

УДК 629.783

**Формализация задачи оперативного планирования целевого
функционирования разнотипных космических аппаратов
дистанционного зондирования Земли**

Емельянов А.А.^{1*}, Малышев В.В.^{2}, Смольянинов Ю.А.^{2***},
Старков А.В.^{2****}**

¹Научный центр оперативного мониторинга Земли «Российские космические системы», ул. Декабристов, владение 51, строение 25, Москва, 127490, Россия

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: aaa@ntsomz.ru*

***e-mail: veniaminmalyshev@mail.ru*

****e-mail: smolyaninov-77@psk-net.ru*

*****e-mail: starkov@goldstar.ru*

Аннотация

Рассматриваются вопросы, связанные с формализацией задачи планирования целевых операций группировки разнотипных КА ДЗЗ и разработкой комплекса взаимосвязанных математических моделей, необходимых для построения специализированного программного обеспечения, позволяющего формировать оптимальные программы управления съемкой в реальной объектовой обстановке на заданном интервале планирования. Предложен подход к решению задачи планирования для группы однотипных космических аппаратов (КА). Вводится критерий эффективности плана в виде линейной свертки нормированной

информационной эффективности и относительных затрат бортового ресурса группы однотипных КА. Решение задачи планирования целевого функционирования группировки разнотипных КА сводится к последовательному решению задач планирования для групп однотипных КА, входящих в состав исходной группировки.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), оперативное планирование съемки, распределение информационных ресурсов космических аппаратов, оптимизация, эффективность.

Введение

Наращивание орбитальной группировки (ОГ) КА ДЗЗ, запланированное Федеральной космической программой России на 2016-2025 годы, и увеличение ее производительности влечет значительное увеличение объёмов принимаемых данных. В условиях существенного увеличения ОГ за счет ввода новых КА, оснащенных различными типами аппаратуры ДЗЗ, важнейшим вопросом является обеспечение комплексного целевого применения космической системы (КС) ДЗЗ.

Перед эксплуатирующей организацией возникает ряд прикладных проблем, среди которых наиболее актуальными являются: отсутствие комплексного планирования целевого применения совокупного информационного ресурса разнородной ОГ КА ДЗЗ, недостаточный уровень автоматизации, отсутствие средств расчета реализуемости заявок потребителей, недостаточный горизонт оперативного планирования, не позволяющий рационально использовать технические возможности КА.

В статье предлагается формализация задачи оперативного планирования и методический подход к ее решению, который ориентирован на создание специализированного программного обеспечения, позволяющего формировать оптимальные планы целевого функционирования ОГ разнотипных КА.

Формализация задачи планирования

Задача планирования ставится в предположении, что космические аппараты (КА), входящие в состав группировки, функционируют на околокруговых субполярных орбитах прямого или обратного наклона, могут проводить сброс данных зондирования на M наземных пунктов приема информации (ППИ), оснащены различной съемочной аппаратурой (СА), общее число типов СА равно q^* . Множество объектов, подлежащих съемке, считается сформированным из N элементов на основе заявок потребителей, а пространственное расположение и форма объектов съемки, определяемые в заявках, могут быть произвольными.

Целевое функционирование орбитальной группировки заключается в совместном выполнении программы съемки заданного множества объектов и программы сброса данных зондирования на наземные ППИ на заданном временном интервале – интервале планирования $[0, T]$.

Особенности процесса целевого функционирования: непостоянный визуальный контакт между КА и объектами, непостоянный радиокontakt между КА и ППИ, высокая себестоимость целевых операций. На выполнение операций накладываются ограничения со стороны внешних условий (освещенность,

облачность, экранирующий эффект Земли и др.) и технических характеристик бортовой аппаратуры КА.

Для формализации задачи планирования проводится дискретизация непрерывных процессов, описывающих состояние КА, и вводятся в рассмотрение модель временных последовательностей возможных целевых операций и модели целевого функционирования бортовых информационных комплексов КА.

Съемочная аппаратура q -го типа ($q = \overline{1, q^*}$) отличается от остальных обеспечиваемым разрешением, используемыми спектральными диапазонами, шириной полосы захвата и другими характеристиками, влияющими на процесс съемки.

Поэтому в подходе к решению задачи планирования выделены два принципиальных положения:

1. Объекты необходимо разделять на группы по типу затребованной в заявке СА и по геометрическим характеристикам.
2. Орбитальную группировку разнотипных КА необходимо разделять на группы однотипных КА, имеющих одинаковый комплект СА.

Вводятся две группы моделей.

1. Модели операций: а) операции съемки объектов – им ставится в соответствие временная последовательность интервалов съемки объектов с определенными номерами:

$$\left\{ \left(t_{ik}^1, t_{ik}^2 \right) \right\}, \left\{ n_{ik} \right\}, i = \overline{1, i^*}, k = \overline{1, k_i^*}, n_{ik} \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (1)$$

б) операции сброса целевой информации – им ставится в соответствие временная последовательность интервалов сброса на ППИ с определенными номерами:

$$\left\{ \left(t_{il}^1, t_{il}^2 \right) \right\}, \quad \left\{ m_{il} \right\}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad l = \overline{1, l_i^*}, \quad m_{il} \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (2)$$

где i – номер КА в группе из i^* однотипных КА, k – номер интервала съемки в последовательности из k_i^* интервалов съемки, возможных для i -го КА на интервале планирования $[0, T]$; t_{ik}^1, t_{ik}^2 – моменты начала и конца k -го интервала съемки; n_{ik} – номер объекта, снимаемого i -ым КА на k -ом интервале; t_{il}^1, t_{il}^2 – моменты начала и конца l -го интервала сброса, общее число которых для i -го КА на $[0, T]$ равно l_i^* ; m_{il} – номер ППИ, доступного для радиоконтакта с i -ым КА на l -ом интервале.

