находящихся на ней объектов, так и состояния атмосферы, хотя с точки зрения прикладных задач и типа космической системы эти задачи соответствуют космическим системам ДЗЗ (в их обычном понимании) и метеорологии [1, 3]. Современными тенденциями в разработке бортовых гиперспектральных ОЭС являются возрастание детальности космических снимков, увеличение полос обзора и захвата, увеличение числа спектральных каналов гиперспектрометров [2–4]. Все это приводит к увеличению объема «гиперкуба» и информационной производительности КА ДЗЗ с бортовыми гиперспектральными ОЭС, ко-

торая начинает существенно превышать пропускную способность существующих спутниковых радиотехнических систем передачи информации с КА. Поэтому при проектировании и создании перспективных космических систем ДЗЗ с гиперспектральной съемкой необходимо уделять серьезное внимание вопросам передачи данных наблюдения с КА и выбору соответствующей технологии передачи видеоданных, учитывающей соотношение между производительностью источника передаваемой информации (гиперспектрометра) и достижимыми в имеющихся системах передачи информации скоростями передачи.

Рассмотрим характеристики информационной производительности гиперспектральных систем ДЗЗ. При кадровой съемке количество информации в одном кадре видеоданных (сцене), регистрируемых бортовой гиперспектральной ОЭС, определяется выражением [8]

$$I = L_1 L_2 g b / \Delta l^2, \quad (1)$$

где L_1, L_2 — размеры сцены вдоль и поперек трассы; g — число разрядов для цифровой записи зарегистрированной яркости в элементе матричного фотоприемника (радиометрическое разрешение); b — число регистрируемых спектральных каналов; Δl — линейное разрешение на местности, соответствующее элементу (пикселю) матричного фотоприемника.

Расчеты по формуле (1) объемов регистрируемых видеоданных для современных гиперспектральных аэрокосмических систем ДЗЗ, приведенных в табл. 1, показывают, что объем инфор-

■ Таблица 1. Объемы видеоданных, регистрируемых современными бортовыми гиперспектрометрами

Аппаратура / носитель	L_1 , км	L_2 , км	l , м	g , бит	b	I , Гбит
MODIS Terra / Aqua	2500	2330	250; 500; 1000	12	36	5,3
Hiperion / EO-1	100	7800	30	16	220	2,84
Artemis / TacSAT-3	100	7800	30	16	400	5,17
AIRS / Aqua	1650	1650	13500	12	2378	0,4
CHRIS / Proba-1	14	14	18; 36	18	19; 63	0,36
ГС / МКА-ФКИ	35	35	52	12	150	0,76
ГСА / «Ресурс-П»	25	25	25	14	96–255	1,07–2
«Лептон» / Авиационный	175	175	0,35	12	156	0,436

мации, формируемой при гиперспектральной съемке в пределах одного кадра, может составлять от 0,5 до 5 Гбайт. А суммарный суточный поток данных ДЗЗ, формируемых при комплексном аэрокосмическом мониторинге с использованием многоспектральных и гиперспектральных ОЭС различного назначения, оценивается величиной до 0,5 Тбайт и более [4, 8].

Наиболее жесткие требования к пропускной способности радиоканалов передачи информации предъявляются в режиме непосредственной передачи — при передаче данных ДЗЗ в масштабе времени, близком к реальному. В этом случае скорость передачи информации в радиоканале должна соответствовать информационной производительности аппаратуры наблюдения. Для получающего наиболее широкое распространение в бортовых ОЭС КА ДЗЗ метода маршрутной съемки с автоматической разверткой в направлении полета КА (метод «заметания» — push broom) [2, 4] скорость передачи информации, требуемая для цифровой передачи видеоданных от бортовой гиперспектральной ОЭС в реальном масштабе времени, определяется выражением [9]

$$v = V_{КА} S g b / \Delta l^2, \quad (2)$$

где $V_{КА}$ — скорость КА для заданной высоты полета $H_{КА}$; S — ширина полосы захвата; g — число разрядов при цифровой передаче зарегистрированной яркости в элементе матричного фотоприемника. Полагается, что размер элемента матричного фотоприемника согласован с линейным разрешением на местности.

При использовании метода push broom регистрация видеоданных выполняется при строчном сканировании линейки матричного фотоприемника, а развертка в направлении полета КА осуществляется за счет его собственного движения. Отношение $N = S/\Delta l$ дает число элементов разрешения бортовой ОЭС в полосе обзора. Если полагать, что скорость КА $V_{КА}$ соответствует первой космической скорости для круговой орбиты высотой $H_{КА}$, то выражение (2) для скорости цифрового потока видеоданных, поступающих от бортовой ОЭС наблюдения, может быть преобразовано к виду

$$v = \frac{N g b}{\Delta l} \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{КА}}}, \quad (3)$$

