УДК 629.78.05

Горелов Ю.Н., Пермяков А.В.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКОНОВ СКАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ СЪЁМКИ В РЕЖИМЕ «PUSH BROOM» ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В [1, 2] рассмотрена новая вариационная задача синтеза оптимальных законов сканирования произвольных маршрутов съёмки (МС) в режиме «push broom» [3] для космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли [3, 4]. Модель процесса сканирования [2] включает: во-первых, показатель качества сканирования:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} F(t, s, w) w dt, \tag{1}$$

где s – дуговая координата, отсчитываемая вдоль центральной линии МС [4] от его начала (s_f – длина сканируемого МС), w – управляющий параметр, t_0 и t_f – соответственно моменты времени начала и окончания процесса сканирования МС; во-вторых, дифференциальную связь для фазовой переменной s:

$$ds/dt = P(t, s) w, \tag{2}$$

для которой выполняются граничные условия:

$$s(t_0) = 0 \ \text{ и } \ s(t_f) = s_f. \tag{3}$$

Решение дифференциального уравнения (2) $s = s(t; t_0, w(\cdot))$ с нулевым начальным условием и с заданной функцией $w = w(t, s)$доставляет закон сканирования для МС. Минимуму функционала (1) отвечает оптимальный закон сканирования. На практике [3] желательны постоянные значения управляющего параметра: $w^* = \text{const}$. В этом случае вариационная задача (1) – (3) сводится к задаче параметрической оптимизации закона сканирования $s = s(t; t_0, w^*)$ для заданного МС (по параметру w^*).

1. Если в (1) и (2) $w^* = \text{const}$, то вместо (1) вводится целевая функция:

$$J^* = J(w^*) = w^* \int_{t_0}^{t_f} F(t, s^*(t, w^*), w^*)\, dt, \tag{4}$$

где $s = s^*(t, w^*)$ – решение уравнения (2) при $w = w^*$. Поскольку здесь предполагается, что $w^* > 0$, то с учётом $P(t, s) > 0$ эти решения – строго монотонно возрастающие функции и, более того, для них существуют обратные функции $t = \sigma(s; w^*)$. Тогда для заданного $w = w^*$ можно определить не только значение (4), но и длительность сканирования МС, поскольку момент времени его завершения определяется так:

$$t_f^* = t_0 + \frac{1}{w^*} \int_0^{s_f} \frac{ds}{P(\sigma(s; w^*), s)}, \qquad (5)$$

где $t_f^* = t_f(w^*)$. Таким образом, в задаче параметрической оптимизации требуется найти допустимое значение парамстра $w = w^*$, для которого целевой функции (4) с учётом (2) и (3) доставляется минимальное значение. А именно, требуется найти минимум целевой функции $J(w^*)$ по параметру w^*:

$$w^*_{\text{opt}} = \arg \min_{w_{\min} \le w \le w_{\max}} J^*(w^*). \qquad (6)$$

2. В общем случае целевая функция (4), момент времени t_f (5) и, стало быть, длительность $(t_f - t_0)$ сканирования МС зависят не только от w^*, но и от выбора t_0 Ему отвечает вполне определённое значение так называемого угла «тангажного упреждения» [3, 4], которому, в свою очередь, соответствует определённое значение угла между линией визирования аппаратуры зондирования КА и касательным ортом к центральной линии МС в её начальной точке – α_0. Наоборот, любому значению α_0 в силу законов орбитального движения КА будет отвечать вполне определённый момент времени t_0, а именно: $t_0 = \xi(\alpha_0)$, где $\xi(\alpha_0)$ – строго монотонно возрастающая функция. В конечном счёте, имеет место: $J^* = J^*(w^*, \alpha_0)$, то есть целевую функцию (4) можно минимизировать не только по параметру w^*, но и по параметру α_0:

$$\{w^*_{\text{opt}}, \alpha^0_{\text{opt}}\} = \arg \min_{\substack{w_{\min} \le w^* \le w_{\max} \\ \alpha^0_{\min} \le \alpha_0 \le \alpha^0_{\max}}} J^*(w^*, \alpha_0). \qquad (7)$$

Очевидно, что решения задач (6) и (7) можно принимать в качестве начального приближения при численном решении вариационной задачи (1) – (3) [5].

3. Результаты решения задачи (7), которые далее приводятся, были получены для следующих условий. Во-первых, модель МС была принята в виде образа прямой на плоскости (в геодезических координатах при её отображении на поверхность геоида), во-вторых, имеются ограничения для параметров: $w^* \in [0{,}01\ м/с; 0{,}14\ м/с]$; $\alpha_0 \in [-30°, 30°]$. Абсолютный азимут центральной линии МС был принят равным $A = 45°$, а наклонение круговой орбиты КА – $i = 57°$. Результаты решения задачи (7)

при указанных условиях в виде её значений $J^* = J^*(w^*, \alpha_0)$ приведены на рис.1, где минимальное значение целевой функции (4) равно $3{,}16\times10^{-8}$ (в точке с $\alpha_0 \approx 0°$ и $w^* \approx$ 0,068 м/с).

Вид поверхности, $J^* = J^*(w^*, \alpha_0)$, приведённый на рис. 1, в окрестности минимума (4) является характерным и повторяется при других условиях моделирования. Соответственно, её сечения при фиксированных значениях угла «тангажного упреждения» суть получаемые значения для задачи (6).

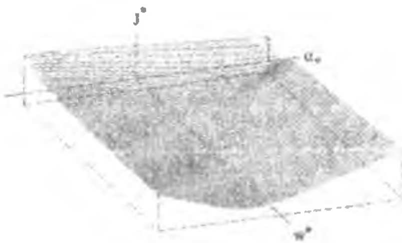

Рис. 1.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 08-08-99116.

Библиографический список

1. Горелов, Ю.Н. Об оптимальном сканировании маршрутов съёмки на поверхности Земли космическими средствами дистанционного зондирования [Текст]/ Ю.Н. Горелов// Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2009. – Т.16. – Вып.1. – С.141-142.
2. Горелов, Ю.Н. К задаче синтеза законов оптимального сканирования произвольных маршрутов съёмки для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли [Текст]/ Ю.Н. Горелов, С.Б. Данилов, А.И. Мантуров, Ю.М. Усталов// Управление движением и навигация летательных аппаратов. Сборник научных трудов. – Самара – 2009. – С.66-71.
3. Бакланов, А.И. Системы наблюдения и мониторинга [Текст]/ А.И. Бакланов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.
4. Горелов, Ю.Н. Управление угловым движением КА дистанционного зондирования [Текст]/ Ю.Н. Горелов, Г.П. Аншаков, А.И. Мантуров, Ю.М Усталов// Всерос. научно-техн. журнал «Полет». – 2006. – № 6. – С.12-18.
5. Моисеев, Н.Н. Элементы теории оптимальных систем [Текст]/ Н.Н. Моисеев – М.: Наука, 1974. – 528 с.