

ПЛАНИРОВАНИЕ СЪЕМКИ ПЛОЩАДНЫХ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ ГРУППИРОВКОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2018 В.А. Галузин, Е.В. Симонова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 12.12.2018

Рассматривается проблема планирования съемки площадных объектов наблюдения группировкой космических аппаратов. Приводятся основные ограничения, а также критерий оценки эффективности расписания работы группировки космических аппаратов. Выполняется обзор существующих подходов к решению данной проблемы. Предлагается методика составления плана работы целевой аппаратуры группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, позволяющая эффективно использовать доступные ресурсы для оптимизации процесса съемки площадного объекта наблюдения. Описывается разработанный прототип модуля планирования целевого применения группировки космических аппаратов. Обосновываются преимущества предложенного подхода к планированию съемки площадных объектов наблюдения группировкой космических аппаратов.

Ключевые слова: планирование, площадные объекты наблюдения, группировка космических аппаратов, наземные станции, дистанционное зондирование Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одним из основных способов получения актуальной информации о состоянии Земли и находящихся на ее поверхности объектах, а анализ большого количества данных, накопленных за длительный период, дает возможность произвести более точную оценку исследуемого процесса в динамике, что позволяет достичь эффективного планирования действий и принятия решений. Информация, полученная в результате анализа снимков ДЗЗ, применяется во многих областях: сельском хозяйстве, геологических и гидрологических исследованиях, в военной сфере, при ликвидации последствий стихийных бедствий, при создании планов территорий и в других сферах деятельности.

Процесс развития систем дистанционного зондирования сопровождается расширением рынка космических услуг, привлечением новых клиентов и, как следствие, повышением требований к оперативности получения данных и их информационной эффективности. Однако применение одиночного спутника ДЗЗ накладывает серьезные ограничения на пространственное покрытие, оперативность и качество получаемых данных. В связи с этим, одной из перспективных тенденций в области ДЗЗ является создание космических систем (КС), включающих в свой состав группировку космических аппаратов (КА), различных по характеристикам борто-

вой аппаратуры [1-2]. Также в состав КС входят наземные базовые станции (НС), на которые КА осуществляют сброс собранных данных и получают программу последующей съемки. В результате применения группировок КА увеличивается частота просмотра поверхности, значительно возрастает размер исследуемых территорий, что позволяет удовлетворить требования потребителя и эффективно использовать все имеющиеся ресурсы, но при этом необходимо динамическое согласование планов функционирования участников группировки в режиме реального времени.

Объекты наблюдения с точки зрения планирования работы целевой аппаратуры группировки КА можно разделить на точечные и площадные (Рисунок 1). Точечный объект имеет небольшие размеры, и его снимок может быть получен за один пролет. Для съемки площадного объекта наблюдения необходимо некоторое количество пролетов КА, в ходе которых будет получено множество смежных снимков, целиком покрывающих заданный район наблюдения.

В данной работе рассматриваются КА с двумя степенями свободы: по крену θ и по тангажу ϕ . Изменение угла поворота КА по крену позволяет расширить полосу видимости с левой или с правой стороны траектории движения КА. Изменение угла наклона КА по тангажу позволяет изменить время начала съемки. Таким образом, появляется возможность съемки большего количества областей за один пролет (Рисунок 2), что обеспечивает множество альтернативных вариантов съемки. В связи с этим составление оптимального плана наблюдения заданного района становится сложной задачей оптимизации с множеством критериев и ограничений.

Галузин Владимир Андреевич, магистрант.

E-mail: vladimir.galuzin@gmail.com

Симонова Елена Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий. E mail: simonova.elena.v@gmail.com

