

УДК 629.197

Макаров А.Л.¹, Мозговой Д.К.², Кулабухов А.М.², Хорошилов В.С.¹, Ольшевский А.Л.¹,
Балашов В.Н.¹, Попель В.М.¹

¹ ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля». Украина, г. Днепропетровск

² Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара. Украина, г. Днепропетровск

ОЦЕНКА РЕАЛИЗУЕМОСТИ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ ПРОТЯЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Анотація

Наведено оцінку можливості 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.

Abstract

The estimation of the possibility of satellite imagery expense of complex configurations using satellites of remote sensing (RS) and high-spatial-resolution optical-electronic scanners, which is implemented with a software control the orientation of the satellite at the time of shooting.

Постановка проблемы

Спутниковая съемка является наиболее эффективным способом получения пространственных данных благодаря своей обзорности, достоверности, оперативности, детальности, бесконтактности и другим преимуществам по сравнению с традиционными наземными методами.

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

Задачи исследования

Существенно повысить оперативность спутниковой съемки протяженных территорий сложной конфигурации позволяет новый метод съемки в процессе перенацеливания (т.е. с расчетными (номинальными) ненулевыми угловыми скоростями), реализуемый с помощью программного управления ориентацией спутника [7, 8].

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 с учетом полосы захвата съемочного прибора и требуемого направления сканирования;
- расчет орбитального движения спутника и выбор витка съемки и времени включения съемочного прибора с учетом заданного коэффициента накопления (при реализации режима «съемка с накоплением»);
- расчет углов ориентации спутника, требуемых для съемки заданного протяженного объекта, с учетом углов установки съемочного прибора;
- расчет угловых скоростей спутника во время съемки и анализ реализуемости съемки с учетом имеющихся ограничений на величины углов ориентации и угловых скоростей спутника;
- моделирование съемки заданного протяженного объекта с учетом дополнительных факторов (атмосферная рефракция, рельеф местности и др.);
- анализ влияния систематических и случайных погрешностей на точность определения координат снятых объектов (погрешности установки съемочного прибора, погрешности определения ориентации и местоположения спутника и др.).



Ниже приведена методика оценки реализуемости спутниковой съемки протяженной приграничной территории сложной конфигурации и результаты компьютерного моделирования.

Математическая модель протяженной территории сложной конфигурации

Снимаемая территория сложной конфигурации задается на карте узловыми точками с произвольным шагом по широте и долготе. Для аппроксимации протяженной территории используется естественный кубический интерполирующий сплайн с последующим сглаживанием методом наименьших квадратов [9, 10].

Определение ориентации спутника при съемке

Входными данными являются [12]:

- координаты опорных точек начала и конца строки в гринвичской системе координат (ГСК) $x_{ор1}, y_{ор1}, z_{ор1}$ ($i = 1, 2$);
- координаты спутника в ГСК $x_{сп}, y_{сп}, z_{сп}$;
- вектора визирования опорных точек в приборной системе координат (ПСК) $\bar{V}_{ор1}^{ПСК}$ ($i = 1, 2$);
- значения элементов матрицы перехода от орбитальной системы координат (ОСК) к ГСК $M_{ОСК-ГСК} = a_{\#(1 \leq i, j \leq 3)}$

Выходными данными являются углы крена, тангажа и рыскания спутника $\varphi_{сп}, \vartheta_{сп}$ и $\psi_{сп}$.

Вектора визирования опорных точек вычисляются по формулам

$$\bar{\Delta}_{ор1} = \{x_{ор1} - x_{сп}, y_{ор1} - y_{сп}, z_{ор1} - z_{сп}\}^T,$$

$$\bar{\Delta}_{ор2} = \{x_{ор2} - x_{сп}, y_{ор2} - y_{сп}, z_{ор2} - z_{сп}\}^T.$$

Затем по $\bar{\Delta}_{ор1}$ и $\bar{\Delta}_{ор2}$ вычисляются нормированные вектора визирования опорных точек в ГСК $\bar{V}_{ор1}^{ГСК}$ и $\bar{V}_{ор2}^{ГСК}$:

$$\bar{V}_{ор1}^{ГСК} = \frac{\bar{\Delta}_{ор1}}{|\bar{\Delta}_{ор1}|}, \dots, \bar{V}_{ор2}^{ГСК} = \frac{\bar{\Delta}_{ор2}}{|\bar{\Delta}_{ор2}|}.$$

Значения элементов матрицы перехода от ГСК к ОСК равны:

$$M_{ГСК-ОСК} = M_{ОСК-ГСК}^T.$$

Затем по матрице $M_{ГСК-ОСК}$ и векторам $\bar{V}_{ор1}^{ГСК}$ и $\bar{V}_{ор2}^{ГСК}$ вычисляются вектора визирования опорных точек в ОСК $\bar{V}_{ор1}^{ОСК}$ и $\bar{V}_{ор2}^{ОСК}$:

$$\bar{V}_{ор1}^{ОСК} = M_{ГСК-ОСК} \cdot \bar{V}_{ор1}^{ГСК}, \bar{V}_{ор2}^{ОСК} = M_{ГСК-ОСК} \cdot \bar{V}_{ор2}^{ГСК}.$$

Вводятся две тройки ортогональных векторов:

$$\bar{u} = \bar{V}_{ор1}^{ОСК}, \bar{v} = \bar{V}_{ор1}^{ОСК} \times \bar{V}_{ор2}^{ОСК}, \bar{w} = \bar{V}_{ор1}^{ОСК} \times \bar{V}_{ор2}^{ОСК}$$

