

УДК 629.197

А. Л. Макаров

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

О СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Розглядається ефективність запропонованого методу супутникового знімання протяжних територій складної конфігурації із застосуванням супутників дистанційного зондування Землі з оптико-електронними сканерами високого просторового розділення, що реалізується за допомогою програмного керування орієнтацією супутника під час знімання.

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 [8, 10].

Как правило, в таких случаях необходима съемка нескольких сцен с разных витков, причем для солнечно-синхронных орбит, характерных для спутников дистанционного зондирования Земли 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 [2, 11].

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

линейных протяженных участков. Однако съемка протяжных территорий сложной конфигурации выполняется за несколько витков [7, 12].

Существенно повысит оперативность спутниковой съемки протяжных территорий сложной конфигурации позволяет новый метод съемки в процессе перенацеливания (т. е. с ненулевыми угловыми скоростями), реализуемый с помощью программного управления ориентацией спутника [6, 9].

Ниже приведены 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.

Снимаемая береговая линия задается на карте узловыми точками x_i с произвольным шагом по широте и долготе (количество узловых точек объекта $n = 6...9$). Для аппроксимации береговой линии функцией $S(x)$ используется естественный кубический интерполирующий сплайн [4, 5] ($S''(x_0) = 0$ и $S''(x_n) = 0$) с последующим

сглаживанием методом наименьших квадратов. Функция $S(x)$ интерполируется полиномом

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

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

$$\begin{pmatrix} 2[h_1 + h_2] & h_2 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & 2[h_2 + h_3] & h_3 & \dots & 0 \\ 0 & h_3 & 2[h_3 + h_4] & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & h_{n-1} & 2[h_{n-1} + h_n] \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \dots \\ \delta_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_2 - \Delta_1 \\ \Delta_3 - \Delta_2 \\ \Delta_4 - \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_n - \Delta_{n-1} \end{pmatrix}.$$

Ее матрица является трехдиагональной, симметричной, со строгим диагональным преобладанием. Такая система эффективно решается методом прогонки. На рис. 1 показан кубический интерполирующий сплайн (а) и сглаживающие сплайны при коэффициентах сглаживания 0.8 (б) и 0.3 (в). Узловые точки показаны крестиками, а пунктиром показана их линейная аппроксимация.

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) [1, 3]. Результаты моделирования показаны на

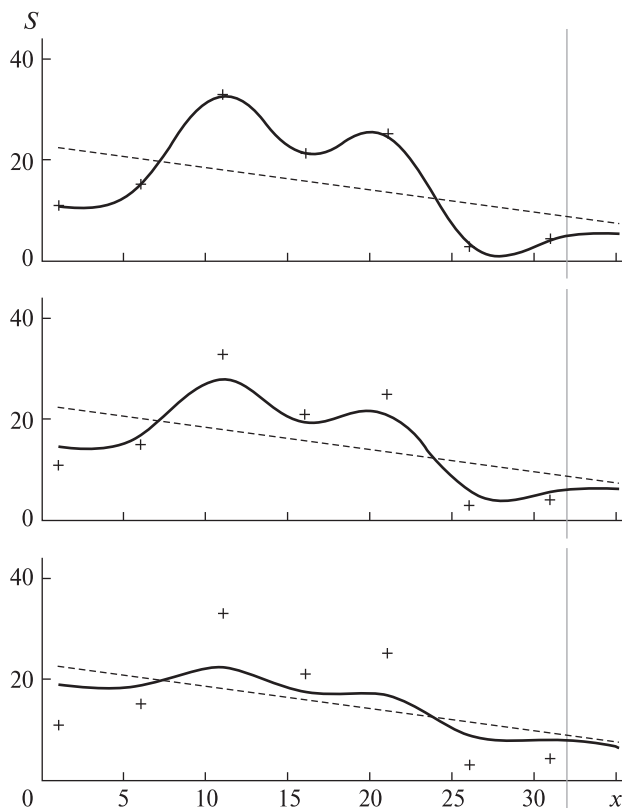


Рис. 1. Кубические сплайны: а — интерполирующий сплайн, б — сглаживающий сплайн при коэффициенте сглаживания 0.8, в — сглаживающий сплайн при коэффициенте сглаживания 0.3

