

УДК 528.8.04

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ГРУППОВЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.Н. Григорьев^a, А.И. Замарин^a, М.Н. Караваев^b

^a Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

^b Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга, Москва, 105066, Российская Федерация

Адрес для переписки: Grig-AN@ya.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 20.04.15, принята к печати 05.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-587-594

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Григорьев А.Н., Замарин А.И., Караваев М.Н. Метод формирования групповых объектов для космических средств дистанционного зондирования Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 587–594.

Аннотация

Предмет исследования. Рассматриваются результаты исследования особенностей применения космических оптико-электронных и радиолокационных средств при дистанционном зондировании Земли. Предметом исследования является текущее планирование съемки объектов на подстилающей поверхности с целью повышения эффективности системы зондирования за счет рационального использования ее ресурсов. **Метод.** Введены новые понятия группового объекта, стохастической полосы захвата и стохастической протяженности маршрута. Приведено общее описание моделей одиночного, группового объектов и их параметров, сформулирован критерий существования группового объекта на основе двух одиночных объектов. Разработан метод формирования групповых объектов при текущем планировании съемки, представлено его описание. Метод содержит ряд этапов обработки данных об объектах с вычислением их новых параметров, стохастических характеристик космического средства и проверки пространственных размеров объектов по значениям стохастической полосы захвата и стохастической протяженности маршрута. Приведено строгое математическое описание методического аппарата формирования модели группового объекта на основе данных об одиночных объектах и возможностях бортового специального комплекса в сложных условиях регистрации пространственных данных. **Основные результаты.** Разработанный метод в виде макета программного средства реализован на основе современной геоинформационной системы с развитым инструментарием обработки и анализа пространственных данных в векторном формате. Проведены экспериментальные исследования метода формирования групповых объектов на различной реальной объектовой обстановке с использованием параметров современных отечественных систем дистанционного зондирования Земли детального наблюдения Канопус-В и Ресурс-П. **Практическая значимость.** Предложенные модели и метод ориентированы на практическую реализацию с использованием векторных моделей пространственных данных и современных геоинформационных технологий. Практическая ценность состоит в сокращении количества расходуемых ресурсов космического средства и наземного комплекса системы при ведении наблюдения малоразмерных и точечных объектов.

Ключевые слова

дистанционное зондирование, бортовой специальный комплекс, текущее планирование, параметры регистрации, групповой объект.

METHOD OF GROUP OBJECTS FORMING FOR SPACE-BASED REMOTE SENSING OF THE EARTH

A.N. Grigoriev^a, A.I. Zamarin^a, M. N. Karavaev^b

^aA.F. Mozhaiskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

^bCentral Research Radio Engineering Institute n.a. academician A.I. Berg, Moscow, 105066, Russian Federation

Corresponding author: Grig-AN@ya.ru

Article info

Received 20.04.15, accepted 05.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-587-594

Article in Russian

For citation: Grigoriev A.N., Zamarin A.I., Karavaev M. N. Method of group objects forming for space-based remote sensing of the Earth. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 4, pp. 587–594.

Abstract

Subject of Research. Research findings of the specific application of space-based optical-electronic and radar means for the Earth remote sensing are considered. The subject matter of the study is the current planning of objects survey on the underlying surface in order to increase the effectiveness of sensing system due to the rational use of its resources. **Method.** New concept of a group object, stochastic swath and stochastic length of the route is introduced. The overview of models for single, group objects and their parameters is given. The criterion for the existence of the group object based on two single objects is formulated. The method for group objects formation while current survey planning has been developed and its description is presented. The method comprises several processing stages for data about objects with the calculation of new parameters, the stochastic characteristics of space means and validates the spatial size of the object value of the stochastic swath and stochastic length of the route. The strict mathematical description of techniques for model creation of a group object based on a single object and onboard special complex facilities in difficult conditions of registration of spatial data is given. **Main Results.** The developed method is implemented on the basis of modern geographic information system in the form of a software tool layout with advanced tools of processing and analysis of spatial data in vector format. Experimental studies of the forming method for the group of objects were carried out on a different real object environment using the parameters of modern national systems of the Earth remote sensing detailed observation Canopus-B and Resurs-P. **Practical Relevance.** The proposed models and method are focused on practical implementation using vector spatial data models and modern geoinformation technologies. Practical value lies in the reduction in the amount of consumable resources by means of space and ground-based systems in the monitoring of small and point-like objects.