и

$$\bar{u}_0 = \bar{V}_{ор1}^{ПСК}, \bar{v}_0 = \bar{V}_{ор1}^{ПСК} \times \bar{V}_{ор2}^{ПСК}, \bar{w}_0 = \bar{V}_{ор1}^{ПСК} \times \bar{V}_{ор2}^{ПСК}.$$

По векторам $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{u}_0, \bar{v}_0, \bar{w}_0$ строятся ортогональные матрицы B и B_0 :

$$B = \begin{pmatrix} u^x & v^x & w^x \\ u^y & v^y & w^y \\ u^z & v^z & w^z \end{pmatrix}, B_0 = \begin{pmatrix} u_0^x & v_0^x & w_0^x \\ u_0^y & v_0^y & w_0^y \\ u_0^z & v_0^z & w_0^z \end{pmatrix},$$

где верхними индексами обозначены соответствующие координаты векторов.

Обозначим через $M_{ПСК-ОСК} = a_{\#(1 \leq i, j \leq 3)}$ матрицу перехода от ПСК к ОСК.

Значения элементов матрицы $M_{ПСК-ОСК}$ вычисляются по формуле:

$$M_{ПСК-ОСК} = B \cdot B_0^T.$$

Углы крена, тангажа и рыскания спутника вычисляются по значениям элементов матрицы $M_{ПСК-ОСК}$.

Угловые скорости определяются путем аналитического дифференцирования коэффициентов сплайна, интерполирующего углы ориентации.

Модель орбитального движения спутника

Для малых периодов прогноза и низкокруговых орбит достаточно точной является аналитическая модель SGP4 [13, 14], позволяющая работать с начальными условиями, представленными в виде TLE-файлов, формируемых системой NORAD.

Анализ влияния погрешностей ориентации и местоположения спутника

Анализ влияния случайных погрешностей задания углов ориентации и прогноза местоположения спутника на реализуемость программы съемки в части точности покрытия заданной территории проводится методом конечных разностей.

Входными данными являются погрешности задания углов ориентации и прогноза местоположения спутника.

Рассчитываются значения частных производных от картографических координат опорных точек по координатам x, y, z спутника и углам крена, рыскания и тангажа спутника для снимаемой сцены ($1 \leq j \leq N$) для всех сочетаний максимальных и минимальных абсолютных значений погрешностей задания углов ориентации и прогноза местоположения спутника

$$\frac{\partial x_{карт OT j}}{\partial x}, \frac{\partial y_{карт OT j}}{\partial x}, \frac{\partial x_{карт OT j}}{\partial y}, \frac{\partial y_{карт OT j}}{\partial y},$$

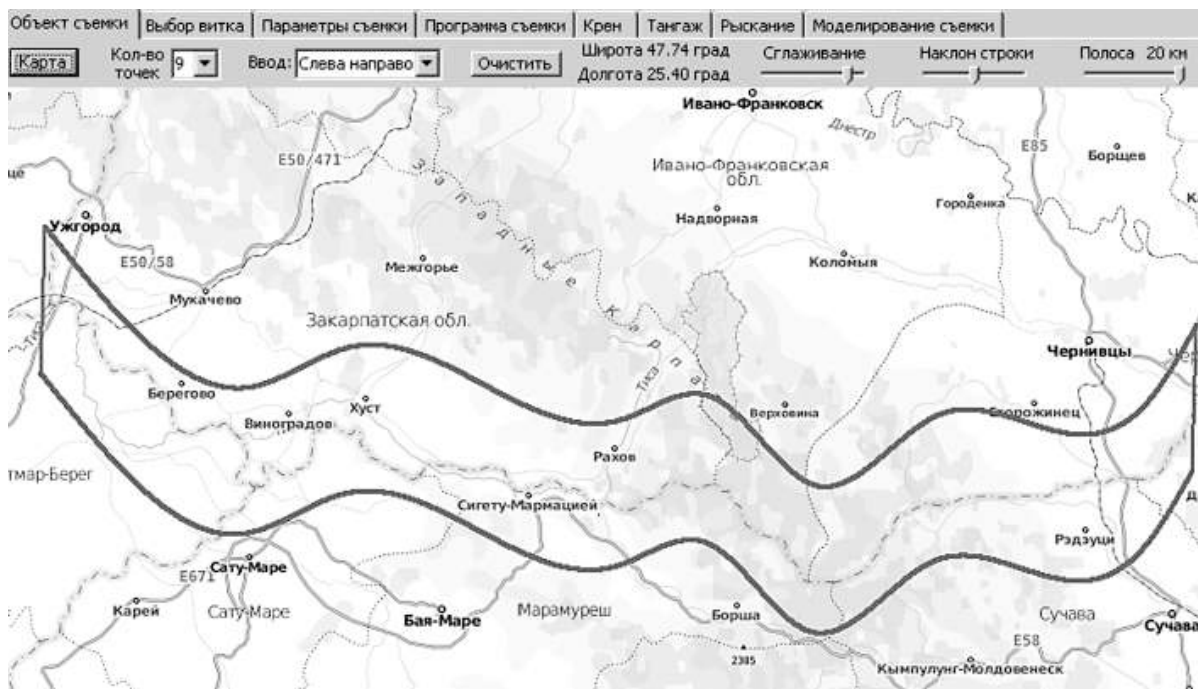


Рис. 1. Сплайн-аппроксимация объекта съемки

$$\frac{dx_{\text{карт OT } j}}{dz}, \frac{dy_{\text{карт OT } j}}{dz}, \frac{dx_{\text{карт OT } j}}{d\phi}, \frac{dy_{\text{карт OT } j}}{d\phi},$$

$$\frac{dx_{\text{карт OT } j}}{d\theta}, \frac{dy_{\text{карт OT } j}}{d\theta}, \frac{dx_{\text{карт OT } j}}{d\psi}, \frac{dy_{\text{карт OT } j}}{d\psi}$$

Выходными данными являются картографические координаты смещенных опорных точек, соответствующие максимальным абсолютным отклонениям от заданных.