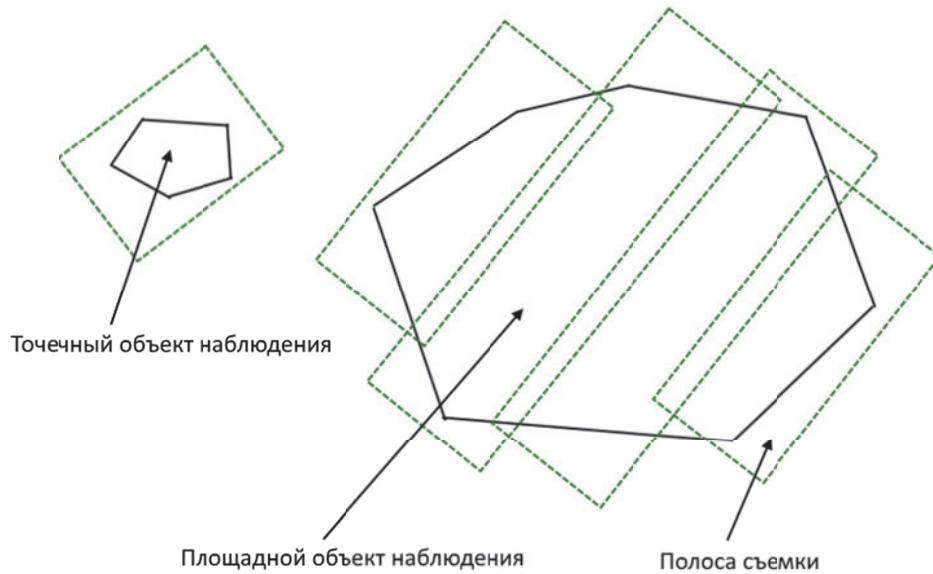


Рис. 1. Точечный и площадной объект наблюдения

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения задачи составления плана работы целевой аппаратуры группировки КА ДЗЗ разрабатывается система планирования, основанная на мультиагентном подходе, в соответствии с которым, искомый план функционирования группировки строится путем самоорганизации отдельных агентов различных типов, например, задач и ресурсов, на основе их конкуренции и кооперации [3]. При этом появляется возможность адаптивной корректировки ранее построенного плана по мере возникновения новых событий без останова и перезапуска системы. Ограничением данного подхода является возможность планирования съемки только точечных объектов наблюдения. Поэтому возникает необходимость расширения существующей методики для планирования съемки площадных объектов.

Для автоматизации построения плана работы целевой аппаратуры КА ДЗЗ используется упрощенная математическая модель работы космической системы, производящей съемку заданного района наблюдения. В данной модели каждый КА характеризуется элементами орбиты и характеристиками установленной аппаратуры. Параметры наземной станции включают ее расположение, скорости приема и передачи данных, угол раствора, а также возможность ее использования для отправки программы съемки и/или приема полученных снимков. Район наблюдения представляется в виде набора координат точек полигона (широта/долгота), ограничивающего его.

Заданы интервал времени, в который необходимо произвести съемку, и ограничения по условиям съемки (облачность, минимальный

угол возвышения Солнца и т.д.), ограничения на характеристики применяемой съемочной аппаратуры и ограничения по пространственному разрешению и взаимному перекрытию полученных снимков.

Необходимо составить план работы целевой аппаратуры КА, оптимальный с точки зрения целевой функции (ЦФ) (1), в соответствии с критерием минимизации времени окончания съемки заданного района, отдавая приоритет снимкам с наилучшим пространственным разрешением, минимальными углами крена и тангажа и минимальным перекрытием.

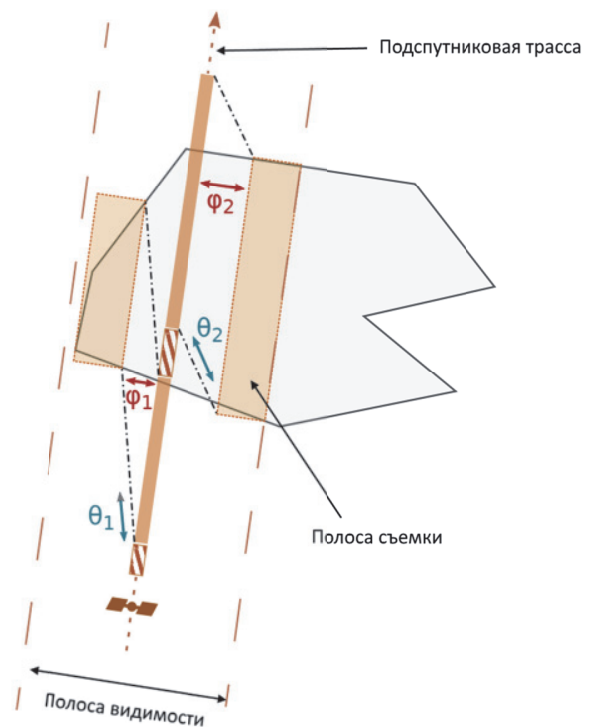


Рис. 2. Съемка КА с двумя степенями свободы

$$\text{ЦФ} = a_1 \left(1 - \frac{\max(t_j)}{\tau_{\max}} \right) + a_2 \left(1 - \frac{\min(res_j)}{res_{\min}} \right) + a_3 \left(1 - \frac{roll_j}{rollMax_j} \right) + a_4 \left(1 - \frac{pitch_j}{pitchMax_j} \right) + a_5 \frac{S_{\text{рн набл}}}{\sum_j^m s_j} \rightarrow \max,$$