Keywords

remote sensing, onboard special complex, current planning, registration options, group object.

Введение

Космические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются источниками пространственных данных об объектах и процессах на подстилающей поверхности и в толще атмосферы Земли. Возможность использования данных для решения конкретных задач обеспечивается параметрами бортовых специальных комплексов (БСК). Современная практика ДЗЗ основывается на оптико-электронных и радиолокационных БСК, позволяющих получать изображения с различными дешифровочными свойствами. Объектом исследования являются системы ДЗЗ, предоставляющие данные с высоким и сверхвысоким пространственным разрешением. К таким системам можно отнести следующие актуальные отечественные и зарубежные проекты: Ресурс-П, Канопус-В, WorldView, RapidEye, COSMO-SkyMed, TanDEM-X и т.д. Полоса захвата БСК, благодаря достижениям технологий оптико-электронного и радиоэлектронного приборостроения, в условиях орбитального применения средств составляет десятки километров.

Данные ДЗЗ являются основой для решения широкого круга научных и производственных задач [1–3]. В ряде случаев объекты съемки при применении систем ДЗЗ являются малоразмерными, т.е. их пространственные размеры существенно меньше величины полосы захвата БСК и составляют единицы километров. При решении отдельных задач требуется исследовать характеристики точечных объектов, данные о которых представлены на изображениях окрестностями в несколько пикселей [4]. Примерами малоразмерных объектов являются локальные участки природно-территориальных комплексов, большинство населенных пунктов и другие объекты инфраструктуры. Начальным этапом цикла ведения ДЗЗ является взаимодействие с потребителями данных – сбор и анализ заявок, по которым на плановый период (календарный год) формируется общий каталог объектов. По этому каталогу с учетом приоритетности решения задач выполняется комплексное планирование целевого применения космических средств (КС) ДЗЗ, включающее этапы предварительного, долгосрочного, оперативного и текущего планирования [5]. В общем случае абсолютное и относительное расположение интересующих объектов ДЗЗ на подстилающей поверхности носит стохастический характер и не является предметом дополнительных исследований при планировании ДЗЗ. В некоторых случаях на основе имитационных моделей систем ДЗЗ выполняется оптимизация построения группировки КС [6–8], выбор оптимальных параметров регистрации данных [9, 10], предварительное исследование качества ожидаемых данных об одиночных объектах [11–13]. На заключительных этапах планирования для каждого одиночного объекта с учетом метеопрогноза и баллистических расчетов определяются внутренние для системы параметры регистрации данных (углы разворота платформы, время включения/выключения, режимы работы БСК и т.д.), согласно которым при штатной работе БСК будет выполнена регистрация данных. Типичная схема регистрации данных о текущем объекте ДЗЗ приведена на рис. 1, а. Рассмотренный подход к планированию ведения ДЗЗ считается традиционным.

Стохастичность расположения объектов допускает возможность удаленности некоторых объектов на дистанции, значение которых с учетом пространственных размеров интересующих участков меньше полосы захвата БСК. В таких случаях имеется потенциальная возможность за один сеанс зарегистрировать данные не только об одном объекте из каталога, что показывает схема на рис. 1, б. Совокупность объектов, данные о которых могут содержаться в одном маршруте съемки, определяется в исследовании как групповой объект ДЗЗ.

Из практики ДЗЗ известно, что современные автоматизированные средства планирования не позволяют выполнять строгий автоматический анализ пространственного расположения объектов ДЗЗ. Од-

нако в некоторых случаях операторам при работе с картами объектов, прогнозом полос обзора и захвата БСК, протяженностью маршрута съемки удается интерактивно идентифицировать групповой объект и внести коррекции в рабочую программу для средства ДЗЗ. Такая процедура обеспечит съемку нескольких объектов за один сеанс, но при наличии технических возможностей и соответствующего опыта оператора. При большом числе объектов процедура определения группового объекта естественным образом усложняется для визуально-интерактивной обработки.

