

Мантуров А. И., Горелов Ю. Н., Юрин В. Е., Пыринов Н. И.

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АВТОНОМНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММ
УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СЪЁМКИ ПЛОЩАДОК В БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСАХ
УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОВ ЗОНДИРОВАНИЯ**

Введение

Современные космические аппараты (КА) зондирования выполняют широкий круг задач, основная из которых – реализация различных видов съёмки. Разработанные ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» аппараты дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), например, семейства «Ресурс» народнохозяйственного назначения с оптико-электронной аппаратурой зондирования (АЗ) для съёмки земной поверхности в режиме «заметания» [1-3] могут выполнять объектовую, маршрутную съёмку, а также сложные виды съёмки – стереосъёмку и съёмку площадок [4]. В статье рассматриваются варианты реализации съёмки площадок в бортовом комплексе управления (БКУ) современных и перспективных КА ДЗЗ.

Основные определения и геометрия съёмки

Маршрут – участок земной поверхности, наблюдаемый на одном непрерывном интервале работы АЗ. Ширина маршрута равна ширине полосы захвата АЗ, длина пропорциональна длительности и условиям зондирования.

Центральная линия маршрута (ЦЛМ) – линия на земной поверхности, задаваемая координатами начальной точки и условиями зондирования.

Центральная линия визирования (ЦЛВ) – прямая, соединяющая центр масс аппарата с текущей точкой наблюдения ЦЛМ.

Азимут начальной точки ЦЛМ – угол, отсчитываемый в плоскости местного горизонта заданной начальной точки наблюдения ЦЛМ от оси, которая является пересечением указанной плоскости с плоскостью меридиана этой точки, до единичного вектора направления движения начальной точки наблюдения ЦЛМ. Азимут задаёт направление съёмки маршрута.

Орбитальная система координат (ОСК) $Ox_0y_0z_0$ представлена на рис. 1.

Начало ОСК находится в центре масс КА. Ось Oy_0 совпадает с радиусом-вектором, направленным из центра масс Земли в центр масс КА. Ось Ox_0 перпендикулярна оси Oy_0 , лежит в плоскости орбиты и направлена в сторону полёта КА. Ось Oz_0 дополняет систему координат до правой ортогональной.

Угол упреждения – угол между плоскостью Y_0OZ_0 ОСК и плоскостью, перпендикулярной плоскости орбиты в заданный момент времени и проходящей через ЦЛВ.

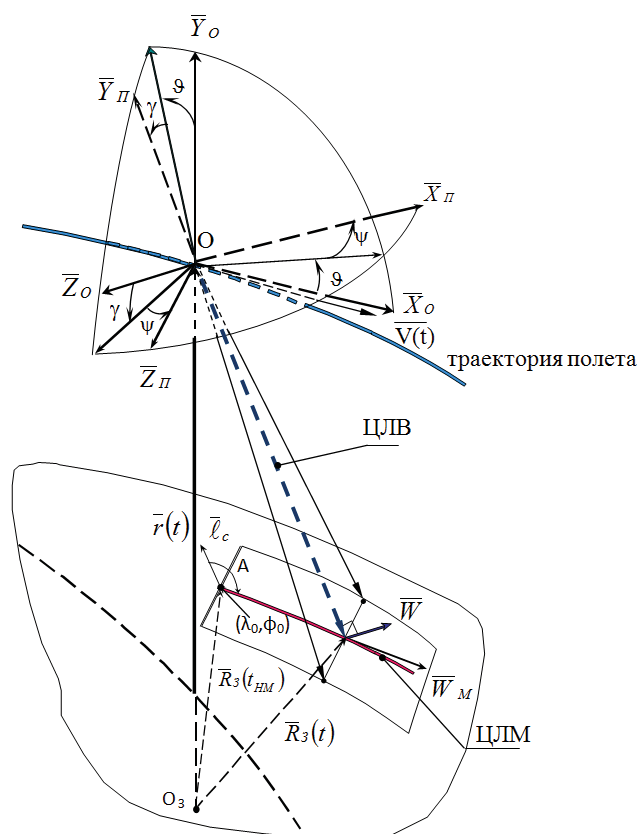


Рисунок 1 – Геометрия съёмки

Площадка – участок земной поверхности с заданными линейными размерами – шириной B и длиной L , меньший из которых превышает ширину полосы захвата АЗ, – состоит из нескольких маршрутов.