Результаты моделирования

Исходные данные для моделирования:

- снимаемый участок – приграничные территории запада Украины (участок Ужгород–Черновцы);
- тип орбиты спутника – солнечно-синхронная, высота 700 км;
- полоса захвата сканера в надире – 20 км.

Моделирование проводилось для следующих видов съемки:

- съемка без накопления (сплайн-аппроксимация объекта съемки);
- съемки с накоплением ($K_{\text{нак}} = 4$, сплайн-аппроксимация объекта съемки);
- съемки без накопления (линейная аппроксимация объекта съемки);

- съемки с накоплением ($K_{\text{нак}} = 4$, линейная аппроксимация объекта съемки).

Результаты моделирования показаны на рис. 1...15.

На рис.1 видно, что сплайн-аппроксимация объекта съемки позволяет полностью снять требуемую территорию за один виток.

Линейная аппроксимация объекта съемки (рис. 6) позволяет за один виток снять требуемую территорию лишь частично, но при меньших угловых скоростях (рис. 7...9).



Рис. 2. Выбор витка и времени съемки

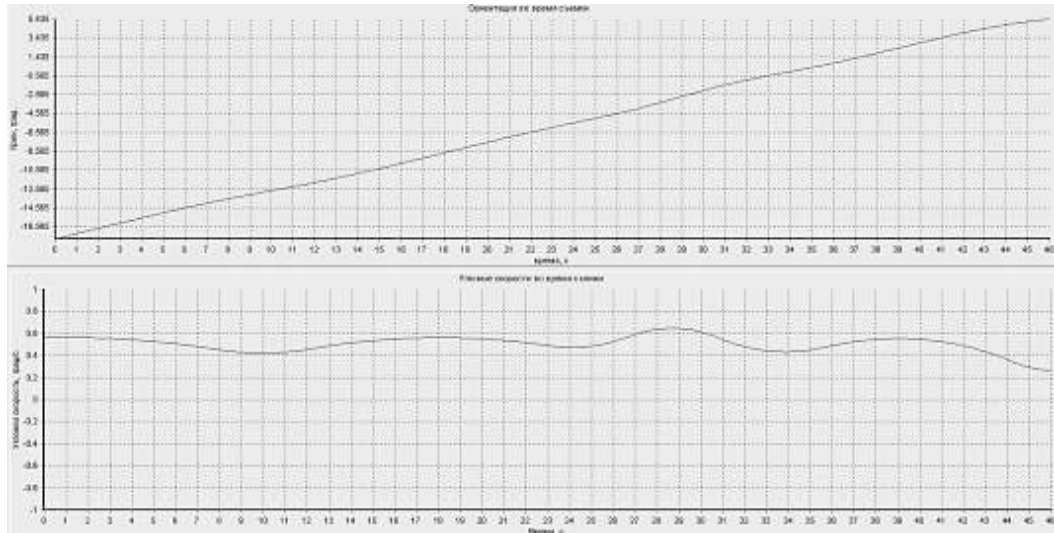


Рис. 3. Угол крена и угловая скорость крена во время съемки без накопления (сплайн-аппроксимация объекта съемки)

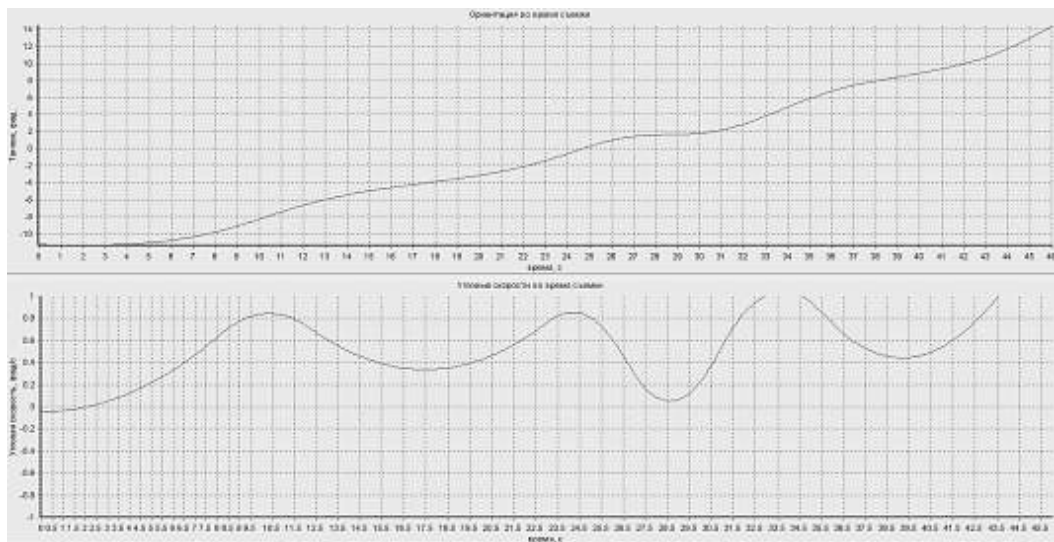


Рис. 4. Угол тангажа и угловая скорость во время съемки без накопления (сплайн-аппроксимация объекта съемки)