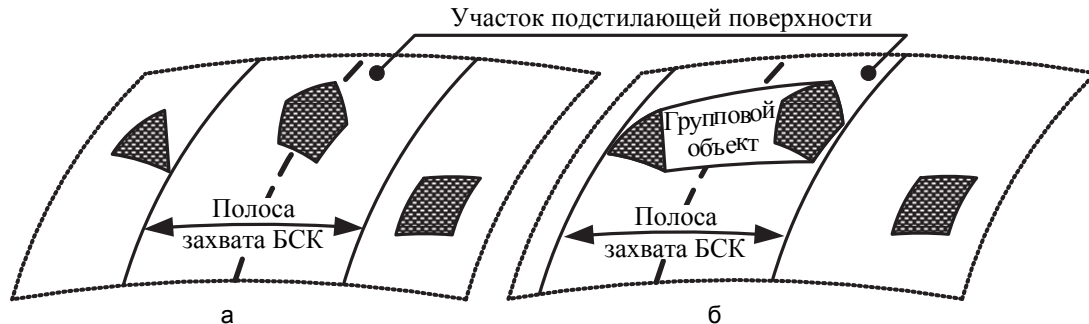


Рис. 1. Способы ведения съемки малоразмерных объектов: съемка одиночного объекта (а); съемка группового объекта (б)

Таким образом, недостаток существующей технологии ДЗЗ состоит в ограниченной возможности планирования, когда каждый объект ДЗЗ рассматривается изолированно от других объектов без учета их взаимного пространственного положения и размеров. По каждому объекту, как правило, ведется отдельный цикл съемки, что приводит к повышенному расходу ресурсов системы. Цель исследования состоит в минимизации затрачиваемых ресурсов системы ДЗЗ при выполнении съемки заданного числа известных объектов. Для достижения цели требуется решить ряд новых задач по разработке моделей одиночного и группового объектов ДЗЗ, а также метода формирования групповых объектов при текущем планировании ДЗЗ. Особенностью исследования является его ориентированность на полную автоматизацию процедуры формирования групповых объектов с использованием современных геопространственных технологий, что ведет к появлению положительного эффекта, выраженного в рациональном использовании ресурсов системы ДЗЗ.

Модели каталога объектов и одиночного объекта ДЗЗ

Каталог объектов ДЗЗ на некоторый период планирования формируется заранее по заявкам от потребителей и является совокупностью моделей одиночных объектов:

$$OI_{\{NOI\}} = \{OI_{noi}\}_{NOI} = \{OI_1, OI_2, \dots, OI_{noi}, \dots, OI_{NOI}\}, [noi = 1(1)NOI],$$

где NOI – число объектов ДЗЗ в каталоге $OI_{\{NOI\}}$; noi – идентификатор одиночного объекта OI_{noi} . В данном исследовании одиночный объект ДЗЗ OI_{noi} достаточно полно представляется его границей, заданной в геоцентрической геодезической системе координат (ГГСК) на поверхности общеземного эллипсоида:

$$OI_{noi} = MO_{noi}^{OI} = \langle (B, L)_{ci} \rangle_{cnoi}, [ci = 1(1)cnoi],$$

где MO_{noi}^{OI} – пространственная маска объекта в ГГСК; OI – верхний индекс, отражающий принадлежность объекта к каталогу $OI_{\{NOI\}}$. Пространственная маска MO_{noi}^{OI} представляет собой кортеж из $cnoi$ пар геодезических координат широта/долгота B, L .

Исследование геометрических свойств объектов, заданных в ГГСК на поверхности эллипсоида, является сложной для практической реализации задачей. Известен переход от геодезической системы координат OI_{noi} к плановой системе координат x, y (ПСК)¹, примерами которой могут быть проекции Гаусса–Крюгера или УТМ (от англ. Universal Transverse Mercator). Тогда перепроектированная маска объекта в ПСК будет иметь вид

$$MO_{noi}^{*OI} = \langle (x, y)_{ci} \rangle_{cnoi}.$$

На основе пространственной маски MO_{noi}^{*OI} может быть определен пространственный экстенд SE_{noi}^{*MO} объекта OI_{noi} в ПСК, который строится по максимальным и минимальным значениям координат x, y в кортеже $\langle (x, y)_{ci} \rangle_{cnoi}$ для каждого измерения X, Y как

¹ ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. Введ. 01.09.2009. М.: Стандартинформ. 13 с.

$$SE_{noi}^{*MO} = \langle (\min x_{noi}, \min y_{noi}), (\max x_{noi}, \max y_{noi}) \rangle.$$

