

УДК 629.197

А. Л. Макаров¹, Д. К. Мозговой², А. М. Кулабухов², В. С. Хорошилов¹,
А. Л. Ольшевский¹, Г. В. Петренко¹, В. М. Попель¹

¹Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

²Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара

ТЕХНОЛОГИЯ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕНАЦЕЛИВАНИЯ

Описано основні етапи моделювання і планування супутникового знімання протяжних і слабоконтрастних об'єктів у процесі перенацілювання для підвищення ефективності знімання за допомогою КА дистанційного зондування Землі з оптико-електронними сканерами високого просторового розрізнення.

При решении ряда задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) возникает необходимость проведения оперативной спутниковой съемки малоразмерных подвижных объектов [2, 10, 14], расположенных вдоль протяженных участков: границы, дороги, реки, береговые линии [6, 11, 12]. Для этого используются КА ДЗЗ высокой разрешающей способности (таблица), отличительной особенностью которых являются:

1) узкая полоса захвата, не позволяющая оперативно снимать произвольно расположенные протяженные участки за один виток;

2) малый размер фотоэлементов линейки ПЗС (низкая чувствительность), что не позволяет снимать слабоконтрастные объекты, а также выполнять сверхоперативную съемку с соседних витков при малых углах Солнца.

Съемка без перенацеливания использовалась на первых КА отечественной разработки («Січ-1», «Океан-О», «Січ-1М»), имеющих бортовые сканеры низкого и среднего пространственного разрешения с широкой полосой захвата (рис. 1).

Оптическая ось сканера при такой съемке обычно направлена в надир, т. е. съемка ведется при нулевых углах ориентации. Скорость и

направление сканирования определяются орбитальным движением спутника.

Съемка с перенацеливанием по крену используется на КА отечественной разработки «Егypt-sat-1» и «Січ-2», имеющих бортовые сканеры высокого пространственного разрешения с узкой полосой захвата (рис. 2).

Поле зрения сканера обычно составляет единицы градусов, а угол перенацеливания — десятки градусов (таким образом, ширина полосы обзора превышает примерно на порядок ширину полосы захвата).

Для покрытия протяженного объекта с произвольной конфигурацией необходима съемка нескольких сцен с разных витков, что требует при отсутствии облачности от двух до шести 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 задач неприемлемо.

В зарубежных системах ДЗЗ высокой разрешающей способности эти проблемы решены частично (некоторые спутники позволяют выполнять съемку произвольно ориентированных прямолинейных протяженных участков. Спутники, реализующие режим съемки с накоплением («QuickBird», «Orbview» и др.), также позволяют получать снимки с заданной ориентацией