где: m – количество сделанных снимков,

t_j – время съемки j -го снимка;

res_j – пространственное разрешение j -го снимка;

$roll_j$ – угол крена КА при съемке j -го снимка;

$pitch_j$ – угол тангажа КА при съемке j -го снимка;

s_j – площадь покрытия j -го снимка;

τ_{\max} – предельное время съемки заданной территории;

res_{\min} – минимально допустимое разрешение снимка;

$rollMax_j$ – максимально возможный угол крена КА для j -го снимка,

$pitchMax_j$ – максимально возможный угол тангажа КА для j -го снимка;

$S_{\text{рн набл}}$ – площадь района наблюдения;

$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 1$ – весовые коэффициенты.

Важной особенностью задачи является необходимость учета динамического изменения ограничений и ресурсов для планирования по событиям, к которым относятся поступление новой задачи или изменение ее параметров, изменение погодных условий, выход из строя ресурса КА или средств связи, погрешность или сбой в получении результатов съемки и т.д.

2. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ

В настоящее время существует достаточно большое количество разработок в данной области. Однако большинство из них ориентированы на одиночные КА и не могут быть спроецированы на группировки большой размерности. Кроме того, алгоритмы планирования, описанные в данных работах, основываются на предопределенном наборе возможных вариантов съемки, без описания методики их получения, поэтому они описывают решение только части проблемы. В работе [4] предложен многокритериальный эволюционный алгоритм оптимизации по четырем критериям: общему количеству сделанных снимков, суммарной прибыли, качеству полученных изображений и балансировке нагрузки между КА. В статье [5] рассматривается аппаратно-программный комплекс преддоговорного оперативного анализа реализуемости выполнения заказов ДЗЗ, целью разработки которого является создание автоматизированной системы оперативного анализа реализуемости заказов на космическую съемку с учетом ресурсов двух космических аппаратов, обеспечиваю-

щей поддержку принятия решений на преддоговорном этапе коммерческой деятельности. В работе [6] описывается решение задачи планирования путем ее разделения на подзадачи планирования работы одиночных КА, оптимальное решение для которых находится при помощи алгоритма имитации отжига, с последующим объединением полученных решений в общий план с применением муравьиного алгоритма.

3. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Для планирования работы целевой аппаратуры группировки КА ДЗЗ площадной объект наблюдения разделяется на множество смежных полос съемки. Затем производится динамический поиск возможных вариантов съемки полученных полос, отсортированных по значению ЦФ, и составление из них плана съемки заданного района наблюдения.

При разбиении района наблюдения из группировки КА выбирается некоторое множество аппаратов со схожими орбитальными параметрами. Далее определяются максимально возможные размеры полосы, которую может снять за один пролет каждый КА из данной группы. После этого производится тесселяция площадного объекта на полосы, совпадающие по азимутальному направлению с траекторией движения КА, не превышающие по своим размерам найденный полигон, с учетом ограничений на их взаимное перекрытие (Рисунок 3).

Возможный вариант съемки включает интервал времени, в течение которого может производиться отправка наземной станцией КА программы для последующей съемки, интервал времени в течение которого может производиться съемка заданного точечного объекта наблюдения, и интервал времени, в течение которого возможен сброс отснятых изображений на базовую станцию.

Расчет интервалов видимости КА наземного объекта производится по следующему алгоритму. В начале рассчитывается время, за которое КА совершает виток вокруг Земли. Затем весь интервал времени, за которое необходимо произвести съемку площадного объекта, разбивается на интервалы, равные продолжительности одного витка. Далее на полученных интервалах при помощи метода золотого сечения осуществляется поиск момента времени, в который КА максимально приближен к наземному объекту и выполняются ограничения на допустимый угол возвышения. Если такой момент времени найден, рассчитывается интервал видимости, на котором выполняются условия ограничения по маневренности аппарата.