Собственно координаты, задающие пространственный экстенд SE_{noi}^{*MO} , вычисляются операторами поиска минимальных и максимальных значений в массивах одноименных координат маски объекта OI_{noi} :

$$\begin{aligned} \min x_{noi} &= \text{MIN}[\langle x_{ci} \rangle_{cnoi}]; & \min y_{noi} &= \text{MIN}[\langle y_{ci} \rangle_{cnoi}]; \\ \max x_{noi} &= \text{MAX}[\langle x_{ci} \rangle_{cnoi}]; & \max y_{noi} &= \text{MAX}[\langle y_{ci} \rangle_{cnoi}]. \end{aligned}$$

В силу разнообразия форм границ объектов ДЗЗ, задаваемых MO_{noi}^{*OI} , пространственный экстенд зависит от разворота осей ПСК на некоторый азимут ψ_{noi} в окрестности объекта OI_{noi} . Тогда для определения параметров $SE_{noi}^{*MO}(\psi_{noi})$ необходимо выполнить пересчет координат пространственной маски MO_{noi}^{*OI} в новую ПСК, заданную поворотом исходной ПСК на азимут ψ_{noi} . Формулы для вычисления координат $x(\psi_{noi}), y(\psi_{noi})$ в новой ПСК в том случае, когда $\psi_{noi} < \pi/2$, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} x(\psi_{noi}) &= \sqrt{x^2 + y^2} \sin\left(\arccos\left(y/\sqrt{x^2 + y^2}\right) - \psi_{noi}\right); \\ y(\psi_{noi}) &= \sqrt{x^2 + y^2} \cos\left(\arccos\left(y/\sqrt{x^2 + y^2}\right) - \psi_{noi}\right). \end{aligned}$$

Геометрический центр пространственного экстенда SE_{noi}^{*MO} является обобщенной оценкой пространственного положения объекта OI_{noi} в ПСК и вычисляется по формуле

$$LO_{noi}^{*SE} = (x_{noi}^{LO}, y_{noi}^{LO}) = ((\min x_{noi} + \max x_{noi})/2, (\min y_{noi} + \max y_{noi})/2),$$

где верхний индекс LO обозначает принадлежность значений плановых координат к оценкам положения объекта OI_{noi} .

Замысел исследования предполагает анализ свойств взаимного расположения объектов из каталога $OI_{\{NOI\}}$ в глобальном масштабе, в силу чего необходим пересчет каждой полученной оценки положения LO_{noi}^{*SE} в геодезические координаты:

$$LO_{noi}^{SE} = B_{noi}^{LO}, L_{noi}^{LO}.$$

Как правило, системы ДЗЗ характеризуются номинальными полосой захвата SV и протяженностью маршрута съемки LV (рис. 2, а) для некоторых стандартных условий наблюдения. В рассматриваемой задаче эти параметры следует рассчитывать применительно к конкретному объекту ДЗЗ, характеризующемуся оценкой положения LO_{noi}^{SE} с учетом прогноза движения, углового поля зрения, длительности включения БСК и других условий орбитального применения. При этом необходимо помнить о стохастической природе положения проекции полосы захвата БСК на подстилающую поверхность, когда КС нестабильно в ориентации и вносит ошибку в наведение аппаратуры на объект ДЗЗ [14, 15]. Таким образом, традиционные оценки характеристик SV и LV некорректно использовать в силу наличия факторов вариаций условий наблюдения, ошибок прогноза, наведения и нестабильности КС, которые могут привести к промаху или частичному выполнению задачи при съемке объекта подстилающей поверхности. Исходя из этого, предлагается использовать параметры стохастической полосы захвата SSV_{noi}^{LO} и стохастической протяженности маршрута съемки SLV_{noi}^{LO} (рис. 2, а) в точке LO_{noi}^{SE} :

$$SSV_{noi}^{LO} = SV_{noi}^{LO} - 2\Delta\hat{\delta}_{noi}^{LO}; \quad SLV_{noi}^{LO} = LV_{noi}^{LO} - 2\Delta\hat{\delta}_{noi}^{LO},$$

где $\Delta\hat{\delta}_{noi}^{LO}$ – приведенная к подстилающей поверхности в точке LO_{noi}^{SE} суммарная линейная ошибка наведения, имеющая двумерный нормальный закон распределения [14] и характеризуемая заданной для системы ДЗЗ вероятностью $P(\Delta\hat{\delta}_{noi}^{LO} \leq |o_{noi}^{LO} - \hat{o}_{noi}^{LO}|)$. Разработка модели стохастических параметров работы БСК является отдельной задачей, выходящей за рамки данного исследования.

