

УДК 629.197

**А.Л. МАКАРОВ¹, Д.К. МОЗГОВОЙ², А.М. КУЛАБУХОВ²,
В.С. ХОРОШИЛОВ¹, А.Л. ОЛЬШЕВСКИЙ¹, В.М. ПОПЕЛЬ¹**¹ Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»² Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара

ПОВЫШЕНИЕ ОПЕРАТИВНОСТИ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ ПРОТЯЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Приведена оценка сравнительной эффективности разработанного метода повышения оперативности спутниковой съемки протяженных территорий сложной конфигурации с применением спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с оптико-электронными сканерами высокого пространственного разрешения, реализуемого с помощью программного управления ориентацией спутника во время съемки. Описаны методы аппроксимации протяженного объекта сложной конфигурации с использованием кубических сплайнов, математическая модель орбитального движения спутника с учетом основных возмущений, а также результаты моделирования различных видов съемки заданной территории с использованием фактических данных об облачности.

Ключевые слова: спутниковая съемка, протяженные территории, дистанционное зондирование Земли, оптико-электронный сканер, программное управление ориентацией

Введение

При спутниковой съемке оптико-электронными сканерами высокого пространственного разрешения 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 сканера, не позволяющей оперативно снимать произвольно расположенные протяженные участки за один виток [1, 2].

Как правило, в таких случаях необходима съемка нескольких сцен с разных витков, причем для солнечно-синхронных орбит, характерных для спутников 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 [3, 4].

Некоторые зарубежные спутники с оптико-электронными сканерами высокого пространственного разрешения позволяют выполнять съемку произвольно-ориентированных прямолинейных протя-

женных участков. Однако, съемка протяженных территорий сложной конфигурации выполняется за несколько витков [5, 6].

1. Постановка 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 [7, 8].

Ниже приведены методика и сравнительные оценки оперативности спутниковой съемки протяженной береговой линии сложной конфигурации, полученные в результате моделирования с использованием фактических данных об облачности по данной территории.

Исходные данные для моделирования:

- снимаемый участок – южное побережье Крыма от Севастополя до Феодосии (протяженность около 160 км);
- период съемки – 19...23 мая 2012 г.;
- тип орбиты спутника – солнечно-синхронная, высота 700 км;
- полоса захвата сканера в надире – 15 км.

2. Методы исследования

Снимаемая береговая линия задается на карте узловыми точками x_i с произвольным шагом по широте и долготе (число узловых точек объекта

$n=6...9$). Для аппроксимации береговой линии функцией $S(x)$, используется естественный кубический интерполирующий сплайн с последующим сглаживанием методом наименьших квадратов [9, 10].

Узловые точки на рис. 1 показаны крестиками, а пунктиром показана их линейная аппроксимация.

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 $\delta_1... \delta_{n-1}$ 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. Такая система эффективно решается методом прогонки [11].

Запишем систему уравнений (1) в виде

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

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

$i = 1, \dots, n-1$, $c_i = \frac{h_i}{6}$, $a_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{3}$,

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

$$c_n = \frac{h_n}{6}, \quad a_n = \frac{h_n}{3}, \quad d_n = p_n - \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n}.$$

