

УДК 629.197

А. Л. МАКАРОВ

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»,
Украина

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

Приведена методика математического описания протяженных объектов сложной конфигурации при планировании съемки с применением спутников дистанционного зондирования Земли с оптико-электронными сканерами высокого пространственного разрешения. Методика основана на использовании сплайн-интерполяции. Она позволяет получать оптимальное покрытие съемки с учетом полосы захвата съёмочного прибора, требуемого направления сканирования и ограничений системы ориентации спутника. Результаты компьютерного моделирования подтвердили высокую эффективность предложенной методики.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, планирование спутниковой съемки, протяженные объекты сложной конфигурации, оптико-электронный сканер, сплайн-аппроксимация.

Постановка проблемы

При планировании спутниковой съемки протяженных территорий сложной конфигурации (границы, дороги, реки, береговые линии и т.п.), расположенных не вдоль подспутниковой трассы, возникает проблема, связанная с узкой (обычно от 5 до 20 км) полосой захвата оптико-электронных сканеров высокого пространственного разрешения, не позволяющей оперативно снимать произвольно расположенные протяженные участки за один виток [1-3, 15]. Как правило, в таких случаях необходима съемка нескольких сцен с разных витков, причем для солнечно-синхронных орбит, характерных для спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с оптико-электронными сканерами, за сутки одна и та же территория может быть снята только на одном витке. Поэтому даже двухвитковая съемка может потребовать при отсутствии облачности и ограничений на минимальные углы съемки нескольких дней (в зависимости от полосы захвата сканера и диапазона углов перенацеливания спутника). С учетом условий облачности съемка может потребовать еще больше времени, что для большинства прикладных и научных задач неприемлемо [4-6].

Некоторые зарубежные спутники с оптико-электронными сканерами высокого пространственного разрешения позволяют выполнять съемку произвольно-ориентированных прямолинейных протяженных участков. Однако съемка протяженных территорий сложной конфигурации обычно выполняется за несколько витков [7, 8].

Задачи исследования

Существенно повысить оперативность спутниковой съемки протяженных территорий сложной конфигурации позволяет новый метод съемки в процессе перенацеливания (т.е. с ненулевыми угловыми скоростями), реализуемый с помощью программного управления ориентацией спутника [9, 10].

Основными этапами планирования такой съемки являются:

- аппроксимация протяженного объекта, заданного отдельными точками на цифровой картооснове (линейная, квадратичная, сплайновая и т.п.);
- определение оптимального покрытия протяженного объекта путем моделирования съемки с учетом полосы захвата съёмочного прибора, требуемого направления сканирования и ограничений системы ориентации спутника.

Метод сплайн-интерполяции

Для математического описания протяженного объекта функцией $S(x)$, используется естественный кубический интерполирующий сплайн [1-3], в котором $S''(x_0) = 0$ и $S''(x_n) = 0$, с последующим сглаживанием методом наименьших квадратов. Снимаемый объект задается на карте узловыми точками x_i с произвольным шагом по широте и долготе (количество узловых точек объекта $n = 6...9$).

Функция $S(x)$ интерполируется полиномом

$$S_i(x) = \omega y_i + \bar{\omega} y_{i-1} + h_i^2 \left[(\omega^3 - \omega) \delta_i + (\bar{\omega}^3 - \bar{\omega}) \delta_{i-1} \right],$$

где $h_i = x_{i+1} - x_i$, $\omega = \frac{x - x_i}{h_{i+1}}$, $\bar{\omega} = 1 - \omega$.

Коэффициенты сплайна $\delta_0 = 0$, $\delta_n = 0$, а $\delta_1 \dots \delta_{n-1}$ находятся из системы линейных уравнений

$$\begin{pmatrix} 2[h_1 + h_2] & h_2 & \dots & 0 \\ h_2 & 2[h_2 + h_3] & \dots & 0 \\ 0 & h_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & h_{n-1} & 2[h_{n-1} + h_n] \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \dots \\ \delta_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_2 - \Delta_1 \\ \Delta_3 - \Delta_2 \\ \Delta_4 - \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_n - \Delta_{n-1} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Ее матрица является трехдиагональной, симметричной, со строгим диагональным преобладанием. Система (1) эффективно решается методом прогонки.

