

УДК 629.783:621.396

МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ОБЗОРНОМ РЕЖИМЕ

© 2013 А. М. Безняков, В. И. Горбулин, Д. Л. Каргу, А. С. Фадеев, В. И. Щербаков

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Статья посвящена оптимизации плана применения космических аппаратов орбитальной системы дистанционного зондирования Земли в обзорном режиме при наблюдении обширных территорий. Предложено контролируемую область на сфере описывать совокупностью непересекающихся областей Дирихле – сферических многоугольников с одинаковыми радиусами описанной окружности. Каждый центр области Дирихле (узловая точка) в любой момент времени характеризуется некоторым коэффициентом приоритета, который зависит от значимости района и от длительности интервала времени после последнего наблюдения данной точки одним из спутников орбитальной системы. Целевой функцией в оптимизационной задаче применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли является суммарное значение коэффициентов важности тех узловых точек, которые включены в план применения космических аппаратов. Предложен алгоритм решения сформулированной задачи комбинаторной оптимизации с учетом ограничений на расход электроэнергии и на объемы накапливаемой и передаваемой потребителю целевой информации.

Бортовая специальная аппаратура, обзорный режим, ограничения, обширные территории, контролируемая область, приоритет, интервал, план применения.

Одним из перспективных направлений улучшения показателей качества функционирования орбитальных систем (ОС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – производительности, периодичности, оперативности – является совершенствование организации согласованного применения космических аппаратов (КА). Теоретическую основу этой задачи составляют методы оптимизации планирования процесса целевого применения ОС. Применение ОС ДЗЗ предполагает использование двух режимов – детального (прожекторного) и обзорного, для каждого из которых соответствующая задача планирования является уникальной. В то же время задача планирования для обзорного режима является менее изученной. Объясняется это тем, что детальный режим используется для мониторинга сравнительно небольших участков земной поверхности, соизмеримых по площади с зоной обзора КА (например, локальных очагов лесных пожаров, районов браконьерского вылова, мониторинга

чрезвычайных ситуаций). В этом случае с математической точки зрения возникает сравнительно простая задача. В научно-технической литературе достаточно широко представлено описание задач планирования и методов их решения для орбитальных систем связи и детального (прожекторного) наблюдения заданных объектов [1-6]. Действительно, при наблюдении локальных районов ограничения на расход электроэнергии и на объемы накапливаемой целевой информации не являются критическими. При анализе комбинаторной задачи выбора в этих условиях реализация принципа «идти в ближайшую точку» даёт хороший результат при малых вычислительных затратах. Поэтому до последнего времени не возникало необходимости формализации задачи планирования обзорного режима наблюдения и разработки соответствующих теоретических методов. Однако в последнее время возникают новые задачи: геофизический мониторинг территории Российской Федерации и приполярных районов, контроль

состояния северного морского пути и арктического континентального шельфа, международная задача поиска пиратов в морских и океанских акваториях, характерные охватом больших территорий и высокой оперативностью предоставления целевой информации. В новых условиях актуальной становится задача учёта ограничений на расход электроэнергии и на объёмы накапливаемой целевой информации. Вследствие этого и реализация принципа «идти в ближайшую точку» не будет обеспечивать получение требуемого качества плана применения ОС. Поэтому возникает новая задача обоснования согласованного плана применения ОС ДЗЗ в обзорном режиме.

Одной из подзадач планирования применения ОС ДЗЗ в обзорном режиме является математическое описание контролируемой области (КО) площадью, в десятки-сотни раз превышающей площадь зоны обзора КА. Решением этой задачи может послужить описание КО совокупностью непересекающихся областей Дирихле – сферических многоугольников с одинаковыми радиусами описанной окружности [7]. Центр области Дирихле, называемый в дальнейшем узловой точкой, имеет в рассматриваемой задаче планирования ключевое значение. С помощью узловых точек выполняются координатная привязка области Дирихле на сфере и ранжирование КО по степени важности. Обозначим узловую точку $M_r : M(j_r, \lambda_r, K_r^{pr})$, $r = 1,.., R$, где R – общее количество узловых точек, j_r – широта, λ_r – долгота и K_r^{pr} – коэффициент приоритета r -й узловой точки.

