

УДК 629.197

А.Л. МАКАРОВ

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

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СЪЕМКИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВ

Приведен анализ методов управления процессом съемки протяженных территорий сложной конфигурации с применением спутников дистанционного зондирования Земли с оптико-электронными сканерами высокого пространственного разрешения. Описаны результаты моделирования съемки береговой линии с использованием фактических данных об облачности, реализуемой с помощью программного управления угловым движением спутника во время съемки. По результатам моделирования сделан вывод о наиболее эффективной в части оперативности и площади покрытия съемке сцены сложной конфигурации.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, оптико-электронный сканер, спутниковая съемка протяженных территорий, программное управление угловым движением спутника.

### Введение

На первых спутниках дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) отечественной разработки "Сич-1", "Океан-О" и "Сич-1М" с бортовыми сканерами низкого и среднего пространственного разрешения с широкой полосой захвата использовалась съемка без перенацеливания [1] (рис. 1).

Оптическая ось сканера при такой съемке обычно направлена в надир, т.е. съемка ведется при нулевых углах и скоростях ориентации в пределах точностных возможностей системы ориентации спутника. Скорость и направление сканирования определяются орбитальным движением спутника [2].

В настоящее время съемка без перенацелива-

ния используется на спутниках ДЗЗ низкого пространственного разрешения, например на спутниках Terra и Aqua [3, 4].

### 1. Современные методы управления процессом съемки поверхности земли

На спутниках отечественной разработки "Egypatsat-1", "Сич-2" [5, 6], имеющих бортовые сканеры высокого пространственного разрешения с узкой полосой захвата, использовалась съемка с перенацеливанием по крену (рис. 2).