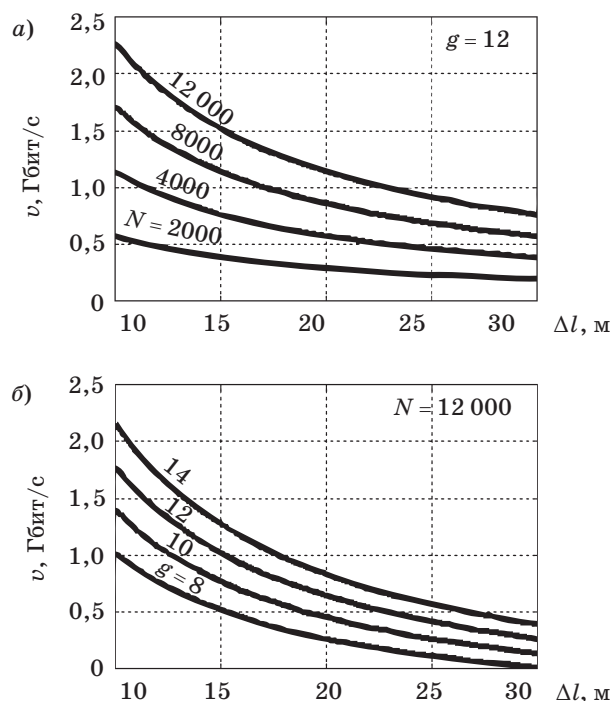
где $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3 \cdot \text{с}^{-2}$ — гравитационная постоянная; $R_3 = 6387 \text{ км}$ — радиус Земли.

Выполнены расчеты по формуле (3) скорости потока видеоданных v от бортовой гиперспектральной ОЭС наблюдения в зависимости от линейного разрешения на местности Δl для $H_{КА} = 600 \text{ км}$, $b = 220$ при различных значени-

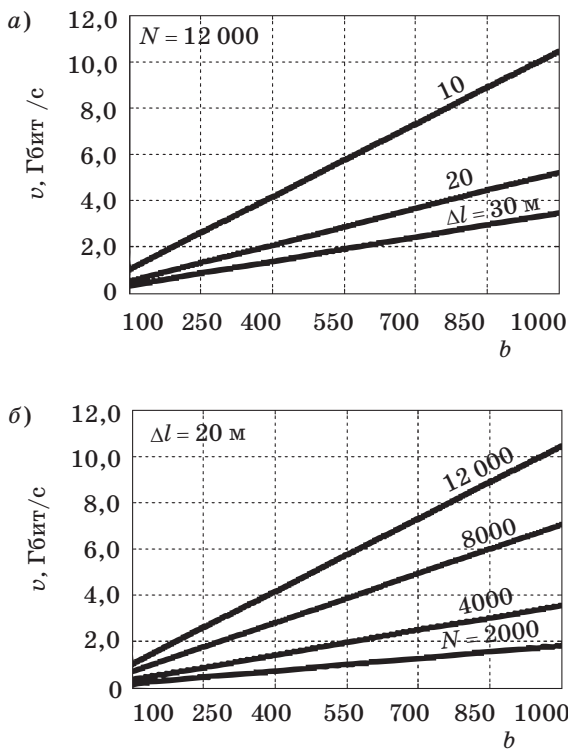
ях числа элементов разрешения бортовой ОЭС N в полосе обзора S (рис. 1, а) и числа разрядов при цифровой передаче видеоданных g (рис. 1, б).

Расчеты по формуле (3) скорости потока видеоданных v от бортовой гиперспектральной ОЭС наблюдения в зависимости от числа спектральных каналов b для $H_{КА} = 600 \text{ км}$, $g = 12$ произведены при различных значениях линейного разрешения на местности Δl (рис. 2, а) и различных значениях числа элементов разрешения бортовой ОЭС N в полосе обзора S (рис. 2, б).

При анализе информационных возможностей космических гиперспектральных систем ДЗЗ практический интерес представляет диапазон значений параметров Δl от десятков до сотен метров, b — до нескольких сотен и N — до десятка тысяч, что соответствует системам среднего пространственного разрешения с широкой полосой обзора и числу каналов существующих гиперспектрометров, разработанных для использования на КА ДЗЗ. Приведенные результаты расчетов показывают, что при таких характеристиках бортовой ОЭС наблюдения в режиме непосредственной передачи потока гиперспектральных видеоданных необходимо обеспечить скорости передачи информации в сотни мегабит в секунду. С уменьшением Δl и увеличением b требуемая скорость передачи данных в реальном масштабе



■ Рис. 1. Скорость поступления потока видеоданных v в зависимости от линейного разрешения на местности Δl при различных значениях числа элементов разрешения в полосе обзора N (а) и числа разрядов при цифровой передаче видеоданных g (б)



■ **Рис. 2.** Скорость поступления потока видеоданных v в зависимости от числа спектральных каналов b при различных значениях линейного разрешения на местности Δl (а) и числа элементов разрешения в полосе обзора N (б)

времени будет составлять единицы гигабит в секунду. Так, например, чтобы передать в режиме реального времени с КА, находящегося на орбите высотой $H_{КА} = 600$ км, гиперспектральные видеоданные с параметрами $b = 500$, $\Delta l = 20$ м, $g = 16$ и при $N = 4000$ потребуются обеспечить скорость передачи не менее 12 Гбит/с.