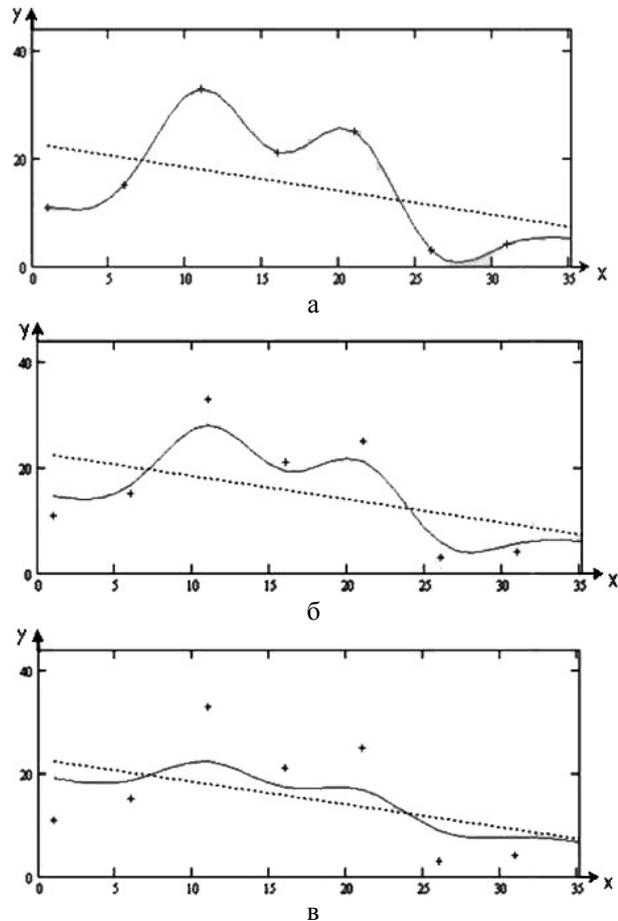


Рис. 1. Кубические сплайны:
а – кубический интерполирующий сплайн;
б – сглаживающий сплайн при коэффициенте сглаживания 0,8; в – сглаживающий сплайн при коэффициенте сглаживания 0,3

Решение трехдиагональной системы (2) в виде $m_i = \lambda_i m_{i+1} + \mu_i$, $i = 0, \dots, n-1$,

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

$$\lambda_0 = -\frac{b_0}{a_0}, \quad \mu_0 = \frac{d_0}{a_0},$$

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

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

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

$$S(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m) - y_i]^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

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

Для того, чтобы найти набор коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_m , которые доставляют минимум функции S , определяемой формулой (3), используем необходимое условие экстремума функции нескольких переменных – равенство нулю частных производных.

В результате получим нормальную систему [12] для определения коэффициентов a_i

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0. \quad (4)$$

Нахождение коэффициентов a_i сводится к решению системы (3).

Эта система упрощается, если эмпирическая формула (3) линейна относительно параметров a_i , тогда система (4) будет линейной.

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

$$\begin{cases} a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ a_2 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 n = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (5)$$

Коэффициенты a_i определяются из системы (5)

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}.$$

Расчет орбитального движения спутника

Для малых периодов прогноза и низкокруговых орбит достаточно точной является аналитическая модель SGP4 [13], позволяющая работать с начальными условиями, представленными в виде TLE-файлов, формируемых системой NORAD.

Первоначальные (подлинные) среднее движение (n_0'') и большая полуось (a_0'') восстанавливаются из вводимых элементов эфемерид TLE-файлов ($a_0, n_0, i_0, e_0, M_0, \Omega_0$) по следующим формулам

$$a_1 = \left(\frac{k_e}{n_0} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad \delta_1 = \frac{3k_2 (3 \cos^2 i_0 - 1)}{2a_1^2 (1 - e_0^2)^{\frac{3}{2}}},$$

$$a_0 = a_1 \left(1 - \frac{1}{3} \delta_1 - \delta_1^2 - \frac{134}{81} \delta_1^3 \right),$$

$$\delta_0 = \frac{3k_2 (3 \cos^2 i_0 - 1)}{2a_0^2 (1 - e_0^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad n_0'' = \frac{n_0}{1 + \delta_0},$$

$$a_0'' = \frac{a_0}{1 - \delta_0},$$

где k_e – гравитационная постоянная.

Значения вспомогательных переменных определяются с учетом значений эфемерид и параметров плотности атмосферы S и q_0 по формулам

$$\theta = \cos i_0, \quad \xi = \frac{1}{a_0'' - S}, \quad \beta_0 = (1 - e_0^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \eta = a_0'' e_0 \xi,$$

$$C_2 = (q_0 - S)^4 \xi^4 n_0'' (1 - \eta^2)^{\frac{7}{2}} \times$$

$$\times \left[a_0'' \left(1 + \frac{3}{2} \eta^2 + 4e_0 \eta + e_0 \eta^3 \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{3}{2} \frac{k_2 \xi}{(1 - \eta^2)} \left(-\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \theta^2 \right) (8 + 24\eta^2 + 3\eta^4) \right],$$

$$C_1 = B^* C_2, \quad B^* = \frac{1}{2} \frac{C_x F_M}{m} \rho,$$

$$C_3 = \frac{(q_0 - S)^4 \xi^5 A_{3.0} n_0'' \sin i_0 a_E}{k_2 e_0},$$

$$C_4 = 2n_0'' (q_0 - S)^4 \xi^4 a_0'' \beta_0^2 (1 - \eta^2)^{\frac{7}{2}} \times$$

$$\times \left[2\eta(1 + e_0 \eta) + \frac{1}{2} e_0 + \frac{1}{2} \eta^3 \right] - \frac{2k_2 \xi}{a_0'' (1 - \eta^2)} \times$$

$$\times \left[3(1 - 3\theta^2) \cdot \left(1 + \frac{3}{2} \eta^2 - 2e_0 \eta - \frac{1}{2} e_0 \eta^3 \right) \right] +$$