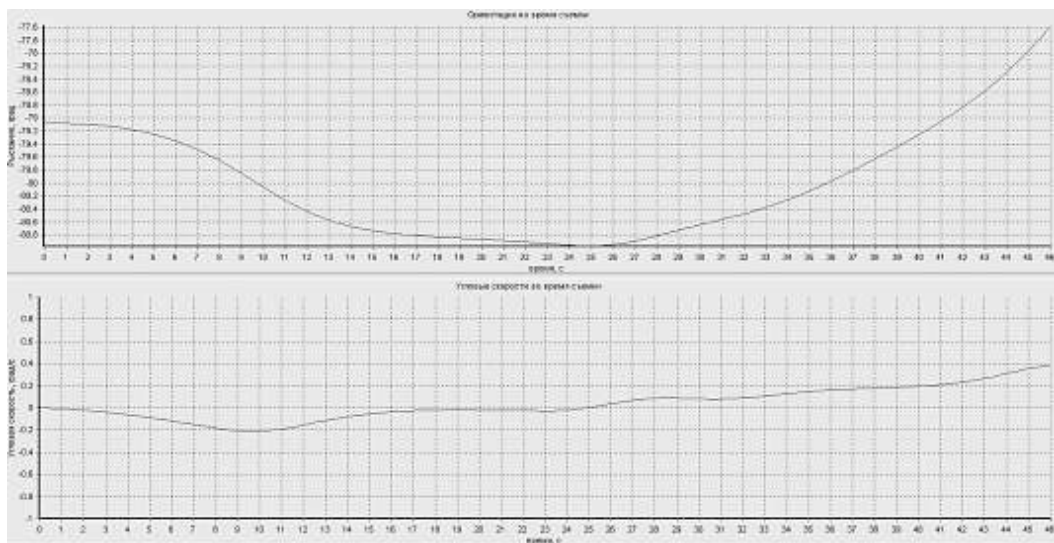


Рис. 5. Угол рыскания и угловая скорость во время съемки без накопления (сплайн-аппроксимация объекта съемки)

