

Мантуров А.И., Мочалов В.А., Усталов Ю.М., Юрин В.Е.

### АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «РЕСУРС-ДК1»

На современном этапе создания автоматических низкоорбитальных космических аппаратов (КА) зондирования земной поверхности, оснащённых оптико-электронной аппаратурой наблюдения и высокоскоростной радиолинией передачи информации на наземные пункты приёма, проблема эффективного управления ими становится одной из важных. Это обусловлено усложнением задач наблюдения (съёмка маршрутов произвольного азимута относительно трассы полёта [1], реализацией требуемых, с точки зрения качества информации, условий сканирования маршрутов и возросшими требованиями к точности, автономности и оперативности управления). Формирование программ управления угловым движением КА непосредственно в бортовом комплексе управления (БКУ) мотивируется стремлением эффективного проведения указанных видов зондирования земной поверхности. Рассматриваемая проблема решается на основе программно-координатного метода управления КА [2]. Реализация программно-координатного метода управления КА требует решения в БКУ задач баллистико-навигационного обеспечения: высокоточного глобального определения параметров движения центра масс КА с использованием системы спутниковой навигации; высокоточного оперативного прогнозирования параметров движения центра масс КА на заданные моменты времени на интервале планирования; формирования программ управления угловым движением КА на интервалах решения целевых и функциональных задач; формирования программ управления наведением антенных устройств высокоскоростной радиолинии на наземные пункты приёма и других.

Районы зондирования на интервале времени полёта КА (интервале зондирования) задаются в виде упорядоченного по времени множества маршрутов, каждый из которых характеризуется совокупностью параметров:  $\varphi_0, \lambda_0, A, \Delta H, (W_{ХП/D})_{ЗД}, \tau, \psi_{Н}, p$ , где  $\varphi_0, \lambda_0$  – координаты начальной точки центральной линии маршрута,  $A$  – азимут сканирования,  $\Delta H$  – среднее на маршруте возвышение над общеземным эллипсоидом,  $(W_{ХП/D})_{ЗД}$  – параметр, определяющий требуемую скорость продольного бега изображения,  $\tau$  – длительность маршрута,  $\psi_{Н}$  – заданный угол тангажа на начало наблюдения маршрута,  $p$  – признак условий сканирования маршрутов.

Параметрами программы управления угловым движением (ПУУД) являются:

матрица направляющих косинусов  $Q(t)$ , векторы угловой скорости  $\bar{\omega}(t)$  и углового ускорения  $\bar{\varepsilon}(t)$  осей программной системы координат (ПСК), определяемые в инерциальной системе координат (ИСК) [2]. Программная система координат определяет в каждый момент времени полёта требуемое для решения соответствующих задач КА угловое движение его связанной системы координат.

При формировании программы управления угловым движением КА на маршрутных интервалах должны выполняться условия сканирования:

а)  $(W_{ХП}/D) = (W_{ХП}/D)_{\text{зад}} = \text{const}$ ,  $W_{ЗП}/D = 0$  на центральной линии маршрута;

б)  $((W_{ХП}/D) - (W_{ХП}/D)_{\text{зад}}) \rightarrow \min$  (по полю маршрута),

где  $(W_{ЗП}/D)$  – параметр, определяющий скорость поперечного бега изображения;  $D$  – дальность от центра масс КА до точки зондирования.

Допустимые значения модуля угловой скорости  $\bar{\omega}(t)$  и ускорения  $\bar{\varepsilon}(t)$  ПСК относительно ИСК ограничены:

$$|\bar{\omega}(t)| \leq \omega_{\text{доп}}, |\bar{\varepsilon}(t)| \leq \varepsilon_{\text{доп}}. \quad (1)$$

Задача формирования программы управления угловым движением КА на интервале зондирования  $[t_{\text{н}}, t_{\text{к}}]$  декомпозируется на задачи формирования ПУУД для интервалов времени, соответствующих съёмке маршрутов, и интервалов перенацеливания между маршрутами – межмаршрутных интервалов (ММИ). Эти задачи реализуются различными алгоритмами.

Формулировка задачи определения ПУУД КА на маршруте: для известных на момент начала сканирования маршрута  $t_0$  параметров движения центра масс КА в ИСК – радиуса-вектора  $\vec{r}(t_0)$  и вектора скорости  $\vec{V}(t_0)$  и заданных характеристик маршрута определить ПУУД  $Q(t)$ ,  $\bar{\omega}(t)$ ,  $\bar{\varepsilon}(t)$  на интервале съёмки маршрута из условий сканирования при ограничениях (1).

