

МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА

А. Н. ГРИГОРЬЕВ¹, Е. И. ШАБАКОВ¹, А. Н. ДЕМЕНТЬЕВ², А. А. РОМАНОВ³

¹Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Grig-AN@ya.ru

²Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, 141070, Королев, Россия

³Войсковая часть 41704 Министерства обороны Российской Федерации, 117997, Москва, Россия

Исследуются технологии планирования и ведения съемки малоразмерных объектов, выполняемой в нестационарных условиях с применением оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли из космоса. Приведен краткий анализ способов снижения объема зарегистрированных данных и исследованы возможности сокращения пространственной избыточности в одномерном массиве зарегистрированных данных на борту космического средства. Разработаны модели объекта съемки при нестационарных условиях наблюдения и в пространстве целевых данных, а также метод сокращения пространственной избыточности.

Ключевые слова: пространственная избыточность, целевые данные, космическое средство, дистанционное зондирование, объект съемки, фотограмметрическая рефракция, стохастические условия, рациональные полиномы.

Введение. Современный перечень задач, решаемых посредством применения космических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), велик за счет разнообразия типов объектов, которые можно исследовать по регистрируемым изображениям. Отдельный класс задач посвящен оперативному контролю состояния малоразмерных объектов. К таким объектам съемки относятся населенные пункты, объекты промышленности, элементы дорожной инфраструктуры и т.п. На рис. 1 приведены примеры изображений реальных малоразмерных объектов ДЗЗ: *а* — территория г. Любань Тосненского района Ленинградской области, размером 4,5×3,5 км; *б* — о. Жижгин в Белом море, размером 3,1×1,7 км; *в* — дер. Павшицы Батецкого района Новгородской области, размером 0,7×0,35 км.

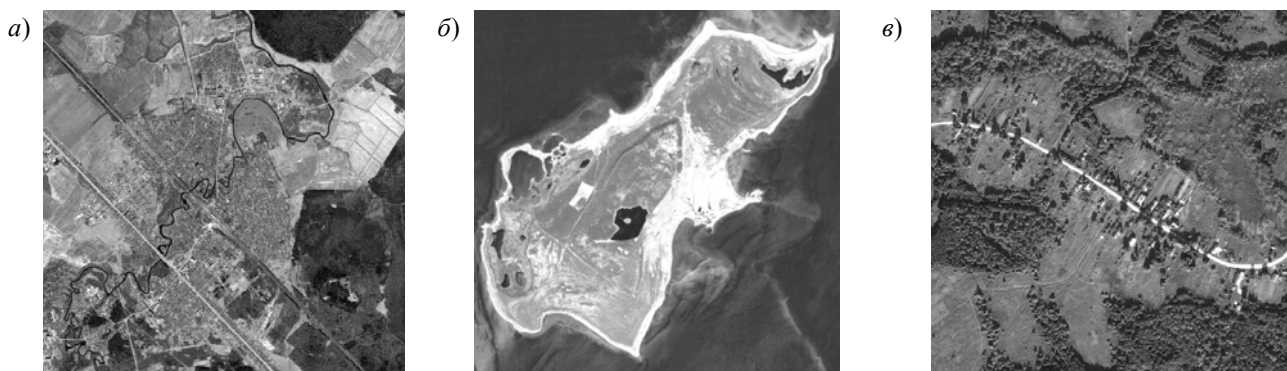


Рис. 1

Современные бортовые оптико-электронные специальные комплексы (БОЭСК), регистрирующие целевые данные, обладают высокой производительностью, достигающей единиц гигабит в секунду. Так, на космических снимках, получаемых, например, с помощью БОЭСК „Геотон-Л1“ космического аппарата (КА) „Ресурс-П“ в полосе захвата более 30 км, протяженность маршрута составляет до 100 км. Для такого рода данных, в случае если объект текущей съемки является малоразмерным, характерна высокая пространственная избыточность.

Доля данных о малоразмерном объекте может составлять единицы процентов от общего объема данных, отраженных на снимке. При существующей технологии космической съемки для формирования данных об объекте, регистрируемых КА, требуется передать весь массив данных. Панхроматический снимок, регистрируемый БОЭСК типа „Геотон-Л1“ с радиометрическим разрешением 12 бит/пкс, по космическому каналу связи с пропускной способностью 300 Мбит/с с учетом применяемого бортового кодирования будет передаваться около 50 с. За среднее время сеанса связи с КА можно получить немногим более 10 таких снимков. При этом передача данных о малоразмерном объекте, территория которого составляет 5×5 км, занимает около 1 с. Таким образом, особенности существующей технологии ДЗЗ приводят к значительным ограничениям производительности съемки малоразмерных объектов, что особенно существенно при решении оперативных задач.