Объединение последовательностей (1) и (2) представляет собой временную последовательность выполнения целевых операций (ВПВО).

2. Модели вектора состояния орбитальной группировки в виде набора дискретных уравнений, правые части которых зависят от вектора предыдущего состояния y_{ik} , вектора управления u_{ik} и вектора технических характеристик x_i .

$$y_{ik+1} = \Phi(y_{ik}, u_{ik}, x_i), \quad y_{ik} \in R_{n_y}, \quad u_{ik} \in R_{n_u}, \quad x_i \in R_{n_x}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad k = \overline{1, k_i^* - 1}. \quad (3)$$

Текущий вектор состояния i -го КА y_{ik} в (3) включает вектор-строку в виде классического набора оскулирующих элементов орбиты $\tilde{y}_{ik} = (a_i, e_i, u_i(t_k), \omega_i, i_i, \Omega_i)^T$ ¹ или набора декартовых координат и проекций вектора скорости $\hat{y}_{ik} = (x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}, \dot{x}_{ik}, \dot{y}_{ik}, \dot{z}_{ik})^T$, а также величину V_{ik} текущего занятого объема

¹ a -большая полуось, e -эксцентриситет, u -аргумент широты, ω -аргумент перигея, i -наклонение, Ω -долгота восходящего узла

бортового запоминающего устройства (БЗУ) и величину θ_{ik} текущего угла визирования СА. Координаты V_{ik} и θ_{ik} зависят от управления, остальные координаты вектора состояния от управления не зависят. Состав вектора x_i уточняется далее.

Ограничения на вектор состояния имеют вид неравенств

$$(y_{ik})_j \leq y_{\max ij}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad j = \overline{1, n_y}, \quad k = \overline{1, k_i^*}, \quad (4)$$

Ограничения на вектор управления космической системой (КС) на $[0, T]$ имеют вид равенств

$$u_{ik} \in \{0, 1\}; \quad \varphi_i^j \left(\sum_k \sum_s (u_{ik})_s \right) \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad s = \overline{1, s^*}, \quad k = \overline{0, (k_i - 1)}, \quad j = \overline{1, \bar{\varphi}_i} \quad (5)$$

где равенства $u_{ik} = 1$ и $u_{ik} = 0$ означают включение и выключение целевой аппаратуры i -го КА в k -й момент соответственно; φ_i^j – логические правила, в соответствии с которыми каждый объект должен быть снят на $[0, T]$ не более одного раза.

Решение задачи оперативного планирования ищется в виде плана $\Pi = (u, y(u))$, т.е. пары, включающей программу управления $\{u_{ik}\}$ и соответствующую программу функционирования целевой аппаратуры $\{y_{ik}(u_{ik})\}$.

Критерий эффективности J формируется в виде линейной аддитивной функции, суммирующей вклады каждой целевой операции в значение эффективности

$$J(\Pi) = J(u, y(u)) = \sum_{i=1}^{i^*} J_i(u_i, y_i(u_i)) = \sum_{i=1}^{i^*} \sum_{k=1}^{k_i^*} J_{ik}(u_{ik}). \quad (6)$$

Методический подход к решению задачи оптимизации плана

Для описания возмущенного движения центров масс КА на околокруговых субполярных орбитах наиболее подходит система дифференциальных уравнений в оскулирующих элементах с использованием компонент вектора Лапласа $l = e \cos \omega$, $\chi = e \sin \omega$, позволяющая избежать при численном интегрировании проблем из-за малости эксцентриситета e [1]:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dp}{dt} &= 2r \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum_{j=0}^k \Delta g_{jY_0} \\
 \frac{di}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \cos u \sum_{j=0}^k \Delta g_{jZ_0} \\
 \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin u}{\cos i} \sum_{j=0}^k \Delta g_{jZ_0} \\
 \frac{du}{dt} &= \frac{\sqrt{p\mu}}{r^2} \left(1 - \frac{r^3 \sin u}{p\mu \tan i} \sum_{j=0}^k \Delta g_{jZ_0} \right) \\
 \frac{dl}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left\{ \sin u \sum_{j=0}^k \Delta g_{jX_0} + \left[\left(1 + \frac{r}{p} \right) \cos u + \frac{r}{p} l \right] \sum_{j=0}^k \Delta g_{jY_0} + \frac{\chi r \sin u}{p \tan i} \sum_{j=0}^k \Delta g_{jZ_0} \right\} \\
 \frac{d\chi}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left\{ -\cos u \sum_{j=0}^k \Delta g_{jX_0} + \left[\left(1 + \frac{r}{p} \right) \sin u + \frac{r}{p} \chi \right] \sum_{j=0}^k \Delta g_{jY_0} - \frac{lr \sin u}{p \tan i} \sum_{j=0}^k \Delta g_{jZ_0} \right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $p = a(1 - e^2)$ – фокальный параметр, μ – гравитационный параметр Земли,

$r = \frac{p}{1 + l \cos u + \chi \sin u}$, а представление сумм, входящих в правые части уравнений (7),

зависит от набора учитываемых возмущающих ускорений. Для ССО этот набор должен включать возмущающие ускорения от нецентральности гравитационного поля Земли, притяжения Солнца и Луны, атмосферного торможения.