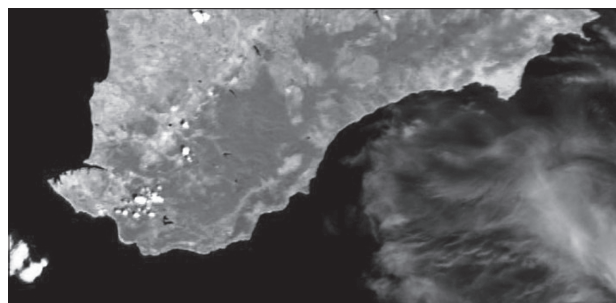


Рис. 2. Состояние облачности 19 мая 2012 г. на время съемки (облачность 2 % — снимаемая территория доступна для съемки)

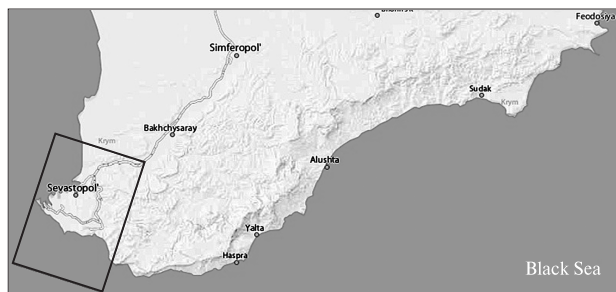


Рис. 3. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 1-й виток снято 15 % площади территории)

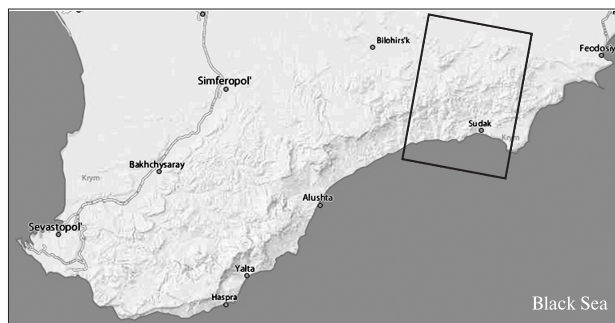


Рис. 6. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 2-й виток снято 17 % площади территории)

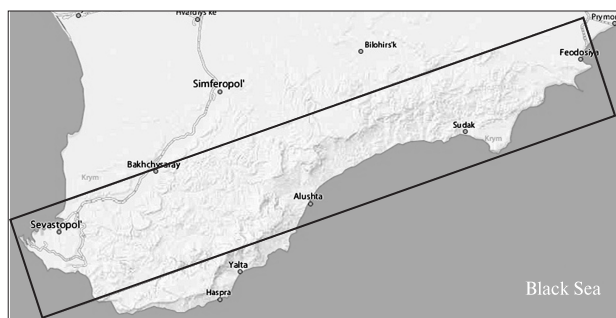


Рис. 4. Съемка с произвольной ориентацией сцены (за 1-й виток снято 80 % площади территории)

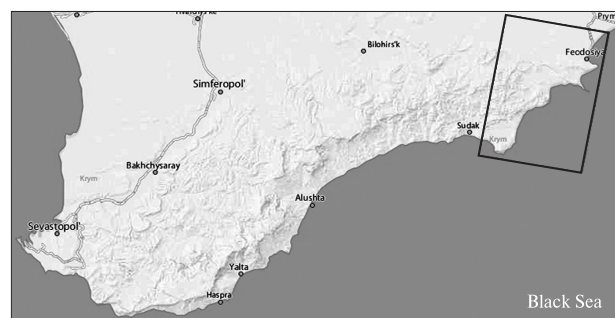


Рис. 7. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 3-й виток снято 20 % площади территории)