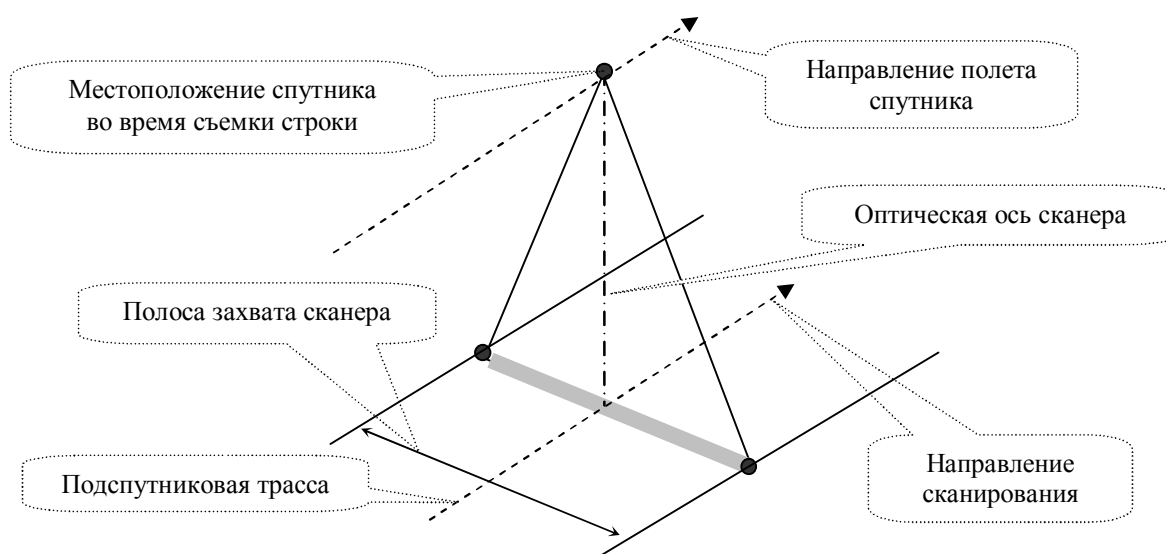


Рис. 1. Съемка без перенацеливания

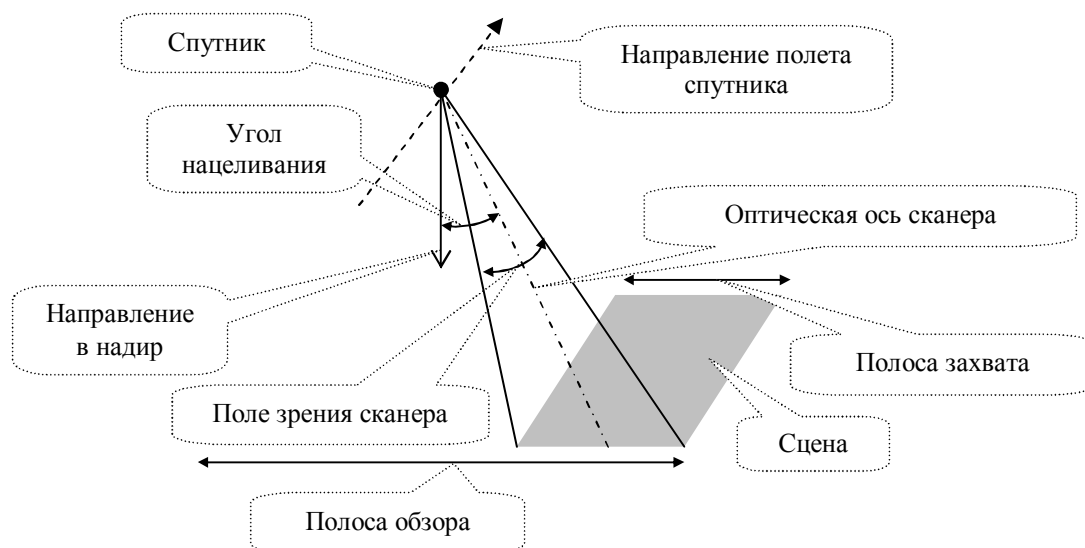


Рис. 2. Съемка с перенацеливанием по крену

Поле зрения сканера высокого разрешения обычно составляет единицы градусов, а угол перенацеливания – десятки градусов (т.е. ширина полосы захвата превышает примерно на порядок ширину полосы обзора). Съемка ведется при фиксированном угле крена и близких к нулю углах тангажа и рыскания [7]. Перенацеливание по крену позволяет несколько повысить технические характеристики спутников высокого пространственного разрешения, например, выполнить многовитковую съемку объектов, находящихся в стороне от подспутниковой трассы, или стереосъемку одной территории с соседних витков [8]. Пример съемки протяженной береговой линии за три витка с перенацеливанием по крену приведен на рис. 3.

Кроме того, перенацеливание по крену позволяет выполнять на одном витке съемку объектов, находящихся с разных сторон от подспутниковой трассы (рис. 4).

При этом требуется высокая скорость перенацеливания и малое время стабилизации спутников,

т.е. повышаются требования к системе ориентации [9, 10].

При съемке слабоосвещенных и слабоконтрастных объектов для повышения чувствительности съемочной аппаратуры в современных спутниках ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения OrbView, "Ресурс-ДК", EROS и др. [11, 12] используется режим съемки с накоплением (так называемый асинхронный режим). Он позволяет увеличить время экспозиции строки за счет снижения скорости перемещения проекции строки фотоприемника (линейки ПЗС) по поверхности Земли путем перенацеливания спутника во время съемки по тангажу (рис. 5).

Благодаря этому возрастает отношение сигнал/шум для получаемых снимков при одних и тех же параметрах оптико-электронной системы (рис. 6).

Режим съемки с накоплением позволяет:

- производить съемку при меньших углах места Солнца с заданным отношением сигнал/шум;