$$+ \frac{3}{4} (1 - \theta^2) (2\eta^2 - e_0 \eta - e_0 \eta^3) \cos 2\omega_0,$$

$$C_5 = 2(q_0 - S)^4 \xi^4 a_0'' \beta_0^2 (1 - \eta^2)^{\frac{7}{2}} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{11}{4} \eta(\eta + e_0) + e_0 \eta^3 \right],$$

$$D_2 = 4a_0'' \xi C_1^2, \quad D_3 = \frac{4}{3} a_0'' \xi^2 (17a_0'' + S) C_1^3,$$

$$D_4 = \frac{2}{3} a_0'' \xi^3 (221a_0'' + 31S) C_1^4.$$

Секулярные (вековые) эффекты от сопротивления атмосферы и от гравитационного поля учитываются с помощью выражений

$$\begin{aligned}
 M_{DF} &= M_0 + \left[1 + \frac{3k_2(-1+3\theta^2)}{2a_0^2\beta_0^3} + \frac{3k_2^2(13+78\theta^2+137\theta^4)}{16a_0^4\beta_0^7} \right] \times \\
 &\times n_0''(t-t_0), \\
 \omega_{DF} &= \omega_0 + \left[-\frac{3k_2(-1+5\theta^2)}{2a_0^2\beta_0^4} + \frac{3k_2^2(7-114\theta^2+395\theta^4)}{16a_0^4\beta_0^8} + \right. \\
 &\left. + \frac{5k_4(3-36\theta^2+49\theta^4)}{4a_0^4\beta_0^8} \right] \times n_0''(t-t_0), \\
 \Omega_{DF} &= \Omega_0 + \left[-\frac{3k_2\theta}{a_0^2\beta_0^4} + \frac{3k_2^2(4\theta-19\theta^3)}{2a_0^4\beta_0^8} + \frac{5k_4\theta(3-7\theta^2)}{2a_0^4\beta_0^8} \right] \times \\
 &\times n_0''(t-t_0), \\
 \delta\omega &= B^*C_3 \cos \omega_0(t-t_0), \\
 \delta M &= -\frac{2}{3}(g_0-S)^4 B^*\xi^4 \frac{a_E}{e_0\eta} \times \\
 &\times \left[(1+\eta \cos M_{DF})^3 - (1+\eta \cos M_0)^3 \right], \\
 M_P &= M_{DF} + \delta\omega + \delta M, \quad \omega = \omega_{DF} - \delta\omega - \delta M, \\
 \Omega &= \Omega_{DF} - \frac{21 n_0'' k_2 \theta}{2 a_0^2 \beta_0^2} C_1 (t-t_0)^2, \\
 e &= e_0 - B^*C_4(t-t_0) - B^*C_5(\sin M_P - \sin M_0), \\
 a &= a_0'' - \left[1 - C_1(t-t_0) - \right. \\
 &\left. - D_2(t-t_0)^2 - D_3(t-t_0)^3 - D_4(t-t_0)^4 \right]^2, \\
 L &= M_P + \omega + \Omega + n_0'' \times \\
 &\times \left[\frac{3}{2} C_1(t-t_0)^2 + (D_2 - 2C_1^2)(t-t_0)^3 + \right. \\
 &+ \frac{1}{4} (3D_3 + 12C_1D_2 + 10C_1^3)(t-t_0)^4 + \\
 &\left. + \frac{1}{5} (3D_4 + 12C_1D_3 + 6D_2^2 + 30C_1^2D_2 + 16C_1^4)(t-t_0)^5 \right], \\
 \beta &= \sqrt{1-e^2}, \quad n = \frac{k_e}{\frac{3}{a^2}}.
 \end{aligned}$$

Дополнительные долгопериодические члены вычисляются по следующим формулам

$$\begin{aligned}
 a_{XN} &= e \cos \omega, \quad L_L = \frac{A_3 \sin i_0}{8k_2 a \beta^2} (e \cos \omega) \left(\frac{3+5\theta}{1+\theta} \right), \\
 a_{YNL} &= \frac{A_3 \sin i_0}{8k_2 a \beta^2}, \quad L_T = L + L_L,
 \end{aligned}$$

$$a_{YN} = e \cos \omega + a_{YNL}.$$

Решение уравнения Кеплера для $(E + \omega)$: устанавливается $U = L_T - \Omega$, и используется итерационное выражение $(E + \omega)_{i+1} = (E + \omega)_i + \Delta(E + \omega)_i$, где

$$\begin{aligned}
 \Delta(E + \omega)_i &= \\
 &= \frac{U - a_{YN} \cos(E + \omega)_i + a_{XN} \sin(E + \omega)_i - (E + \omega)_i}{-a_{YN} \sin(E + \omega)_i - a_{XN} \cos(E + \omega)_i + 1}, \\
 (E + \omega)_i &= U.
 \end{aligned}$$