Соответствующие формулы достаточно подробно описаны в работе [1] и здесь не приводятся в силу их громоздкости. Компьютерное численное интегрирование системы (7) с начальными условиями, рассчитанными по двустрочным элементам (TLE-данным), позволяет получить файлы с таблицами эфемерид эксплуатируемых КА ДЗЗ, близких к реальным. Таблицы эфемерид, фиксирующие с заданным шагом по времени положения центров масс КА группировки, могут служить дискретной моделью движения, которая используется для циклического решения задачи планирования с целью поиска наилучшей программы управления (рис.1). Вынесение алгоритма расчета эфемерид за цикл, предложенное в работе [2], снижает время решения задачи планирования.

На интервале планирования помимо изменения текущего положения КА в пространстве происходит изменение двух других координат вектора состояния КА, зависящих от текущего управления: занятого объема БЗУ $V_{БЗУ}$ и угла отклонения линии визирования от надира θ .

Модели целевой аппаратуры бортового информационного комплекса КА строятся на двух допущениях [3]:

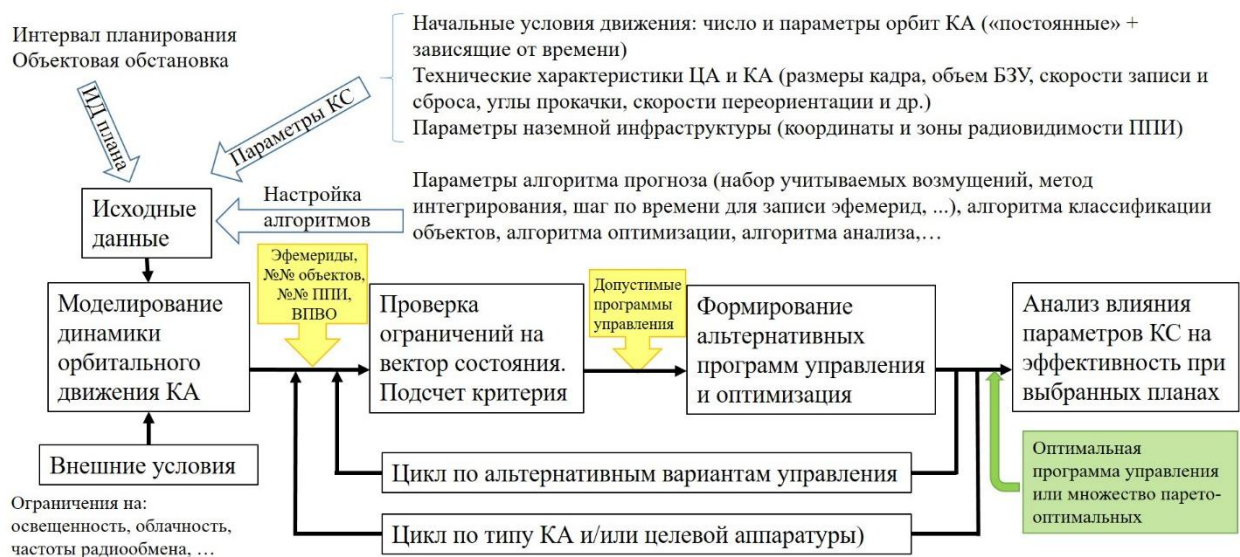


Рис. 1. Укрупненная блок-схема решения задач планирования

1. для каждого типа съемочной аппаратуры каждого КА интервал планирования есть последовательность участков только двух типов: а) аппаратура включена (ведется съемка) и б) аппаратура выключена (отсутствие съемки);

2. для передающей аппаратуры интервал планирования есть последовательность участков двух типов: а) аппаратура включена (ведется сброс) и б) аппаратура выключена (отсутствие сброса).

Изменение объема БЗУ i -го КА на интервале (t_k, t_{k+1}) описывается дискретным уравнением, учитывающим существенно разные по величине скорости записи w^+ и сброса w^- данных зондирования [2]:

$$V_{ik+1} = \Delta V_{n_{ik}}^+ u_{ik}^+ + \max \{ V_{ik} - \Delta t_{ik} b_{ik} w_i^- u_{ik}^-; 0 \}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad k = \overline{0, k_i^* - 1}, \quad (8)$$

где $\Delta V_{n_{ik}}^+ = (t_{ik}^2 - t_{ik}^1) w^+$ – приращение объема БЗУ при съемке объекта с номером n_{ik} ,

$\Delta t_{ik} = t_{ik+1} - t_{ik}$ – продолжительность интервала времени между двумя последовательными моментами включения съемочной аппаратуры i -го КА,

b_{ik} - доля Δt_{ik} , приходящаяся на передачу информации из БЗУ i -го КА,

$$b_{ik} = \sum_l \tau_{il} / \Delta t_{ik}, \quad \forall \tau_{il} = t_{il}^2 - t_{il}^1: \quad t_{ik} \leq t_{il}^1 \leq t_{il}^2 \leq t_{ik+1}.$$

В соответствии с моделью (8) текущий занятый объем БЗУ i -го КА представляет собой кусочно-линейную функцию (рис. 2) со значениями в пределах от 0 до V_i^{\max} .