Анализ методов сокращения избыточности данных ДЗЗ. Традиционным подходом к сокращению объема регистрируемых на борту целевых данных является уплотнение потока информации за счет использования методов компрессии изображений [1]. В настоящее время активно исследуются методы, основанные на различных модификациях вейвлет-преобразования [2—5]. Существуют также альтернативные способы компрессии изображений [6, 7] и способы, при использовании которых учитываются внутренние корреляционные связи массивов многозональных данных [8]. Как правило, метод компрессии остается инвариантным в процессе его применения, но при этом известны работы, посвященные адаптации способа обработки изображения к его свойствам (см., например, [9]). Однако при практическом использовании методов компрессии на борту КА ДЗЗ для обеспечения требуемого качества данных устанавливаются небольшие коэффициенты их сжатия (в 2—4 раза). При многозональной съемке видеоспектральными средствами дополнительно сократить объем данных без существенных потерь их информативности можно за счет объединения однотипных изображений, формируемых в спектральных каналах [10].

Существует способ съемки объектов, включающий оптимизацию параметров регистрации данных. В этом случае протяженность маршрута съемки выбирается по протяженности объекта с учетом возможных ошибок планирования съемки и работы комплексов КА. Такой способ позволяет достичь существенного сокращения избыточности, но не лишен определенных недостатков. С учетом совершенствования БОЭСК по увеличению полосы захвата такой подход обеспечит сокращение пространственной избыточности только вдоль направления сканирования подстилающей поверхности. Кроме того, из-за ограничения маршрута теряются данные о прилегающих территориях.

Одним из оптимальных методов сокращения пространственной избыточности целевых данных космической съемки является их фрагментация с целью извлечения доли данных, содержащих изображение объекта. Но на современном этапе развития методов обработки данных эта процедура реализуется только при наземной обработке с применением высокопроизводительных средств автоматизации [11].

Таким образом, актуальным является развитие методов бортовой обработки зарегистрированных данных с сокращением их избыточности в зависимости от условий решения поставленной задачи.

Модель объекта ДЗЗ в нестационарных условиях ведения съемки. На текущий период применения КА ДЗЗ разрабатывается каталог объектов $O_{\{I\}} = \{O_i\}_I$, $[i = 1(1)I]$, где O_i — отдельный объект съемки, i — индекс объекта, I — общее число объектов.

В контексте исследования комплекс средств ДЗЗ необходимо рассматривать как открытую систему, функционирующую в среде с непостоянными пространственно-временными свойствами. При этом следует учитывать ряд внешних и внутренних факторов, определяющих условия регистрации данных и представляемых детерминированными и стохастическими

условиями наблюдения. Детерминированным внешним условием является положение объекта, которое можно описать кортежем геодезических координат $O_i = \langle (B, L, H)_c \rangle_{C_i}$, $[c = 1(1)C_i]$. Анализ формы объектов сложно выполнять непосредственно в геодезических координатах, поэтому целесообразно использовать плановую систему координат (x, y, z) . Прямой и обратный пересчет координат известен и представлен операторами $(x, y, z) = \text{PGT}(B, L, H)$, $(B, L, H) = \text{GPT}(x, y, z)$. Тогда модель объекта ДЗЗ в плановых координатах имеет вид $O_i^P = \langle (x, y, z)_c \rangle_{C_i}$.

К детерминированным внутренним условиям съемки объекта O_i относятся азимут направления сканирования A_i и величина рефракционного смещения D_i объекта при наблюдении через атмосферу, которые можно оценить по существующим моделям атмосферной рефракции на основе прогнозируемых и заданных параметров внешнего ориентирования [12]. Исследования моделей рефракции показали необходимость ее учета в задаче описания малоразмерных объектов ДЗЗ. При углах наблюдения объекта более 30° величина D_i , приведенная к поверхности Земли, при съемке с высоты 500 км составляет более 200 м, что сопоставимо с размерами отдельных малоразмерных объектов.

Обобщенным стохастическим условием съемки является линейная ошибка σ_i наведения БОЭСК на объект O_i . Значение σ_i зависит от ряда величин случайного характера, включающих ошибки планирования съемки и погрешности системы навигации и наведения КА ДЗЗ [13]. Считается, что ошибка σ_i распределена по нормальному закону. Для больших КА оценка величины σ_i , приведенной к поверхности Земли при съемке с высоты 500 км, составляет порядка 150...250 м, а для малых КА — 600...700 м.