Для расчета предварительных величин, необходимых для вычисления короткопериодических возмущений, используются следующие выражения

$$e \cos E = a_{XN} \cos(E + \omega) + a_{YN} \sin(E + \omega),$$

$$e \sin E = a_{XN} \sin(E + \omega) + a_{YN} \cos(E + \omega),$$

$$e_L = \sqrt{a_{XN}^2 + a_{YN}^2}, \quad P_L = a(1 - e_L)^2,$$

$$r = a(1 - e \cos E), \quad \dot{r} = k_e \frac{\sqrt{a}}{r} e \sin E, \quad r\dot{r} = k_e \frac{\sqrt{P_L}}{r},$$

$$\cos u = \frac{a}{r} \left[\cos(E + \omega) - a_{XN} + \frac{a_{YN}(e \sin \omega)}{1 + \sqrt{1 - e^2}} \right],$$

$$\sin u = \frac{a}{r} \left[\sin(E + \omega) - a_{YN} - \frac{a_{XN}(e \sin \omega)}{1 + \sqrt{1 - e^2}} \right],$$

$$u = \arctg \left(\frac{\sin u}{\cos u} \right).$$

Короткопериодические возмущения вычисляются по следующим формулам

$$\Delta r = \frac{k_2}{2P_L} (1 - \theta^2) \cos 2u, \quad \Delta u = -\frac{k_2}{4P_L^2} (7\theta^2 - 1) \sin 2u,$$

$$\Delta u = -\frac{k_2}{4P_L^2} (7\theta^2 - 1) \sin 2u,$$

$$\Delta i = \frac{3k_2\theta}{2P_L^2} \sin i_0 \cos 2u, \quad \Delta \dot{r} = -\frac{k_2 n}{P_L} (1 - \theta^2) \sin 2u,$$

$$\Delta r \dot{r} = \frac{k_2 n}{P_L} \left[(1 - \theta^2) \cos 2u - \frac{3}{2} (1 - 3\theta^2) \right].$$

Добавляя короткопериодические члены, получим оскулирующие величины

$$r_k = r \left[1 - \frac{3}{2} k_2 \frac{\sqrt{1 - e_L^2}}{P_L^2} (3\theta^2 - 1) \right] + \Delta r,$$

$$u_k = u + \Delta u, \quad \Omega_k = \Omega + \Delta \Omega, \quad i_k = i_0 + \Delta i,$$

$$\dot{r}_k = \dot{r} + \Delta \dot{r}, \quad r \dot{r}_k = r \dot{r} + \Delta r \dot{r}.$$

Прямоугольные координаты и составляющие вектора скорости вычисляются по следующим формулам

$$\begin{aligned}
 x &= r_k (-\sin \Omega_k \cos i_k \sin u_k + \cos \Omega_k \cos u_k), \\
 y &= r_k (\cos \Omega_k \cos i_k \sin u_k + \sin \Omega_k \cos u_k), \\
 z &= r_k \sin i_k \sin u_k, \\
 \dot{x} &= \dot{r}_k (-\sin \Omega_k \cos i_k \sin u_k + \cos \Omega_k \cos u_k) + \\
 &+ r \dot{\Gamma}_k (-\sin \Omega_k \cos i_k \sin u_k - \cos \Omega_k \cos u_k), \\
 \dot{y} &= \dot{r}_k (\cos \Omega_k \cos i_k \sin u_k + \sin \Omega_k \cos u_k) + \\
 &+ r \dot{\Gamma}_k (\cos \Omega_k \cos i_k \sin u_k - \sin \Omega_k \cos u_k), \\
 \dot{z} &= \dot{r}_k \sin i_k \sin u_k + r \dot{\Gamma}_k \sin i_k \sin u_k.
 \end{aligned}$$

3. Результаты моделирования

Моделирование проводилось для следующих видов съемки:

- многовитковая съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы и нулевыми угловыми скоростями во время съемки;

- многовитковая съемка с произвольной ориентацией сцены и ненулевыми угловыми скоростями во время съемки;

- одновитковая съемка сцены сложной конфигурации с ненулевыми угловыми скоростями во время съемки.