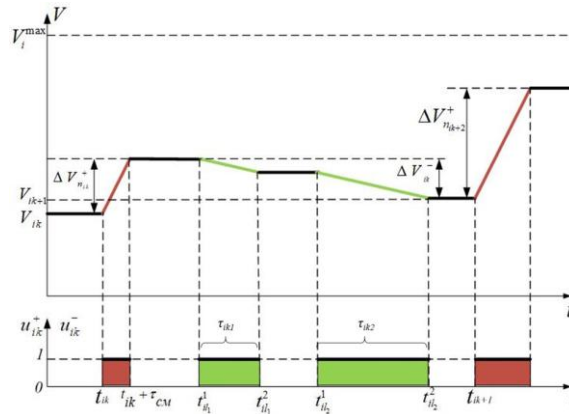


Рис. 2. Кусочно-линейная модель изменения объема БЗУ

Моделью изменения углового положения линии визирования СА также является дискретное уравнение, связывающее требуемое для съемки и предыдущее положение θ_{ik} через составляющую вектора управления u_{ik} и угловую скорость переориентации $\dot{\theta}_{ik}$ [2]:

$$\theta_{ik+1} = \arctg \left\{ \frac{R_E \sin \varphi_{ik+1}}{r_{ik+1} - R_E \cos \varphi_{ik+1}} \right\} u_{ik} + \left(\theta_{ik} + \dot{\theta}_{ik} \Delta t_{ik} \right) (1 - u_{ik}), \quad i = \overline{1, i^*}, \quad k = \overline{1, (k_i^* - 1)}, \quad (9)$$

где R_E – радиус Земли, φ_{ik+1} – геоцентральный угол, задающий требуемое для съемки отклонение линии визирования от надира в момент t_{ik+1} ,

$$\dot{\theta}_{ik} = \frac{\theta_{is} - \theta_{ir}}{t_{is} - t_{ir}}, \quad t_{ir} \leq t_{ik} < t_{ik+1} \leq t_{is}, \quad u_{ir-1} = u_{is-1} = 1, \quad u_{ij} = 0, \quad \forall j = \overline{r, s-2}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad k = \overline{1, k_i^*},$$

t_{ir}, t_{is} – два последовательных момента времени, в которые совершается съемка объектов;

θ_{ir}, θ_{is} – соответствующие съемкам углы визирования объектов

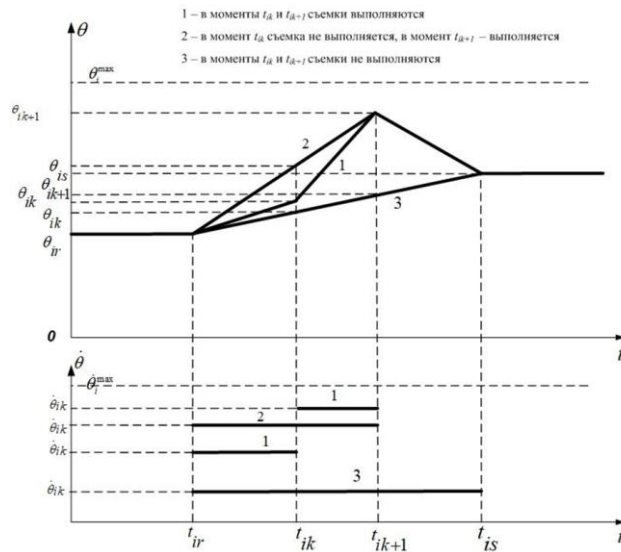


Рис. 3. Кусочно-линейная модель переориентации линии визирования

В соответствии с моделью (9) текущее положение линии визирования СА i -го КА представляет собой кусочно-линейную функцию (рис. 3) со значениями в пределах от $-\theta_i^{\max}$ до θ_i^{\max} , а зависимость угловой скорости – кусочно-постоянную функцию со значениями в пределах от $-\dot{\theta}_i^{\max}$ до $\dot{\theta}_i^{\max}$.

Обобщая, следует заметить, что вектор $x_i = (V_i^{\max}, w_i^+, w_i^-, \theta_i^{\max}, \dot{\theta}_i^{\max})^T$.

Определение возможных моментов съемки ведется, в отличие от подхода, принятого в работах [3,4], с предварительным разделением объектов на точечные и площадные, так как соответствующие алгоритмы различаются.