Другой подзадачей является расчёт временных интервалов зондирования КО. Сложность решения этой задачи обусловлена её комбинаторным характером при наличии ограничений на расход электроэнергии и на объёмы накапливаемой и передаваемой

потребителю целевой информации. Необходимость учёта этих ограничений связана с высокими энергозатратами и большими объёмами целевой информации при зондировании обширных КО. Ограничения по расходу электроэнергии и объёму накапливаемой и передаваемой информации учитываются путём сведения их к предельному времени работы бортовой специальной аппаратуры (БСА) $\tau_{\text{пред}} = \min(\tau_{\text{ЭП}}^{\text{пред}}, \tau_{\text{ЗУ}}^{\text{пред}})$, где $\tau_{\text{ЗУ}}^{\text{пред}}$ – предельное время накопления информации в зависимости от пропускной способности каналов передачи информации и объёма бортового запоминающего устройства, $\tau_{\text{ЭП}}^{\text{пред}}$ – предельное время работы БСА на текущем интервале применения КА в зависимости от возможностей его системы электроснабжения.

Таким образом, расчёт временных интервалов зондирования КО сводится к расчёту интервалов времени включения и выключения БСА для наблюдения узловых точек с учётом ограничения на предельное время работы БСА. При этом полагается, что КА находится на круговой орбите, а БСА функционирует в обзорном режиме. Под обзорным режимом понимается наблюдение подстилающей поверхности в полосе обзора БСА, ширина которой равна диаметру мгновенной зоны обзора БСА (рис. 1).

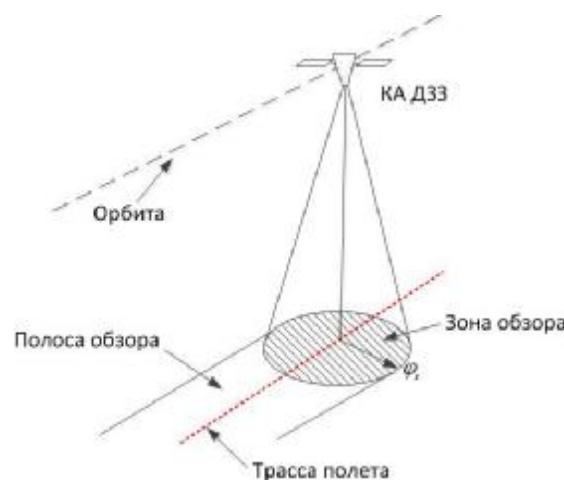


Рис. 1. Зона и полоса обзора КА ДЗЗ

В обзорном режиме работы БСА перенацеливание оси конуса обзора не производится. Планирование применения БСА КА ДЗЗ осуществляется на период накопления целевой информации между сеансами связи с наземными потребителями $T_{\text{прим}}$.

Баллистические условия наблюдения узловых точек M_r на интервале применения $T_{\text{прим}}$ характеризуются моментами времени входа и выхода их из зоны обзора, которые образуют интервалы наблюдения $T_s^{\text{набл}} = [t_s^{\text{в нач}}, t_s^{\text{в кон}}]$, $s=1,..,S$, где S – количество узловых точек, попавших в полосу обзора КА, $t_s^{\text{в нач}}$ и $t_s^{\text{в кон}}$ – время начала и время окончания интервала. Если расстояние между узловыми точками меньше диаметра мгновенной зоны обзора БСА КА, то соответствующие интервалы наблюдения будут пересекаться, образуя интервалы пересечения $T_i^{\text{перес}}$, $i=1,..,I$, где I – количество интервалов пересечения.

Фактические же условия наблюдения определяются по времени непосредственного функционирования БСА, охватывающим одним включением одну или несколько узловых точек, попавших в зону обзора КА в интервале $T_k^{\text{функци}}$ = $[t_k^{\text{нач}}, t_k^{\text{кон}}]$, $k=1,..,K$, где k – номер включения, K – количество включений БСА в интервале $T_{\text{прим}}$. Интервалы функционирования $T_k^{\text{функци}}$

характеризуются длительностью $\tau_k^{\text{функци}}$ (в зависимости от принципа съёмки БСА) и значением коэффициента приоритета K_k^{pr} , который определяется в виде суммы приоритетов узловых точек, просмотренных на k -м интервале функционирования $T_k^{\text{функци}}$. Полученные по определённому правилу и удовлетворяющие принятым ограничениям интервалы функционирования БСА $\{T_k^{\text{функци}}$ $\}$ образуют план работы БСА.

Математическая постановка задачи имеет следующий вид.