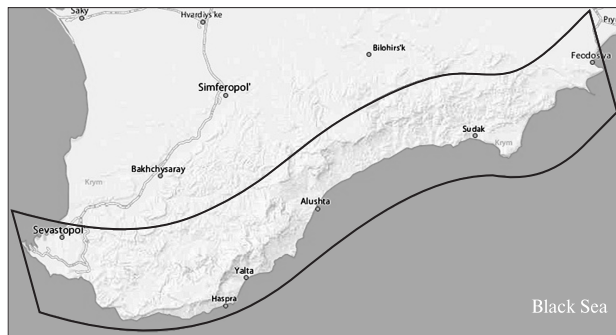


Рис. 5. Съемка сцены сложной конфигурации (за 1-й виток снято 98 % площади территории)

Вид съемки	Количество сцен (витков)	Срок выполнения, сут	Доля 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 %

рис. 2—7. Как видно, в заданный 5-дневный период снимаемая территория была доступна для съемки полностью 1 день, частично — 2 дня, недоступна — 2 дня. В таблице приведены показатели эффективности различных видов съемки.

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 (осенне-зимний период) и других регионов Украины влияние погодных условий еще более существенное, и

сравнительная эффективность разработанного метода съемки будет еще выше.

1. Долинец Ю. С., Мозговой Д. К. Использование снимков со спутников Terra и Aqua для решения актуальных прикладных задач // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаціно-космічної техніки». Збірник доповідей. — Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2007. — Ч. II. — С. 97—103.
2. Долинец Ю. С., Мозговой Д. К. Технология спутниковой съемки с ненулевыми угловыми скоростями // X Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез. — Д., 2008. — С. 495.
3. Кравець О. В., Мозговой Д. К. Использование данных MODIS для экологического мониторинга и контроля ЧС // X Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос». 9—11 квітня 2008 р., Дніпропетровськ: Національний центр аеро-космічної освіти молоді України ім. О. М. Макарова: Збірник тез. — Дніпропетровськ: НЦАОМ, 2008. — С. 500.
4. Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Хорошилов В. С. и др. Методы повышения эффективности спутниковой съемки произвольно расположенных протяженных участков Земли // 21-я Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. (Севастополь, 12—16 сент. 2011 г.). — Севастополь: Вебер, 2011. — С. 182—183.
5. Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Хорошилов В. С. и др. Повышение эффективности съемки с помощью космического аппарата земных объектов произвольной конфигурации // Технологические системы. — 2011, № 2 (55). — С. 66—70.
6. Макаров О. Л., Мозговой Д. К., Кулабухов А. М. и др. Технология спутниковой съемки в процессе перенацеливания // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 6. — С. 3—9.
7. Мозговой Д. К. Методика супутникової зйомки мало-розмірних слабоконтрастних об'єктів // Програма наукової конференції за підсумками науково-дослідної роботи університету за 2010 рік. — Дніпропетровськ: ДНУ, 2010. — С. 108.
8. Мозговой Д. К. Технология съемки протяженных объектов // IX Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Зб. тез. — Д., 2007. — С. 439.
9. Мозговой Д. К. Управление ориентацией КА ДЗЗ высокой разрешающей способности // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Ракетно-космічна техніка. — 2009. — Вип. 13, т. 1. № 17/4. — С. 59—65.
10. Мозговой Д. К., Волошин В. И. Спутниковая съемка протяженных объектов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Ракетно-космічна техніка. — 2006. — Вип. 10. — 2, № 9/2. — С. 239—241.
11. Мозговой Д. К., Волошин В. И. Технология съемки прибрежных зон // Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины: Тезисы докладов Международной конференции молодых ученых (Качивели, 12—14 июня 2007 г.). — Севастополь, 2007. — С. 21—22.
12. Мозговой Д. К., Волошин В. И., Бушуев Е. И., Салтыков Ю. Д. Использование новых технологий съемки для повышения эффективности КА МС-2-8 // VII Украинская конференция по космическим исследованиям. Сб. тезисов. 3 — 8 сентября 2007 г., НЦУИКС, Евпатория. — С. 182—183.

Надійшла до редакції 25.06.12

A. L. Makarov

ON SATELLITE IMAGING OF LENGTHY TERRITORIES WITH COMPLEX CONFIGURATION

We consider the efficiency of the method proposed for satellite imaging of lengthy territories with complex configuration using Earth remote sensing satellites with optical-electronic scanners of high resolution which is realized with the help of programmed control of the satellite orientation during imaging.