Для получения фактических данных об облачности по данной территории использовались снимки спутников Aqua и Terra (прибор MODIS) [14, 15].

Результаты моделирования показаны на рис. 2...11.

В заданный 5-дневный период снимаемая территория была доступна для съемки полностью 1 день, частично – 2 дня, недоступна – 2 дня.

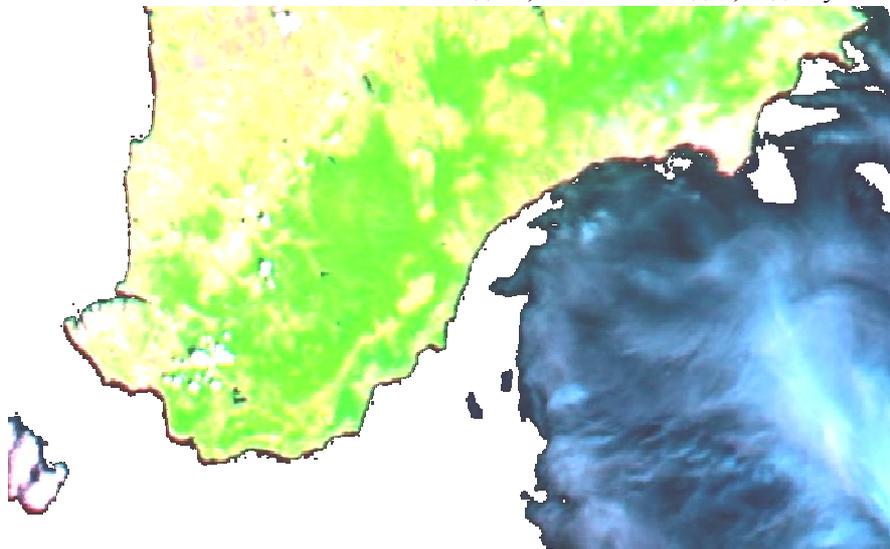


Рис. 2. Состояние облачности 19.05.2012 на время съемки (облачность ~2% - снимаемая территория доступна для съемки)



Рис. 3. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 1-й виток снято ~15% площади территории)



Рис. 4. Съемка с произвольной ориентацией сцены
(за 1-й виток снято ~80% площади территории)