Таким образом, комплекс условий съемки объекта O_i можно представить вектором параметров $\mathbf{P}_i = \langle A_i, D_i, \sigma_i \rangle$, а множество $P_{\{I\}} = \{\mathbf{P}_i\}_I$ будет содержать данные о съемке всех объектов на текущий период.

Модель объекта ДЗЗ в пространстве целевых данных. Рассмотрим общий случай регистрации целевых данных в БОЭСК с линейным приемником, имеющим число элементов N . Приемник ориентирован перпендикулярно направлению орбитального движения, за счет которого выполняется сканирование подстилающей поверхности, и позволяет регистрировать данные в одном панхроматическом спектральном канале. Число считываний зарядовых пакетов M_i при съемке объекта O_i определяется строчной частотой считывания, длительностью включения БОЭСК и может быть спрогнозировано при планировании. В результате съемки на борту КА формируется одномерный массив квантованных значений яркости излучения $\mathbf{L}_{[K_i]} = \left\| L_k \right\|_{K_i}$, $[k = 1(1)K_i]$, где число элементов массива определяется по формуле $K_i = NM_i$.

Массив $\mathbf{L}_{[K_i]}$ при первичной наземной обработке преобразуется в двухмерный массив „сырых“ целевых данных $\mathbf{L}_{[M_i, N]} = \left\| L_{m, n} \right\|_{M_i, N}$, $[m = 1(1)M_i]$, $[n = 1(1)N]$, для которого может быть установлена связь с геодезическими координатами (B, L, H) . Эта связь устанавливается посредством строгой фотограмметрической обработки с использованием известной модели БОЭСК и с учетом геометрических условий съемки. Однако при таком подходе разрабатываемый метод зависит от конкретного БОЭСК. Для обеспечения универсальности

модели объекта ДЗЗ предлагается использовать обобщенные аппроксимирующие функции — рациональные полиномы, широко применяемые при современной фотограмметрической обработке. Способы идентификации рациональных полиномов и их использования приведены в работах [14, 15]. Пересчет геодезических координат (B, L, H) в координаты целевых данных (m, n) об объекте O_i может быть представлен оператором $(m, n) = \text{RPC}(B, L, H, \dots)$, где многоточие заменяет ряд параметров преобразования, вычисление которых обеспечивает производитель БОЭСК. Таким образом, модель объекта ДЗЗ в пространстве целевых данных имеет вид $O_i^D = \langle (m, n)_c \rangle_{C_i}$.

Метод сокращения избыточности данных. Предлагаемый метод основан на традиционном цикле ведения ДЗЗ, включающем три основных этапа: планирование съемки; регистрация, бортовая обработка и передача данных в наземный комплекс; наземная обработка и выдача потребителю.

При планировании с использованием модели O_i^P учитывается влияние рефракции и формируется модель объекта $O_i^P = \langle (x', y', z)_c \rangle_{C_i}$: например, при $A_i \in (0, \pi/2)$ это выполняется согласно выражениям $x' = x + D_i \sin A_i$, $y' = y + D_i \cos A_i$.

Плановые координаты объекта O_i^P пересчитываются в геодезические координаты $(B', L', H) = \text{GPT}(x', y', z)$ и далее в координаты целевых данных $(m', n') = \text{RPC}(B', L', H, \dots)$. Для упрощения модели объекта $O_i^D = \langle (m', n')_c \rangle_{C_i}$ определяется его пространственный экстен-
тент

$$E_i^D = (m'_{\min}, n'_{\min}; m'_{\max}, n'_{\max})_i,$$

где $m'_{\min} = \text{MIN}(\langle m'_c \rangle_{C_i})$, \dots , $n'_{\max} = \text{MAX}(\langle n'_c \rangle_{C_i})$; $\text{MIN}(\cdot)$ и $\text{MAX}(\cdot)$ — операторы определения минимальных и максимальных значений из кортежа координат объекта O_i^D .

Для учета ошибки наведения σ_i выполняется расширение экстен-
та E_i^D таким образом, чтобы обеспечить высокую вероятность наличия объекта в увеличенном экстен-
те E_i^{D} . В этом случае для построения увеличенного экстен-
та предлагается использовать правило „трех сигм“:

$$E_i^{D} = (m''_{\min}, n''_{\min}; m''_{\max}, n''_{\max})_i,$$

где $m''_{\min} = m'_{\min} - \text{MD}(3\sigma_i/G_i)$, \dots , $n''_{\max} = n'_{\max} + \text{MD}(3\sigma_i/G_i)$; $\text{MD}(\cdot)$ — оператор математического округления; G_i — пространственное разрешение при съемке объекта O_i .