Пусть заданы интервал применения $T_{\text{прим}}$, длительность включения БСА $\tau^{\text{функци}}$, предельное время работы БСА $\tau^{\text{пред}}$ на интервале $T_{\text{прим}}$. Требуется определить множество интервалов функционирования $\{T_k^{\text{функци}}$ $\}$ КА на интервале применения $T_{\text{прим}}$ такое, чтобы сумма коэффициентов приоритета всех узловых точек M_r , попавших в зону обзора КА на интервале $T_{\text{прим}}$ и включённых в план работы БСА, была максимальной: $\sum_{k=1}^K K_k^{pr} \rightarrow \max$, а суммарная длительность функционирования БСА была меньше предельного допустимого времени его работы: $\sum_{k=1}^K \tau_k^{\text{функци}} \leq \tau^{\text{пред}}$.

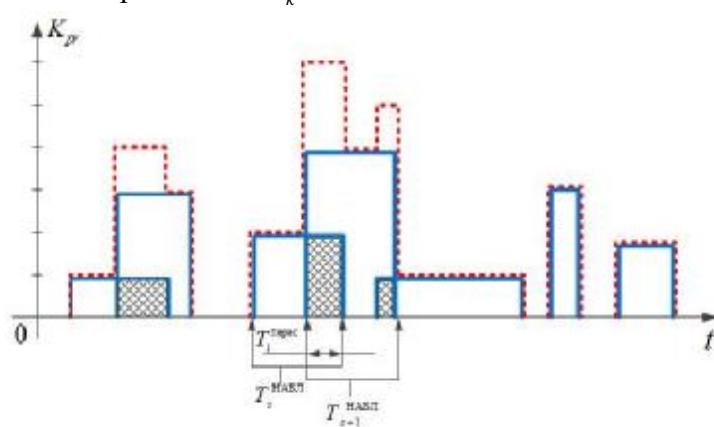


Рис. 2. Циклограмма предварительного плана работы БСА

Методика решения задачи состоит в следующем.

1. Составляется предварительный план работы БСА. Для этого на каждом интервале $T_{\text{ПРИМ}}$ методом наложения орбитальных карт [8] определяется подмножество узловых точек $\{M_s\}$, попавших в полосу обзора, и временные интервалы их наблюдения $\{T_s^{\text{НАБЛ}}\}$. На хронологической оси определяются интервалы пересечения $T_i^{\text{перес}}$ для времён наблюдения близлежащих узловых точек. На рис. 2 изображена циклограмма предварительного плана работы БСА. По оси абсцисс отложено время, а по оси ординат отложены значения коэффициента приоритета K^{pr} . Сплошной линией обведены отдельные интервалы наблюдения узловых точек, а пунктирными – объединённые интервалы, в которые включены интервалы пересечения $T_i^{\text{перес}}$ с коэффициентами приоритета, равными сумме коэффициентов приоритета узловых точек, попавших в эти интервалы: $K_i^{pr} = \sum_{p=1}^P K_p^{pr}$, где P – количество узловых точек наблюдаемых в i -м интервале пересечения. Если интервалы $T_s^{\text{НАБЛ}}$ не пересекаются, то $T_i^{\text{перес}} = T_s^{\text{НАБЛ}}$ (рис. 2). Расчёт интервалов пересечения $T_i^{\text{перес}}$ выполняется по алгоритму суммирования кусочно-постоянных функций, изложенном в работе [9].

2. Из всего множества интервалов $\{T_i^{\text{перес}}\}$ выбирается интервал $T_{\text{max}}^{\text{перес}}$ с максимальным значением коэффициента приоритета i^* : $K_{i^*}^{pr} = \max_{i \in 1, \dots, I} \{K_i^{pr}\}$, $T_{\text{max}}^{\text{перес}} = T_{i^*}^{\text{перес}}$, где i^* – номер интервала пересечения $T_i^{\text{перес}}$ с максимальным значением K_i^{pr} .

3. Находится середина $t_k^{\text{ср}}$ интервала $T_{\text{max}}^{\text{перес}}$, рассчитывается время начала $t_k^{\text{нач}}$ и окончания $t_k^{\text{кон}}$ интервала функционирования $T_k^{\text{ФУНКЦ}}$ БСА:

$$t_k^{\text{нач}} = t_k^{\text{ср}} - \frac{\tau_k^{\text{ФУНКЦ}}}{2},$$

$$t_k^{\text{кон}} = t_k^{\text{ср}} + \frac{\tau_k^{\text{ФУНКЦ}}}{2}.$$

4. Составляется основной план работы БСА. Для этого получившийся интервал $T_k^{\text{ФУНКЦ}}$ запоминается, а все узловые точки, попавшие в данный интервал, считаются просмотренными (включёнными в основной план) и исключаются из подмножества $\{M_s\}$.