Расчетные характеристики информационной производительности современных КА ДЗЗ с гиперспектральной съемкой приведены в табл. 2. Анализ оценок информационной производительности показывает, что для представленных в таблице КА ДЗЗ передача видеоданных с КА на наземные ППИ в масштабе времени, близком к реальному, требует обеспечения скорости передачи информации в сотни мегабит–единицы гигабит в секунду. Только при таких скоростях передачи информации происходит согласование скорости поступления информации от бортовой аппаратуры наблюдения со скоростью ее цифровой передачи по каналу связи. Высокие требования к скорости передачи информации могут также иметь место и при воспроизведении из бортового запоминающего устройства больших объемов записанных видеоданных при ограниченном времени прохождения КА в зоне видимости наземного ППИ.

■ **Таблица 2.** Информационная производительность современных КА ДЗЗ с гиперспектральной съемкой

Наименование КА / государство (оператор)	Число каналов / диапазон съемки, мкм	Разрешение на местности, м	Полоса обзора, км	Информационная производительность датчика, Мбит/с
MightySat II.1. (Sindri) / США	256 / 0,47÷10,05	30–250; 26–51	20	430
Earth Observing-1 (EO-1) / США	220 / 0,4÷2,5	30	7,7	240
EOS AM-1 (Terra) / США	14 / 0,52÷11,6	15; 30; 90	60	85
EOS PM-1 (Aqua) / США	36 / 0,41÷14,39	250; 500; 1000	2300	10
Proba / США	150 / 0,4÷10,5	5; 18; 36	14	1000
OFEC-7 / Израиль	200 / 0,35÷3	10–15	11	2000
«Ресурс-П» / Россия	255 / 0,4÷1,1	25–30	25–30	500
«Кондор-Э» / Россия (проект)	256 / 0,5÷0,8	20	15×12	725
«Астрогон-Вулкан» / Россия (проект)	700 / 0,2÷1,4	5	15×12	7000

Анализ характеристик радиотехнических систем передачи данных ДЗЗ

Рассмотрим возможности существующих спутниковых радиотехнических систем передачи информации по передаче видеоданных гиперспектрального ДЗЗ на наземные ППИ. В настоящее время для передачи данных с КА ДЗЗ используются радиотехнические системы передачи информации, работающие в различных диапазонах частот — от ОВЧ/УВЧ-диапазонов (135–150 МГц, 400–470 МГц) до Х-диапазона (7450–8400 МГц) [10, 11]. Практический интерес представляет анализ возможностей высокоскоростной передачи гиперспектральных видеоданных в Х-диапазоне, который является в настоящее время основным для цифровой передачи с КА ДЗЗ больших объемов видеоданных со скоростью до 320 Мбит/с в одном радиоканале. Для сравнения: в S-диапазоне, также широко используемом для передачи с КА данных ДЗЗ, скорость передачи не выше 15 Мбит/с в одном радиоканале. В табл. 3

представлены значения скоростей передачи информации в некоторых современных спутниковых радиотехнических системах передачи видеоданных с КА ДЗЗ, работающих в X-диапазоне, и используемых в них методов модуляции (структур сигналов) [10].

В перспективе для высокоскоростной передачи с КА данных ДЗЗ планируется использование Ка-диапазона (23–28 ГГц), однако в настоящее время спутниковые радиотехнические системы передачи информации, работающие в этом диапазоне, находятся в стадии разработки [11]. При этом от перехода в Ка-диапазон не следует ожидать значительного увеличения скоростей передачи информации свыше сотен мегабит в секунду. В перспективных лазерных высокоскоростных системах передачи информации с КА на первом этапе их развития также рассматривается возможность реализации скоростей передачи информации в сотни мегабит в секунду (до 600 Мбит/с) [12]. Это обусловлено тем, что реализуемые скорости передачи информации определяются не только потенциальными возможностями диапазона частот по увеличению ширины полосы радиоканала, но и быстродействием электронных устройств формирования сигналов, кодирования и декодирования информации. Существенную роль играют также ограничения технической реализации, связанные, в том числе, с используемыми структурами сигналов и методами кодирования при обеспечении требуемого энергетического потенциала высокоскоростной радиопередачи с КА видеоданных.