Модель группового объекта для средства дистанционного зондирования

Было отмечено, что групповой объект ДЗЗ OI_{goi} представляет собой совокупность некоторого числа одиночных объектов OI_{noi} и может быть представлен в общем виде как

$$OI_{goi} = OI_{goi}(noia, noib, \dots) = MO_{goi}^{OI} = \{MO_{noia}^{OI}, MO_{noib}^{OI}, \dots\} = \{\langle (B, L)_{cia} \rangle_{cnoia}, \langle (B, L)_{cib} \rangle_{cnoib}, \dots\},$$

где $noia, noib, \dots$ – идентификаторы одиночных объектов $OI_{noia}, OI_{noib}, \dots$, из которых составлен групповой объект OI_{goi} . Предлагается рассмотреть наиболее простой случай создания группового объекта OI_{goi} на основе двух произвольных одиночных объектов OI_{noia}, OI_{noib} . При этом на первом этапе рассматривается потенциальный групповой объект OI_{poi} .

Пространственный экстендент потенциального объекта SE_{poi}^{*MO} определяется аналогично экстенденту одиночного объекта OI_{noi} , за исключением того, что после преобразования в ПСК «крайние» координаты для каждого измерения вычисляются по всем кортежам одиночных объектов, формирующих групповой объект, например:

$$\min x_{poi} = \text{MIN}[\langle x_{cia} \rangle_{cnoia}, \langle x_{cib} \rangle_{cnoib}] ; \quad \min y_{poi} = \text{MIN}[\langle y_{cia} \rangle_{cnoia}, \langle y_{cib} \rangle_{cnoib}] .$$

Существование группового объекта OI_{goi} возможно в том случае, когда за один сеанс съемки с применением некоторого БСК на борту носителя в пределах маршрута съемки регистрируются изображения двух одиночных объектов OI_{noia}, OI_{noib} . Дистанция OD_{poi}^{LO} между одиночными объектами OI_{noia}, OI_{noib} в потенциальном групповом объекте OI_{poi} будет определяться как расстояние между оценками их пространственного положения LO_{noia}^{SE} и LO_{noib}^{SE} .

На основе стохастической полосы захвата SSV_{poi}^{LO} и стохастической протяженности маршрута SLV_{poi}^{LO} в окрестности LO_{poi}^{SE} можно сформулировать критерий существования группового объекта OI_{goi} логической записью вида

$$\left((\max x_{poi}(\psi_{poi}) - \min x_{poi}(\psi_{poi})) \leq SSV_{poi}^{LO} \right) \wedge \left((\max y_{poi}(\psi_{poi}) - \min y_{poi}(\psi_{poi})) \leq SLV_{poi}^{LO} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow OI_{poi} = \{OI_{noia}, OI_{noib}\} \rightarrow OI_{goi} ,$$

где $\max x_{poi}(\psi_{poi}), \min x_{poi}(\psi_{poi}), \max y_{poi}(\psi_{poi}), \min y_{poi}(\psi_{poi})$ – параметры пространственного экстендента объекта $SE_{poi}^{*MO}(\psi_{poi})$ в ПСК, повернутой на азимут трассы линии визирования ψ_{poi} .

Критерий формулируется следующим образом. Пусть для потенциального группового объекта OI_{poi} его размер поперек трассы линии визирования не превышает значение стохастической полосы захвата SSV_{poi}^{LO} , и размер вдоль трассы линии визирования не превышает значение стохастической протяженности маршрута SLV_{poi}^{LO} . Тогда из одиночных объектов OI_{noia}, OI_{noib} можно сформировать групповой объект ДЗЗ OI_{goi} (рис. 2, б).

На основе пространственного экстендента SE_{goi}^{*MO} может вычисляться оценка положения группового объекта, которая с учетом пересчета в ГГСК имеет вид