На рисунке 1 показан кубический интерполирующий сплайн (а) и сглаживающие сплайны при коэффициентах сглаживания 0,8 (б) и 0,3 (в). Узловые точки сплайна показаны крестиками, а пунктиром показана их линейная аппроксимация методом наименьших квадратов.

Метод наименьших квадратов

При использовании метода наименьших квадратов наилучшими коэффициентами a_1, a_2, \dots, a_m аппроксимирующей функции S считаются те, для которых сумма квадратов отклонений найденной теоретической функции от заданных эмпирических значений будет минимальной [4, 5, 11].

Следовательно, задача состоит в определении коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_m таким образом (т.е. в выборе одной кривой из множества), чтобы сумма квадратов отклонений была наименьшей

$$S(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m) - y_i]^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где a_1, a_2, \dots, a_m – коэффициенты аппроксимации.

Чтобы найти набор коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_m , которые обеспечивают минимум функции S , определяемой формулой (1), используется необходимое условие экстремума функции нескольких переменных - равенство нулю частных производных. В результате получим нормальную систему

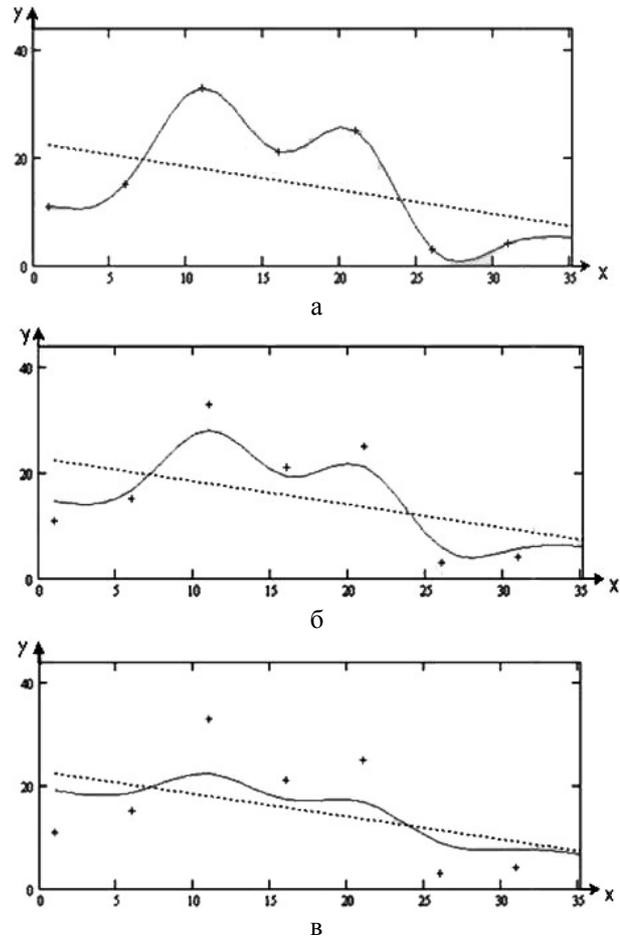


Рис. 1. Кубические сплайны:

- а – кубический интерполирующий сплайн;
- б – сглаживающий сплайн при коэффициенте сглаживания 0,8;
- в – сглаживающий сплайн при коэффициенте сглаживания 0,3

для определения коэффициентов a_i

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0. \quad (3)$$

Эта система упрощается, если эмпирическая формула (2) линейна относительно параметров a_i , тогда система (3) будет линейной.