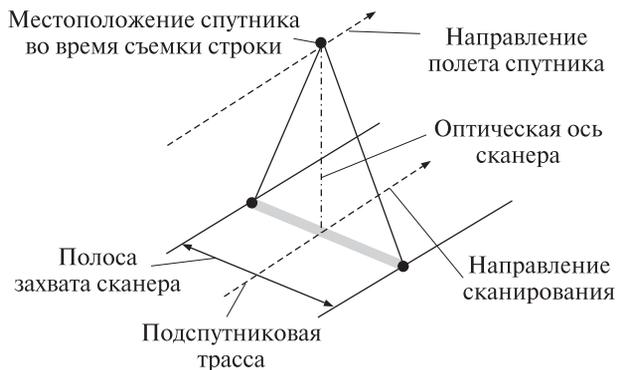


Рис. 1. Съемка без перенацеливания

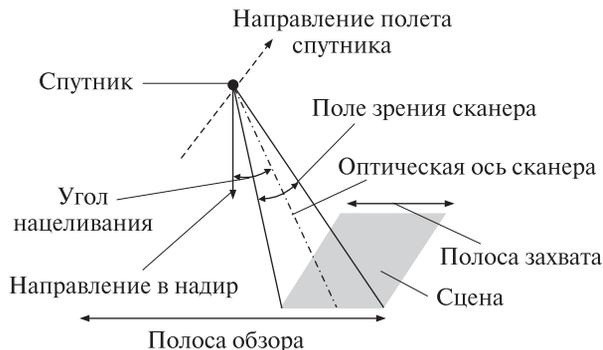


Рис. 2. Съемка с перенацеливанием по крену



Рис. 3. Съемка с заданной ориентацией сцены

КА дистанционного зондирования Земли высокой разрешающей способности

| Спутник | Разрешение | | Точность геопривязки, м | Высота орбиты, км | Наклонение орбиты, град | Полоса захвата, км | Максимальное отклонение от надира, град |
|---------------|------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---|
| | PAN/MS, м | радиометрическое, бит | | | | | |
| «Ikonos» | 1/4 | 11 | 23 | 680 | 98.1 | 11 | 45 |
| «QuickBird» | 0.6/2.4 | 11 | 23 | 450 | 98 | 16.5 | 45 |
| «Eros B» | 0.7 | 10 | — | 500 | 97.4 | 7 | 45 |
| «Ресурс-ДК» | 1/3 | 10 | — | 360...604 | 64...70 | 5...28 | 30 |
| «OrbView» | 1/4 | 11 | — | 470 | 97 | 8 | 50 |
| «WorldView-1» | 0.5/— | 11 | 6.5 | 496 | 97.2 | 17.6 | 40 |
| «KartoSat» | 0.8 | 10 | — | 630 | 97.9 | 9.6 | 45 |
| «KompSat» | 1/4 | 10 | — | 685 | 98 | 15 | — |
| «GeoEye» | 0.4/1.6 | 11 | 2.5 | 681 | 98.1 | 15.2 | 60 |
| «WorldView-2» | 0.46/1.84 | 11 | 6.5 | 770 | 97.2 | 5 | 40 |

сцены (например, в направлении север — юг), а также снимать произвольно ориентированные протяженные объекты за один виток (рис. 3).

Если съемку производить в процессе перенацеливания спутника (т. е. с ненулевыми угловыми скоростями ориентации), то можно выбирать оптимальное направление сканирования и снимать произвольно расположенные протяженные участки за один виток, т. е. более оперативно (рис. 4).

Кроме того, съемка с ненулевыми угловыми скоростями позволяет увеличить время экспозиции за счет снижения скорости перемещения проекции строки фотоприемника (линейки ПЗС) по поверхности Земли путем перенацеливания спутника во время съемки и снимать малоконтрастные или слабоосвещенные объекты [1, 3] (рис. 5, 6).

При этом возрастает отношение сигнал/шум ($K = S/n$) для получаемых снимков при одних и тех же параметрах оптико-электронной системы (рис. 7). Это позволяет существенно повысить оперативность и достоверность данных спутниковой системы ДЗЗ [9, 13].

Основными этапами планирования съемки с ненулевыми угловыми скоростями являются [4, 8]:

- аппроксимация протяженного объекта, заданного отдельными узловыми точками на цифровой картооснове (линейная, квадратичная, сплайновая);
- 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 (для 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;