■ **Таблица 3.** Характеристики радиопередачи видеоданных с КА ДЗЗ

КА	Частотный диапазон радиопередачи, МГц	Скорость передачи информации, Мбит/с	Метод модуляции
Terra, Aqua	8160÷8212,5	13; 150	QPSK, SQPSK
EO-1, Cartosat-1 (IRS-P5)	8125÷8300	52,5	QPSK
«Ресурс-П», QuickBird-2, Ikonos, Orbview-3,5	8025÷8400	75; 150; 320; 370 (2 канала)	BPSK, QPSK, OQPSK, SQPSK
«Метеор-3М», «Аркон 2», БелКА	8025÷8400	15; 30; 61; 123	BPSK, QPSK
Pleiades	7450÷8400	600 (2 канала)	8PSK
Eros C (A, B)	7450÷8400	70; 280; 455	QPSK
Landsat-7, ALOS	8105÷8342,5	150; 138,76	QPSK, AQPSK

Обеспечение высокой скорости передачи информации в радиопередаче «борт–земля» также зависит от характеристик приемной аппаратуры наземного ППИ, поскольку именно ее характеристиками в большинстве случаев обеспечивается требуемый энергетический потенциал радиопередачи информации с КА. Требуемые характеристики радиопередачи с КА данных ДЗЗ при скоростях передачи информации 5–15 Мбит/с обеспечиваются при выходной мощности бортового радиопередатчика до 10 Вт с использованием слабонаправленной бортовой передающей спиральной антенны размером 50–60 см и наземной приемной зеркальной антенны диаметром 0,6–2,0 м, а для обеспечения скоростей передачи информации 150–300 Мбит/с при тех же характеристиках бортовых передатчиков и антенн необходимы наземные приемные антенны диаметром 5–9 м. В первом случае наземный ППИ может быть реализован как в мобильном исполнении, так и в стационарном варианте, во втором случае — только в стационарном варианте. При этом дальнейшее увеличение скорости передачи информации осуществляется за счет передачи данных одновременно по нескольким высокоскоростным каналам. Использование в качестве наземных ППИ малогабаритных мобильных приемных станций с малыми диаметрами приемной зеркальной антенны приводит к необходимости увеличения размеров и направленности бортовых антенн и, как следствие, усложнения аппаратуры их наведения. В противном случае обеспечить высокую скорость передачи с КА данных ДЗЗ невозможно.

Современные отечественные комплексы приема информации с КА ДЗЗ обеспечивают в X-диапазоне скорость приема информации до 150 Мбит/с при диаметре наземной антенны 2,4 м, скорость приема информации до 320 Мбит/с — при диаметре наземной антенны 5–9 м [11, 13], при этом в ряде систем для достижения более высоких скоростей передачи информации используется параллельная передача по нескольким радиоканалам.

Таким образом, в существующих и перспективных спутниковых системах передачи видеоданных с КА ДЗЗ скорости передачи информации составляют сотни мегабит в секунду. Практически следует ориентироваться на типовую скорость передачи информации 300 Мбит/с для X-диапазона с возможностью ее увеличения в перспективе до 600 Мбит/с–1,2 Гбит/с при параллельной многоканальной передаче, переходе в Ка-диапазон и использовании лазерных систем. Однако эти возможности систем передачи информации уже сейчас не согласуются с информационными возможностями многих гиперспектральных систем ДЗЗ, и в перспективе это рассогласование будет только

усиливаться. Поэтому необходим поиск путей согласования информационной производительности аппаратуры ДЗЗ с пропускной способностью радиоканалов передачи данных. Это становится возможным при сокращении избыточности зарегистрированных гиперспектральных данных наблюдения и снижении на этой основе объемов передаваемых с КА ДЗЗ видеоданных.

Современные подходы к сокращению избыточности гиперспектральных видеоданных

Проблему сокращения избыточности гиперспектральных видеоданных при их передаче с КА ДЗЗ следует решать по двум направлениям. Первое направление соответствует традиционному подходу к сокращению избыточности видеoinформации — их сжатию с использованием различных алгоритмов сжатия видеоданных [14, 15]. Второе направление является характерным для обработки данных многоспектральных и гиперспектральных ОЭС наблюдения и связано с выбором для оперативной передачи и обработки наиболее информативных спектральных каналов [16, 17].

Применение различных алгоритмов сжатия видеоданных получило в настоящее время широкое распространение как для передачи изображений, так и, даже в большей степени, для их хранения. Уменьшение требуемой скорости передачи информации при использовании алгоритмов сжатия видеоданных определяется коэффициентом сжатия используемого алгоритма. Существуют алгоритмы сжатия с потерями и без потерь. Наиболее известными и универсальными алгоритмами сжатия изображений без потерь являются программные алгоритмы WinRar, WinZip, алгоритм Lossless JPEG на основе стандарта сжатия JPEG. Известны и находят применение также другие программные алгоритмы сжатия видеоданных, такие как Adaptive Binary Optimization (ABO), GIF, Progressive Graphics File (PGF), PNG, Qbit Lossless Codec, TIFF, WMPPhoto, RunLengthEncoding (RLE), LZW [14, 15].

Учитывая необходимость последующей тематической обработки данных наблюдения и распознавания наблюдаемых объектов, необходимо использовать алгоритмы сжатия видеоданных ДЗЗ без потерь, не допускающие искажений статистических яркостных характеристик восстановления данных. Однако коэффициент сжатия для алгоритмов сжатия без потерь ниже, чем для алгоритмов сжатия с потерями. При сжатии отдельных изображений, что в случае гиперспектральных видеоданных соответствует сжатию каждого изображения зарегистрированного «гиперкуба» в отдельности, коэффициент сжатия

составляет единицы. При совместном сжатии нескольких изображений, зарегистрированных в нескольких спектральных каналах, коэффициент сжатия может быть увеличен в 1,5–2 раза при учете межканальной корреляции [4, 15].

