УДК 629.78.05

Горелов Ю.Н., Данилов С.Б., Курганская Л.В., Штанов В.Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В ПОЛОСЕ СКАНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Модели сканирования произвольных маршрутов съёмки (МС) для космическ аппаратов дистанционного зондирования в режиме «push broom» [1-3] включают мод ли МС их центральных линий $\mathbf{M} = \mathbf{M}(s)$, задаваемых радиус-векторами (в геоцентр ческой системе координат) $\mathbf{r}_\mathbf{M} = \mathbf{r}_\mathbf{M}(s)$, где s – дуговая координата, отсчитываем вдоль центральной линии МС. При этом $s(t_0)=0$, t_0 – момент начала сканировани $s(t_f)=s_f$, s_f – длина, t_f – момент завершения сканирования МС. Если требует обеспечить высокое качество получаемой информации в пределах всей полосы скан рования МС, то его модель сканирования должна также включать некоторую моде физической поверхности Земли $\mathbf{G}_3$ в пределах полосы сканирования МС, например, виде аппроксимирующей её с требуемой точностью поверхности $\mathbf{\Phi}$. Центральная л ния МС должна лежать на этой поверхности, то есть $\mathbf{M} \in \mathbf{\Phi}$, что означает определе ное согласование модели центральной линии МС и поверхности $\mathbf{\Phi}$. Эта задача пока привлекала внимания исследователей, и до настоящего времени в моделях сканиро ния МС обычно вместо $\mathbf{\Phi}$ используются поверхности, эквидистантные общеземно эллипсоиду $\mathbf{G}_0$.

1. Модели центральной линии и полосы сканирования МС. Модель центральн линии МС в виде кривой $\mathbf{M}$ – её образ в некоторой области [4], которая отвечает со ветствующей части поверхности $\mathbf{G}_0$:

$$\mathbf{V} = \left(-\frac{\pi}{2} \le B \le \frac{\pi}{2},\ 0 \le L \le 2\pi\right),$$

где B и L – внутренние координаты (геодезические широта и долгота). В общем сл чае выбор внутренних координат в области $\mathbf{V}$ произволен. Соответственно, в неко рой включающей полосу сканирования МС (или район зондирования) области $\mathbf{D} \subset$ образ центральной линии МС – кривая $\tilde{\mathbf{M}}$ – задаётся параметрическими уравнениям

$$B = \varphi_1(\theta);\ \ L = \varphi_2(\theta),$$

где $\varphi_1(\theta)$ и $\varphi_2(\theta)$ – заданные функции, θ – некоторый параметр или, в частнос

$\theta = \xi(\tilde{s})$, $\tilde{s}$ – дуговая координата, отсчитываемая на поверхности $\mathbf{G}_0$ вдоль кривой $\tilde{\mathbf{M}}$ от её начала. Для построения модели $\mathbf{M}$ необходимо задать профиль высот над $\mathbf{G}_0$: $H = h(\theta)$, где $h(\theta)$ – некоторая функция. Для поверхности $\boldsymbol{\Phi}$, аппроксимирующей G_3 (по крайней мере, в пределах полосы сканирования МС или в области $\mathbf{D} \subset \mathbf{V}$, где $\tilde{\mathbf{M}} \in \mathbf{D}$), с учётом (2) она определяется так: $h(\theta) = \Phi(\varphi_1(\theta), \varphi_2(\theta))$. Очевидно, что $h(\xi(\tilde{s})) = \tilde{h}(\tilde{s})$, и с учётом, что здесь $ds = \sqrt{1 + (d\tilde{h} / d\tilde{s})^2}\, d\tilde{s}$, можно записать:

$$H = \tilde{h}(\tilde{s}) = \Phi(\mu_1(\tilde{s}), \mu_2(\tilde{s})), \qquad (3)$$

где $\mu_1(\tilde{s}) = \varphi_1(\xi(\tilde{s}))$, $\mu_2(\tilde{s}) = \varphi_2(\xi(\tilde{s}))$.

В конечном счёте, соотношение (3) вместе с параметрическими уравнениями центральной линии МС (2) в виде: $B = \mu_1(\tilde{s})$; $L = \mu_2(\tilde{s})$ является моделью последней в геодезических координатах, для которой не требуется явного задания поверхности $\boldsymbol{\Phi}$.

В общем случае поверхность $\boldsymbol{\Phi}$ в геодезических координатах, по крайней мере, в области $\mathbf{D} \subset \mathbf{V}$, можно задавать в явном виде уравнением: $H = \Phi(B, L)$. Исходными данными для построения $\boldsymbol{\Phi}$ являются: во-первых, модель центральной линии МС в виде её параметрических уравнений и, во-вторых, данные в виде цифровой модели рельефа (ЦМР) [5, 6] для моделируемого участка $\mathbf{G}_3$. Такие модели используются при решении задач пространственного моделирования. При этом широко используются методы интерполяции и аппроксимации, так как исходная информация, как правило, носит дискретный характер и связывается с некоторой сетью и, наиболее часто, с регулярной сетью высотных отметок. При этом часто применяются модели треугольной нерегулярной сети TIN, а в особых случаях в TIN – моделях используется триангуляция Делоне [5, 6].