Схема алгоритма динамического поиска возможных вариантов съемки представлена на ри-

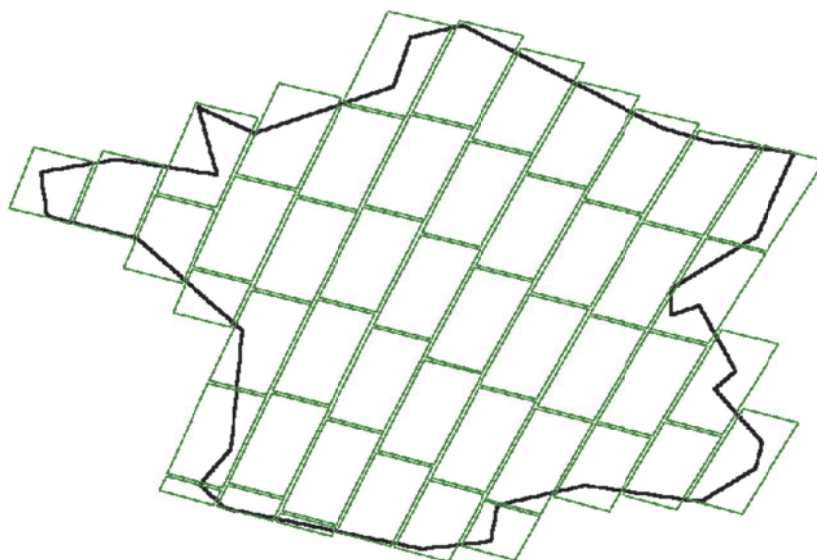


Рис. 3. Тесселяция района наблюдения

сунке 4. Поиск производится итерационно. Для каждой полосы съемки находится наилучший с точки зрения ЦФ вариант съемки. Затем выполняется попытка запланировать на него съемку. Если попытка завершилась удачно, найденный вариант съемки добавляется в общее расписание съемки заданного района наблюдения. Если же в процессе планирования возникли конфликты, производится попытка разделить данный вариант съемки на несколько вариантов, в которых конфликты отсутствуют. При удачном завершении процесса разделения из полученных вариантов выбирается вариант съемки, наилучший с точки зрения ЦФ, и добавляется в расписание. В противном случае поиск возможных вариантов для данной полосы съемки продолжается.

4. ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ

Рассмотренная методика реализована в прототипе модуля планирования работы целевой аппаратуры группировки КА ДЗЗ при наблюдении площадных объектов, выполняющего построение плана в интеграции с внешней системой планирования целевого применения группировки КА ДЗЗ. Модуль разработан на языке Java с применением фреймворка Spring [7] (рисунок 4). Для реализации алгоритмов, связанных с расчетом баллистики, используется низкоуровневая библиотека динамики пространства Orekit (ORbits Extrapolation KIT) [8]. На рисунке 5 представлена структурная схема модуля планирования работы целевой аппаратуры группировки КА ДЗЗ и его взаимодействия с внешней системой планирования.

Внешняя система передает в модуль исходные данные и заявку на планирование, после чего модуль производит поиск оптимального плана съемки, который содержит список полос

съемки заданного района наблюдения, для каждой из которых указана следующая информация:

- КА, выполняющий съемку;
- наземная станция, осуществляющая передачу программы съемки, и время ее приема;
- время начала и окончания работы съемочного оборудования;
- углы крена и тангажа КА;
- наземная станция, осуществляющая прием результатов съемки, и время их передачи.
- координаты полигона, ограничивающего полосу.

Полученное решение передается во внешнюю систему планирования, которая, после получения планов съемки для всех районов наблюдения, включает его в общий план целевого применения группировки КА ДЗЗ или запрашивает у модуля планирования другое решение с учетом новых ограничений, возникших в результате задействования ресурсов при съемке других районов наблюдения.

Взаимодействие с пользователем осуществляется с помощью веб-интерфейса (Рисунок 6). В левой части веб-страницы расположено меню, при помощи которого можно перейти на вкладки с исходными данными для планирования (КА, наземные станции, объекты наблюдения и т.д.), результатами планирования, представленными в табличном виде и в виде диаграммы Ганта, аналитическими данными и трехмерной моделью. Внесение изменений в исходные данные влечет автоматическое перестроение существующего расписания.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для демонстрации возможностей прототипа модуля планирования был поставлен эксперимент, демонстрирующий добавление задачи на