Для обеспечения высоких значений коэффициентов сжатия видеоданных необходимо использовать алгоритмы сжатия с потерями информации, способные обеспечить коэффициенты сжатия порядка десятков и более. В основе методов сжатия изображений с потерями лежат алгоритмы фрактального и вейвлет-сжатия, алгоритмы Low JPEG2000 и High JPEG2000 на основе стандарта сжатия JPEG, методы сжатия на основе дифференциального анализа и др. [14]. В случае их использования для сокращения избыточности видеоданных ДЗЗ необходимо следить, чтобы потери информации не приводили к ухудшению качества решения задач тематической обработки данных наблюдения.

Оценки коэффициента сжатия $K_{сж}$ для 10 различных программных алгоритмов сжатия гиперспектральных данных представлены на рис. 3. В качестве тестового изображения использовался тестовый гиперспектральный снимок размером 1200×4000 элементов, с числом спектральных каналов $b = 500$, радиометрическим разрешением $g = 16$, объемом 4,8 Гбайт. Такой объем видеоданных без сжатия может быть передан по радиоканалу со скоростью передачи информации 100–150 Мбит/с за 4–5 мин, что соизмеримо с длительностью сеанса связи с низкоорбитальным КА ДЗЗ при его прохождении в зоне радиовидимости наземного ППИ. Алгоритмы сжатия без потерь 1–8 обеспечивают уменьшение объема передаваемых видеоданных до 2,5 раза, а алгоритмы сжатия с потерями 9–10 — уменьшение объема передаваемых видеоданных до 5,5 раза.

Недостатком рассмотренных алгоритмов сжатия изображений, не позволяющим достичь



■ Рис. 3. Оценки коэффициента сжатия $K_{сж}$ для различных алгоритмов сжатия видеоданных: 1 — WinRar; 2 — WinZip; 3 — TIFF; 4 — PNG; 5 — RLE; 6 — LZW; 7 — JPEG; 8 — JPEG2000 LS; 9 — JPEG2000 Low; 10 — JPEG2000 High

высоких коэффициентов сжатия многоспектральных и гиперспектральных данных, является то, что в них для сжатия используются различные переходы в цветоразностном пространстве, что плохо работает в случае совместного сжатия изображений, зарегистрированных в различных спектральных каналах. Кроме того, в большинстве алгоритмов сжатия изображений, адаптированных для сжатия многоспектральных и гиперспектральных видеоданных, многомерные спектральные данные рассматриваются как набор независимых двумерных изображений в пространственных координатах, а взаимосвязь данных по третьей — спектральной — координате не учитывается.

Учет корреляции и взаимосвязи гиперспектральных данных по спектральной координате учитывается при выборе для передачи и обработки наиболее информативных спектральных каналов. Анализ показывает, что имеет место значительная корреляция спектральных характеристик большинства природных и техногенных объектов и типов подстилающей поверхности в оптическом и ИК-диапазонах по длине волны. Это позволяет существенным образом сократить объем анализируемых гиперспектральных данных за счет сокращения числа передаваемых и поступающих в обработку видеоданных различных спектральных каналов. Данные, зарегистрированные в соседних спектральных каналах, сильно коррелированы между собой, и для решения большинства прикладных задач ДЗЗ полный объем многоспектральных и гиперспектральных данных избыточен и может быть сокращен. При этом число спектральных каналов, поступающих в обработку, может быть сокращено до 6–20, что соответствует величине существенной спектральной размерности (числу значимых спектральных составляющих) многоспектральных данных оптических наблюдений [16, 18].

Будем называть наиболее информативными спектральные каналы, которые при корреляционном распознавании объектов по спектральным образам позволяют обеспечить вероятность распознавания, близкую к вероятности распознавания по полному объему многоспектральных данных. С учетом спектральной размерности многоспектральных данных оптических наблюдений выбор наиболее информативных спектральных каналов эквивалентен сжатию исходных видеоданных в десятки раз, хотя, строго говоря, это является сжатием с потерями — информация, содержащаяся в отброшенных спектральных каналах, теряется, по крайней мере, для обработки, которая осуществляется только с использованием видеоданных переданных спектральных каналов. Кроме того, наибольшие возможности

сжатия гиперспектральных данных за счет выбора для передачи наиболее информативных спектральных каналов открываются при наличии априорной информации о наблюдаемых объектах и используемом алгоритме их распознавания. Для различных объектов и алгоритмов распознавания наиболее информативные спектральные каналы будут различными.

В общем случае выбор наиболее информативных спектральных каналов осуществляется путем оценивания возможного вклада видеоданных каждого спектрального канала в решение конкретной задачи ДЗЗ и поиска такой комбинации спектральных каналов, которые в совокупности дают наилучший результат в смысле выбранного критерия. Простейшим методом сокращения числа передаваемых спектральных каналов является их равномерное прореживание, практически не требующее априорной информации о наблюдаемых объектах. Если же известны спектральные образы объектов, предполагаемых к распознаванию по спектральным признакам, то могут быть реализованы оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы выбора наиболее информативных спектральных каналов.

