

**Ю. Н. Горелов, О. И. Горелова, С. Б. Данилов** (Самара, СамГУ). **Формирование оптимальных планов сканирования для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.**

Синтез интегральных программ управления угловым движением космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) непосредственно связан с разработкой эффективных методов решения задачи формирования планов зондирования для них в виде последовательности сканируемых маршрутов съемки на заданном интервале планирования для множества заданных районов наблюдения в полосе обзора КА ДЗЗ [1]–[3]. При разработке этих методов вполне достаточно использовать приближенно оптимальные решения задач синтеза законов сканирования маршрутов съемки в режиме «push broom» [2] и управления угловым движением КА ДЗЗ на межмаршрутных интервалах, т.к. оптимизация плана зондирования (или, что то же самое, плана сканирования), связанная с производительностью космической системы ДЗЗ, в иерархическом отношении соответствует более высокому уровню оптимизации этой системы.

Потенциальное множество маршрутов съемки на интервале планирования формируется с учетом орбитального движения КА ДЗЗ и задается моделями их центральных линий:  $r_M^{(k)} = r_M^{(k)}(s)$ ,  $s \in [0, s_j^{(k)}]$ ,  $k = 1, 2, \dots, K_{\Pi}$ , где  $K_{\Pi}$  — количество маршрутов в полосе обзора, а  $s_j^{(k)}$  — их длина в единицах дуговой координаты  $s$ . Маршруты характеризуются также условиями съемки  $U_k$ , например, продолжительностью интервала сканирования  $k$ -го маршрута ( $\tau_k$ ); требуемой скоростью бега изображения точек центральной линии в фокальной плоскости аппаратуры зондирования ( $w_k$ ) и т. п. [2], [3]. К ним также относятся допустимые вариации моментов времени начала сканирования  $k$ -го маршрута ( $\Delta t_k$ ), условия освещенности, облачности в районе зондирования и т. п.

Индексацию маршрутов в их потоке в полосе обзора КА можно ввести в порядке возрастания моментов времени  $t_k$  начала их прохождения траверза КА. С атрибутами возможных маршрутов индексное множество  $[1, 2, \dots, K_{\Pi}]$  образует множество  $M_{\Pi} = \{k, t_k, U_k\}_{k=1,2,\dots,K_{\Pi}}$ . Планы сканирования суть подмножества номеров маршрутов  $k_j \in [1, 2, \dots, K_{\Pi}]$ ,  $j = 1, 2, \dots, J_{\Pi}$ ,  $0 < J_{\Pi} \leq K_{\Pi}$ , которые включены в эти планы, и моменты начала их сканирования  $t_{k_j}^* = t_{k_j} + \Delta t_{k_j}$ , где  $|\Delta t_{k_j}| \leq \Delta t_{k_j}^*$ , а  $\Delta t_{k_j}^*$  — предельная вариация  $t_{k_j}$ . Каждому плану сканирования на множестве  $M_{\Pi}$  соответствует, с учетом замены  $t_{k_j}$  на  $t_{k_j}^*$ , подмножество  $M_{\Pi}^* \subseteq M_{\Pi}$ :  $M_{\Pi}^* = \{k_j, t_{k_j}^*, U_{k_j}^*\}_{j=1,2,\dots,J_{\Pi}}$ , где  $U_{k_j}^*$  — условия съемки  $k_j$ -го маршрута при его включении в план.

Ориентируясь на схемы динамического программирования [4], в качестве показателей оптимальности планов зондирования следует выбирать функции  $Q = \sum_{k=1}^{K_{\Pi}} \beta_k q_k(t_k, \tau_k, \Delta U_k)$ , где  $\beta_k = 0, 1$ ;  $q_k = q_k(t_k, \tau_k, \Delta U_k)$  — функции «выигрыша» от включения  $k$ -го маршрута в план  $M_{\Pi}^*$  (с длительностью  $\tau_k$  и остальными условиями зондирования  $\Delta U_k$ , в том числе факторами, имеющими случайный характер). Если план  $M_{\Pi}^*$  сформирован, т.е. определены значения переменных  $\beta_k$  ( $\beta_k = 1$ , если  $k$ -й маршрут включен в данный план, иначе  $\beta_k = 0$ ) и последовательность  $k_1, k_2, \dots, k_{J_{\Pi}}$ , задающая порядок и число включаемых в план сканирования маршрутов, то его эффективность оценивается значением  $\widehat{Q}_{J_{\Pi}} = \sum_{j=1}^{J_{\Pi}} q_{k_j}(t_{k_j}^*, \tau_{k_j}, \Delta U_{k_j}^*)$ . Очевидно, что интерпретация оптимальности плана  $M_{\Pi}^*$  определяется видом функций  $q_k = q_k(t_k, p_k, \tau_k, \Delta U_k)$ , например, при  $q_k = 1$  получим план с максимальным количеством маршрутов, если же  $q_k = \tau_k$ , то — с максимальной суммарной длительностью сканирования, и т. п.