Пункты с 1-го по 4-й повторяются, пока суммарная длительность работы БСА не станет больше предельного времени функционирования $(\sum_{k=1}^K \tau_k^{\text{ФУНКЦ}} \leq \tau^{\text{пред}})$ или пока все узловые точки из подмножества $\{M_s\}$ не будут включены в основной план при условии $(\sum_{k=1}^K \tau_k^{\text{ФУНКЦ}} \leq \tau^{\text{пред}})$.

На рис. 3 изображена циклограмма основного плана работы БСА.

Заштрихованные прямоугольники соответствуют интервалам функционирования БСА $T_k^{\text{ФУНКЦ}}$, которые включены в основной план работы БСА. Числами в квадратах обозначена очерёдность внесения в основной план интервалов функционирования БСА $T_k^{\text{ФУНКЦ}}$.

Результатом решения оптимизационной задачи является совокупность интервалов $T_k^{\text{ФУНКЦ}}$ функционирования БСА КА, удовлетворяющая ограничению по предельному времени работы БСА на интервале планирования применения $T_{\text{ПРИМ}}$. При этом суммарное значение коэффициента приоритета K_k^{pr} всех интервалов будет максимально.

Таким образом, предложенная методика может применяться для составления плана работы БСА в обзорном режиме с учётом ограничений на объём памяти ОЗУ и на потребление электроэнергии БСА как для отдельного КА, так и для всех КА системы. Она даёт оптимальное решение, проста в

реализации и не требует больших вычислительных затрат. Введение коэффициента текущего приоритета позволяет осуществлять согласованное применение КА ДЗЗ. Причём для одинаковых коэффициентов приоритета можно выполнить равномерный просмотр всей контролируемой области.

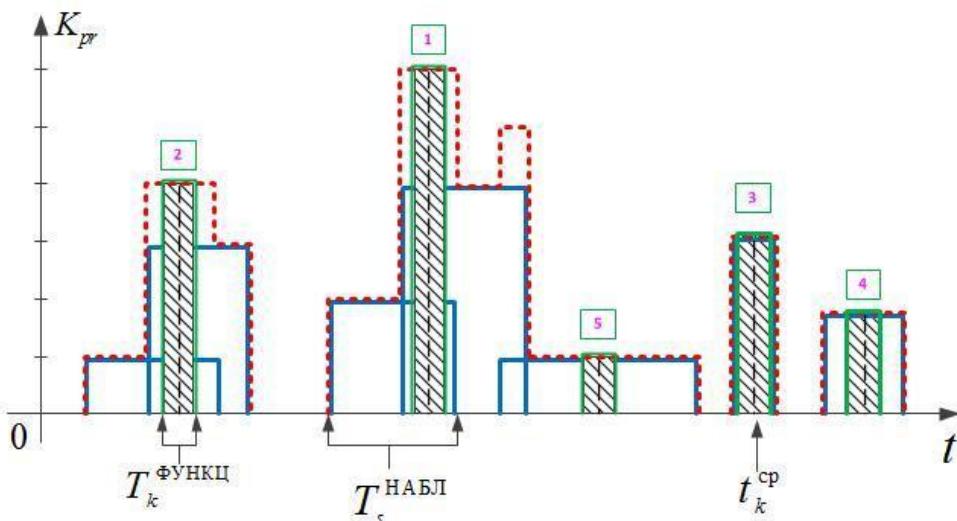


Рис. 3. Циклографма основного плана работы БСА

Библиографический список

1. Сологуб, А.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли. [Текст] / А.В. Сологуб, Г.П. Аншаков, В.В. Данилов под ред. Д.И. Козлова. – М.: Машиностроение, 1993. – 368с.
2. Ханцеверов, Ф.Р. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли [Текст] / Ф.Р. Ханцеверов, В.В. Остроухов. – М.: Машиностроение, 1989. – 263 с.
3. Интегрированная система управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования [Текст] / Г.П. Аншаков, Б.Е. Ландау, А.И. Мантуров [и др.] // IX С.-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 27-29 мая, 2002. – СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – С.77-84.
4. Малышев, В.В. Оперативное планирование процесса съемки земной поверхности с помощью автоматического ИСЗ [Текст] / В.В. Малышев, Д.В. Моисеев // Исследование Земли из космоса. – 1982, – № 5. – С. 104-109.
5. Малышев, В.В. Планирование съемки наземных объектов системой автоматических искусственных спутников Земли [Текст] / В.В. Малышев, Д.Э. Чернов // Изв. Академии наук. Сер. Теория и системы управления. – 1997. – №6. – С.76-82.
6. Драпоных, В.В. Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения [Текст] / В.В. Драпоных // Интернет-журнал «Труды МАИ». – 2004. – Вып. 16. – 15 с.
7. Математическая модель района наблюдения при планировании применения орбитальной группировки метеорологических космических систем

[Текст] / А.М. Безняков, В.И. Горбулин, Н.В. Радионов [и др.] // Молодежь. Техника. Космос: тр. IV Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. - СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012.