В случае линейной зависимости $y = a_1 + a_2 x$ система (3) примет вид

$$\begin{cases} a_1 \sum_{i=1}^n x + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a_2 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \cdot n = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases}$$

Коэффициенты a_i определяются по формулам

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2},$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}.$$

Метод прогонки

Систему уравнений (1) для нахождения коэффициентов кубического интерполирующего сплайна можно представить в виде [2, 9, 12]

$$\begin{pmatrix} a_0 & b_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_1 & a_1 & b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & a_2 & b_2 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & b_{n-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & b_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_n & a_n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} m_0 \\ m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{n-2} \\ m_{n-1} \\ m_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{n-2} \\ d_{n-1} \\ d_n \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $a_0 = \frac{h_1}{3}$, $b_0 = \frac{h_1}{6}$, $d_0 = -p_0 + \frac{y_1 - y_0}{h_1}$, $c_n = \frac{h_n}{6}$,

$a_n = \frac{h_n}{3}$, $d_n = p_n + \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n}$, $c_i = \frac{h_i}{6}$,

$a_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{3}$, $b_i = \frac{h_{i+1}}{6}$, $d_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i}$,

$i = 1, \dots, n - 1$.

Решение трехдиагональной системы (4) находится в виде

$$m_i = \lambda_i m_{i+1} + \mu_i, \quad i = 1, \dots, n - 1,$$

где λ_i, μ_i - прогоночные коэффициенты ($m_n = \mu_n$ при $b_n = 0$).

Рекуррентные формулы для прогоночных коэффициентов λ_i, μ_i такие

$$\lambda_0 = -\frac{b_0}{a_0}, \quad \mu_0 = \frac{d_0}{a_0}, \quad \lambda_i = \frac{-b_i}{a_i + c_i \lambda_{i-1}},$$

$$\mu_i = \frac{d_i - c_i \mu_{i-1}}{a_i + c_i \lambda_{i-1}}, \quad i = 1 \dots n.$$

Модель рельефа территории съемки

Модель рельефа территории съемки может быть создана одним из следующих способов [7, 13]: по данным спутниковой стереосъемки; по данным спутниковой радиолокационной съемки; по данным наземной геодезической съемки; по данным GPS-съемки; синтезирована из слоя рельефа цифровой карты местности.

В настоящее время в картографии и ГИС используются векторные (изолинии, TIN-сетки) и растровые (матрицы высот, светотени) цифровые модели рельефа. В данной работе используется растровая модель рельефа территории съемки SRTM-90, полученная по данным спутниковой радиолокационной съемки и преобразованная в файл формата DEM.

Переходы между картографическими системами координат

Поскольку выбор узловых точек протяженного объекта и последующая сплайн-аппроксимация выполняются в географической (широтно-долготной) системе координат, а большинство современных крупномасштабных электронных карт выполнены в картографических проекциях (как правило, в UTM), то при планировании и моделировании спутниковой съемки необходимо выполнять преобразование картографических координат в географические и обратно [4, 5].

Переход от геодезических координат к картографическим

Переход от геодезических координат спутника φ и λ к картографическим координатам x и y производится по формулам

$$y = B(\varphi) + \frac{t}{2} \cdot N \cdot \cos^2 \varphi \cdot l^2 + \frac{t}{24} \cdot N \cdot \cos^4 \varphi \times$$

$$\times (5 - t^2 + 9\eta^2) \cdot l^4 + \frac{t}{720} \cdot N \cdot \cos^6 \varphi \times$$

$$\times (61 - 58t^2 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2) \cdot l^6 +$$

$$+ \frac{t}{40320} \cdot N \cdot \cos^8 \varphi \cdot (1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6) \cdot l^8,$$

$$x = N \cdot \cos \varphi \cdot l + \frac{1}{6} \cdot N \cdot \cos^3 \varphi \cdot (1 - t^2 + \eta^2) \cdot l^3 + \\ + \frac{1}{120} \cdot N \cdot \cos^5 \varphi \cdot (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2 \cdot \eta^2) \cdot l^5 + \\ + \frac{t}{5040} \cdot N \cdot \cos^7 \varphi \cdot (61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6) \cdot l^7,$$