Математическая постановка задачи выбора наиболее информативных спектральных каналов при корреляционном распознавании объектов по спектральным признакам формулируется как задача обнаружения координат существенного изменения свойств зарегистрированных спектральных характеристик. Участки существенного изменения свойств (скачков) анализируемых спектральных характеристик ищутся с использованием методов статистического оценивания в виде решающей статистики для обнаружения и оценки максимального правдоподобия координаты (спектрального канала) изменения свойств (скачков) анализируемого процесса [17, 19]. Известны также квазиоптимальные и эвристические алгоритмы выбора наиболее информативных спектральных каналов: с использованием вейвлет-анализа, по приращениям и по максимуму контраста спектральных образов [20].

Представлены оценки коэффициента сжатия $K_{сж}$ для четырех различных вариантов выбора наиболее информативных спектральных каналов гиперспектральных данных (рис. 4). В качестве тестового изображения использовался тот же тестовый гиперспектральный снимок, для которого на рис. 3 приведены коэффициенты сжатия при использовании программных алгоритмов сжатия видеоданных. Коэффициент сжатия определялся из условия снижения не более чем на 5 % вероятности корреляционного распознавания наблюдаемого объекта по ограниченному числу спектральных каналов по сравнению с распознаванием по полному объему гиперспектраль-



■ **Рис. 4.** Оценки коэффициента сжатия $K_{сж}$ для алгоритмов выбора спектральных каналов: 1 — оптимальный алгоритм; 2 — алгоритм анализа приращений; 3 — алгоритм на основе вейвлет-анализа; 4 — алгоритм равномерного прореживания

ных данных. Оптимальный алгоритм 1 обеспечивает уменьшение объема передаваемых видеоданных до 12,5 раза, квазиоптимальные алгоритмы 2 и 3 — уменьшение до 10 раз, простейший алгоритм 4 — до шести раз.

Уменьшение требуемой скорости передачи информации при использовании алгоритмов сжатия видеоданных определяется результирующим коэффициентом сжатия. При совместном использовании программных алгоритмов сжатия видеоданных в каждом спектральном канале и выбора наиболее информативных спектральных каналов из всего «гиперкуба» зарегистрированных гиперспектральных видеоданных возможно их сжатие в несколько десятков раз. Так, применение оптимального алгоритма выбора наиболее информативных спектральных каналов к тестовому гиперспектральному снимку объемом 4,8 Гбайт с числом спектральных каналов $b = 500$, для которого определялись коэффициенты сжатия, приведенные на рис. 3 и 4, позволило сократить число спектральных каналов до $b = 40$. Последующее применение к видеоданным этих спектральных каналов процедуры сжатия с использованием алгоритмов сжатия без потерь, таких как WinRar или WinZip, позволило дополнительно сжать данные еще в 1,5 раза. Результирующий коэффициент сжатия составляет 18,75, при этом практически отсутствуют потери в качестве решения задач тематической обработки видеоданных, а для их передачи при том же времени передачи, что при передаче со скоростью 100–150 Мбит/с всего объема гиперспектральных данных, может быть использован радиоканал со скоростью передачи информации 5–15 Мбит/с.

Заключение

В статье рассмотрены вопросы, связанные с согласованием информационной производительности бортовых гиперспектральных ОЭС

космических систем ДЗЗ с пропускной способностью спутниковых радиоканалов передачи данных на наземные ППИ. Полученные оценки информационной производительности существующих гиперспектрометров показывают, что суммарные объемы регистрируемых гиперспектральных видеоданных уже сейчас достигают доли терабайт, и в ближайшей перспективе неизбежно их увеличение. Для передачи с КА ДЗЗ на наземные ППИ полного потока зарегистрированных гиперспектральных данных необходимо достижение в спутниковых радиотехнических системах передачи информации скоростей передачи в единицы гигабит в секунду и выше, что превосходит возможности как существующих, так и перспективных высокоскоростных систем передачи информации, включая лазерные. Использование же параллельной многоканальной передачи означает, по сути, одновременную загрузку нескольких радиолиний и не всегда может быть технически реализовано. Отсюда следует вывод о необходимости сжатия регистрируемых гиперспектральных видеоданных для согласования информационной производительности гиперспектральных ОЭС КА ДЗЗ с характеристиками имеющих ограниченную пропускную способность радиоканалов передачи информации на наземные ППИ.