Формулировка задачи определения ПУУД КА на межмаршрутных интервалах  $[t^{\text{н}}, t^{\text{к}}]$ : для известных параметров программы управления угловым движением КА в орбитальной системе координат (ОСК) в момент  $t_{\text{н}}$  начала ММИ – окончания очередного маршрута  $t_{\text{м}}^{\text{н}}$  и в момент  $t_{\text{к}}$  окончания ММИ – начала следующего маршрута  $t_{\text{м}}^{\text{к}}$ , определить ПУУД  $Q(t)$ ,  $\bar{\omega}(t)$ ,  $\bar{\varepsilon}(t)$  для интервала  $[t^{\text{н}}, t^{\text{к}}]$ , исходя из обеспечения непрерывности и дифференцируемости угловых скоростей и ускорений на этих интервалах с выполнением краевых условий.

В общем виде ПУУД на межмаршрутном интервале – интервале перенацелива-

ния  $T = t_{II}^k - t_{II}^{ff}$  может включать участки разгона:  $\Delta t_1 = \Delta \bar{t}$ , и торможения:  $\Delta t_3 = \Delta \bar{t}$ , а также участок движения с постоянной в ОСК угловой скоростью между ними:  $\Delta t_2 = T - 2\Delta \bar{t}$ .

Алгоритмы определения ПУУД на маршрутах и межмаршрутных интервалах используют сплайн-функции в виде степенных полиномов [3]. На основе этих алгоритмов для КА «Ресурс-ДК» №1 разработаны и введены в состав бортового программного обеспечения БКУ КА программы для планирования и формирования управления угловым движением КА с целью реализации азимутальной съёмки с минимизацией изменения параметра  $W_{\text{ХП}}/D$  по ширине полосы захвата целевой аппаратуры [1].

Российский оперативный КА нового поколения «Ресурс-ДК» №1, запущенный на орбиту 15 июня 2006 года и функционирующий до настоящего времени, предназначен для многозонального дистанционного зондирования земной поверхности с целью получения высокоинформативных изображений в видимом диапазоне спектра с обеспечением оперативной доставки информации по радиоканалу непосредственно на наземные пункты приема.

Испытания КА с реализацией азимутальной съёмки были проведены в процессе его лётной эксплуатации в два этапа. На первом этапе отработаны 24 режима, содержащих по одному маршруту с относительным азимутом от  $-27^\circ$  до  $+25^\circ$  при углах поворота КА по крену от  $-22^\circ$  до  $+24^\circ$ . На втором этапе отработан 21 режим. Режимы содержали от одного до семи маршрутов с относительным азимутом от  $-26^\circ$  до  $+35^\circ$  при углах поворота КА по крену от  $-28,2^\circ$  до  $26,1^\circ$ .

Зависимости программной угловой скорости  $\bar{\omega}$  и ускорения  $\bar{e}$  на межмаршрутных интервалах в проекциях на оси ПСК приведены на рис. 1, 2. Зависимости программной угловой скорости  $\bar{\omega}$  на маршрутах в проекциях на оси ПСК приведены на рис. 3.

Анализ полученных из БКУ в составе телеметрической информации расчётных значений параметра скорости движения изображения  $W_{\text{ХП}}/D$  по зонам компенсации целевой аппаратуры на начало и конец маршрутов показывает, что формируемое в БКУ программное угловое движение КА на маршруте обеспечивает минимальное изменение параметра  $W_{\text{ХП}}/D$ , как по ширине полосы захвата целевой аппаратуры, так и по длине маршрута, то есть обеспечивается односкоростной режим съёмки. При этом на азимутальных маршрутах достигается более чёткое изображение по крайним зонам компенсации при съёмке с большими углами крена. Реализованный в БКУ метод программно-

го управления угловым движением позволяет проводить азимутальную съёмку при любых углах крена в пределах полосы обзора КА без потерь качества изображения на крайних зонах компенсации.