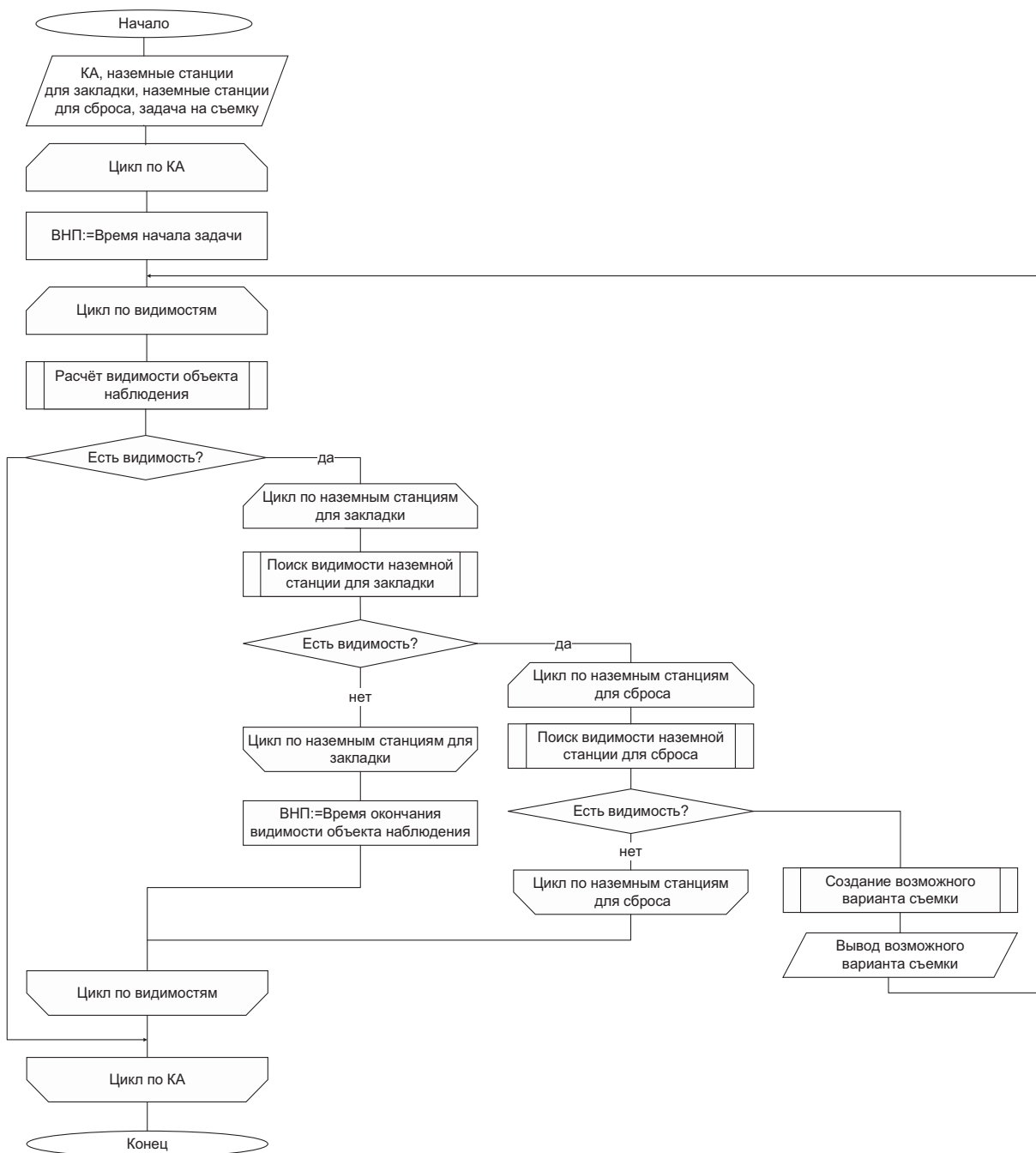


Рис. 4. Схема алгоритма поиска возможных вариантов съемки

съемку площадного объекта наблюдения, добавление и удаление ресурсов.

Изначально в системе задана группировка из трех космических аппаратов $\{KA_1, KA_2, KA_3\}$ и двух наземных станций приема/передачи $\{НС_1, НС_2\}$. Добавим задачу на съемку района наблюдения площадью 541 км², представленного на рисунке 7. Зададим сроки выполнения заявки в течение 12 часов с 10:00 до 22:00.