В статье показано, что перспективным способом выхода из сложившейся ситуации является совместное использование программных алгоритмов сжатия видеоданных в каждом спектральном канале и выбора для оперативной передачи из всего «гиперкуба» зарегистрированных гиперспектральных видеоданных ограниченного числа наиболее информативных спектральных каналов. При этом возможно сжатие исходных гиперспектральных данных в несколько десятков раз с соответствующим уменьшением требуемой скорости передачи информации в радиоканале. В результате при предельной скорости передачи в существующих и перспективных спутниковых высокоскоростных системах передачи информации 300–600 Мбит/с возможно использование среднескоростных систем передачи информации со скоростью передачи 10–30 Мбит/с. При этом выбор спектральных каналов для оперативной передачи может осуществляться на этапе планирования съемки на основании априорной информации об объектах, предполагаемых к распознаванию по спектральным признакам. Ограничениями для уменьшения числа передаваемых каналов является спектральная размерность гиперспектральных данных, допустимые потери в качестве решения задач ДЗЗ при их тематической обработке и необходимость использования априорной информации об объектах наблюдения.

Литература

1. Савиных В. П., Цветков В. Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. — М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 2001. — 228 с.
2. Бакланов А. И. Системы наблюдения и мониторинга. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 234 с.
3. Сорокин Ю. С. Космическая съемка Земли 2010–2011. Ежегодник. — М.: Радиотехника, 2010. — 490 с.
4. Schowengerdt R. A. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. — N. Y.: Academic Press, 2007. — 558 p.
5. Рождествин В. Н. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 528 с.
6. Мальцев Г. Н., Козинов И. А., Данилкин А. П. Космические системы и технологии многоспектрального дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. 2010. № 1. С. 148–158.
7. Урличич Ю. М., Селин В. А., Емельянов К. С. О приоритетах практической реализации развития космической системы дистанционного зондирования Земли // Наука и технологии в промышленности. 2012. № 1. Ч. 2. С. 71–80.
8. Бондур В. Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16. doi: 10.7868/S0205961414010035
9. Козинов И. А., Бабанин И. Г., Богомазов А. Ю. Оперативная передача видеоданных с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Известия Юго-Западного гос. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника, информатика. 2012. № 2–3. С. 102–105.
10. Гершензон В. Е., Кучейко А. А. Стандартизация оборудования станций приема данных дистанционного зондирования Земли // Пространственные данные. 2006. № 1. С. 33–43.
11. Шевчук Р. Б. Комплексы приема информации с российских спутников дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2012. № 2. С. 66–76.
12. Мальцев Г. Н. Современное состояние и перспективы развития многофункциональной космической системы ретрансляции // Изв. ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение. Вып. 4. 2013. С. 13–18.
13. Носенко Ю. И., Лошкарев П. А. Единая территориально-распределенная информационная система дистанционного зондирования Земли — проблемы, решения, перспективы. Ч. 1 // Геоматика. 2010. № 3. С. 35–43.
14. Miano J. Compressed Image File Formats: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP. — Boston: (ACM Press) Addison-Wesley Professional, 1999. — 288 p.
15. Motta G., Rizzo F., Storer J. A. Hyperspectral Data Compression. — N. Y.: Springer Science and Business Media, 2006. — 421 p.
16. Фатеев В. Ф., Миньков С. А. Потенциальные возможности космических многоспектральных оптико-электронных приборов при обнаружении малоразмерных объектов // Оптический журнал. 2000. № 7. С. 5–11.
17. Мальцев Г. Н., Козинов И. А., Фатеев В. Ф. Методы выбора наиболее информативных спектральных каналов при дистанционном зондировании Земли с малых КА // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. № 6. С. 23–31.
18. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Многоспектральные оптико-электронные системы // Специальная техника. 2002. № 4. С. 56–62.
19. Козинов И. А., Мальцев Г. Н. Модифицированный алгоритм обнаружения разладки случайного процесса и его применение при обработке многоспектральных данных // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 9–17.
20. Козинов И. А. Обнаружение локальных свойств анализируемых сигналов и процессов с использованием вейвлет-преобразования // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 21–28. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.21

UDC 528.851

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.74

Transfer of Hyperspectral Video Data of Earth Remote Sensing via Radio Channels of Limited Capacity

Maltsev G. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, georgy_maltsev@mail.ruKozinov I. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, garry-spb@yandex.ru^aA. F. Mozhaiskiy Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Simultaneous use of hyperspectral imagery in hundreds of spectral channels is a steady tendency in the development of space systems for Earth remote sensing. It leads to anticipating growth of the informativeness of onboard optical-electronic observation systems in relation to the capacity of radio channels of information transfer from the spacecrafts. The problem is that the modern radio engineering information transmission systems with limited throughput cannot transfer complete volumes of registered hyperspectral video data either by direct operational transmission or by reproduction from an onboard storage device. It is necessary to develop technologies for the abbreviation (compression) of a hyperspectral video data flow for its transmission to ground stations of information reception, using satellite radio engineering information transmission systems with limited throughput. **Results:** The analysis of information productivity of the existing onboard hyperspectral optical-electronic systems showed that it reaches gigabits per second and will increase in the long term. At the same time, the throughput of radio channels of video data transmission from spacecrafts, taking into account the opportunities of the used frequency ranges and technical restrictions, does not exceed several

hundred megabits per second. To reduce the transmitted data amount, we suggest to share the algorithms of video data shrinking in each spectral channel and choose only several most informative spectral channels out of all the registered hyperspectral video data. This will reduce the transmitted data amount in several tens times and coordinate the information productivity of optical-electronic observation systems with the throughput of the radio channels. Achievable compression ratios are defined for hyperspectral video data when sharing different compression methods and methods of choosing the most informative spectral channels. **Practical relevance:** The obtained results can be applied in the design and use of space systems of Earth remote sensing with hyperspectral shooting for choosing technologies and modes to transmit the spacecraft observation data via radio channels of limited capacity.