где $B(\varphi)$ – длина дуги меридиана от экватора;

$$N = \frac{a^2}{b\sqrt{1+\eta^2}} - \text{радиус кривизны в первом вер-$$

тикале;

$$\eta^2 = e'^2 \cos^2 \varphi - \text{вспомогательный параметр;}$$

$e'^2 = (a^2 - b^2) / b^2$ – второй числовой эксцентриситет;

$t = \operatorname{tg} \varphi$ – вспомогательная величина;

$l = \lambda - \lambda_0$ – разность долгот;

λ_0 – долгота центрального меридиана.

Длина дуги меридиана $B(\varphi)$ вычисляется при помощи следующего разложения в ряд

$$B(\varphi) = \alpha \cdot [\varphi + \beta \cdot \sin 2\varphi + \gamma \sin 4\varphi + \delta \sin 6\varphi + \varepsilon \sin 8\varphi],$$

$$\text{где } \alpha = \frac{a+b}{2} \left(1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 \right),$$

$$\beta = -\frac{3}{2}n + \frac{9}{16}n^3 - \frac{3}{32}n^5, \quad \gamma = \frac{15}{16}n^2 - \frac{15}{32}n^4,$$

$$\delta = -\frac{35}{48}n^3 + \frac{105}{256}n^4, \quad \varepsilon = \frac{315}{512}n^4, \quad n = \frac{a-b}{a+b}.$$

Переход от картографических координат к геодезическим

Переход от картографических координат спутника x и y к геодезическим координатам φ и λ производится по формулам

$$\varphi = \varphi' + \frac{t}{2N^2}(-1 - \eta^2) \cdot x^2 + \frac{t}{24N^4} \times \\ \times (5 + 3t^2 + 6\eta^2 - 6t^2\eta^2 - 3\eta^4 - 9t^2\eta^4) \cdot x^4 + \frac{t}{720N^6} \times \\ \times (-61 - 90t^2 - 45t^4 - 107\eta^2 + 162t^2\eta^2 + 45t^4\eta^2) \cdot x^6 + \\ + \frac{t}{40320N^8} (1385 + 3633t^2 + 4095t^4 + 1575t^6) \cdot x^8, \\ \lambda = \lambda_0 + \frac{1}{N \cdot \cos \varphi} \cdot x + \frac{1}{6N^3 \cdot \cos \varphi} (-1 - 2t^2 - \eta^2) \cdot x^3 + \\ + \frac{1}{120N^5 \cdot \cos \varphi} (5 + 28t^2 + 24t^4 + 6\eta^2 + 8t^2\eta^2) \cdot x^5 + \\ + \frac{1}{5040N^7 \cdot \cos \varphi} (-61 - 662t^2 - 1320t^4 - 720t^6) \cdot x^7,$$

где N , η , t вычисляются для значения широты точки пересечения φ'

$$\varphi' = y' + \beta \cdot \sin 2y' + \gamma \cdot \sin 4y' + \delta \cdot \sin 6y' + \varepsilon \cdot \sin 8y',$$

$$\text{где } \alpha = \frac{a+b}{2} \left(1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 \right),$$

$$\beta = \frac{3}{2}n - \frac{27}{32}n^3 + \frac{269}{512}n^5, \quad \gamma = \frac{21}{16}n^2 - \frac{55}{32}n^4,$$

$$\delta = \frac{151}{96}n^3 - \frac{417}{128}n^4, \quad \varepsilon = \frac{1097}{512}n^4, \quad y' = \frac{y}{\alpha}.$$

Аппроксимация протяженного объекта

Для аппроксимации протяженных объектов сложной конфигурации наиболее эффективны методы сплайн-аппроксимации [2, 7, 14]. На рисунке 2 показана кусочно-линейная аппроксимация узловых точек объекта съемки (приграничной территории).