Для каждого объекта, имеющего форму сферического полигона и заданного числом h и географическими координатами вершин (λ_i -долгота, φ_i -широта), вычисляется набор геометрических характеристик, позволяющих разделять объекты на точечные, протяженные и площадные. В частности, для n -го объекта вычисляются следующие геометрические характеристики:

площадь объекта, равная площади сферического полигона

$$S_n = \varepsilon R_E^2, \quad (10)$$

где ε -сферический избыток, определяемый через сумму углов поворота контура объекта [5],

периметр $P_n = \sum_{i=1}^{h-1} l_i = R_E \sum_{i=1}^{h-1} \Delta\sigma_i$, где угловое расстояние между соседними вершинами

$\Delta\sigma_i$ определяется по формуле гаверсинусов

$$\Delta\sigma_i(\lambda_i, \varphi_i, \lambda_{i+1}, \varphi_{i+1}) = 2 \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{2} + \cos \varphi_i \cos \varphi_{i+1} \sin^2 \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_i}{2}}; \quad (11)$$

географические долгота и широта геометрического центра (центроида)

$$\lambda_{nC} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h \lambda_i, \quad \varphi_{nC} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h \varphi_i,$$

габаритные угловые радиусы – с использованием формулы (11)

$$r_n^{\max} = \max_i \Delta\sigma_i(\lambda_i, \varphi_i, \lambda_{nC}, \varphi_{nC}), \quad r_n^{\min} = \min_i \Delta\sigma_i(\lambda_i, \varphi_i, \lambda_{nC}, \varphi_{nC}), \quad (12)$$

фактор формы (по аналогии с фактором формы круга) $F_n = \frac{4\pi S_n}{P_n^2}$,

габаритные ширина l_{nX} и длина l_{nY} полигонального образа объекта относительно направления A_n , а также удлинение β_n определяемые соотношениями

$$l_{nX} = \max_i \hat{\lambda}_i - \min_i \hat{\lambda}_i, \quad l_{nY} = \max_i \hat{\varphi}_i - \min_i \hat{\varphi}_i, \quad \beta_n = \frac{l_{nY}}{l_{nX}},$$

в которых азимут ориентации A_n вычисляется через соотношение центробежного и статических моментов инерции геометрического образа объекта, $\hat{\lambda}_i, \hat{\varphi}_i$ – координаты

вершин полигона в главных осях инерции, а l_{nX}, l_{nY} измеряются вдоль главных осей инерции полигона.

В процессе разбиения исходного множества объектов на подмножества к точечным относятся объекты, площадь которых не превышает площади кадра съемочной аппаратуры и фактор формы полигона близок к единице. Объекты, у которых габаритная ширина меньше ширины кадра и ориентация близка к попутной, т.е. разница азимута вектора скорости КА и A_n лежит в допустимых пределах, относятся к категории протяженных. Остальные объекты считаются площадными.

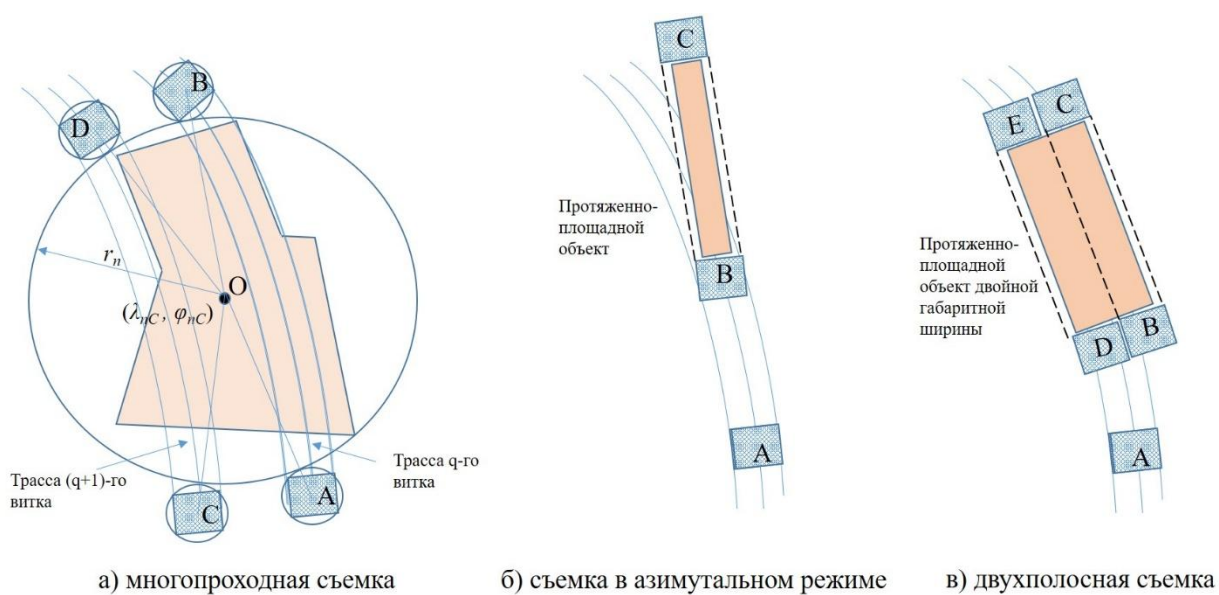


Рис. 4. Формирование временных интервалов съемки площадных объектов

Определение возможного момента съемки точечного объекта проводится по формуле

$$t_{ik} = \frac{t_{ik}^1 + t_{ik}^2}{2}, \quad (13)$$

в которой моменты входа и выхода объекта с координатами $(\lambda_{n_{ik}}, \varphi_{n_{ik}})$ в зону обзора i -го КА определяются из равенств

$$\varphi_i^{\max} = \gamma(t_{ik}^1), \quad \varphi_i^{\max} = \gamma(t_{ik}^2), \quad t_{ik}^1 \leq t_{ik}^2, \quad (14)$$