Каждый маршрут задаётся следующим набором параметров:

$$\{\lambda_0, \varphi_0, A, \Delta H, \vartheta_y, (W_{\text{ХП}}/D)_{\text{ЗАД}}, \tau_M, \{p\}_i\}, \quad (1)$$

где λ_0, φ_0 – долгота и геоцентрическая широта начальной точки ЦЛМ;

A – азимут ЦЛМ в начальной точке;

ΔH – среднее на маршруте превышение над общеземным эллипсоидом;

ϑ_y – угол упреждения на начало наблюдения маршрута;

$(W_{\text{ХП}}/D)_{\text{ЗАД}}$ – параметр, определяющий скорость бега изображения для ЦЛМ;

τ_M – длительность сканирования маршрута;

$\{p\}_i$ – набор дополнительных характеристик маршрута.

Влияние параметров (1) на геометрию маршрута описано в [3, 4].

Современная реализация съёмки площадок

В настоящее время декомпозиция площадок на отдельные маршруты, расчёт параметров этих маршрутов (1) проводится в наземном комплексе планирования. Этот процесс

предполагает моделирование работы БКУ, что значительно усложняет процедуру планирования. Результаты декомпозиции – параметры каждого маршрута (1) – передаются в БКУ, где расчёт программы управления угловым движением (ПУУД) КА для реализации съёмки заданных маршрутов проводится по уточнённым исходным данным с учётом ограничений систем КА. При формировании ПУУД КА используются уточняемые системой спутниковой навигации параметры движения центра масс КА, переопределяются заданные углы упреждения в соответствии с дискретностью времени работы АЗ [5]. В некоторых случаях это может привести к отмене маршрутов площадки, в основном, из-за невозможности перенацеливания АЗ между маршрутами в рамках ограничений системы управления движением (СУД). Если в наземном комплексе планирования использовать более жёсткие ограничения по сравнению с БКУ, уменьшатся достижимые размеры площадок, но реализация всех заданных маршрутов по-прежнему не гарантируется.

Постановка задачи

Один из способов повысить общую эффективность управления КА – проводить декомпозицию площадки на отдельные маршруты (1) непосредственно в БКУ. Такой способ позволит реализовать съёмку всех маршрутов площадки, при этом возможности СУД КА будут использоваться эффективно.

Цель работы: во-первых, определить необходимый и достаточный для задания площадки набор исходных данных; во-вторых, разработать алгоритм декомпозиции площадки на отдельные маршруты вида (1), который может быть реализован в БКУ современных КА ДЗЗ, т. е. удовлетворяет жёстким условиям по скорости сходимости, объёму и точности вычислений.

Сформулируем условия зондирования при съёмке площадок.

Итак, площадка состоит из набора маршрутов (рис. 2), для которого выполняются следующие условия:

- набор маршрутов покрывает заданную площадь земной поверхности;
- азимут направления центральных линий маршрутов площадки совпадает;
- соседние маршруты по всей длине имеют непустое пересечение, минимальная ширина перекрытия определяется фиксированным (заданным) минимальным процентом перекрытия p .

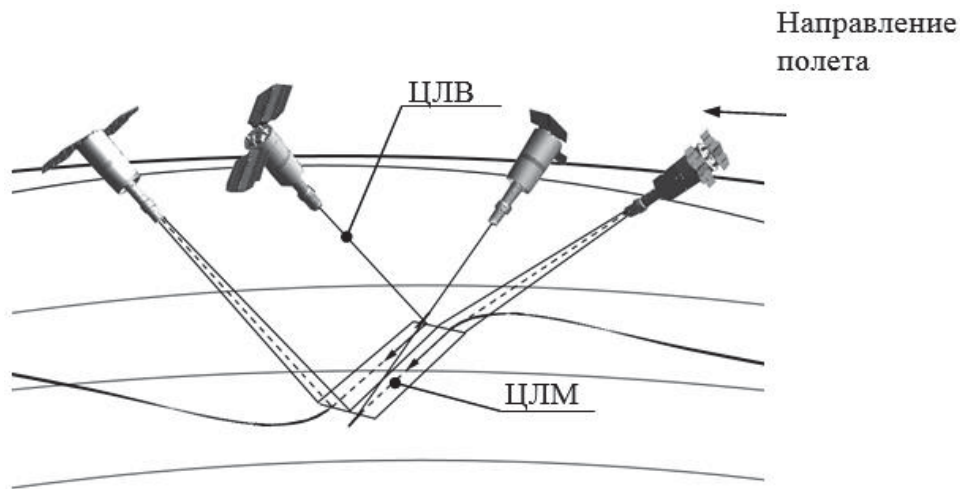


Рисунок 2 – Геометрия съёмки площадки

Площадку предлагается описывать следующим набором параметров:

$$\{\lambda_{ц}, \varphi_{ц}, A, \vartheta_{\max}, \Delta H, B, L, p, N\}, \quad (2)$$

где $\lambda_{ц}$, $\varphi_{ц}$ – долгота и геоцентрическая широта центральной точки площадки;

A – азимут центральной линии площадки;

ΔH – среднее превышение над общеземным эллипсоидом, которое является упрощённой моделью аппроксимации части поверхности Земли $\Phi = \Phi(r)$ [6];

ϑ_{\max} – максимальный угол упреждения для маршрутов площадки;

N – количество маршрутов, достаточное для покрытия площадки.