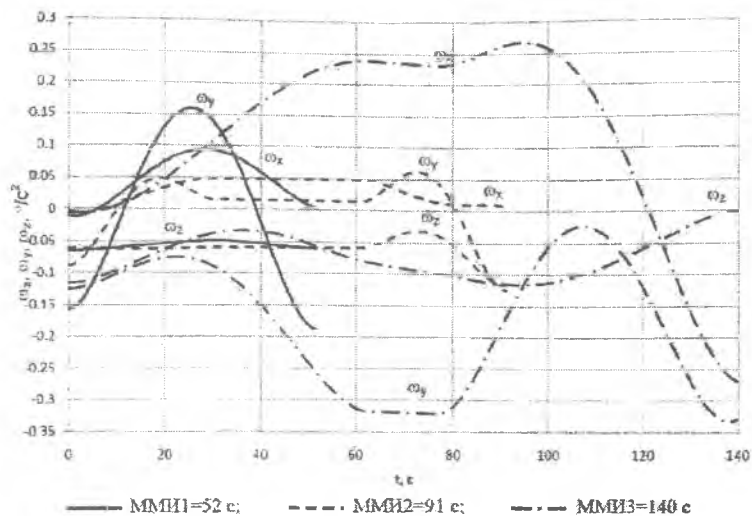


Рис. 1. Изменение проекций угловой скорости ПСК в ИСК на межмаршрутных интервалах

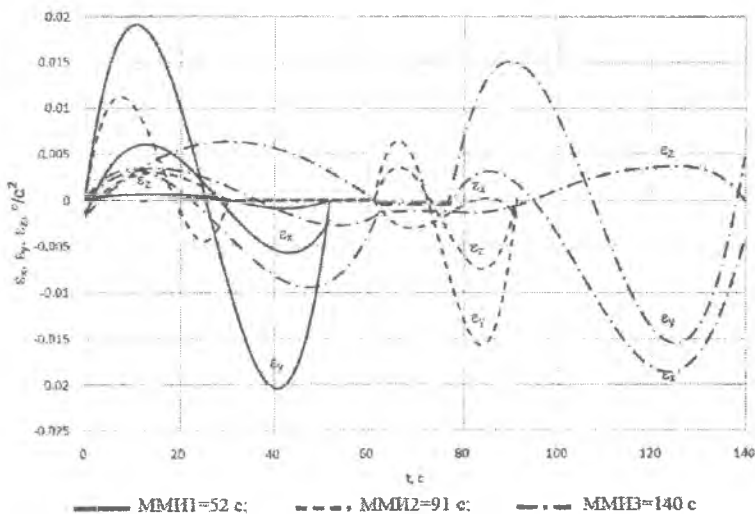


Рис. 2. Изменение проекций углового ускорения ПСК в ИСК на межмаршрутных интервалах

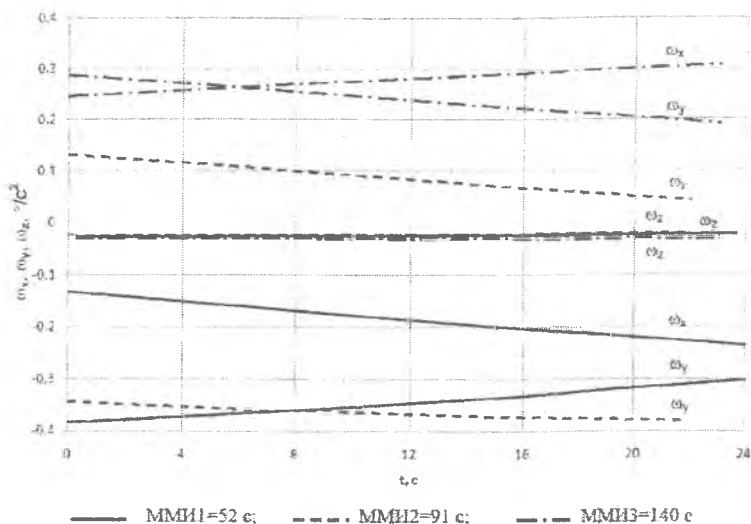


Рис. 3. Изменение проекций угловой скорости ПСК в ИСК на маршрутах

Положительные результаты экспериментальной отработки азимутальной съёмки на КА «Ресурс-ДК» №1 позволили внедрить её для штатного использования потребителями целевой информации.

#### Библиографический список

1. Ахметов, Р.Н. Автономное программное управление угловым движением современных КА ДЗЗ [Текст]/ Р.Н. Ахметов, Г.П. Аншаков, А.И. Мантуров, Ю.М. Усталов и др. // *Аэрокосмический курьер*, 2008. – №6. – С. 20-22.
2. Аншаков, Г.П. Интегрированная система управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли [Текст]/ Г.П. Аншаков, Б.Е. Ландау, А.И. Мантуров, В.Г. Пешехонов и др. // IX С.-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, 27-29 мая, 2002. – СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – С. 77-84.
3. Аншаков Г.П., Моделирование программ управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования при сканировании набегающего потока районов наблюдения [Текст]/ Г.П. Аншаков, А.И. Мантуров, Ю.М. Усталов и др. // XII С.-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, 23-25 мая, 2005. – СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – С. 58-64.