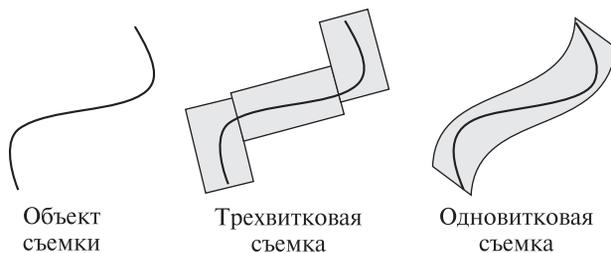


Рис. 4. Съемка протяженного объекта

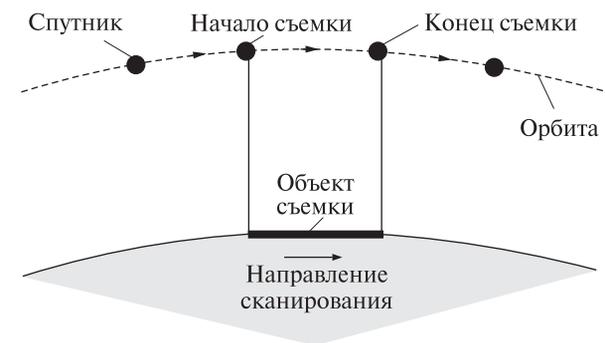


Рис. 5. Съемка без накопления

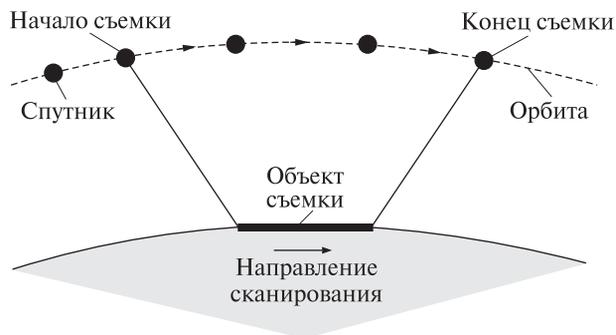


Рис. 6. Съемка с накоплением

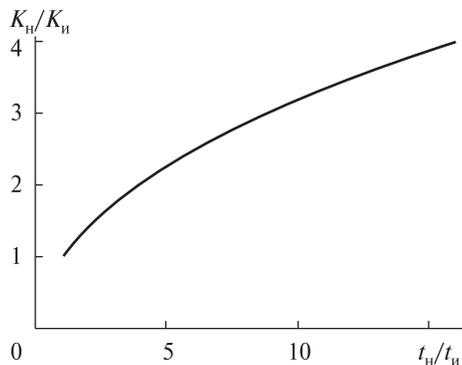


Рис. 7. Зависимость отношения K сигнал/шум от коэффициента накопления

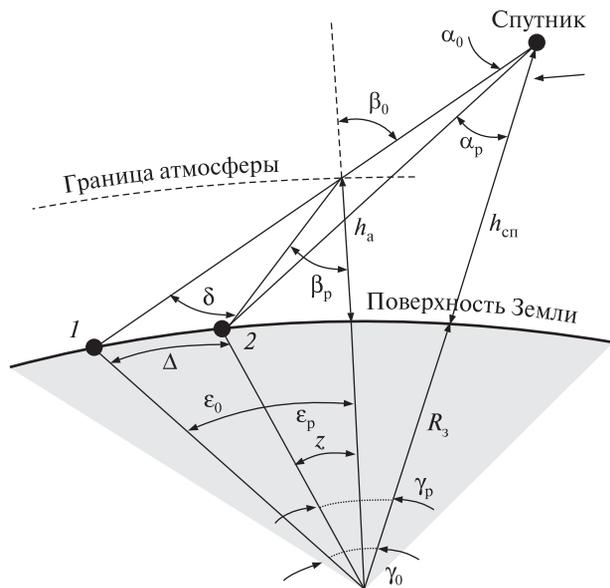


Рис. 8. Влияние рефракции атмосферы (см. текст)