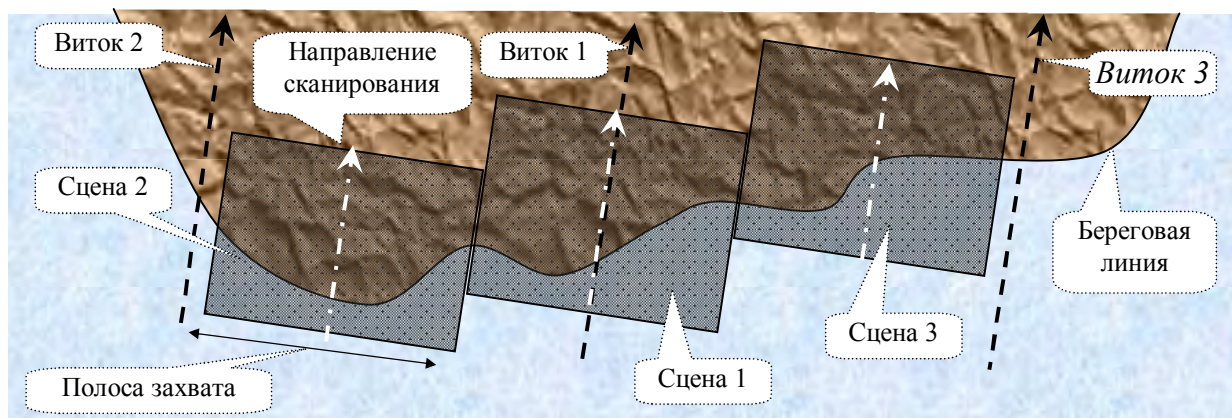


Рис. 3. Съемка протяженной береговой линии за три витка



Рис. 4. Съемка с разных сторон от подспутниковой трассы

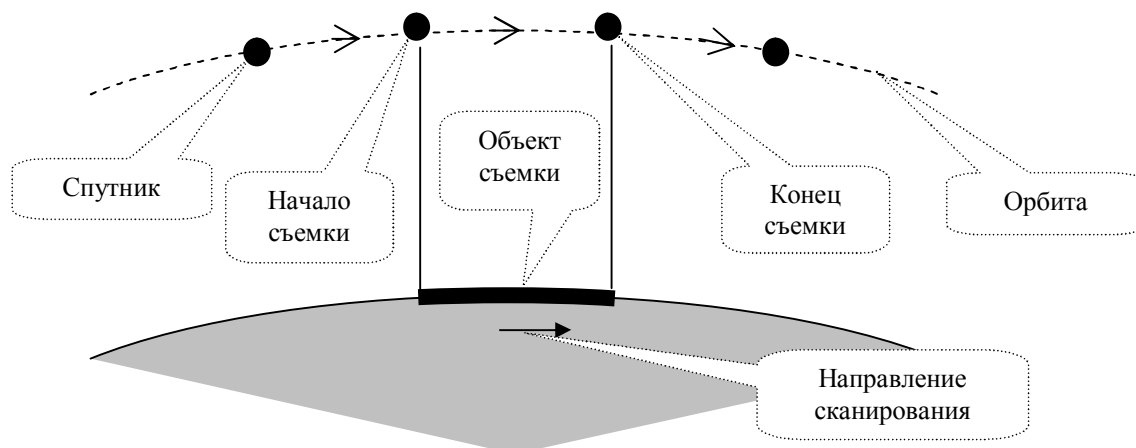


Рис. 5. Съемка без накопления

– обнаруживать на снимках слабоосвещенные и слабоконтрастные объекты в заданных условиях освещенности;

– выполнять более качественно процедуры классификации снимка, использующие радиометрические и спектральные признаки [13-15].

При такой съемке необходимо учитывать множество факторов, основными из которых являются:

– различная наклонная дальность и угол съемки для строк, соответствующих началу, середине и концу сцены, что приводит к соответствующим различиям в размерах проекции линейки ПЗС на поверхности Земли (рис. 7);

– значительное отклонение от надира оптической оси спутника в начале и конце съемки, необходимое при больших значениях коэффициента накопления (значениях отношения времени съемки с накоплением ко времени съемки без накопления), что приводит к необходимости учета высоты рельефа и атмосферной рефракции.

Кроме того, при съемке с накоплением увеличивается длительность сеанса связи в режиме непосредственной передачи без хранения на борту (для одной и той же снимаемой территории), что позволяет использовать приемные станции с меньшими антеннами и те же параметры бортовой передающей аппаратуры.