Для планирования район был разделен на три полосы съемки $\{ПС_1, ПС_2, ПС_3\}$ (Рисунок 8). При этом для планирования были выбраны два космических аппарата – KA_1 и KA_2 с одинаковыми траекториями движения. Результат планирования съемки полученных полос представлен в таблице 1.

Добавим еще одну базовую станцию $НС_3$, расположенную ближе к данному району наблюдения, чем станция $НС_1$. В результате задача сброса снимка $ПС_3$ заняла более выгодное положение, улучшив тем самым общую оценку расписания (Таблица 2).

Теперь удалим KA_1 . Задачи, запланированные на удаленный КА, будут вынуждены перепланироваться на KA_2 , что приведет к перестройке плана съемки (Таблица 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была предложена методика составления плана работы целевой аппаратуры

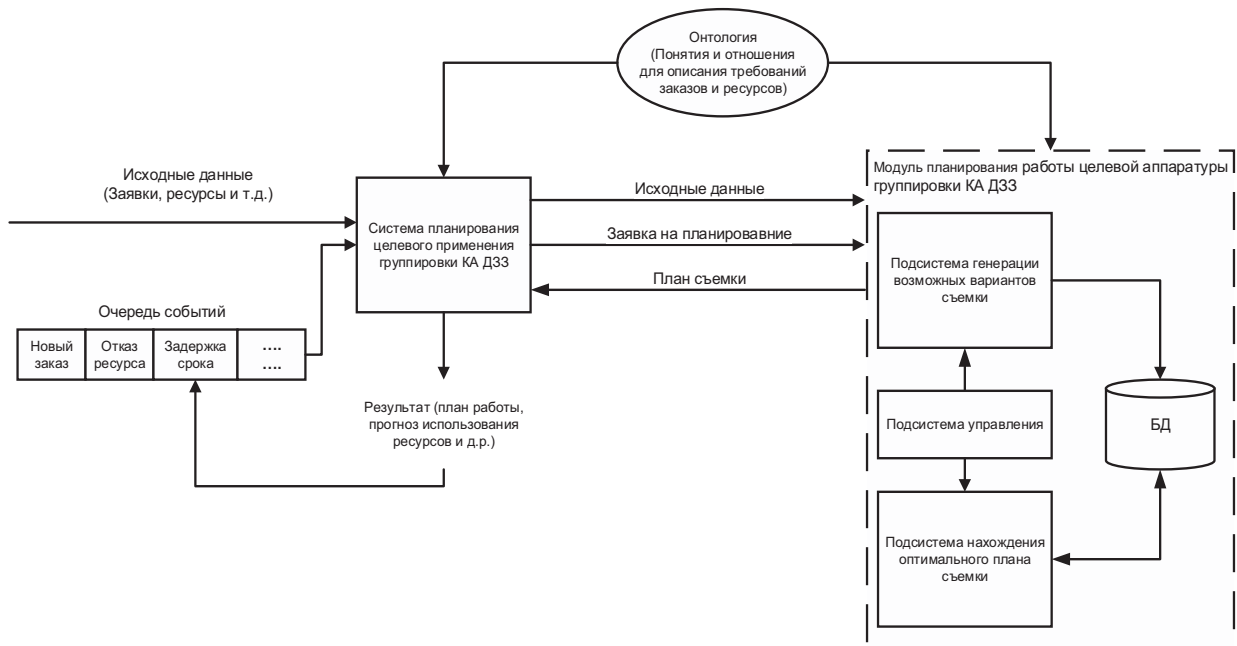


Рис. 5. Структурная схема модуля планирования

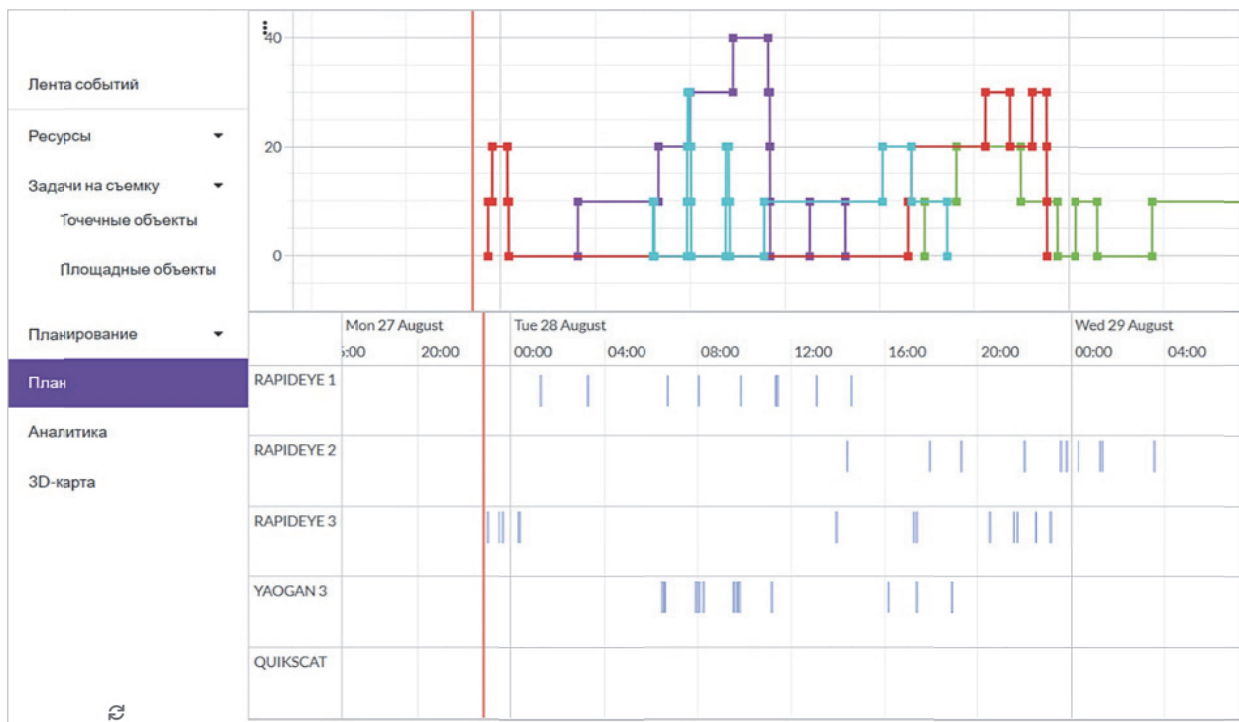


Рис. 6. Экран прототипа системы планирования целевого применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