Графические интерпретации преобразований модели объекта O_i^P приведены на рис. 2, где представлены варианты учета рефракции (а) и построения экстен-
тов объекта в пространстве целевых данных (б).

Множество экстен-
тов $E_{\{I\}}'' = \{E_i^{D}\}_I$ представляет собой совокупность параметров, необходимых для сокращения избыточности целевых данных на борту в течение периода применения космического средства. Указанные параметры должны быть включены в бортовую рабочую программу для выполнения съемки. Для практической реализации предложенного

метода должен быть определенным образом доработан БОЭСК за счет внедрения аппаратно-программных средств сокращения пространственной избыточности данных.

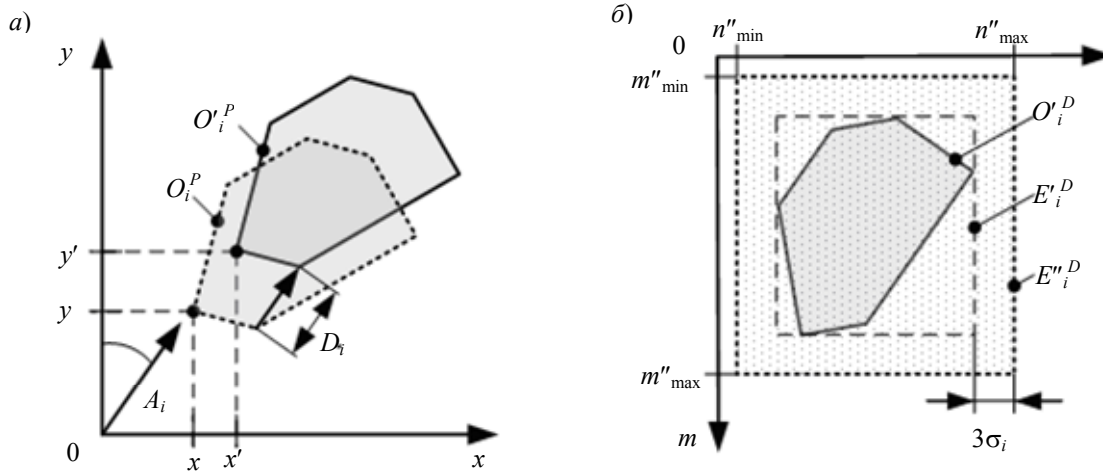


Рис. 2

По мере регистрации целевых данных $\mathbf{L}_{[K_i]}$ выполняется их дополнительная бортовая обработка — децимация — согласно следующему правилу:

$$un''_{\min} \leq k \leq un''_{\max}, u = \left[m''_{\min} (1) m''_{\max} \right] \Rightarrow \mathbf{L}_{[K_i]} \rightarrow \mathbf{L}_{[\downarrow K_i]}.$$

Частное $K_i / \downarrow K_i$ характеризует степень сокращения избыточности данных. Полученный массив $\mathbf{L}_{[\downarrow K_i]}$ является результатом сокращения избыточности и может более оперативно передаваться по каналам связи за счет меньшего объема, в том числе по менее производительным каналам КА-ретрансляторов и пунктов приема, находящихся в распоряжении некоторых потребителей. При этом исходный массив $\mathbf{L}_{[K_i]}$ может быть сохранен в бортовой памяти и передан на пункты приема данных.

Заключение. Исследована проблема сокращения избыточности целевых данных, регистрируемых оптико-электронной аппаратурой на борту космического средства. В результате анализа известных способов уменьшения объема информации выбрано перспективное направление по фрагментации данных при съемке малоразмерных объектов. Для решения задачи разработаны модели объекта ДЗЗ при нестационарных условиях регистрации и в пространстве целевых данных. Предложен новый метод сокращения пространственной избыточности данных, регистрируемых на борту космического средства, заключающийся в идентификации моделей объектов при планировании съемки и в дополнительной бортовой обработке по децимации зарегистрированных данных.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании и разработке перспективных космических систем дистанционного зондирования Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu W., Lei N., Wang K., Wang Q., Li T. Design of real-time remote sensing image compression system // Proc. SPIE 8908, Intern. Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging: Imaging Sensors and Applications, 89080S. 2013. P. 639—635.
2. Du Q., Zhu W., Fowler J. Anomaly-based JPEG2000 compression of hyperspectral imagery // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2008. Vol. 5, iss. 4. P. 696—700.
3. Li B., Yang R., Jiang H. Remote-sensing image compression using two-dimensional oriented wavelet transform // IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing. 2011. Vol. 49, iss. 1. P. 236—250.