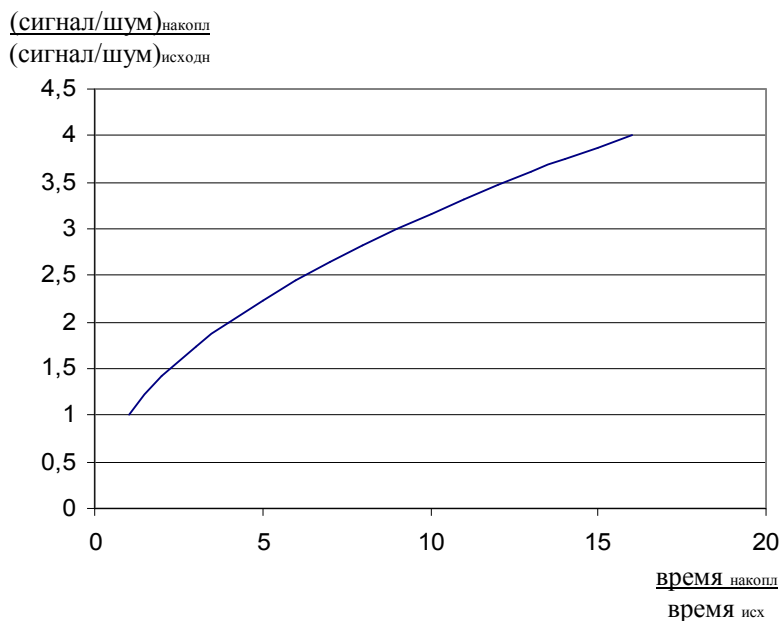


Рис. 6. Зависимость отношения сигнал/шум от коэффициента накопления

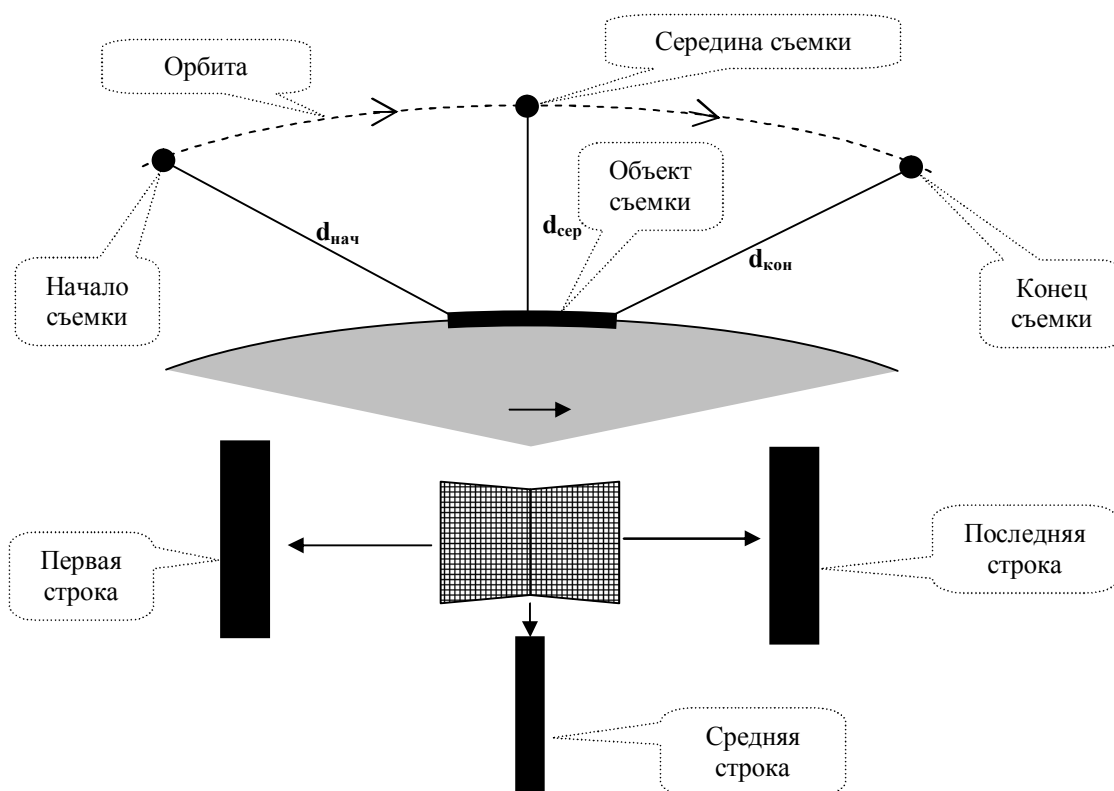


Рис. 7. Влияние различной наклонной дальности на геометрию съемки

Режим съемки с накоплением предъявляет соответствующие требования к спутнику в части обеспечения требуемой переориентации в процессе съемки.