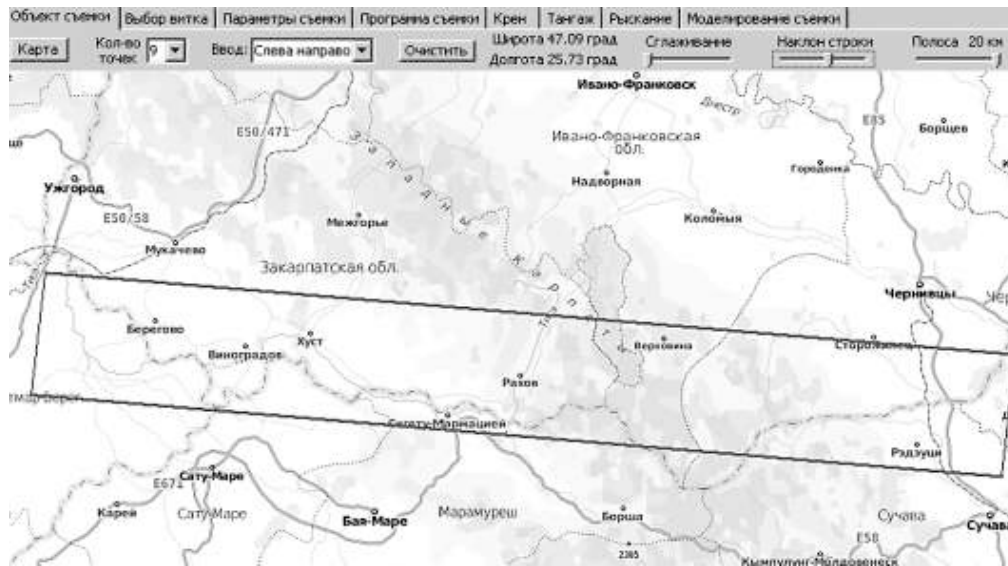


Рис. 6. Линейная аппроксимация объекта съемки

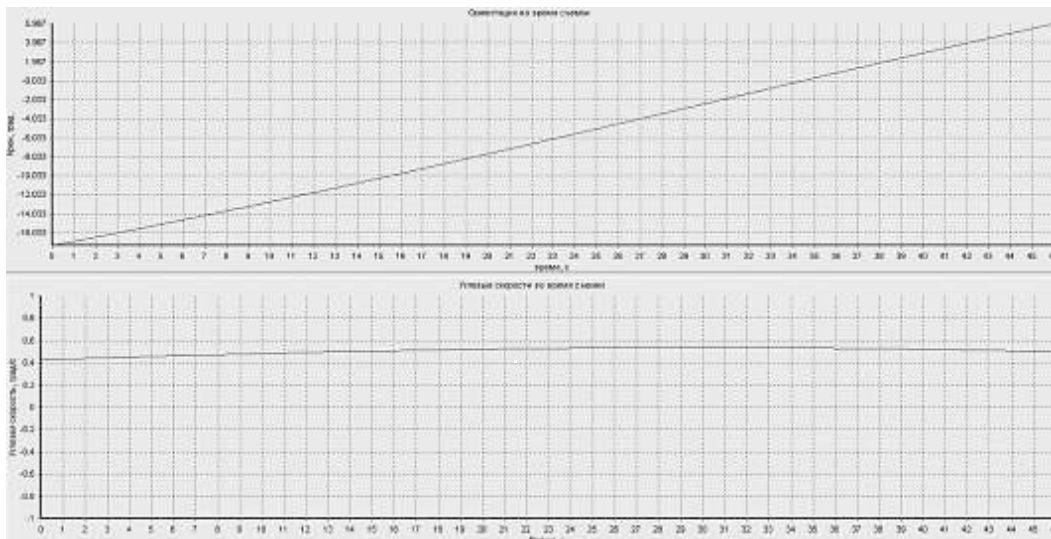


Рис. 7. Угол крена и угловая скорость крена во время съемки без накопления (линейная аппроксимация объекта съемки)

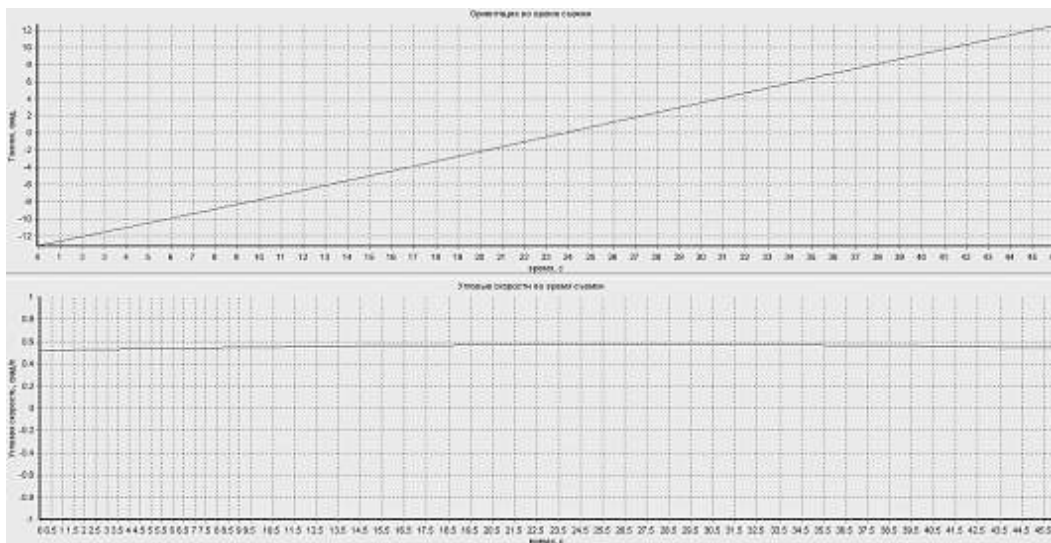


Рис. 8. Угол тангажа и угловая скорость тангажа во время съемки без накопления (линейная аппроксимация объекта съемки)

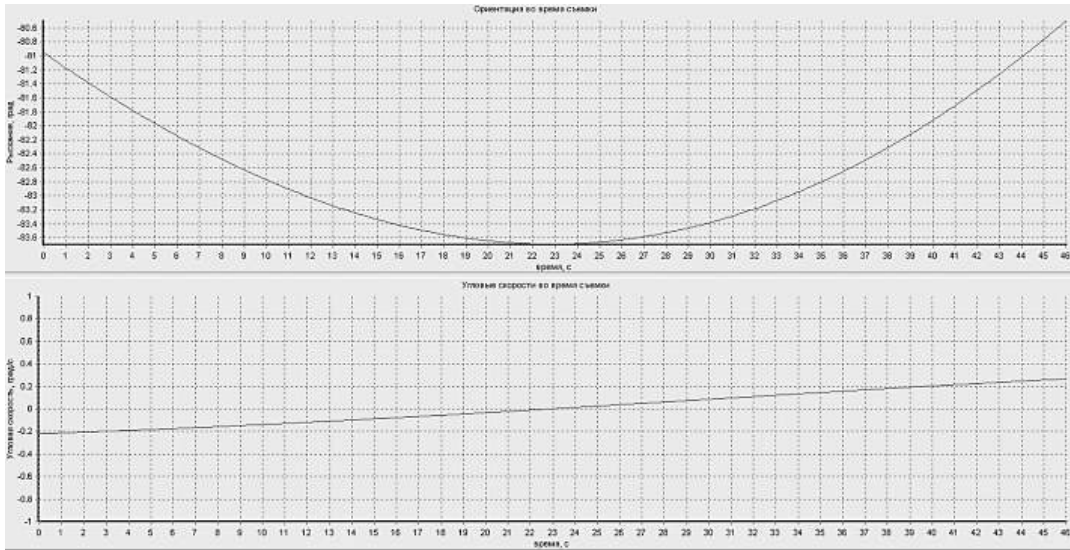


Рис. 9. Угол рыскания и угловая скорость рыскания во время съемки без накопления (линейная аппроксимация объекта съемки)