где φ_i^{\max} – геоцентральный угловой радиус зоны обзора i -го КА

$$\varphi_i^{\max} = \arcsin\left(\frac{r_{KA}}{R_E} \sin \theta_i^{\max}\right) - \theta_i^{\max}, \quad (15)$$

θ_i^{\max} – предельный угол прокачки линии визирования,

$\gamma(t)$ – текущий геоцентральный угол между радиус-вектором КА \bar{r}_{KA} и радиус-вектором центра объекта $\bar{r}_{n_{ik}}$

$$\gamma(t) = \arccos \frac{(\bar{r}_{KA}(t), \bar{r}_{n_{ik}})}{|\bar{r}_{KA}(t)| |\bar{r}_{n_{ik}}|}. \quad (16)$$

По найденному моменту съемки вычисляется необходимый угол визирования

$$\theta_{ik} = \arctan \frac{\sin \varphi}{\frac{r_{KA}}{R_E} - \cos \varphi} \Bigg|_{\varphi=\gamma(t_{ik})}. \quad (17)$$

Алгоритм расчета временных интервалов съемки площадных объектов выбирается в зависимости от фактора формы F_n , удлинения β_n и ориентации A_n района съемки относительно трассы.

Для площадного объекта моменты начала t_{ik}^1 и окончания t_{ik}^2 съемки определяются равенствами

$$\gamma(t_{ik}^1) - l^* = r_{n_{ik}}, \quad \gamma(t_{ik}^2) - l^* = r_{n_{ik}}, \quad t_{ik}^1 < t_{ik}^2, \quad (18)$$

в которых текущее угловое расстояние $\gamma(t)$ вычисляется по формуле (16), габаритный радиус $r_{n_{ik}}$ – по формуле (11), а l^* – по формуле

$$l^* = \frac{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{R_E}, \quad (19)$$

где l_x, l_y – линейные размеры кадра.

Если форма района съемки вытянута ($\beta_n > \beta^*$) и ориентация близка к поперечной ($|\cos(A_{KA}(t_{ik}^1) - A_n)| \leq \varepsilon_A$), то вместо габаритного радиуса в уравнениях (18) предлагается использовать габаритную полуширину (рис. 5):

$$\gamma(t_{ik}^1) - l^* = \frac{1}{2} \min(l_{nX}, l_{nY}), \quad \gamma(t_{ik}^2) - l^* = \frac{1}{2} \min(l_{nX}, l_{nY}), \quad t_{ik}^1 < t_{ik}^2. \quad (20)$$

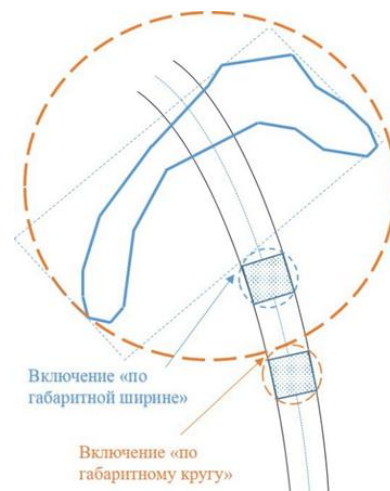


Рис. 5. Включение «по габаритному кругу» и «по габаритной ширине»

Наличие достаточного уровня освещенности для проведения съемки проверяется путем сравнения угла возвышения Солнца h_{\otimes} с его допустимым значением h_q^* для конкретного q -го типа съемочной камеры на борту КА

$$h_{\otimes}(t_{ik}) \geq h_q^*. \quad (21)$$

где $h_{\otimes}(t_{ik}) = \arcsin(\sin \delta_{\otimes}(t_{ik}) \sin \varphi_{n_{ik}} + \cos \delta_{\otimes}(t_{ik}) \cos \varphi_{n_{ik}} \cos(\lambda_{\otimes}(t_{ik}) - \lambda_{n_{ik}}))$, а угол склонения δ_{\otimes} и долгота λ_{\otimes} Солнца вычисляются по известным формулам [1] с учетом текущей даты и уравнения времени.

Для учета влияния облачности предлагается использовать математическую модель облачного покрова, описывающую распределение количества облачности над районами съемки с помощью карт зон однородности [1]. Съемка объекта в момент t_{ik} или на интервале (t_{ik}^1, t_{ik}^2) считается возможной, если разыгрываемое с помощью датчика случайных чисел количество облачности над районом съемки $B(t, \lambda_{n_{ik}}, \varphi_{n_{ik}})$ не превышает заданное:

$$B(t, \lambda_{n_{ik}}, \varphi_{n_{ik}}) \Big|_{t=t_{ik}} \leq B_{cr} \quad \text{или} \quad B(t, \lambda_{n_{ik}}, \varphi_{n_{ik}}) \Big|_{t=t_{ik}^1} \leq B_{cr}, \quad (22)$$

где B_{cr} – максимальное количество облачности над объектом, допускаемое в заявке потребителя.

Моменты t_{ik} для точечных и (t_{ik}^1, t_{ik}^2) для площадных объектов заносятся в последовательность $\{(t_{ik}^1, t_{ik}^2)\}$, соответствующие номера объектов n_{ik} – в последовательность $\{n_{ik}\}$ только при выполнении условий по освещенности (21) и количеству облачности над районом съемки (22), образуя временную последовательность возможных моментов (интервалов) съемки (1).