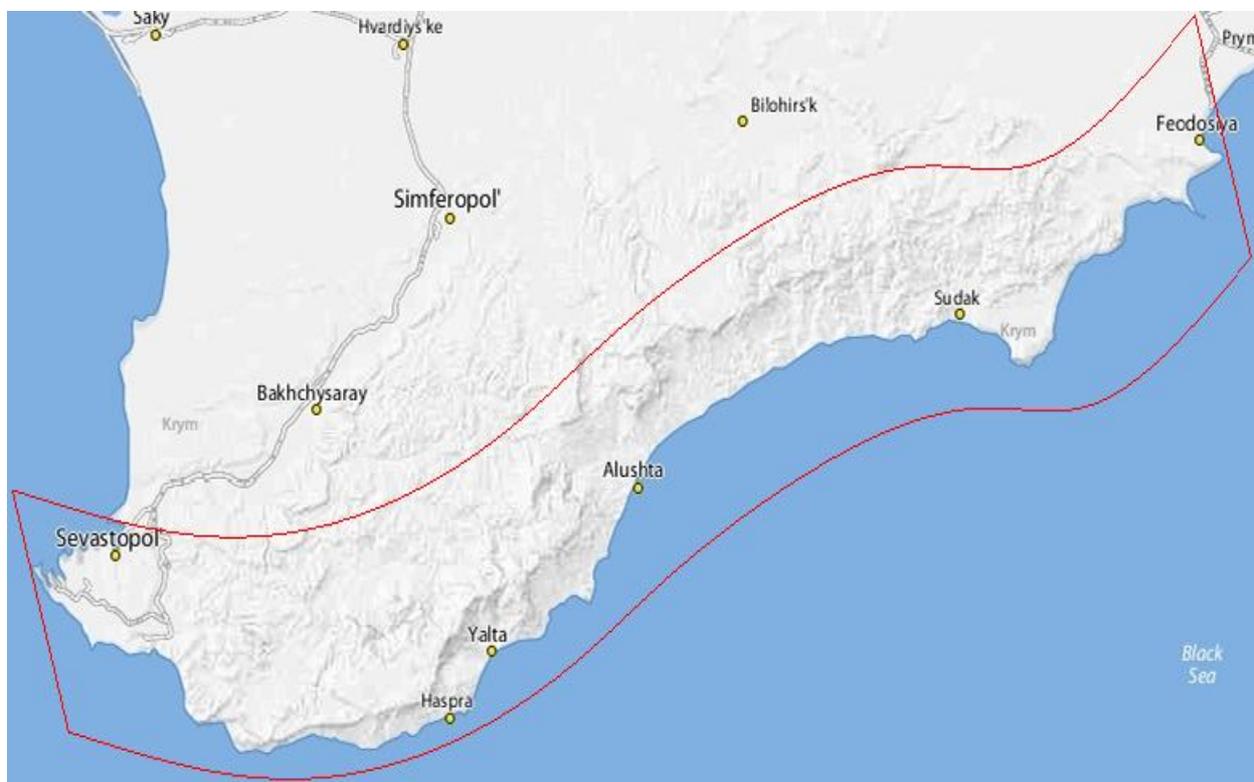


Рис. 5. Съемка сцены сложной конфигурации
(за 1-й виток снято ~98% площади территории)

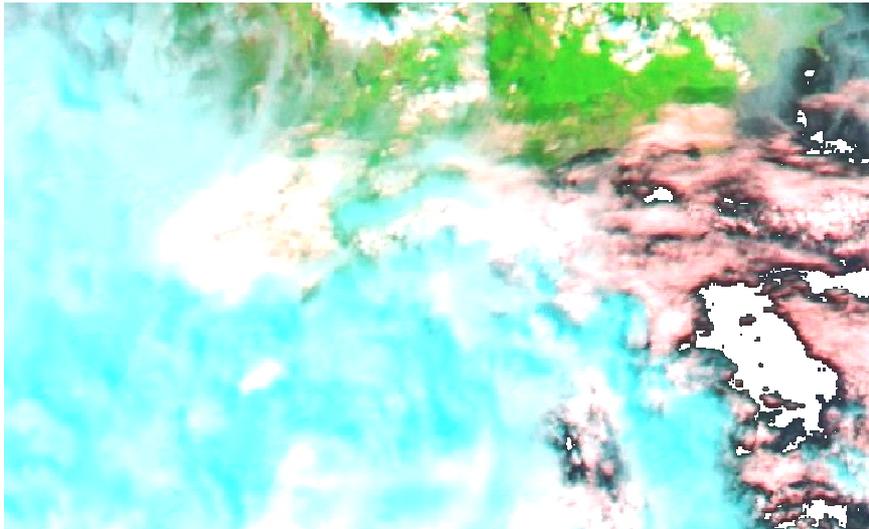


Рис. 6. Состояние облачности 20.05.2012 на время съемки
(облачность ~70% - снимаемая территория недоступна для съемки)



Рис. 7. Состояние облачности 21.05.2012 на время съемки
(облачность ~98% - снимаемая территория недоступна для съемки)

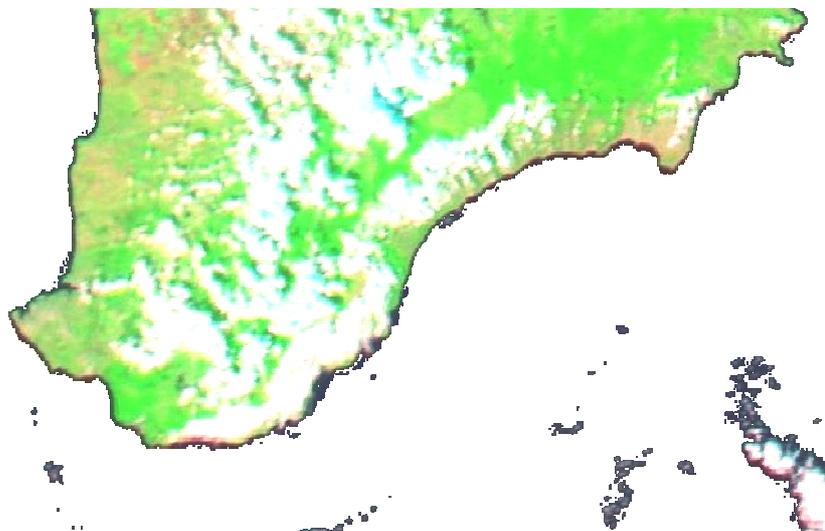


Рис. 8. Состояние облачности 22.05.2012 на время съемки
(облачность ~15% - снимаемая территория частично доступна для съемки)