8. Использование орбитальных карт для разработки метода расчета показателей качества спутниковых систем при обзоре широтных поясов Земли [Текст] / Л.П. Зозуля, В.И. Горбулин, В.В.

Панченко В.А. [и др.] // Информация и космос. – 2009. – № 4. – С. 66-74.

9. Использование орбитальных карт для разработки метода расчета показателей качества спутниковых систем при обзоре широтных поясов Земли [Текст] / В.И. Горбулин, В.В. Панченко, Л.П. Зозуля [и др.] // Информация и космос. – 2009. – Вып. 4.

METHODS OF OPTIMAL PLANNING OF USING EARTH REMOTE SENSING SPACE MODULES IN THE SURVEY MODE

© 2013 A. M. Beznyakov, V. I. Gorbulin, D. L. Kargu, A. S. Fadeev, V. I. Scherbakov

Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg

The paper is devoted to the optimization of using Earth remote sensing space modules of an orbital system in the survey overview mode for vast areas. It is suggested that the controlled area should be described by a set of non-overlapping Dirichlet domains –spherical polygons with equal circumradii. Each center of a Dirichlet domain (nodal point) is described at any point of time by the priority coefficient which depends on the importance of the area and the length of the time interval after the previous observation of the given point by one of the orbital system satellites. The target function in the optimization task of using Earth remote sensing space modules is the accumulative value of importance coefficients of the node points included in the plan of space modules application. An algorithm for solving the defined problem of combinatorial optimization is proposed taking into account the restrictions on power consumption and volumes of accumulated target information transferred to consumers.

On-board special equipment, overview mode, restrictions, vast areas, controlled area, priority, interval, plan of using.

Информация об авторах

Безняков Алексей Михайлович, адъюнкт кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. E-mail: bez-al@mail.ru. Область научных интересов: баллистика, системы электроснабжения космических аппаратов.

Горбулин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. E-mail: v_gorbulin@yandex.ru. Область научных интересов: баллистика, системы электроснабжения космических аппаратов.

Каргу Дмитрий Леонидович, кандидат технических наук, начальник кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. E-mail: dmitrii_kargu@mail.ru. Область научных интересов: системы электроснабжения космических аппаратов.

Фадеев Александр Сергеевич, доктор технических наук, генеральный директор, Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры (ЦЭНКИ). E-mail: info@niipm.ru. Область научных интересов: проблемные вопросы в области эксплуатации наземной космической инфраструктуры.

Щербаков Валерий Иванович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой теоретической механики и теории механизмов и машин, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского. E-mail: vka114@mail.ru. Область научных интересов: проектная и экспериментальная баллистика, механика космических тросовых систем.

Beznyakov Alexey Mikhailovich, graduate student of the department of board electrical equipment and energy systems of flying vehicles, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg. E-mail: bez-al@mail.ru. Area of research: ballistics, electric power supply systems of flying vehicles.

Gorbulin Vladimir Ivanovich, doctor of engineering, professor of the department of board electrical equipment and energy systems of flying vehicles, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg. E-mail: v_gorbulin@yandex.ru. Area of research: ballistics, electric power supply systems of flying vehicles.

Kargu Dmitriy Leonidovich, candidate of engineering, head of the department of board electrical equipment and energy systems of flying vehicles, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg. E-mail: dmitrii_kargu@mail.ru. Area of research: ballistics, electric power supply systems of flying vehicles.

Fadeev Alexander Sergeevich, doctor of engineering, general manager of the corporation «TsENKI» (Center of maintenance of the ground-based space infrastructure). E-mail: info@niipm.ru. Area of research: problem areas in the field of using the ground-based space infrastructure.

Scherbakov Valeriy Ivanovich, candidate of engineering, head of the department of theoretical mechanics and theory of machines and mechanisms, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg. E-mail: vka114@mail.ru. Area of research: design and experimental ballistics, mechanics of space tether systems.