Большинство современных спутников ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения (Ikonos, QuickBird и др.) позволяют получать сним-

ки с заданной ориентацией сцены (например, в направлении север-юг), а также снимать произвольно ориентированные протяженные объекты за один виток (рис. 8).

При такой съемке направление сканирования не совпадает с направлением движения подспутниковой точки (рис. 9), что требует непрерывного

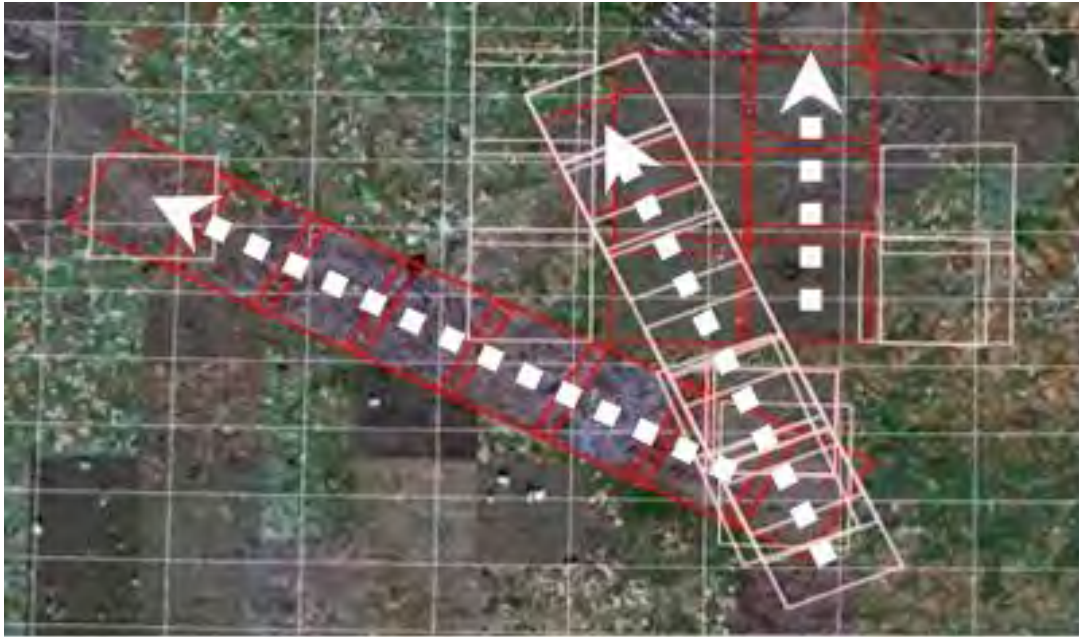


Рис. 8. Съемка с заданной ориентацией сцены (QuickBird)