2. Основные задачи синтеза модели сканирования МС связаны с построением поверхности $\boldsymbol{\Phi}$ с целью надлежащей аппроксимации $\mathbf{G}_3$ в области $\mathbf{D} \subset \mathbf{V}$. Исходными данными при этом являются точки некоторой сети $(\hat{B}_i, \hat{L}_i) \in \mathbf{D} \subset \mathbf{V}$ и значения $\hat{H}_i$, $i = 1, 2, ..., n$. В связи с этим первая задача здесь связана с формированием для области $\mathbf{D} \subset \mathbf{V}$ локальной ЦМР в прямоугольных геоцентрических координатах (в СК-95 или WGS-84) – x_g, y_g, z_g. Обычно отметки высот в ЦМР в геодезических координатах в промежуточных точках сети восстанавливаются с помощью заданных функций

$H = F(B, L)$. Как правило, это линейные комбинации базисных функций (чаще всего простейшие полиномы): $F(B, L) = \sum_{k=1}^{m} a_k f_k(B, L)$, где a_k – весовые коэффициенты, которые можно определить, например, с помощью метода наименьших квадратов [5]. Поэтому, в общем случае, связанную с $\mathbf{D}$ систему точек $(\hat{B}_i, \hat{L}_i, \hat{H}_i)$, $i = 1, 2, ..., n$ всегда можно пополнить промежуточными точками и получить в окрестности полосы сканирования МС более плотную систему точек (B_i, L_i, H_i), $i = 1, 2, ..., N$ $(N > n)$.

Вторая задача синтеза модели сканирования МС связана с тем, что при переходе от геодезических к прямоугольным координатам получим локальную ЦМР, с помощью которой поверхность $\mathbf{\Phi}$ представляется в первом приближении в виде набора плоских треугольников $\hat{\mathbf{\Phi}}$. В этом случае элементарная полоска сканирования [1] – ломанная, а центральная линия МС $\mathbf{M} \in \mathbf{\Phi}$ – кусочно-гладкая кривая, которая будет иметь точки излома. Последнее недопустимо при синтезе программ углового движения космических аппаратов дистанционного зондирования [1,2]. В связи с этим необходимо синтезировать гладкую поверхность $\mathbf{\Phi}$, чтобы векторное уравнение кривой $\mathbf{M} \in \mathbf{\Phi}$ было бы дважды дифференцируемым по $\tilde{s}$. Поэтому надо построить такую поверхность $\mathbf{\Phi}$: $F(x, y, z) = 0$, чтобы она имела наименьшее отклонение от точек локальной ЦМР: (x_i, y_i, z_i), $i = 1, 2, ..., N$. Как и выше, здесь также можно представить функцию $F(x, y, z)$ в виде линейной комбинации простейших полиномов: $F(x, y, z) = \sum_{k=1}^{m} a_k \varphi_k(x, y, z)$. Функции $F(x, y, z)$ можно синтезировать методом «скользящего окна» [5]. В этом случае $a_k = a_k(\tilde{s})$, $k = 1, 2, ..., m$. Если $\varphi_k(x, y, z)$ – полиномы второй степени, то получим семейство поверхностей $\mathbf{П}(\tilde{s})$, которые будут соприкасающимися параболоидами к некоторой искомой поверхности $\mathbf{\Phi}$ [4]. Очевидно, что вершины $\mathbf{П}(\tilde{s})$ будут задавать кривую $\mathbf{M} \in \mathbf{\Phi}$, если это дополнительное условие принималось при синтезе функций $F(x, y, z)$. Тогда вычисление нормали к $\mathbf{\Phi}$ и кривизны кривой $\mathbf{M} \in \mathbf{\Phi}$ существенно упрощается, что необходимо при формировании программ углового движения космических аппаратов дистанционного зондирования.

Отметим, что в настоящее время уровень развития бортовых вычислительных систем позволяет рассматривать и достаточно эффективно решать задачи синтеза локальных ЦМР и моделей сканирования МС непосредственно на борту космических аппаратов дистанционного зондирования.

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. 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.
4. Александров, А.Д. Геометрия [Текст]/ А.Д. Александров, Н.Ю. Нецветаев. – М.: Наука, 1990. – 672 с.
5. Тикунов, В.С. Геоинформатика [Текст]/ В.С. Тикунов.–М.: Изд-ский центр «Академия», кн. 1, 2-е изд., 2008. – 384 с.
6. Лурье, И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков [Текст]/ И.К. Лурье. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.