Условие радиовидимости КА с заданного ППИ имеет вид [6]

$$\mu(t) \leq \varphi_{\delta} \cap D(t) \leq D_{\max}, \quad (23)$$

где φ_{δ} – угловой радиус зоны обзора ППИ, $\varphi_{\delta} = \arccos[R_E \cos \delta^* / r_{KA}] - \delta^*$,

$\mu(t)$ – текущее угловое расстояние между ППИ и подспутниковой точкой:

$$\mu(t) = \arccos[\sin \varphi_{КА}(t) \sin \varphi_{ППИ} + \cos \varphi_{КА}(t) \cos \varphi_{ППИ} \cos (\lambda_{КА}(t) - \lambda_{ППИ})],$$

$$D(t) – \text{текущая дальность от ППИ до КА, } D(t) = \sqrt{r_{КА}^2 + R_E^2 - 2r_{КА}R_E \cos \varphi_{КА}}.$$

Границы интервала радиовидимости, т.е. моменты (t_{il}^1, t_{il}^2) входа и выхода i -го КА из зоны радиовидимости ППИ с номером m_{il} определяются из соотношений (23), когда левое неравенство превращается в равенство.

Интервалы (t_{il}^1, t_{il}^2) заносятся в последовательность $\{(t_{il}^1, t_{il}^2)\}$, соответствующие номера ППИ m_{il} – в последовательность $\{m_{il}\}$, образуя временную последовательность возможных интервалов сброса (2).

Для расчета площади заданной территории Земли, отснятой группой однотипных КА, предложено использовать оверлейные алгоритмы, отработанные в геоинформационных системах [7, 8]:

- алгоритм определения пересечения отрезков,
- алгоритм определения пересечения полилиний,
- алгоритм наложения полигонов.

Применение названных алгоритмов позволяет находить координаты угловых вершин A, B, C, D фрагмента площадного объекта, который заключен внутри контура Φ_{ij} , образованного границами полосы захвата и полигона (рис. 6).

По найденным числу r^* и координатам вершин контура Φ_{ij} площадь отснятого фрагмента $s_n(\Phi_{ij})$ вычисляется с использованием формулы (10).

$$s_n(\Phi_{ij}) = \varepsilon(\Phi_{ij})R_E^2 = (2\pi - \sum_{r=1}^{r^*} \tau_r)R_E^2, \quad (24)$$

где τ_r – угол поворота контура Φ_{ij} при переходе через r -ую вершину. Кроме того, вычисляется величина $\bar{s}_{n_{ik}}$ отснятого фрагмента площадного объекта, отнесенная к площади кадра:

$$\bar{s}_{n_{ik}} = \frac{s_n(\Phi_{ij})}{s_{\text{кадр}}} = \frac{s_n(\Phi_{ij})}{l_x \cdot l_y}. \quad (25)$$

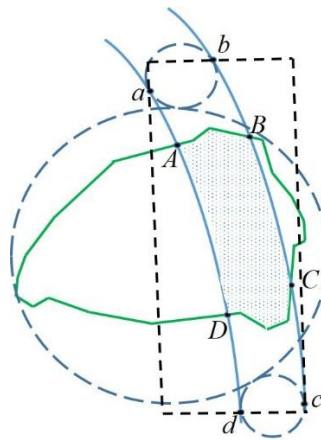


Рис. 6. К определению площади фрагмента, покрытого полосой съемки

Низкоорбитальные однотипные КА группировки имеют (в номинале) кратные солнечно-синхронные орбиты (ССО) и характеризуются периодом кратности орбит T^* . Для кратной N -суточной ССО число витков j^* , целиком укладывающееся в $T^* = N$ суток, однозначно определяется драконическим периодом обращения $T_{\text{др}}$ [6]:

$$j^* = \frac{T_{cc}}{T_{\text{др}}} N = \left[\frac{T_{cc}}{T_{\text{др}}} \right] N + m = n_{nc} N + m, \quad (26)$$

где T_{cc} – длительность средних солнечных суток, n_{nc} – число полных витков в полетных сутках, (n_{nc} – класс орбиты, m – индекс орбиты), n_{nc} , N , m – целые числа. Внутри периода кратности T^* трассы i -го КА не повторяются, а ширина полосы

захвата (полосы съемки) $l_x^{(i)}$ существенно меньше ширины полосы обзора по экватору $b_9^{(i)}$. Поэтому, если интервал планирования $T \leq T^*$, то площадь S_i , отснятая i -м КА на интервале планирования, т.е. за j^* витков, складывается из площадей точечных объектов и отдельных фрагментов разных площадных объектов, отснятых на каждом j -ом витке из j^* возможных

$$S_i = \sum_{j=1}^{j^*} \sum_{n=1}^N s_n(\Phi_{ij}) . \quad (27)$$

Площадь S_q , отснятая аппаратурой q -го типа на интервале планирования, оценивается по формуле

$$S_q = \sum_{i=1}^{i^*} S_i = \sum_{i=1}^{i^*} \sum_{j=1}^{j^*} \sum_{n=1}^N s_n(\Phi_{ij}), \quad (28)$$

где учитываются только те слагаемые $s_n(\Phi_{ij})$, для которых контуры Φ_{ij} разные (т.е. разные угловые вершины).