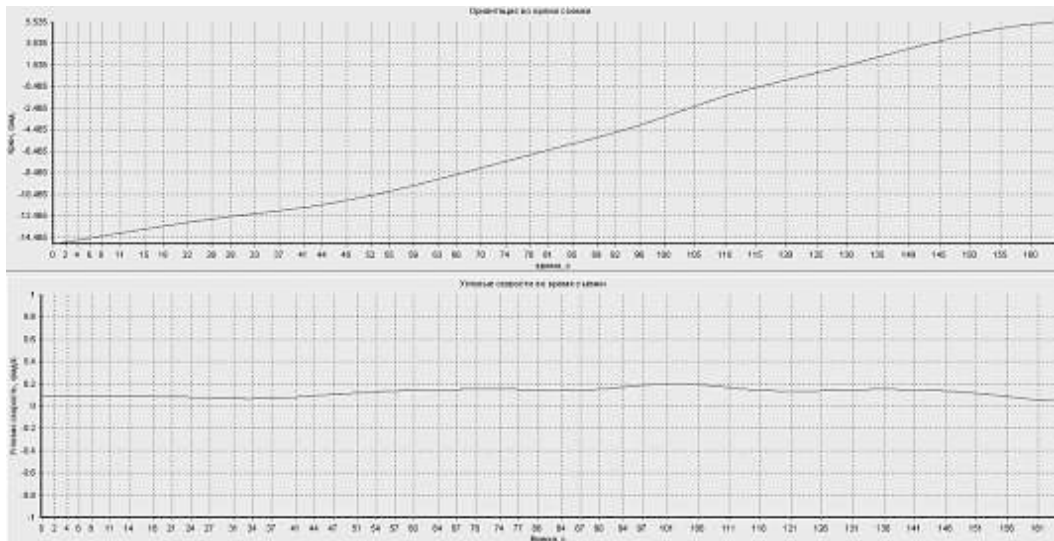


Рис. 10. Угол крена и угловая скорость крена во время съемки с накоплением (сплайн-аппроксимация объекта съемки)

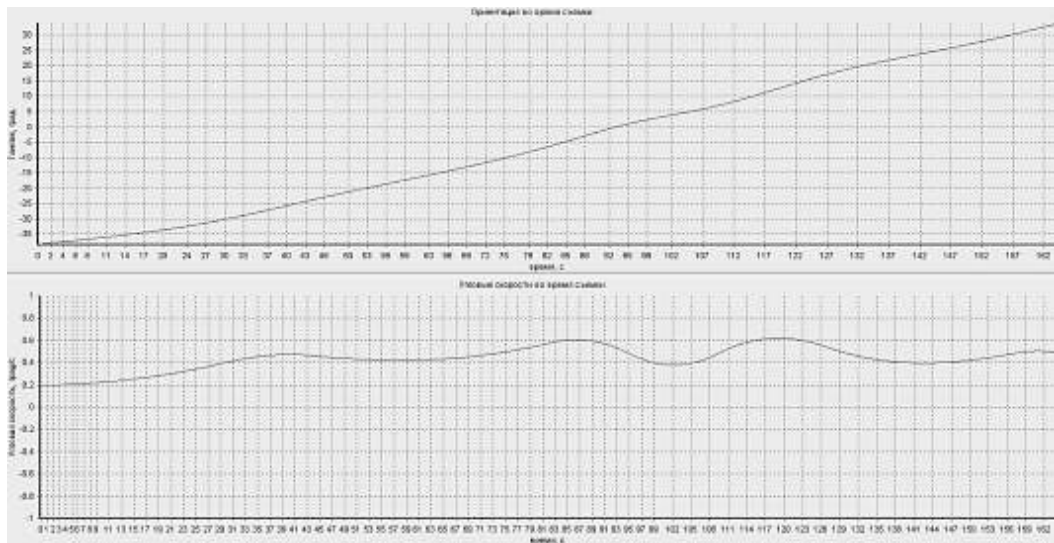


Рис. 11. Угол тангажа и угловая скорость тангажа во время съемки с накоплением (сплайн-аппроксимация объекта съемки)

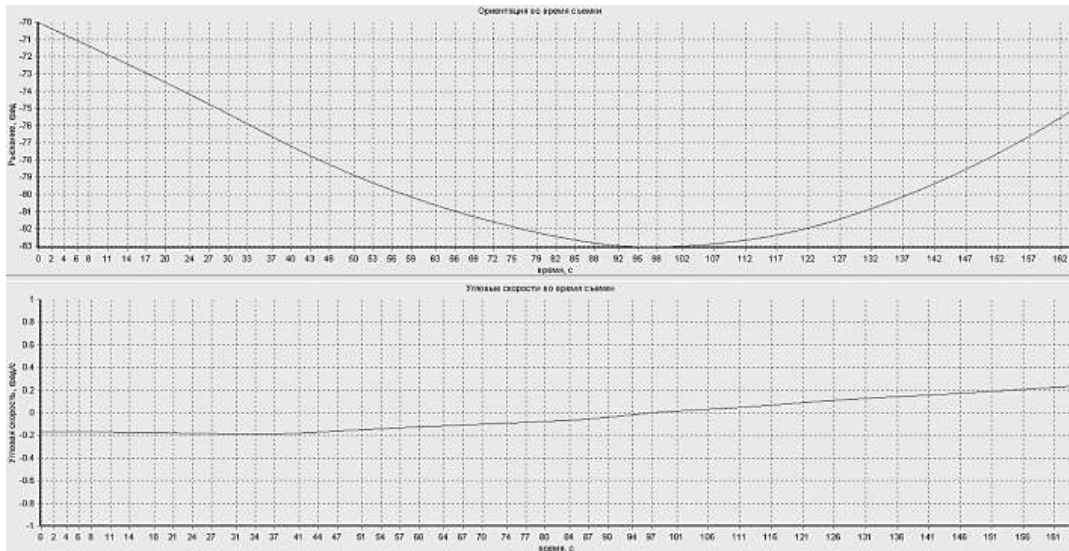


Рис. 12. Угол рыскания и угловая скорость рыскания во время съемки с накоплением (сплайн-аппроксимация объекта съемки)