На рисунке 3 показан контур покрытия при линейной аппроксимации заданного протяженного участка (полоса захвата сканера в надире 40 км).

Как видно из рисунка 3, линейная аппроксимация не обеспечивает полного покрытия объекта съемки.

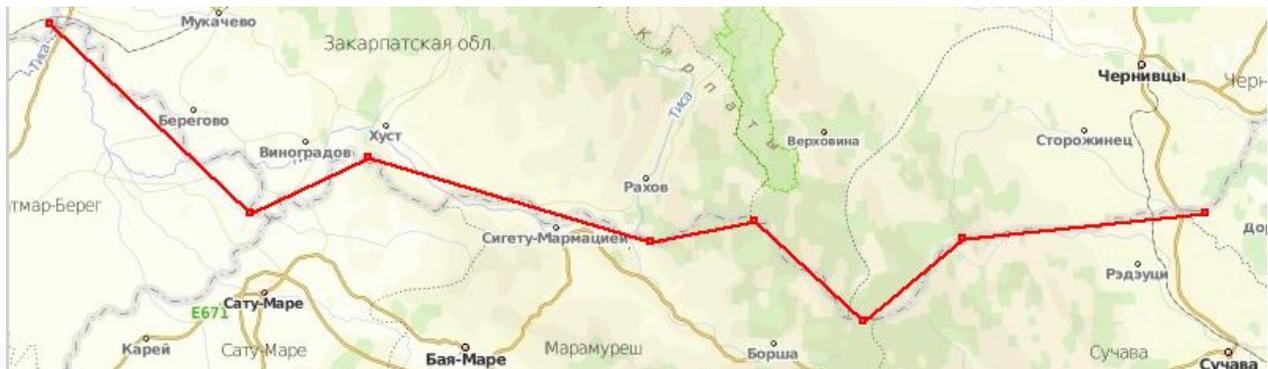


Рис. 2. Кусочно-линейная аппроксимация объекта съемки

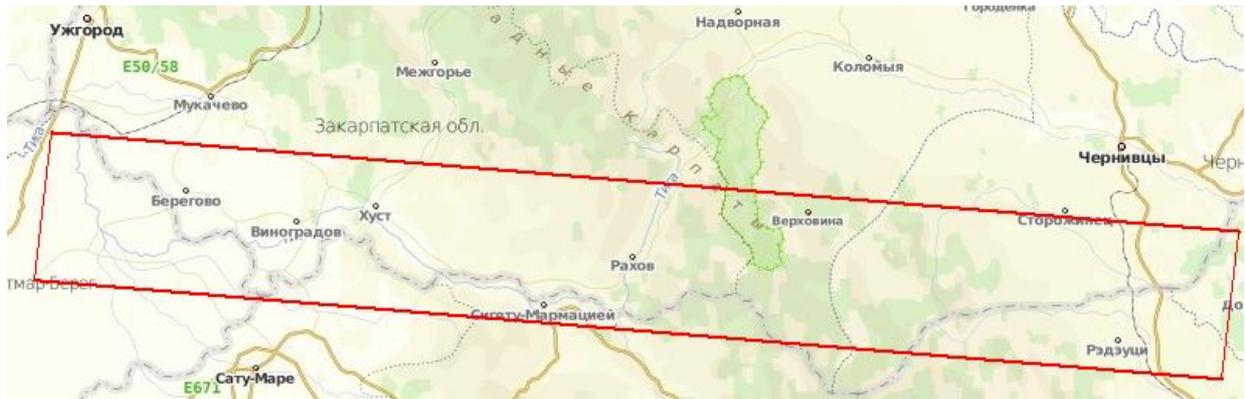


Рис. 3. Контур покрытия при линейной аппроксимации объекта съемки

На рисунке 4 показаны контуры покрытия при сплайн-интерполяции заданного протяженного участка приграничной территории.