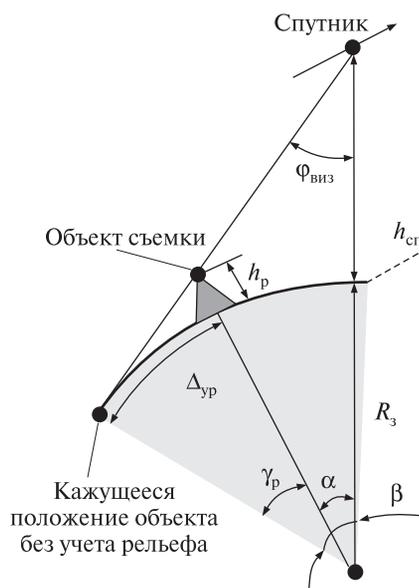


Рис. 10. К учету высоты рельефа

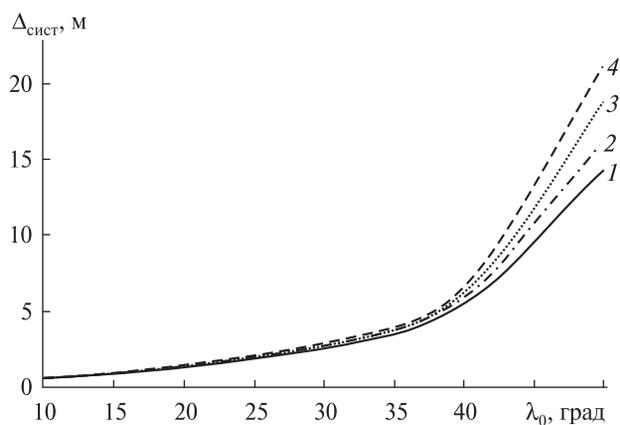


Рис. 9. Систематическая рефракционная погрешность $\Delta_{\text{сист}}$: кривые 1 – 4 для высот орбиты $h = 600, 700, 800$ и 900 км

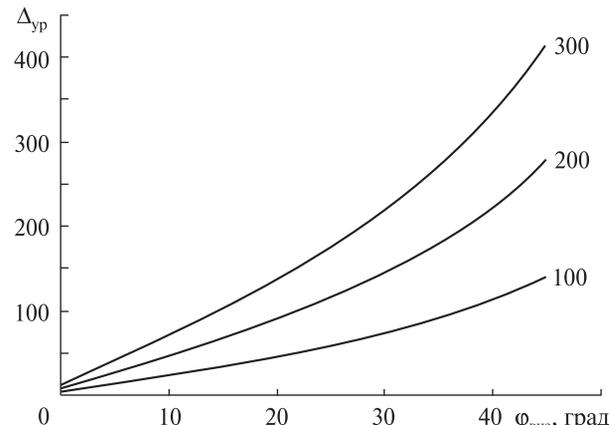


Рис. 11. Зависимость погрешности $\Delta_{\text{ур}}$ определения координат проекции фотоприемника от угла $\phi_{\text{виз}}$ отклонения от надира для высот рельефа 100, 200 и 300 м

- 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.).

Прохождение оптических волн в тропосфере и ионосфере сопровождается искривлением их видимых траекторий — рефракцией (рис. 8). На рисунке обозначено: цифрой 1 — кажущееся положение визируемой точки (без учета рефракции), 2 — действительное положение визируемой точки (с учетом рефракции), Δ — линейная погрешность за счет рефракции, $h_{\text{сп}}$ — высота спутника, $h_{\text{а}}$ — эффективная высота атмосферы, α_0 — угол визирования без учета рефракции, β_0 —

зенитный угол входа вектора визирования в атмосферу, ε_0 — геоцентрический угол точки входа без учета рефракции, γ_0 — геоцентрический угол спутника без учета рефракции, δ — рефракционная поправка, β_p — зенитный угол входа с учетом рефракции, α_p — угол визирования с учетом рефракции, ε_p — геоцентрический угол точки входа с учетом рефракции, γ_p — геоцентрический угол спутника с учетом рефракции.

Среднюю рефракционную ошибку δ при давлении $P = 0.1$ МПа и температуре 10 °С вблизи поверхности Земли для зенитных углов $\beta < 70^\circ$ можно вычислить по приближенной формуле $\delta = 58'' \operatorname{tg}\beta_0$.

Ниже приведен порядок расчета систематической рефракционной погрешности для различных углов визирования и высот орбит. Исходные данные для расчета:

- средний радиус Земли $R_3 = 6371$ км,
- высота эквивалентной однородной атмосферы $h_a = 8$ км,
- высота орбиты спутника $h_{\text{сп}}$,
- угол визирования без учета рефракции α_0 .