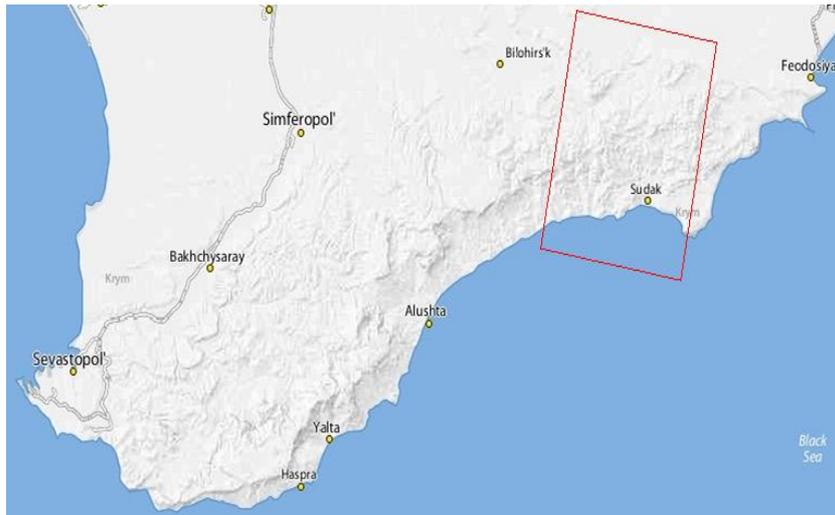


Рис. 9. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 2-й виток снято ~17% площади территории)

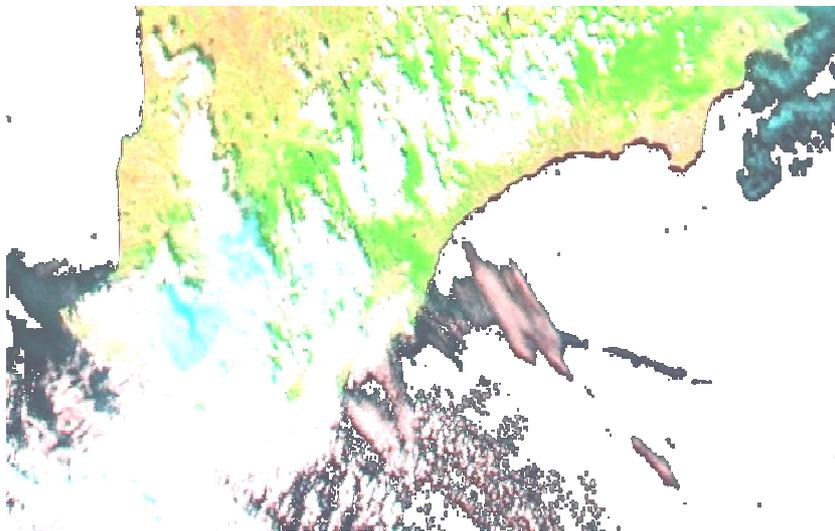


Рис. 10. Состояние облачности 23.05.2012 на время съемки (облачность ~20% - снимаемая территория частично доступна для съемки)



Рис. 11. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 3-й виток снято ~20% площади территории)

Выводы

В таблице 1 приведены показатели эффективности различных видов съемки, полученные в результате моделирования.

Таблица 1
Показатели эффективности съемки в результате моделирования

Вид съемки	Кол-во сцен (витков)	Срок выполнения, дней	Процент снятой площади
Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы	3	5	52%
Съемка с произвольной ориентацией сцены	1	1	80%
Съемка сцены сложной конфигурации	1	1	98%

По результатам моделирования можно сделать вывод, что одновитковая съемка сцены сложной конфигурации с ненулевыми угловыми скоростями во время съемки является наиболее эффективной в части оперативности и площади покрытия.

Для других сезонов съемки (осеннее-зимний период) и других регионов Украины влияние погодных условий еще более существенное, и сравнительная эффективность разработанного метода съемки будет еще выше.

Литература

1 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.

2 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.

3 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.

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 Использование новых технологий съемки для

повышения эффективности КА МС-2-8 [Текст] / Д.К. Мозговой, В.И. Волошин, Е.И. Бушуев, Ю.Д. Салтыков // VII Украинская конф. по космическим исследованиям. Сб. тезисов. 3 – 8 сентября 2007г., НЦУИКС, Евпатория, 2007. – С. 182–183.

6 Мозговой, Д.К. Методика спутниковой 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.

7 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.

8 Технология спутниковой съемки в процессе перенацеливания [Текст] / О.Л. Макаров, Д.К. Мозговий, А.М. Кулабухов и др. // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 6. – С. 3–9.