Следуя далее схеме динамического программирования [4], изложим один из подходов к формированию планов  $M_{\Pi}^*$ , в котором процесс планирования — некоторый пошаговый процесс. При этом на его первом шаге формируется множество планов,

в которых предусматривается сканирование только одного маршрута съемки; на втором шаге — двух маршрутов и т. д. Для этого введем в рассмотрение функции  $q_k = q_k(\Delta t_k, w_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K_{\Pi}$ , где для сокращения записи опущены соответствующие аргументы, и рассмотрим функции

$$F_m(k_m, \Delta t_{k_m}, w_{k_m}) = \sum_{j=1}^m q_{k_j}(\Delta t_{k_j}, w_{k_j}), \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

которые будут равны  $\widehat{Q}_m$  для оптимального плана, содержащего  $m$  маршрутов, последним из которых является маршрут с номером  $k_m$  и с параметрами  $\Delta t_{k_m}$  и  $w_{k_m}$ . Тогда рекуррентное соотношение, связывающее значения функций (1) для всех  $m = 2, 3, \dots, K_{\Pi}$ , имеет следующий вид:

$$F_m(k_m, \Delta t_{k_m}, w_{k_m}) = \max_{F_{m-1} \neq 0, P_{m-1} \neq 0} \{q_{k_m}(\Delta t_{k_m}, w_{k_m}) + F_{m-1}(k_{m-1}, \Delta t_{k_{m-1}}, w_{k_{m-1}})\}, \quad (2)$$

где  $k_m = 1, 2, \dots, K_{\Pi}$ , а значение функции (1) при  $m = 1$  вычисляется так:

$$F_1(k_1, \Delta t_{k_1}, w_{k_1}) = \begin{cases} q_{k_1}(\Delta t_{k_1}, w_{k_1}), & \text{если } P_0 \neq 0, \\ 0, & \text{если } P_0 = 0. \end{cases}$$

В (2) должны выполняться следующие условия: во-первых,  $F_{m-1} \neq 0$  или  $F_{m-1}(k_{m-1}, \Delta t_{k_{m-1}}, w_{k_{m-1}}) \neq 0$  — условие существования такого плана, в котором количество маршрутов съемки равно  $m - 1$ , и при этом последним является маршрут с номером  $k_{m-1}$  и с параметрами  $\Delta t_{k_{m-1}}$  и  $w_{k_{m-1}}$ ; во-вторых,  $P_{m-1} \neq 0$  или  $P_{m-1}(k_{m-1}, \Delta t_{k_{m-1}}, k_m, \Delta t_{k_m}) \neq 0$  — условие допустимости межмаршрутного перехода с конечной точки  $k_{m-1}$ -го маршрута (при его сканировании с  $\Delta t_{k_{m-1}}$  и  $w_{k_{m-1}}$ ) на начало  $k_m$ -го маршрута съемки (с  $\Delta t_{k_m}$  и  $w_{k_m}$ ).

На основе рекуррентных соотношений (2) были разработаны и реализованы высокоэффективные алгоритмы синтеза оптимальных планов зондирования на многовитковых интервалах полета КА ДЗЗ при сканировании от сотен до нескольких тысяч маршрутов съемки с длительностью от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. Эффективность разработанных алгоритмов обеспечивает не только оперативные коррекции планов зондирования, но и при соответствующей их модификации они могут быть рекомендованы для использования в бортовых комплексах управления перспективных КА ДЗЗ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 08-08-99116.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелов Ю. Н. Интегральные программы управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли. — Обзорение прикл. и промышл. матем., 2008, т. 15, в. 3, с. 1063–1065.
2. Бакланов А. И. Системы наблюдения и мониторинга. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2009, 234 с.
3. Аншаков Г. П., Горелов Ю. Н., Мантуров А. И., Усталов Ю. М. Управление движением космического аппарата дистанционного зондирования. — Общерос. научно-техн. журнал «Полет», 2006, № 6, с. 12–18.
4. Моисеев Н. Н. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1974, 528 с.