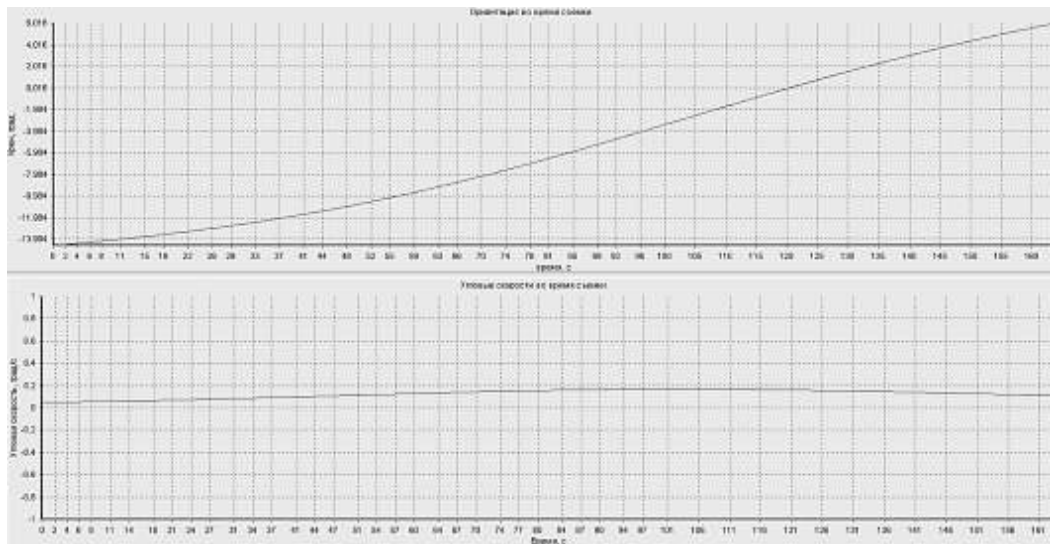


Рис. 13. Угол крена и угловая скорость крена во время съемки с накоплением (линейная аппроксимация объекта съемки)

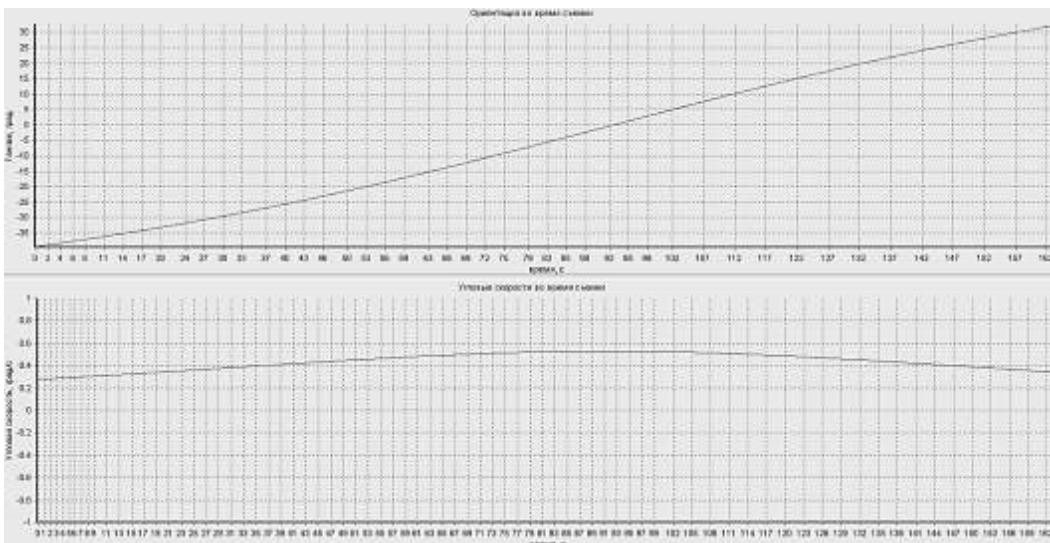


Рис. 14. Угол тангажа и угловая скорость тангажа во время съемки с накоплением (линейная аппроксимация объекта съемки)