9 Повышение эффективности съемки с помощью космического аппарата земных объектов произвольной конфигурации [Текст] / А.Л. Макаров, Д.К. Мозговой, В.С. Хорошилов и др. // Технологические системы. – 2011. - №2(55). – С. 66-70.

10 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.

11 Черкасов, М.А. Численные методы. Решение задач [Текст] / М.А. Черкасов. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 88 с.

12 Денисова, Э.В. Основы вычислительной математики [Текст]: Учебно-методическое пособие / Э.В. Денисова, А.В. Кучер. - Санкт-Петербург: ИТМО, 2010. – 164 с.

13 Hoots F. Models for Propagation of NORAD Element Sets [Text] / R. Felix Hoots, L. Ronald Roehrich. – Peterson: Project Spacetrack Reports Office of Astrodynamics Aerospace Defense Center, 1980. – 91 p.

14 Долинец, Ю.С. Использование снимков со спутников Terra и Aqua для решения актуальных прикладных задач [Текст] / Ю.С. Долинец, Д.К. Мозговой // VI Міжнар. наук.-техн. конф. "Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаціно-космічної техніки". Збірник доповідей. Частина II. – К.: НТУ КПІ, 2007. – С. 97 – 103.

15 Кравец, О.В. Использование данных MODIS для экологического мониторинга и контроля ЧС [Текст] / О.В. Кравец, Д.К. Мозговой // X Міжнародна молодіжна наук.-практ. конф. «Людина і космос»: Збірник тез. – Дніпропетровськ: НЦАОМ, 2008. – С. 500.

Поступила в редакцию 19.09.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан физико-технического факультета А.Н. Петренко, Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара, Днепропетровск.

ПІДВИЩЕННЯ ОПЕРАТИВНОСТІ СУПУТНИКОВОЇ ЗЙОМКИ ПРОТЯЖНИХ ТЕРИТОРІЙ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

О.Л. Макаров, Д.К. Мозговой, А.М. Кулабухов, В.С. Хорошилов, О.Л. Ольшевський, В.М. Попель

Наведено оцінку порівняльної ефективності розробленого методу підвищення оперативності супутникової зйомки протяжних територій складної конфігурації із застосуванням супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з оптико-електронними сканерами високого просторового розрізнення, реалізованого за допомогою програмного керування орієнтацією супутника під час зйомки. Описані методи апроксимації протяжного об'єкту складної конфігурації з використанням кубічних сплайнів, математична модель орбітального руху супутника з урахуванням основних збурень, а також результати моделювання різних видів зйомки заданої території з використанням фактичних даних про хмарність.

Ключові слова: супутникова зйомка, протяжні території, дистанційне зондування Землі, оптико-електронний сканер, програмне керування орієнтацією

EFFICIENCY INCREASING OF SATELLITE SURVEY OF EXTENSIVE TERRITORY WITH COMPLEX CONFIGURATION

A.L. Makarov, D.K. Mozgovoy, A.M. Kulabuhov, V.S. Horoshilov, A.L. Olishevskiy, V.M. Popel

The estimation of the relative effectiveness of the developed method of expediting satellite imagery of extended territories of complex configuration with the use of remote sensing satellites (ERS) with optical-electronic scanners of high spatial resolution by using orientation control of satellite during the shooting. Describes the methods of approximating the longest object complex configuration using cubic splines, mathematical model of the orbital motion in view of major disturbances, as well as the results of modeling different kinds of shooting given territory using actual data on cloud cover.

Key words: satellite imagery, extensive territory, remote sensing, optical-electronic scanner, orientation control program

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 Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина.

Мозговой Дмитрий Константинович – старший преподаватель факультета физики, электроники и компьютерных систем Днепропетровского национального университета им. Олеса Гончара, Днепропетровск, Украина. e-mail: m-d-k@i.ua

Кулабухов Анатолий Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированного управления физико – технического факультета Днепропетровского национального университета им. Олеса Гончара, Днепропетровск, Украина.

Хорошилов Виктор Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, начальник расчетно – теоретического сектора конструкторского бюро космических аппаратов систем и комплексов Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина. e-mail: skh@ukr.net

Ольшевский Александр Лаврентьевич – Заслуженный машиностроитель Украины, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, начальник отдела антенно – фидерных и СВЧ устройств конструкторского бюро космических аппаратов систем и комплексов Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина.

Попель Валерий Михайлович – заместитель начальника отдела антенно – фидерных и СВЧ устройств конструкторского бюро космических аппаратов систем и комплексов Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина. e-mail: dk@dniprokosmos.dp.ua