$$LO_{goi}^{SE} = (B_{goi}^{LO}, L_{goi}^{LO}) .$$

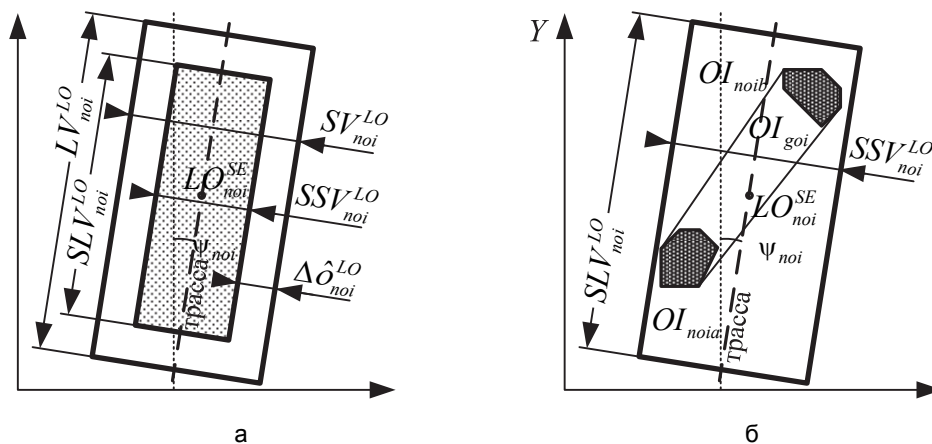


Рис. 2. Формулировка критерия формирования группового объекта OI_{goi} : стохастические параметры SSV и SLV (а); пример выполнения критерия (б)

Метод формирования групповых объектов при текущем планировании ДЗЗ

На основе моделей одиночного и группового объектов, их параметров и критерия формирования группового объекта разработан метод формирования групповых объектов, схема которого представлена на рис. 3. Исходными данными на начальном этапе работы метода являются каталог одиночных объектов ДЗЗ $OI_{\{NOI\}}$ и баллистический прогноз движения КС для периода текущего планирования, на основе которых существующими средствами выполняется разработка предварительной рабочей программы для бортовых обеспечивающих и специальных комплексов. Одним из результатов получения рабочей программы являются данные об условиях наблюдения одиночных объектов OI_{noi} , что позволяет оценить стохастическую полосу захвата SSV_{noi}^{LO} в результате вычисления параметров одиночного объекта SE_{noi}^{*MO} и LO_{noi}^{SE} . На основе полученных компонентов пространственного экстенда SE_{noi}^{*MO} выполняется отсеивание объектов OI_{noi} , пространственные размеры которых превосходят SSV_{noi}^{LO} для условий съемки в точке LO_{noi}^{SE} (рис. 3, этап № 4). Один маршрут съемки по таким крупным объектам характеризуется пространственной недостаточностью, в силу чего требуется разработка сложных схем регистрации данных из нескольких смежных маршрутов.

Следующий этап посвящен формированию на основе всех возможных пар одиночных объектов OI_{noi} перечня потенциальных групповых объектов OI_{poi} . Общее количество объектов OI_{poi} определяется как $NOI' / (2(NOI' - 2)!)!$, где NOI' – число одиночных объектов после отсеивания. Для каждого объекта OI_{poi} вычисляются параметры $SE_{poi}^{*MO}(\psi_{poi})$, LO_{poi}^{SE} , OD_{poi}^{LO} , SLV_{poi}^{LO} и выполняется обратное ранжирование объектов OI_{poi} по значению OD_{poi}^{LO} , т.е. первые ранги присваиваются объектам OI_{poi} с наименьшими значениями дистанции OD_{poi}^{LO} . Кроме того, на основе значений OD_{poi}^{LO} производится отсеивание объектов OI_{poi} , в которых расстояние между одиночными объектами превосходит параметр SLV_{poi}^{LO} (рис. 3, этап № 7). Далее, при ненулевом числе объектов OI_{poi} производится расчет SSV_{poi}^{LO} и полная проверка потенциальных объектов по разработанному критерию формирования группового объекта OI_{goi} согласно очередности после ранжирования. В том случае, когда объект OI_{poi} с некоторыми одиночными объектами OI_{noia} и OI_{noib} успешно проходит проверку по критерию, из последующих потенциальных объектов исключаются объекты, содержащие объекты OI_{noia} и OI_{noib} . По совокупности прошедших проверку объектов OI_{poi} создается промежуточный каталог групповых объектов $OI'_{\{GOI\}}$, для которого повторяются этапы обработки №№ 5–10 (рис. 3). В начале нового цикла объекты каталога $OI'_{\{GOI\}}$ рассматриваются как одиночные. Циклы обработки завершаются в том случае, когда после проверки на этапе № 8 окажется нулевое число потенциальных объектов. В таком случае на основе последнего промежуточного каталога $OI'_{\{GOI\}}$ формируется итоговый каталог $OI_{\{GOI\}}$.