Для вычисления необходимых параметров используются формулы

$$\beta_0 = \arcsin\left(\frac{R_3 + h_{\text{сп}}}{R_3 + h_{\text{атм}}}\sin\alpha_0\right),$$

$$\delta_{\text{сист}} = 58'' \cdot \operatorname{tg}\beta_0, \beta_p = \beta_0 - \delta_{\text{сист}},$$

$$\gamma_0 = \arcsin\left(\frac{R_3 + h_{\text{сп}}}{R_3}\sin\alpha_0\right) - \alpha_0,$$

$$\varepsilon_0 = \arcsin\left(\frac{R_3 + h_{\text{атм}}}{R_3}\sin\beta_0\right) - \beta_0,$$

$$\varepsilon_p = \arcsin\left(\frac{R_3 + h_{\text{атм}}}{R_3}\sin\beta_p\right) - \beta_p,$$

$$\gamma_p = \gamma_0 - \varepsilon_0 + \varepsilon_p.$$

Наклонная дальность R_p и угол визирования α_p с учетом рефракции находятся по формулам

$$R_p = \sqrt{R_3^2 + (R_3 + h_{\text{сп}})^2 - 2(R_3 + h_{\text{сп}})R_3\cos\gamma_p},$$

$$\alpha_p = \arcsin\left(\frac{R_3}{R_p}\sin\gamma_p\right),$$

а систематическая рефракционная погрешность $\Delta_{\text{сист}}$ — по формуле

$$\Delta_{\text{сист}} = R_3(\varepsilon_0 - \varepsilon_p).$$

Результаты расчетов $\Delta_{\text{сист}}$ для значений угла визирования $\alpha_0 = 10...50^\circ$ и высоты орбиты $h_{\text{сп}} = 600...900$ км приведены на рис. 9.

Значительное отклонение от надира в начале и в конце съемки, необходимое при больших значениях коэффициента накопления (отношения времени съемки с накоплением к времени съемки без накопления) приводит к необходимости учета высоты рельефа (рис. 10). Здесь $\varphi_{\text{виз}}$ — угол визирования, α , β — геоцентрические углы

$$\alpha = \arcsin\frac{(R_3 + h_{\text{сп}})\sin\varphi_{\text{виз}}}{h_p + R_3} - \varphi_{\text{виз}},$$

$$\beta = \arcsin\frac{(R_3 + h_{\text{сп}})\sin\varphi_{\text{виз}}}{R_3} - \varphi_{\text{виз}},$$

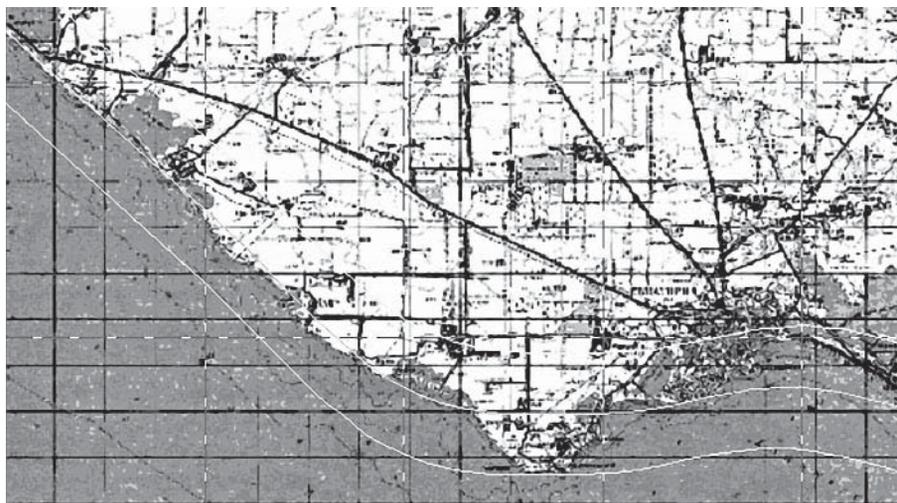


Рис. 12. Снимаемый участок (береговая линия)