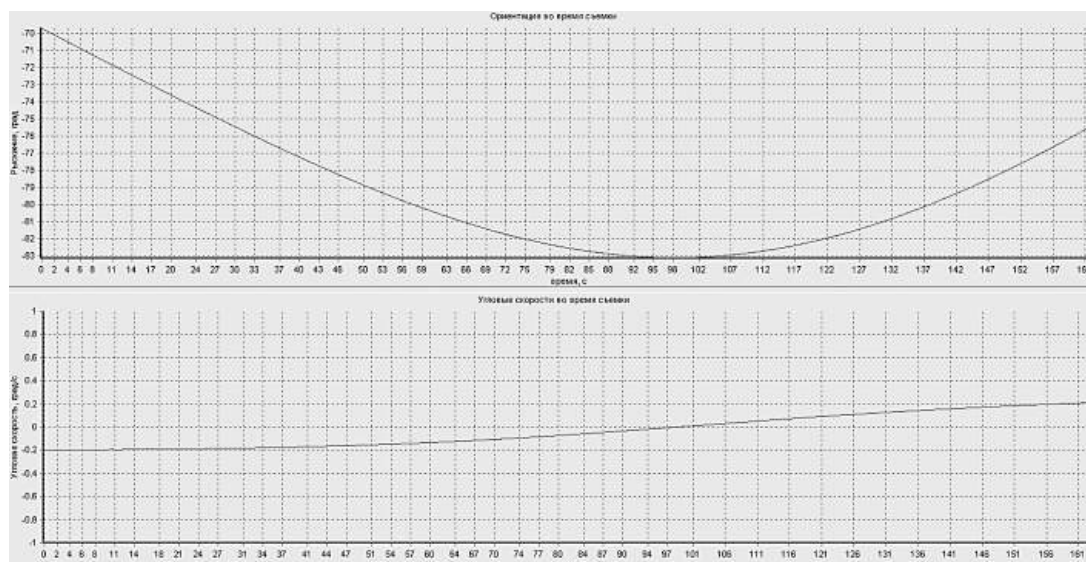


Рис. 15. Угол рыскания и угловая скорость рыскания во время съёмки с накоплением (линейная аппроксимация объекта съёмки)

Выводы

В таблице 1 приведены требуемые диапазоны углов ориентации и угловых скоростей для различных видов съёмки, полученные в результате моделирования.

Компьютерное моделирование подтвердило возможность спутниковой съёмки с расчетными (номинальными) ненулевыми угловыми скоростями протяженных территорий сложной конфигурации путем программного управления ориентацией спут-

ника во время съёмки. Угловые скорости перенацеливания спутника в среднем составили менее 0.5 град/с. При этом сплайн-аппроксимация объекта съёмки оказалась наиболее эффективной в части оперативности съёмки (выполняется за один виток) и процента покрытия территории.

Литература

1. Мозговой Д. К. Спутниковая съёмка протяженных объектов / Д. К. Мозговой, В.И. Волошин // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Ракетно-космічна техніка. Вип. 10, т. 2. № 9/2, 2006 г. — С. 239–241.

Таблица 1

Тип аппроксимации	Параметры ориентации и углового движения спутника	Единицы измерения	Съёмка без накопления (продолжительность съёмки 46 с)		Съёмка с накоплением (продолжительность съёмки 164 с)	
			Мин. значение	Макс. значение	Мин. значение	Макс. значение
Сплайновая (покрытие 100%)	Угол крена	град	-16.6	5.4	-14.8	5.5
	Угол тангажа	град	-11.9	14.2	-40	34
	Угол рыскания	град	-81	-79.1	-83	-73
	Скорость крена	град/с	0.29	0.65	0.08	0.21
	Скорость тангажа	град/с	-0.05	1.4	0.2	0.62
	Скорость рыскания	град/с	-0.21	0.39	-0.2	0.23
Линейная (покрытие 85%)	Угол крена	град	-17.9	9	-14.7	5.9
	Угол тангажа	град	-13.1	12.8	-39	33
	Угол рыскания	град	-83.7	-80.9	-83.1	-70.4
	Скорость крена	град/с	0.45	0.52	0.05	0.18
	Скорость тангажа	град/с	0.51	0.58	0.29	0.52
	Скорость рыскания	град/с	-0.22	0.09	-0.2	0.21

2. Мозговой Д.К. Технология съёмки протяженных объектов / Д.К. Мозговой // IX Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. «Людина і космос»: Зб. тез. — Д., 2007. — С. 439.

3. Мозговой Д.К. Технология съёмки прибрежных зон / 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 съёмки с ненулевыми угловыми скоростями / Ю.С. Долинец, Д.К. Мозговой // X Міжнар. моло-

діжна наук.-практ. конф. «Людина і космос»: Збірник тез. — Д.: НЦАОМ, 2008. — С. 495.

5. *Мозговой Д.К.* Использование новых технологий съемки для повышения эффективности КА МС-2-8 / 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. — С. 182–183.

6. *Мозговий Д.К.* Методика супутникової зйомки малорозмірних слабоконтрастних об'єктів / Д.К. Мозговий // Програма наук. конф. за підсумками наук.-досл. роботи університету за 2010 рік. — Д.: ДНУ, 2010. — С. 108.

7. *Мозговой Д.К.* Управление ориентацией КА ДЗЗ высокой разрешающей способности / Д.К. Мозговой // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Ракетно-космічна техніка. Вип. 13, т. 1. № 17/4, 2009 г. — С. 59–65.

8. *Технология спутниковой съемки в процессе перенацеливания* / Макаров О.Л., Мозговий Д.К., Кулабухов А.М. 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* / Макаров А.Л., Мозговой Д.К., Хорошилов В.С. и др. // Технологические системы, № 2(55)/2011. — С. 66–70.

10. *Методы повышения эффективности спутниковой съемки произвольно расположенных протяженных участков Земли* / Макаров А.Л., Мозговой Д.К., Хорошилов В.С. 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 / М.А. Черкасов — М.: Изд-во МАИ, 2007. — 88 с.

12. *Денисова Э.В.* Основы вычислительной математики: 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 / Felix R. Hoots, Ronald L. Roehrich — Peterson: Project Spacetrack Reports Office of Astrodynamics Aerospace Defense Center, 1980. — 91 p.

14. *Повышение оперативности спутниковой съемки протяженных территорий сложной конфигурации* / Макаров А.Л., Мозговой Д.К., Хорошилов В.С. и др. // Авиационно-космическая техника и технология. — Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2012 г.