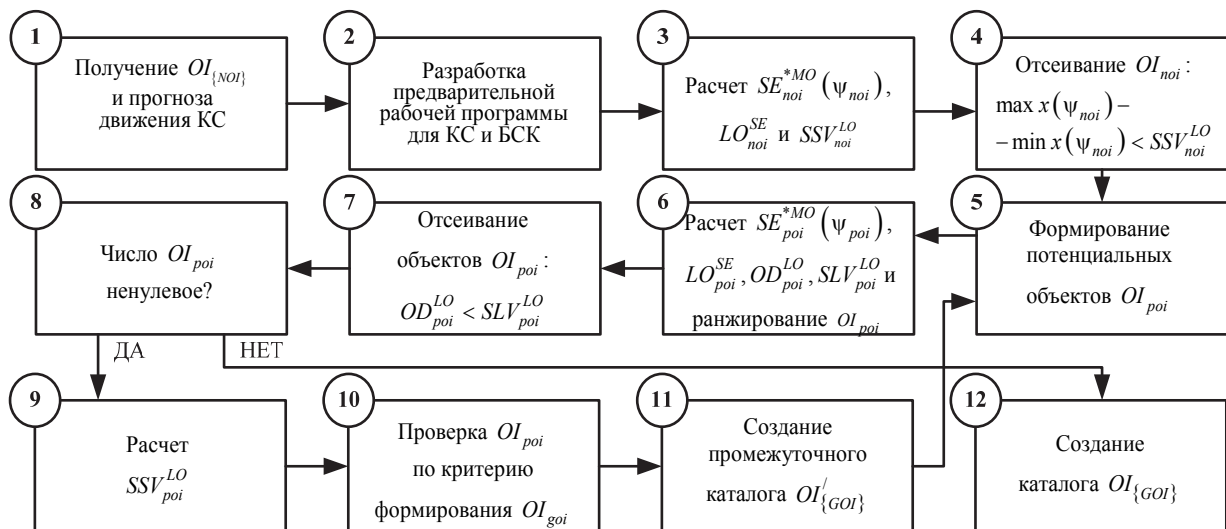


Рис. 3. Основные этапы формирования каталога групповых объектов дистанционного зондирования Земли

Разработанный метод в виде макета программного средства реализован на основе современной геоинформационной системы с развитым инструментарием обработки и анализа пространственных данных в векторном формате. Производятся экспериментальные исследования метода формирования групповых объектов ДЗЗ на различной реальной объектовой обстановке с использованием параметров современных отечественных систем ДЗЗ детального наблюдения, а именно Канопус-В и Ресурс-П.

Заключение

Основными результатами выполненного исследования являются математические модели одиночного и группового объектов, а также метод формирования групповых объектов при текущем планировании дистанционного зондирования Земли. Модель одиночного объекта содержит его представление в виде пространственной маски, на основе которой определяются такие параметры, как пространственный экстенд, оценка положения объекта и условия наблюдения объекта с нестабильного носителя при существовании ошибки прогноза. Модель группового объекта определена в общем виде и подробно рассматривается на примере объединения двух одиночных объектов. В модели скорректировано вычисление пространственного экстенда и сформулирован критерий существования группового объекта. Разработанный метод формирования групповых объектов при текущем планировании съемки содержит ряд этапов обработки данных об объектах с вычислением их новых параметров, стохастических характеристик космического средства и проверку пространственных размеров объектов по значениям стохастической полосы захвата и стохастической протяженности маршрута.

Перспективы развития моделей и метода состоят в учете высот одиночных объектов, что усложняет анализ возможности их объединения при космической съемке. Представленные результаты достаточно хорошо реализуются с применением современных геоинформационных технологий, что обеспечило разработку макета программного средства для исследований в условиях, приближенных к реальным ситуациям. При соответствующей доработке метод может использоваться для планирования съемки групповых объектов с произвольным азимутом.