группировки КА ДЗЗ, позволяющая эффективно использовать доступные ресурсы для оптимизации процесса съемки площадного объекта наблюдения. Предложена математическая модель работы космической системы, производящей съемку заданного района. Описаны упрощенные алгоритмы расчета интервалов видимости КА наземного объекта и динамического поиска возможных вариантов съемки.

Разработанный программный прототип модуля планирования работы целевой аппаратуры

группировки КА ДЗЗ подтвердил перспективность предложенной методики благодаря свойствам масштабируемости и открытости, а также гибкости, обеспечиваемой оперативной реакцией на возникающие события.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дарнопых, В.В. Автоматизация параметрического анализа целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования



Рис. 7. Район наблюдения

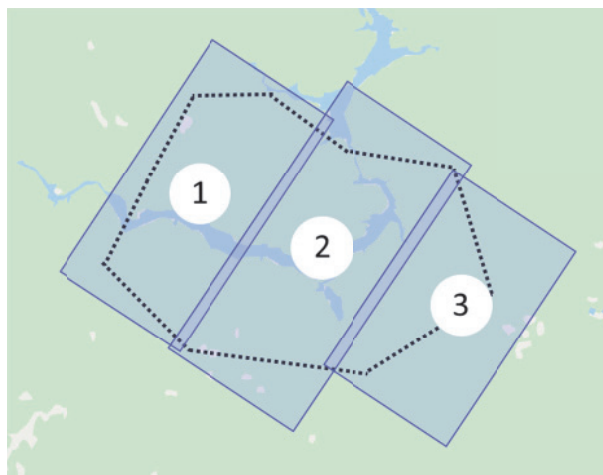


Рис. 8. Полосы съемки

Таблица 1. Первоначальный план съемки

ПС	КА	НС передачи и время закладки	Время съемки	Углы крена и тангажа	НС приема и время сброса
1	1	НС ₁ / 12:17:36	12:23:05 – 12:23:13	18,52°/25,41°	НС ₂ / 12:37:41 – 12:37:45
2	1	НС ₁ / 12:45:51	13:01:57 – 13:02:07	18,87°/25,39°	НС ₂ / 13:17:33 – 13:17:38
3	2	НС ₂ / 13:42:32	14:19:22 – 14:19:28	7,12°/31,03°	НС ₁ / 14:41:15 – 14:41:18