Основные условия формирования ПУУД КА для съёмки площадок: обеспечение заданных размеров и необходимого перекрытия по всей длине маршрутов площадки, учёт максимальных углов отклонения оси визирования ЦА от вертикали при съёмке маршрутов площадки в обеспечение требуемого разрешения.

Алгоритм декомпозиции площадки на отдельные маршруты в БКУ

Параметры площадки (2) могут быть решением задачи оптимального многомаршрутного сканирования произвольного района зондирования, характерные размеры которого существенно превышают ширину полосы захвата АЗ КА. В терминах теории оптимальных покрытий предстоит найти такую систему N «центров», что $N \rightarrow \min$ при заданном $\varepsilon_0 > 0$, где ε_0 – определяет ширину маршрутов в зависимости от закона сканирования [6].

Для площадки, состоящей из N маршрутов, длина L не превосходит длину каждого маршрута L_i , $i = 1, \dots, N$:

$$L < \min L_i, i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

суммарная ширина маршрутов площадки в каждой точке, удалённой на одно и то же рас-

стояние от ортогональной ЦЛМ стороны площадки, с учётом минимального процента перекрытия p , должна быть не меньше ширины площадки B :

$$B \leq (1 - p) \times \sum_{i=1}^{N-1} B_i + B_N. \quad (4)$$

Для улучшения условий работы АЗ диапазон углов упреждения выбирается таким образом, чтобы уменьшить максимальную дальность съёмки на всех маршрутах площадки и изменение дальности на каждом маршруте площадки:

$$D_{\max} \rightarrow \min, \dot{D}(t_{HM_i}) = 0, i = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Условия (4), (5) определяют необходимое количество маршрутов («центров») N для съёмки площадки, условия (3)-(5) – параметры этих маршрутов (1).

При зондировании маршрутов площадки преимущественно используется азимутальная съёмка с заданным значением параметра продольного бега изображения $W_{ХП}/D$ для ЦЛВ [4].

Декомпозицию площадки (2) на маршруты с параметрами (1), их сопряжение с учётом возможностей СУД предлагается проводить в следующей последовательности.

1. По заданным $\{\lambda_{Ц}, \varphi_{Ц}, A, B, L\}$ однозначно определяется отрезок на земной поверхности $[(\lambda_{Н}, \varphi_{Н}), (\lambda_{К}, \varphi_{К})]$, которому принадлежат начальные точки $m_0^{(n)} \in M_n$, где M_n – центральные линии маршрутов площадки. При этом A задаёт вектор нормали к отрезку, B – его длину. За начало отрезка $(\lambda_{Н}, \varphi_{Н})$ принимается тот конец, который расположен ближе к трассе полёта КА.

2. Оценивается минимально необходимое количество маршрутов N , покрывающих площадку.

3. Рассчитываются в первом приближении координаты начальных точек маршрутов $m_0^{(n)}$, покрывающих площадку, $(\lambda_{0i}, \varphi_{0i}) \in [(\lambda_{Н}, \varphi_{Н}), (\lambda_{К}, \varphi_{К})]$, $i = 1, \dots, N$. Расчёт координат $(\lambda_{0i}, \varphi_{0i})$, $i = 1, \dots, N$, проводится итерационно. Для первой итерации рассматривается ширина маршрута площадки в его начальной точке, для последующих итераций – также в середине и конце маршрутов для обеспечения заданного процента перекрытия.

4. Если $N = 2$, то значения углов упреждения ϑ_{yi} , $i = 1, 2$, для маршрутов площадки подбираются итерационно таким образом, чтобы угол упреждения на конец первого маршрута $\vartheta_{км1}$ был равен по модулю углу упреждения на начало второго маршрута ϑ_{y2} : $\vartheta_{км1} =$

– ϑ_{y2} , $|\vartheta_{км1}| = |\vartheta_{y2}| \rightarrow \min$, но так, чтобы выполнялись ограничения СУД при перенацеливании между первым и вторым маршрутами, или $(t_n^{(2)} - t_k^{(1)}) \geq T_{\min}$, где T_{\min} – минимальное допустимое время, необходимое для перенацеливания [7].

Если $N = 3$, то значения угла упреждения на начало среднего (второго) маршрута ϑ_{y2} подбирается итерационно таким образом, чтобы угол упреждения на конец второго маршрута $\vartheta_{км2} = -\vartheta_{y2}$. Значение угла упреждения на начало третьего маршрута ϑ_{y3} подбирается минимально возможным, чтобы выполнялись ограничения СУД при перенацеливании между вторым и третьим маршрутами: $|\vartheta_{y3}| \rightarrow \min$. Значение угла упреждения на начало первого маршрута ϑ_{y1} задаётся равным углу тангажа на конец третьего маршрута, взятому с противоположным знаком: $\vartheta_{y1} = -\vartheta_{км3}$.