References

1. Grigor'ev A.N., Shilin B.V. Analysis of seasonal variations of the spectral characteristics of landscape components, using the data of the Hyperion space video spectrometer. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 2013, vol. 80, no. 6, pp. 360–362. doi: 10.1364/JOT.80.000360
2. Chichkova E.F. Rezultaty kosmicheskoi s'emki vostochnoi chasti Finskogo zaliva v 2013 godu [Results of satellite imagery of Finland Gulf at east in 2013]. *Sbornik Materialov XV Mezhdunarodnogo Ekologicheskogo Foruma Den' Baltiiskogo Morya* [Proc. XV Int. Environmental Forum Baltic Sea Day]. St. Petersburg, 2014, pp. 54–55.
3. Grigor'ev A.N., Kritsuk S.G., Tronin A.A., Shilin B.V., Mezenko A.N. Mapping the vegetation of St. Petersburg from the materials of space-based digital multispectral imaging. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 2004, vol. 71, no. 3, pp. 158–164.
4. Grigoriev A.N. The method of formation of objects spectral characteristics on the basis of multitemporal data of space hyperspectral remote sensing. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 175–184. (in Russian)
5. Urlichich Yu.M., Selin V.A., Emel'yanov K.S. O prioritetakh prakticheskoi realizatsii razvitiya kosmicheskoi sistemy distantionnogo razvitiya Zemli [On priorities of practical implementation of the space system of Earth remote development]. *Aerokosmicheskii Kur'er*, 2011, no. 6 (78), pp. 12–19.
6. Pikul A.I., Hegai D.K., Shpak A.V. The evaluation algorithm of the efficient grouping of the low-orbit satellites for the ground objects monitoring. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 3 (73), pp. 66–70. (in Russian)
7. Maurer E., Mrowka F., Braun A., Geyer M.P., Lenzen C., Wasser Y., Wickler M. TerraSAR-X mission planning system: automated command generation for spacecraft operations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 642–648. doi: 10.1109/TGRS.2009.2033469
8. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., Hajnsek I., Werner M., Younis M., Zink M. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, vol. 45, no. 11, pp. 3317–3341. doi: 10.1109/TGRS.2007.900693
9. Gorbulin V.I., Zozulya L.P., Kargu D.L., Kotyashov E.V., Chernyavskii V.A. Operativnyi raschet intervalov nablyudeniya zadannoi dlitel'nosti kosmicheskikh apparatov na krugovykh i ellipticheskikh orbitakh [Operational calculation of observation intervals specified duration spacecraft into circular and elliptic orbits]. *Voprosy Elektromekhaniki*, 2012, vol. 131, p. 19–22.
10. Lippittab C.D., Stow D.A., Clarke K.C. On the nature of models for time-sensitive remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, vol. 35, no. 18, pp. 6815–6841. doi: 10.1080/01431161.2014.965287

11. Anglberger H., Tailhades S., Suess H. An image acquisition planning tool for optimizing information content in image data of spaceborne SAR systems. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2011, vol. 8179, art. 81790A. doi:10.1117/12.898141
12. Schott J.R., Gerace A.D., Brown S.D., Gartley M.G. Modeling the image performance of the landsat data continuity mission sensors. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2011, vol. 8153, art. 81530F. doi:10.1117/12.893675
13. Holst G.C. Imaging system fundamentals. *Optical Engineering*, 2011, vol. 50, no. 5, art. 052601. doi: 10.1117/1.3570681
14. Fedulov R.V., Shishkin A.S. Pointing of optical equipment of small remote sensing spacecraft. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika*, 2013, no. 2 (22), pp. 97–104. (in Russian)
15. Polyakov A.Yu., Treskov V.V., Demidov V.M. Image linear shifts and rotation angle estimation for electronic optical system movement relatively to observable scene. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 4 (68), pp. 118–119. (in Russian)

- | | |
|------------------------------------|---|
| <i>Григорьев Андрей Николаевич</i> | – кандидат технических наук, докторант, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, Grig-AN@ya.ru |
| <i>Замарин Александр Иванович</i> | – доктор технических наук, профессор, профессор, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, e8@mail.ru |
| <i>Караваяев Максим Николаевич</i> | – заместитель начальника научно-тематического отдела, Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга, Москва, 105066, Российская Федерация, kmn.2693@yandex.ru |
| <i>Andrey N. Grigoriev</i> | – PhD, postdoctoral student, A.F. Mozhaiskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, Grig-AN@ya.ru |
| <i>Alexander I. Zamarin</i> | – D.Sc., Professor, Professor, A.F. Mozhaiskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, e8@mail.ru |
| <i>Maksim N. Karavaev</i> | – Deputy Head of the Scientific and Thematic Section, Central Research Radio Engineering Institute n.a. academician A.I. Berg, Moscow, 105066, Russian Federation, kmn.2693@yandex.ru |