

## К ВОПРОСУ СИНТЕЗА ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ СЪЕМКИ МАРШРУТА С ПЕРЕМЕННЫМ АЗИМУТОМ

Современные космические аппараты (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) осуществляют съемку на поверхности Земли маршрутов, которые близки к форме к прямоугольникам. Такие маршруты, как правило, расположены эквидистантно трассе полета аппаратов или таким образом, что азимут центральной линии маршрута (ЦЛМ) постоянен на всем протяжении маршрута [1, 2].

К перспективным видам съемки можно отнести съемку маршрутов с переменным азимутом ЦЛМ. Такая съемка предполагает использование на КА аппаратуры зондирования с узкой полосой захвата и зондирование маршрутов с криволинейной центральной линией, например, береговой линии моря. Для съемки маршрутов необходимо формировать исходные характеристики маршрутов и программы управления угловым движением КА.

Используемые на КА ДЗЗ методы формирования программы управления угловым движением предполагают, что маршрут может быть задан следующей совокупностью характеристик [3]:

$$\left\{ \{ \varphi_i, \lambda_i \}, i = 0, \dots, n, A, L, \Delta H, (W_{ХП} / D)_{ЗЭЛ} \right\},$$

где  $\varphi_i, \lambda_i$  – широта и долгота начальной точки ЦЛМ;  $A$  – азимут центральной линии маршрута (азимут – угол между направлением на север и касательной к ЦЛМ);  $L$  – длина центральной линии маршрута;  $\Delta H$  – среднее на маршруте превышение над обобщенным эллипсоидом;  $(W_{ХП} / D)_{ЗЭЛ}$  – параметр, определяющий требуемую скорость бега изображения для ЦЛМ.

Для определения программы управления угловым движением введем понятие программной системы координат (ПСК). Центр ПСК совпадает с центром масс КА;  $OY_D$  противоположна линии визирования, направленной из центра масс КА в наблюдаемую точку ЦЛМ. Вектор дальности  $D$  направлен от центра масс КА до наблюдаемой точки земной поверхности.  $W_M$  – вектор относительной скорости точки пересечения линии визирования КА и поверхности Земли на уровне маршрута. Ось  $OX_D$

падает с направлением вектора  $W$  – проекции вектора  $W_M$  на плоскость, перпендикулярную линии визирования. Ось  $OZ_{II}$  дополняет систему до правой. Проекция вектора  $W$  на оси  $OX_{II}$  и  $OZ_{II}$  обозначим соответственно  $W_{XII}$  и  $W_{ZII}$ . Будем полагать, что ПСК в каждый момент времени при съемке маршрута определяет требуемое программное угловое положение некоторой связанной системы координат (ССК) КА. При этом ось ССК, соответствующая оси  $OX_{II}$ , совпадает с направлением скорости сдвига изобращения, реализуемого в аппаратуре зондирования.

Под программой управления угловым движением (ПУУД) КА для съемки заданного маршрута (1) понимаются зависимости от времени углов ориентации ПСК  $OX_{II}Y_{II}Z_{II}$  относительно, например, орбитальной системы координат (ОСК)  $OX_0Y_0Z_0$ , однозначно определяющие ориентацию КА, исходя из выполнения условий:

– поддержания заданного значения параметров  $W_{XII}/D$  и  $W_{ZII}/D$  для ПЦМ:

$$W_{XII}/D = (W_{XII}/D)_{зад} = const; \quad W_{ZII}/D = 0; \quad (2)$$

– ограничений на допустимые диапазоны углов программных поворотов ПСК относительно ОСК по гашгажу  $\theta$ , крену  $\gamma$  и рысканию  $\psi$ :

$$\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max}, \quad \gamma_{min} \leq \gamma < \gamma_{max}, \quad \psi_{min} \leq \psi \leq \psi_{max}, \quad (3)$$

а также на допустимые абсолютные значения угловой скорости  $\omega(t)$  и ускорения  $\varepsilon(t)$  ПСК относительно ОСК:

$$|\omega(t)| \leq \omega_{max}, \quad |\varepsilon(t)| \leq \varepsilon_{max}. \quad (4)$$

Определение ОСК проводится в соответствии с [4].

Если ПЦМ представляет собой некоторую функцию, описывающую кривую на земной поверхности, то для формирования программы управления угловым движением при съемке криволинейного маршрута необходимо в каждый момент времени вычислять азимут ПЦМ. Затем можно использовать алгоритмы формирования ПУУД [3].

Пусть задан набор  $n$ -точек на земной поверхности:  $\{(\varphi_{3дi}, \lambda_{3дi}), (\lambda_{3дi}, \lambda_i)\}$ ,  $i = 0, n$ , где  $(\varphi_{3дi}, \lambda_{3дi})$  – широта  $i$ -ой точки;  $(\lambda_{3дi}, \lambda_i)$  – долгота  $i$ -ой точки.