Как видно из рисунка 4, сплайн-интерполяция имеет существенную кривизну, что требует динамичного перенацеливания спутника.

Определение оптимального покрытия протяженного объекта с учетом полосы захвата съемочного прибора и требуемого направления сканирования производится путем подбора коэффициента

сглаживания сплайна и при необходимости сдвигов и поворотов контура покрытия.

На рисунке 5 показаны контуры покрытия при сплайн-аппроксимации заданного протяженного участка приграничной территории.

Как видно из рисунка 5, сплайн-аппроксимация обеспечивает полное покрытие заданного участка приграничной территории при меньшей кривизне контура сцены.



Рис. 4. Контур покрытия при сплайн-интерполяции объекта съемки



Рис. 5. Контур покрытия при сплайн-аппроксимации объекта съемки

Заклучение

Предложена эффективная методика математического описания протяженных объектов сложной конфигурации с использованием сплайн-аппроксимации.

Данная методика позволяет получать оптимальное покрытие протяженного объекта путем подбора коэффициента сглаживания сплайна и при необходимости сдвигов и поворотов контура покрытия с учетом полосы захвата съемочного прибора, требуемого направления сканирования и ограниченный на диапазоны углов перенацеливания и угловых скоростей спутника.

Результаты компьютерного моделирования подтвердили высокую эффективность предложенной методики. При спутниковой съемке протяженных приграничных территорий запада Украины (участок Ужгород – Черновцы) угловые скорости перенацеливания спутника в среднем составили менее 0.5 град/с. При этом сплайн-аппроксимация объекта съемки оказалась наиболее эффективной как в части оперативности съемки (выполняется за один виток), так и в части процента покрытия территории (100 %).

Литература

1. Мозговой, Д. К. Спутниковая съемка с высоким разрешением при ненулевых угловых скоростях [Текст] / Д. К. Мозговой // Доклад на заседании научно семинара «Космическая техника и технологии», 17 декабря 2008 г.: тезисы докл. – Днепропетровск: Физико-технический факультет ДНУ, 2008. – 4 с.
2. Мозговой, Д. К. Методика спутникової зйомки малорозмірних слабоконтрастних об'єктів [Текст] / Д. К. Мозговий // Програма наук. конф. за підсумками наук.-досл. роботи університету за 2010 рік. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2010. – С. 108.
3. Технология спутниковой съемки в процессе перенацеливания [Текст] / О. Л. Макаров, Д. К. Мозговой, А. М. Кулабухов и др. // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 6. – С. 3–9.
4. Долинец, Ю. С. Технология спутниковой съемки с ненулевыми угловыми скоростями [Текст] / Ю. С. Долинец, Д. К. Мозговой // X Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. «Людина і космос»: Збірник тез. – Дніпропетровськ : НЦАОМ, 2008. – С. 495.
5. Мозговой, Д. К. Технология съемки прибрежных зон [Текст] / Д. К. Мозговой, В. И. Волошин // Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины. Тезисы докладов Междунар. конф. молодых ученых (Кацивели, 12 – 14 июня 2007). – Севастополь, 2007. – С. 21–22.
6. Мозговой, Д. К. Спутниковая съемка протяженных объектов [Текст] / Д. К. Мозговой, В. И. Волошин // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Сер. «Ракетно-космічна техніка». – 2006. – Вип. 10, т. 2. – С. 239 – 241.
7. Мозговой, Д. К. Технология съемки протяженных объектов [Текст] / Д. К. Мозговой // IX Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. «Людина і космос»: Зб. тез. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 439.
8. Мозговой, Д. К. Управление ориентацией КА ДЗЗ высокой разрешающей способности [Текст] / Д. К. Мозговой // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Сер. «Ракетно-космічна техніка». – 2009. – Вип. 13, т. 1. – С. 59 – 65.
9. Методы повышения эффективности спутниковой съемки произвольно расположенных протяженных участков Земли [Текст] / А. Л. Макаров, Д. К. Мозговой, В. С. Хорошилов и др. // 21-я Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. (Севастополь, 12 – 16 сент. 2011 г.). – Севастополь : Вебер, 2011. – С. 182 – 183.
10. Повышение оперативности спутниковой съемки протяженных территорий сложной конфигурации [Текст] / А. Л. Макаров, Д. К. Мозговой, А. М. Кулабухов и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 6. – С. 113-122.
11. Мозговий, Д. К. Підвищення інформативності супутникової зйомки малорозмірних об'єктів земної поверхні [Текст] / Д. К. Мозговий // Програма наукової конференції за підсумками науководослідної роботи університету за 2012 рік. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2012. – С. 92.
12. Учет погрешностей ориентации КА при съемке с ненулевыми угловыми скоростями [Текст] / О. Л. Макаров, Д. К. Мозговой, А. М. Кулабухов и др. // Космічна наука і технологія. – 2013. – №1. – С. 20 – 27.
13. Мозговой, Д. К. Метод программного управления угловым движением спутника ДЗЗ в процессе съемки [Текст] / Д. К. Мозговой // Международная конференция "Космические технологии: настоящее и будущее": Тезисы докладов (Днепропетровск, 16-20 апреля 2013 г.). – Днепропетровск : ГКБ "Южное", 2013. – С. 61.
14. Mozgovoy, D. Method of program's control of angle motion of remote sensing satellite during the shooting [Text] / D. Mozgovoy // Technologies: Present and Future. International Conference. – Dnepropetrovsk : Yuzhnoe State Design Office, 2013. – P. 158 – 159.
15. Мозговой, Д. К. Использование данных MODIS и ASTER для решения актуальных прикладных задач [Текст] / Д. К. Мозговой // Международная научно-практическая конференция «Стратегические решения информационного развития экономики, общества и бизнеса на современном этапе»: Тезисы докладов (п. Научный, АР Крым, Украина, 17-19 июля 2013 г.). – Днепропетровск, 2013. – С. 113-114.