Для $N > 3$, алгоритм расчёта углов упреждения ϑ_{yi} , $i = 4, \dots, N$, аналогичен алгоритму расчёта ϑ_{y3} при $N = 3$.

Если суммарная ширина маршрутов площадки при рассчитанных углах упреждения, с учётом необходимого перекрытия, не достигает заданной, то абсолютная величина углов упреждения для крайних маршрутов площадки должна быть увеличена.

5. Значения параметра $(W_{хп}/D)_{зад}$, который определяет закон сканирования, для маршрутов площадки рассчитываются из условия постоянства угла ϑ на начало наблюдения маршрута.

Если $|A_{отн}| > A^*$, где A^* – некоторая константа, то значения параметра $(W_{хп}/D)_{зад}$ для маршрутов площадки задаются максимальными из реализуемого АЗ диапазона.

6. Длительность маршрутов τ_m заданной длины L в первом приближении находится из уравнения:

$$\frac{\dot{W}_{M0}}{2} \tau^2 + W_{M0} \tau - L = 0$$

где W_{M0} – величина относительной скорости движения по земной поверхности точки пересечения с ней ЦЛВ \overline{W}_M в начальной точке маршрута, \dot{W}_{M0} – величина производной относительной скорости движения по земной поверхности точки пересечения с ней ЦЛВ \overline{W}_M в начальной точке маршрута.

7. Уточнение координат начальных точек маршрутов площадки проводится по результатам оценки перекрытия между соседними маршрутами, для чего необходимо провести расчёт расстояния между соседними точками смежных маршрутов (на начало, середину и конец маршрутов).

В результате за некоторое конечное число итераций будут определены все параметры (1) маршрутов площадки (2), удовлетворяющие условиям (3)-(5).

Набор параметров (2) содержит все необходимое для декомпозиции площадок на маршруты (1) и однозначно задаёт площадку на земной поверхности. Разработанный алгоритм обеспечивает расчёт:

– координат начальных точек маршрутов (1) по заданным длине L , азимуту съёмки A , координатам геометрического центра площадки (2);

– параметра продольного бега изображения для ЦЛВ маршрутов из условий $\dot{D} \equiv 0$ или $\mathcal{Q} \equiv 0$ в начальных точках маршрутов;

– длительности маршрутов по заданным \mathcal{Q}_y , $(W_{\text{ХП}}/D)_{\text{Зад}}$, L .

Основное направление совершенствования разработанного алгоритма – оптимизация по количеству выполняемых итераций.

Заключение

Изложены условия съёмки площадки, предложен вариант автономного формирования программ управления для реализации съёмки площадок в БКУ перспективных КА ДЗЗ, формализованы условия расчёта программы управления и структура исходных данных, задающих площадку. Представлен разработанный алгоритм декомпозиции площадки на отдельные маршруты, реализация которого в БКУ позволит увеличить общую эффективность эксплуатации КА.

Исследование проведено при поддержке РФФИ, проекты № 13-08-97019 p_поволжье_a.

Библиографический список

- 1 Кирилин А.Н., Аншаков Г.П., Ахметов Р.Н., Сторож А.Д. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Самара: ИД «АГНИ», 2011, 280 с.
- 2 Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М., Горелов Ю.Н. Управление угловым движением КА ДЗЗ//Общероссийский научно-технический журнал «Полёт». 2006. №6. С. 12-18.
- 3 Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Мочалов В.А., Юрин В.Е. Организация решения целевых задач в бортовых комплексах управления КА зондирования // Сб. докл. «XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам». 2011. С. 263-269.

- 4 Галкина А.С., Мантуров А.И., Пыринов Н.И., Юрин В.Е. Использование вычислительных методов при параметризации программы управления угловым движением в бортовых комплексах управления космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Самар. госуд. аэрокосм. ун-та им. акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 4 (35). С. 59-68.
- 5 Галкина А.С., Мантуров А.И., Рублёв В.И., Юрин В.Е. Анализ точности формирования и реализации программ управления угловым движением космического аппарата при использовании системы спутниковой навигации // Гироскопия и навигация. 2010. № 1. С. 15-25.
- 6 Горелов Ю.Н., Юрин В.Е. Об оптимальном многомаршрутном сканировании для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Известия СНЦ РАН. 2013. Т.15. № 6. С.140-147.
- 7 Горелов Ю.Н., Курганская Л.В., Мантуров А.И., Соллогуб А.В., Юрин В.Е. К задаче оптимизации программ управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Гироскопия и навигация. 2014. № 1 (84). С. 81-97.