Таблица 2. План съемки после добавления новой наземной станции

ПС	КА	НС передачи и время закладки	Время съемки	Углы крена и тангажа	НС приема и время сброса
1	1	НС ₁ / 11:17:36	11:23:05 – 11:23:13	18,52°/25,41°	НС ₂ / 11:37:41 – 11:37:45
2	1	НС ₁ / 12:45:51	13:01:57 – 13:02:07	17,67°/25,39°	НС ₂ / 13:17:33 – 13:17:38
3	2	НС ₂ / 13:42:32	14:19:22 – 14:19:28	7,12°/31,03°	НС ₃ / 14:26:04 – 14:26:07

Таблица 3. План съемки после удаления КА

ПС	КА	НС передачи и время закладки	Время съемки	Углы крена и тангажа	НС приема и время сброса
1	2	НС ₂ / 17:10:06	17:31:06 – 17:31:14	4,93°/30,98°	НС ₃ / 17:50:07 – 17:50:11
2	2	НС ₂ / 15:39:48	15:58:45 – 15:58:55	6,07°/31,11°	НС ₃ / 16:17:41 – 16:17:46
3	2	НС ₂ / 13:42:32	14:19:22 – 14:19:28	7,12°/31,03°	НС ₃ / 14:26:04 – 14:26:07

- Земли/ В.В. Дарнопых, И.В. Усовик// Электронный журнал «Труды МАИ» [Электронный ресурс]. URL: – <http://trudymai.ru/upload/iblock/d83/avtomatizatsiya-parametricheskogo-analiza-tselevogo-funktsionirovaniya-kosmicheskikh-sistem-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli.pdf> (дата обращения 10.03.2018).
2. Дарнопых, В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ/ В.В. Дарнопых, И.В. Усовик// Электронный журнал «Труды МАИ» [Электронный ресурс]. URL: <http://trudymai.ru/upload/iblock/b04/b0489e8a6d6dfc68189905fb36860979.pdf> (дата обращения 10.03.2018).
 3. Скобелев, П.О. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий/ П.О. Скобелев, В.К. Скимунт, Е.В. Симонова, А.А. Жилиев, В.С. Травин// Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015, №10 (171). – С. 60-70.
 4. Sun, K., Li, J., Chen, Y., and He, R., “Multi-objective Mission Planning Problem of Agile Earth Observing Satellites” // Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations. – 2012, vol. 4. – P. 2802–2810.
 5. Золотой С.А. Автоматизированная система оперативного анализа реализуемости дистанционного зондирования земли / С.А. Золотой, Н.А. Архипова, В.М. Корзун, В.Д. Костюченко, О.Э. Куприянец, А.Л. Соболев // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016, № 3. – С. 4-11.
 6. Li, J., Yao, F., Bai, B., and He, R., “A Decomposition-Based Algorithm for Imaging Satellites Scheduling Problem” // 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science. – IEEE Xplore, 2009. – P. 1-6.
 7. Spring Boot [Электронный ресурс]. URL: <https://spring.io/projects/spring-boot> (дата обращения 17.04.2018).
 8. Orekit [Электронный ресурс]. URL: <https://www.orekit.org> (дата обращения 17.04.2018).

PLANNING THE SURVEYING OF AREA OBSERVATION OBJECTS BY A GROUP OF SPACECRAFTS

© 2018 V.A. Galuzin, E.V.Simonova

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The paper addresses the problem of planning the surveying of area observation objects by a group of spacecrafts. The main limitations are given, as well as the criterion for evaluating efficiency of the schedule of a spacecraft group. A review of existing approaches to solving this problem is provided. The paper also proposes methodology for creating a work plan for target equipment of the spacecraft group for Earth remote sensing. This methodology makes it possible to effectively use available resources to optimize the process of surveying an area observation object. The developed prototype of the planning module for target application of the spacecraft group is described. The paper specifies advantages of the proposed approach to planning of the surveying of area observation objects by a group of spacecrafts.

Keywords: planning, area observation objects, group of spacecrafts, ground stations, Earth remote sensing.

Vladimir Galuzin, Graduate Student.

E-mail: galuzin@smartsolutions-123.ru

Elena Simonova, PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Chair of Informatics and Information Technology. E-mail: simonova.elena.v@gmail.com