Поступила в редакцию 18.12.2013, рассмотрена на редколлегии 12.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., начальник расчетно-теоретического сектора конструкторского бюро космических аппаратов, систем и комплексов В. С. Хорошилов, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», г. Днепропетровск.

МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ПРОТЯЖНИХ ОБ'ЄКТІВ СУПУТНИКОВОЇ ЗЙОМКИ

О. Л. Макаров

Наведено методику математичного опису протяжних об'єктів складної конфігурації при плануванні зйомки із застосуванням супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з оптико-електронними сканерами високої просторової роздільної здатності. Методика базується на використанні сплайн-інтерполяції. Вона дозволяє одержувати оптимальне покриття зйомки з урахуванням полоси захоплення знімального пристрою, потрібного направлення сканування і обмеження системи орієнтації супутника. Результати комп'ютерного моделювання підтвердили високу ефективність запропонованої методики.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, планування супутникової зйомки, протяжні об'єкти складної конфігурації, оптико-електронний сканер, сплайн-апроксимація.

METHODS OF MATHEMATICAL DESCRIPTION OF ELONGATED OBJECTS DURING SATELLITE IMAGERY

A. L. Makarov

The method of the mathematical description of extended objects with complex configuration during planning of satellite imagery with high spatial resolution electro-optical scanners with using cubic splines. The technique is based on spline-interpolation use. It allows to receive optimum cover of shooting taking into account a band of acquisition of the film-making device demanded a direction of scanning and limitations of the satellite attitude control system. Computer simulation results have confirmed high efficiency of the proposed technique.

Key words: remote sensing, planning satellite imagery, extended objects of complex configuration, cubic splines.

Макаров Александр Леонидович – канд. техн. наук, Заслуженный машиностроитель Украины, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, Главный конструктор – начальник конструкторского бюро космических аппаратов, систем и комплексов, Государственное предприятие "Конструкторское бюро "Южное" им. М. К. Янгеля", Днепропетровск, Украина.