Тогда для определения азимута ПЦМ может быть задана одним из трех спосо-

бов:

1. Параметрически в виде полиномов, зависящих от произвольного параметра  $p$ :

$$\lambda(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_k p^k;$$

$$\varphi(p) = b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_k p^k.$$

2. В виде функции  $\varphi(\lambda)$ . Чтобы воспользоваться этим способом набор  $(\lambda_{3АД})_i$  должен быть упорядочен по возрастанию или по убыванию:

$$\varphi(\lambda) = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + \dots + a_k \lambda^k.$$

Для поиска оптимального вида ЦЛМ, проходящей на минимальном расстоянии от данных точек, воспользуемся методом наименьших квадратов. Максимальную степень аппроксимирующего полинома примем равной 4.

3. В виде сплайн-функции, например, 4-ой степени:

$$\lambda_k(p) = C_{0k} + C_{1k} p + \dots + C_{4k} p^4,$$

$$\varphi_k(p) = A_{0k} + A_{1k} p + \dots + A_{4k} p^4, \quad k = n-1.$$

Заданы координаты  $n$ -точек  $\{(\varphi_{3АД})_i, (\lambda_{3АД})_i\}$ . Для построения сплайнов рассчитываются новые координаты  $(\lambda_i^*, \varphi_i^*)$  по формулам:

$$\lambda_0^* = \lambda_0, \quad \varphi_0^* = \varphi_0,$$

$$\lambda_i^* = 0,5 \cdot (\lambda_{i+1} + \lambda_i), \quad \varphi_i^* = 0,5 \cdot (\varphi_{i+1} + \varphi_i), \quad i = 1, \dots, n-1,$$

$$\lambda_n^* = \lambda_n, \quad \varphi_n^* = \varphi_n.$$

На следующем шаге вычисляются коэффициенты полиномов, исходя из условия, что в граничных точках значения первых и вторых производных полиномов совпадают.

Воспользуемся сплайн-интерполяцией для описания криволинейных маршрутов, чтобы обеспечить наблюдение некоторой совокупности заданных точек на земной поверхности. На рис. 1-4 приведен пример, иллюстрирующий формирование программ управления угловым движением для съемки маршрута с переменным азимутом.

Пусть на поверхности Земли заданы координаты некоторых точек. ЦЛМ строится с помощью сплайн-функции (7) (рис. 1). В каждый момент наблюдения маршрута рассчитываются трасса полета и полоса захвата (рис. 2), значения углов ориентации и их производных (рис. 3-4).

Практическое использование возможности формирования программ управления угловым движением для съемки криволинейных маршрутов на поверхности Земли может привести к повышению эффективности эксплуатации КА.

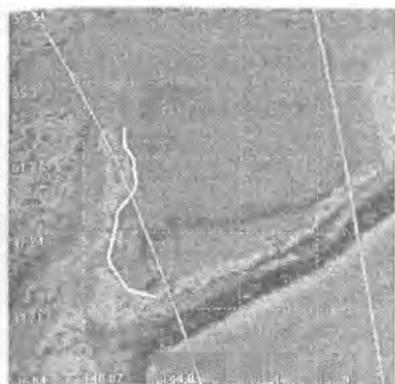


Рис. 1. Задание центральной линии

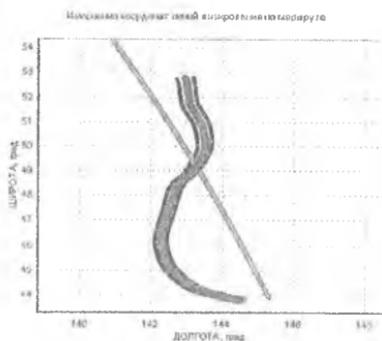


Рис. 2. Построение ЦЛМ, трассы и полосы захвата

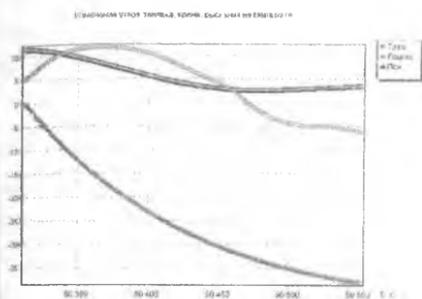


Рис. 3. Графики изменения углов ориентации на маршруте

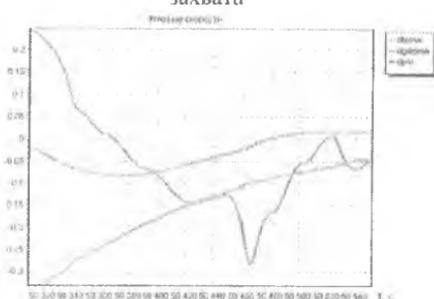


Рис. 4. Графики изменения производных углов ориентации на маршруте

### Библиографический список

1. Агапов В. Первый снимок метрового разрешения с КА Ikonos // Новости космонавтики, 1999. №12. – С. 37.
2. Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М., Горелов Ю.И. Управление угловым движением КА ДЗЗ // Полет, 2006. №6. – С. 12-18.
3. Аншаков Г.П., Антонов Ю.Г., Мантуров А.И., Усталов Ю.М. Интегрированная система управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли // IX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – Санкт-Петербург, 2002. – С. 77-85.
4. Основы теории полета космических аппаратов. Под редакцией Г.С. Нариманова. – М.: Машиностроение, 1972.