4. *Karami A., Yazdi M., Mercier G.* Compression of hyperspectral images using discrete wavelet transform and tucker decomposition // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2012. Vol. 5, iss. 2. P. 444—450.
5. *Zhang Q.* Fast orientation prediction-based discrete wavelet transform for remote sensing image compression // *Remote Sensing Letters*. 2013. Vol. 4, N 12. P. 1156—1165.
6. *Huang K., Dai Q.* A new on-board image codec based on binary tree with adaptive scanning order in scan-based mode // *IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50, iss. 10. P. 3737—3750.
7. *Ryan M. J., Arnold J. F.* Lossy compression of hyperspectral data using vector quantization // *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 61, N 3. P. 419—436.
8. *Дудин Е. А., Карин С. А., Григорьев А. Н.* Сжатие многоспектральных данных дистанционного зондирования Земли с использованием метода главных компонент // *Информация и космос*. 2014. № 4. С. 77—81.
9. *Григорьев А. Н., Дудин Е. А.* Метод адаптивного сжатия спутниковых изображений земной поверхности // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58, № 3. С. 179—184.
10. *Григорьев А. Н.* Метод сокращения избыточности гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии: Сб. трудов*. М.: Радиотехника, 2012. Ч. 2. С. 69—77.
11. *Бондур В. Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // *Исследование Земли из космоса*. 2014. № 1. С. 4—16.
12. *Колосов М. А., Шабельников А. В.* Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: Сов. радио, 1976. 220 с.
13. *Кузнецов Ю. А., Лабазов О. А.* Исследование точностных характеристик системы управления микроспутника дистанционного зондирования Земли // *Экология та ноосферологія*. 2009. Т. 20, № 1—2. С. 24—31.
14. *Xiong Z., Zhang Y.* A generic method for RPC refinement using ground control information // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2009. Vol. 75, N 9. P. 1083—1092.
15. *Grodecki J., Dial G.* Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2003. Vol. 69, N 1. P. 59—68.

Сведения об авторах

- Андрей Николаевич Григорьев** — канд. техн. наук, докторант; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра оптико-электронных средств; E-mail: Grig-AN@ya.ru
- Евгений Иванович Шабakov** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра оптико-электронных средств; E-mail: eish@bk.ru
- Андрей Николаевич Дементьев** — ЦНИИмаш, отделение радиоэлектронного обеспечения; заместитель начальника отделения; E-mail: dementev_2001@mail.ru
- Алексей Александрович Романов** — войсковая часть 41704; начальник отдела; E-mail: romanov_alexey@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных средств
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
25.05.15 г.

Ссылка для цитирования: *Григорьев А. Н., Шабakov Е. И., Дементьев А. Н., Романов А. А.* Метод сокращения избыточности данных дистанционного зондирования из космоса // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 1. С. 38—44.

METHOD TO REDUCE DATA REDUNDANCY IN REMOTE SENSING FROM SPACE

A. N. Grigoriev¹, E. I. Shabakov¹, A. N. Dementiev², A. A. Romanov³¹ A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: Grig-AN@ya.ru² Central Scientific-Research Institute of Machine Building, 141070, Korolev, Russia³ Military Unit 41704 of the Ministry of Defense of Russian Federation, 117997, Moscow, Russia

Technologies of small object observation planning and survey with the use of space-based optical-electronic remote sensing systems are studied. A brief analysis of methods used to reduce the volume of recorded data is presented. The possibility of contraction of spatial redundancy in a one-dimensional array of data recorded on board of the spacecraft is investigated. Models of survey objects for nonstationary observation conditions are developed, a method for reduction of spatial redundancy is proposed.

Keywords: spatial redundancy, target data, spacecraft, remote sensing, object of imagery, photogrammetric refraction, stochastic parameters, rational polynomials.

Data on authors

- | | | |
|----------------------------|---|---|
| Andrey N. Grigoriev | — | PhD, Doctoral Cand.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Optical-Electronic Means; E-mail: Grig-AN@ya.ru |
| Evgeny I. Shabakov | — | PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Optical-Electronic Means; E-mail: eish@bk.ru |
| Andrey N. Dementiev | — | Central Scientific-Research Institute of Machine Building, Department of Radio-Electronic Provision; Deputy Head of the Department; E-mail: dementev_2001@mail.ru |
| Alexey A. Romanov | — | Military Unit 41704; Head of the Department; E-mail: romanov_alexey@mail.ru |

For citation: Grigoriev A. N., Shabakov E. I., Dementiev A. N., Romanov A. A. Method to reduce data redundancy in remote sensing from space // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 1. P. 38—44 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-1-38-44