Keywords — Remote Sensing of Earth, Hyper Spectrometer, Spectral Channel, Information Transfer Speed, Redundancy Reduction, Video Data Compression.

References

1. Savinykh V. P., Tsvetkov V. Y. *Geoinformatsionnyi analiz dannykh distantsionnogo zondirovaniia* [Geoinformational Analysis of Remote Sensing Data]. Moscow, Kartgeotsentr — Geodezizdat Publ., 2001. 228 p. (In Russian).
2. Baklanov A. I. *Sistemy nabludeniia i monitoringa* [System Surveillance and Monitoring]. Moscow, BINOM. Laboratoriia znaniia Publ., 2009. 234 p. (In Russian).
3. Sorokin U. S. *Kosmicheskaiia s"emka Zemli 2010–2011. Ezhegodnik* [Earth Remote Sensing. Yearbook]. Moscow, Radio-tekhnika Publ., 2010. 490 p. (In Russian).
4. Schowengerdt R. A. *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. New York, Academic Press, 2007. 558 p.
5. Rozhdestvin V. N. *Optikoelektronnye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoi sredy* [Optical-Electronic Systems of Environmental Monitoring of Environment]. Moscow, MG TU im. N. E. Bauman Publ., 2002. 528 p. (In Russian).
6. Maltsev G. N., Kozinov I. A., Danilkin A. P. Space Systems and Technologies Interned for Multispectral Remote Sensing of the Earth. *Informatsiia i kosmos*, 2010, no. 1, pp. 148–158 (In Russian).
7. Urlichich Y. M., Selin V. A., Emel'yanov S. K. On the Priorities of Practical Implementation of Development of Space System of Remote Sounding of the Earth. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti*, 2012, no. 1–2, pp. 71–80 (In Russian).
8. Bondur V. G. Modern Approaches to Processing of Big Flows of Hyper Spectral and Multispectral Space Information. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, no. 1, pp. 4–16 (In Russian) doi: 10.7868/S0205961414010035
9. Kozinov I. A., Babanin I. G., Bogomazov A. Y. Rapid Transmission of Video Data from the Spacecraft for Remote Sensing of the Earth. *Izvestiia Iugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika, informatika*, 2012, no. 2–3, pp. 102–106 (In Russian).
10. Gershenzon V. E., Kucheiko A. A. Standardization of the Equipment of Stations of Reception of Data of Remote Sensing of Earth. *Prostranstvennye dannye*, 2006, no. 1, pp. 33–43 (In Russian).
11. Shevchuk R. Complexes for Data Receiving from Russian Remote Sensing Satellites. *Geomatika*, 2012, no. 2, pp. 66–76 (In Russian).
12. Maltsev G. N. Current State and Prospects of Development of Multifunctional Space System Relay. *Izvestiia GUAP. Aerokosmicheskoe priborostroenie*, 2013, iss. 4, pp. 13–18 (In Russian).
13. Nosenko Y. I., Loshkarev P. A. Unified Geographically Distributed Information System of Earth Remote Sensing — Problems, Solutions, Perspectives. Part 1. *Geomatika*, 2010, no. 3, pp. 35–43 (In Russian).
14. Miano J. *Compressed Image File Formats: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP*. Boston, (ACMPress) Addison-Wesley Professional, 1999. 288 p.
15. Motta G., Rizzo F., Storer J. A. *Hyperspectral Data Compression*. New York, Springer Science and Business Media, 2006. 421 p.
16. Fateev V. F., Minkov S. A. The Potential of Space Multi-Spectral Opto-Electronic Devices in the Detection of Small Objects. *Opticheskii zhurnal*, 2000, no. 7, pp. 5–11 (In Russian).
17. Maltsev G. N., Kozinov I. A., Fateev V. F. Methods of Choice of the Most Informational Spectral Channels under Remote Flexing of the Earth from the Small Spacecrafts. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2007, no. 6, pp. 23–31 (In Russian).
18. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. Multi-Spectral Optical-Electronic Systems. *Spetsial'naia tekhnika*, 2002, no. 4, pp. 56–62 (In Russian).
19. Kozinov I. A., Maltsev G. N. Modified Algorithm of the Detection of Abrupt Changes in a Casual Process and its use for Processing of Multispectral Data. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 3, pp. 9–17 (In Russian).
20. Kozinov I. A. Detecting Local Characteristic of Analyzed Signals and Processes using Wavelet Transformation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 1, pp. 21–28 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.21