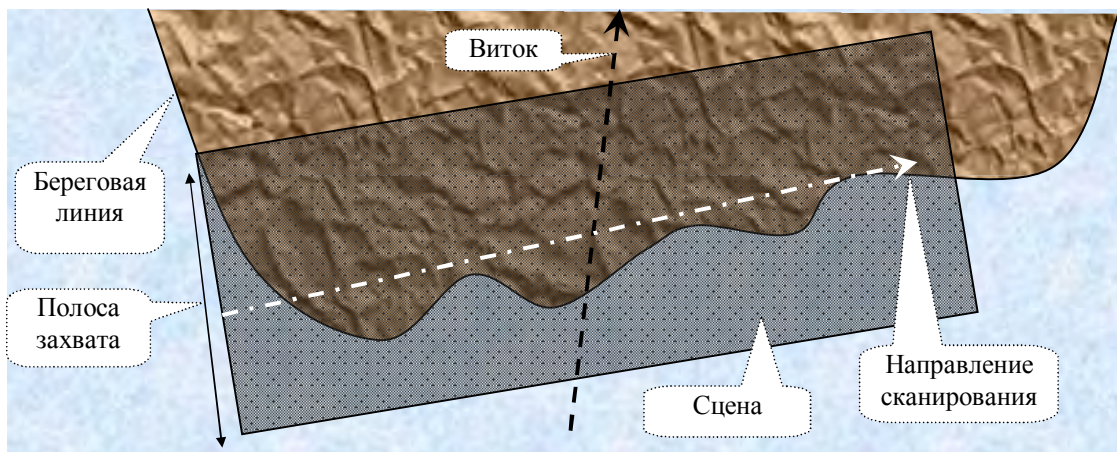


Рис. 9. Одновитковая съемка протяженного объекта

изменения углов крена, тангажа и рыскания непосредственно во время съемки.

Запущенные в последние годы спутники ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения (GeoEye, WorldView, Pleiades и др.) совмещают режим съемки с аппаратным накоплением TDI (Time Delay and Integration) и режим съемки с произвольной ориентацией сцены. Режим TDI использует матричный ПЗС-датчик вместо линейного, и съемка одной и той же территории производится последовательно несколькими строками матрицы с последующим суммированием по столбцам.

Это позволяет одновременно повысить радиометрическое качество снимков и увеличить полезную площадь сцены, снимаемую за один пролет.

Комбинированная съемка в процессе перенацеливания требует программного управления угловым

движением спутника непосредственно во время съемки.

Данный режим съемки не был реализован на отечественных спутниках ДЗЗ, так как он требует специальной методики планирования съемки, использующей программное управление угловым движением спутника непосредственно во время съемки. Разработка такой методики позволит использовать данный режим съемки на перспективных спутниках высокого пространственного разрешения отечественной разработки (на "Сич-3" и других).

## 2. Моделирование

С целью анализа эффективности метода съемки, использующего программное управление угловым движением спутника, проводилось моделиро-

вание для следующих видов съемки:

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

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

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

Выбранный снимаемый участок – южное побережье Крыма от Севастополя до Феодосии (протяженность около 160 км). Тип орбиты спутника – солнечно-синхронная, высота 700 км. Полоса захвата сканера в надире – 25 км.

Моделирование проводилось для съемки в режиме «без накопления» при отсутствии погрешностей ориентации и стабилизации КА.

Для получения фактических данных об облачности по данной территории использовались снимки спутников Aqua и Terra (прибор MODIS) [3, 4].

Результаты моделирования показаны на рис. 10...15.

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

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

Таблица 1

Показатели эффективности различных видов съемки, полученные 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%

## Выводы

Из результатов моделирования следует вывод, что одновитковая съемка сцены сложной конфигурации с ненулевыми угловыми скоростями 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.



Рис. 10. Съемка с произвольной ориентацией сцены (за 1-й виток снято ~80% площади территории)



Рис. 11. Съемка сцены сложной конфигурации (за 1-й виток снято ~98% площади территории)



Рис. 12. Состояние облачности 20.05.2012 на время съемки  
(облачность ~70% - снимаемая территория недоступна для съемки)



Рис. 13. Состояние облачности 21.05.2012 на время съемки  
(облачность ~98% - снимаемая территория недоступна для съемки)

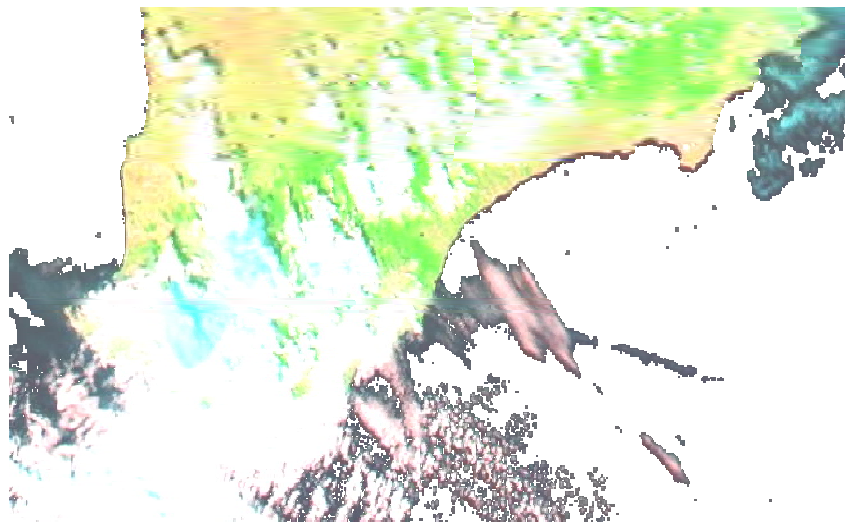


Рис. 14. Состояние облачности 23.05.2012 на время съемки  
(облачность ~20% - снимаемая территория частично доступна для съемки)