В развитие подхода, предложенного в [2], информационный эффект, достигающийся при совершении съемки одного точечного объекта или одного фрагмента площадного объекта, предлагается оценивать величиной:

$$J_{ik} = \left(1 - \frac{\theta_{ik}}{\theta_{i \max}}\right) B_{ik}(P_n) \bar{s}_{n_{ik}}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad k = \overline{1, k_i^*}, \quad (29)$$

где $B_{ik}(P_n)$ – важность съемки n_{ik} -ого объекта, измеряемая в баллах, P_n – уровень приоритета, определяющий важность съемки n -го объекта по сравнению с остальными объектами, величина $\bar{s}_{n_{ik}}$ для площадных объектов вычисляется по (24)-(25), а для точечных объектов $\bar{s}_{n_{ik}} = 1$.

Принимая во внимание модели целевого функционирования бортовой аппаратуры КА (8) и (9), предлагается показатель информационной эффективности съемочного плана количественно выражать формулой

$$J_{\text{inf}}(q) = \sum_{i=1}^{i^*} J_i = \sum_{i=1}^{i^*} \sum_{k=1}^{k_i^*} J_{ik} u_{ik}, \quad (30)$$

где $J_i, i = \overline{1, i^*}$ - ценность информации, полученной i -ым КА в процессе съемки объектов на интервале $[0, T]$. Величина показателя (30) напрямую зависит от выбранной программы съемки $\{u_{ik}\}$. Однако, проведение маневров переориентации сопровождается затратами бортового ресурса КА, например, в виде расхода заряда аккумуляторной батареи и/или рабочего тела корректирующей двигательной установки. В простейшем виде затраты R_i бортового ресурса i -го КА на интервале планирования представимы в виде

$$R_i = \sum_{k=1}^{k_i^*} R_{ik} u_{ik}, \quad (31)$$

где R_{ik} - затраты ресурса на переориентацию между моментами t_{ik-1} и t_{ik} . Пусть $R(0)$ - суммарный бортовой ресурс группы однотипных КА с аппаратурой q -го типа на начало интервала планирования. С использованием линейной свертки показателей $\bar{J}_{\text{inf}}(q)$ и \bar{R}_q , предлагается критерий эффективности группы однотипных КА в виде

$$J(q) = \alpha \bar{J}_{\text{inf}}(q) - \beta \bar{R}_q, \quad (32)$$

где $\bar{J}_{\text{inf}}(q)$ - нормированная информационная эффективность,

$$\bar{J}_{\text{inf}}(q) = J_{\text{inf}}(q) / \sum_i \sum_k B_{ik}(P_q), \quad (33)$$

\bar{R}_q – относительные затраты бортового ресурса группы однотипных КА с аппаратурой q -го типа на выполнение программы $\{u_{ik}\}$:

$$\bar{R}_q = \sum_{i=1}^{i^*} R_i / R(0) ; \quad (34)$$

α и β , ($\alpha+\beta=1$) – весовые коэффициенты, задающие относительную важность слагаемых показателей и определяемые с применением метода уверенных суждений [9].

Таким образом, постановку задачи оптимизации плана для группы *однотипных* КА можно записать в виде соотношений (3)-(5) с критерием (32).

Для оценки эффективности оперативного плана съемки, проводимой орбитальной группировкой *разнотипных* КА предлагается использовать показатель J_Σ , определяемый по формуле

$$J_\Sigma = \sum_{q=1}^{q^*} J(q) S_q = \sum_{q=1}^{q^*} S_q \sum_{i=1}^{i^*} J_i = \sum_{q=1}^{q^*} S_q \sum_{i=1}^{i^*} \sum_{k=1}^{k_i^*} J_{ik} u_{ik} , \quad (35)$$

в которой двойная внутренняя сумма вычисляется по (30)-(34) на программе $\{u_{ik}\}$ съемки, проводимой *однотипными* КА с аппаратурой q -го типа, а площади S_q рассчитываются по (28).

Следует отметить, что программы съемки $\{u_{ik}\}$, фигурирующие в (35), зависят от характеристик СА и должны определяться отдельно для каждого q -го типа СА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания

(проект № 9.7505.2017/БЧ)

Библиографический список

1. Малышев В.В., Бобронников В.Т., Красильщиков М.Н., Нестеренко О.П., Федоров А.В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.
2. Малышев В.В., Дарнопых В.В. Оперативное планирование целевого функционирования космических систем наблюдения и связи: Монография. - М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2017. – 225 с.
3. Дарнопых В.В. Автоматизация параметрического анализа целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26960>
4. Усовик И.В., Дарнопых В.В., Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35957>
5. Серапинас Б.Б. Геодезические основы карт. Учебное пособие. - М.: Изд-во МГУ, 2001. - 132 с.
6. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. – М.: Радио и связь, 2004. – 200 с.

7. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. – М.: КДУ, 2008. - 424 с.
8. Замай С.С., Якубайлик О.Э. Программное обеспечение и технологии геоинформационных систем. – Красноярск: Красноярский государственный университет, 1998. - 110 с.
9. Малышев В.В., Пиявский С.А. Метод "уверенных суждений" при выборе многокритериальных решений // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. № 5. - С. 90-101.