Рис. 15. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы  
(за 3-й виток снято ~20% площади территории)

## Литература

1. Мозговой, Д.К. Спутниковая съемка с высоким разрешением при ненулевых угловых скоростях [Текст] / Д.К. Мозговой // Космическая техника и технологии: материалы научн. семинара, 17 декабря 2008 г. – Днепропетровск: Физ.-технич. ф-т ДНУ, 2008. – 4 с.
2. 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.
3. 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 авіаційно-космічної техніки": Зб. доповідей. Ч. II. - К.: НТУ КПІ, 2007. – С. 97-103.
4. Кравец, О.В. Использование данных MODIS для экологического мониторинга и контроля ЧС [Текст] / О.В. Кравец, Д.К. Мозговой // X Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. «Людина і космос»: Зб. тез. – Дніпропетровськ: НЦАОМ, 2008. – С. 500.
5. 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»: Зб. тез. – Дніпропетровськ: НЦАОМ, 2008. – С. 495.
6. 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 Укр. конф. по космическим исследованиям: Сб. тезисов, 3 – 8 сентября 2007г., Евпатория: НЦУИКС, 2007. – С. 182–183.

7. 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.

8. 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, № 9/2. – С. 239-241.

9. 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.

10. 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, № 17/4. – С. 59-65.

11. 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.

12. Мозговой, Д.К. Классификация малоразмерных объектов на спутниковых снимках [Текст] / Д.К. Мозговой, О.В. Кравец // Екологія та ноосферологія. – 2009. – Т. 20, №3-4. – С. 26-30.

13. Мозговой, Д.К. Применение комбинированных масок для фильтрации периодических помех [Текст] / Д.К. Мозговой // Міжвідомчий наук.-техн. зб. "Прикладна геометрія та інженерна графіка". – Київ.: Українська асоціація з практичної геометрії, 2008. – С. 175-179.

14. Мозговий, Д.К. Використання вейвлетів в обробці супутникових знімків високого просторового розрізнення [Текст] / Д.К. Мозговий, В.М. Корчинський, О.В. Кравець // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Сер. «Ракетно-космічна техніка». – 2009. – Вип. 13, т. 1, № 17/4. – С. 65-71

Поступила в редакцію 05.04.2013, рассмотрена на редколлегии 29.05.2013

**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", Днепропетровск, Украина.

## КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗЙОМКИ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКІВ

*О.Л. Макаров*

Наведено аналіз методів керування процесом зйомки протяжних територій складної конфігурації із застосуванням супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з оптико-електронними сканерами високого просторового розрізнення. Описано результати моделювання зйомки берегової лінії з використанням фактичних даних про хмарність, реалізованої за допомогою програмного керування кутовим рухом супутника під час зйомки. За результатами моделювання зроблено висновок про найбільш ефективне щодо оперативності та площі покриття знімання сцени складної конфігурації.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, оптико-електронний сканер, супутникова зйомка протяжних територій, програмне керування кутовим рухом супутника.

## CONTROL OF THE EARTH SURFACE SURVEY BY SATELLITES

*A.L. Makarov*

Provides an analysis of control methods of the shooting extended territories complicated configuration using remote sensing satellite with high spatial resolution optical-electronic scanners. Describes the results of coastline shooting simulation using actual data on clouds, implemented using software control angle motion of the satellite during the shooting. The simulation results show that the operational efficiency and the imaging coverage of an irregular-shaped.

**Keywords:** remote sensing, optical-electronic scanner, satellite photography of extensive territories, software control of angular motion of the satellite.

**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.