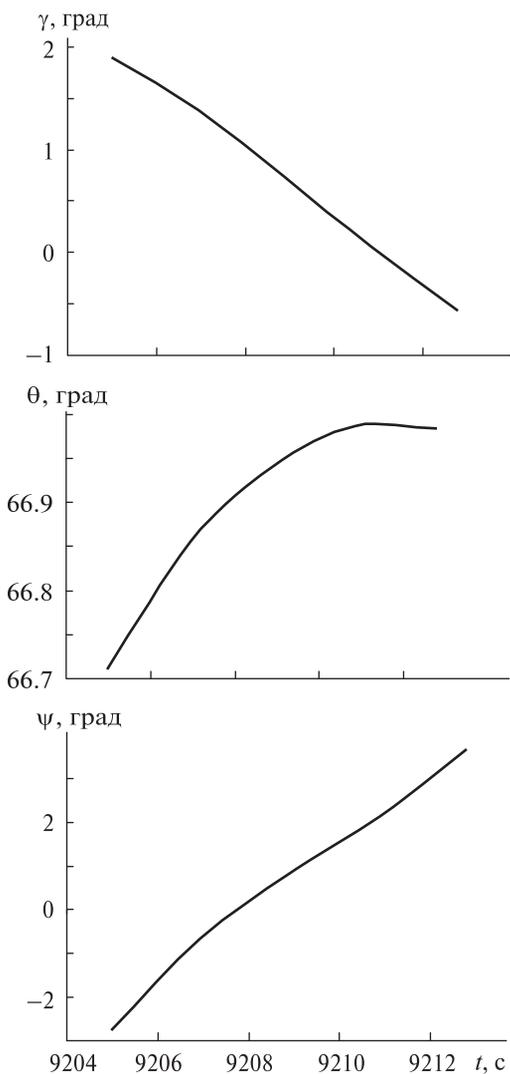


Рис. 13. Углы крена γ , тангажа θ и рыскания ψ ориентации спутника во время съемки протяженной береговой линии

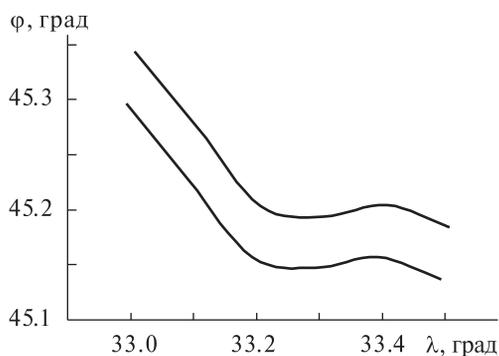


Рис. 14. Границы снятой территории (долгота λ и широта φ)

$\gamma_p = \beta - \alpha$ — угловая погрешность, $\Delta_{yp} = R_3 \gamma_p$ — линейная погрешность.

На рис. 11 приведены зависимости погрешностей определения координат проекции фотоприемника на поверхности Земли от угла отклонения от надира, определяемые высотой рельефа.

Было проведено моделирование съемки протяженной береговой линии (рис. 12) с использованием одновременно режимов перенацеливания и накопления при таких исходных данных:

- высота орбиты спутника 640 км,
- наклонение орбиты спутника 88° ,
- эксцентриситет орбиты спутника 0.02,
- поле зрения сканера 0.7° ,
- земной эллипсоид — WGS-84,
- коэффициент накопления 4.

Результаты моделирования (углы ориентации спутника во время съемки и границы снятой территории) приведены на рис. 13 и 14.

Результаты моделирования подтвердили возможность съемки протяженных участков с использованием одновременно режимов перенацеливания и накопления.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований были изучены недостатки разных моделей управления КА ДЗЗ при съемке, а также выполнен анализ влияния упрощений и погрешностей моделей съемки на эффективность решения целевой задачи в части оперативности съемки, площади покрытия и достоверности данных ДЗЗ.

Особенности планирования спутниковой съемки высокой разрешающей способности и обработки полученных данных ДЗЗ требуют учета большего числа дополнительных факторов, которые не учитывались при разработке предыдущих КА отечественной разработки («Січ-1», «Океан-О», «Egypsat-1», «Січ-2»).

Методика программного управления ориентацией КА ДЗЗ высокого пространственного разрешения в процессе перенацеливания (т. е. с ненулевыми угловыми скоростями ориентации) позволяет выбирать оптимальное направление сканирования и снимать произвольно расположенные протяженные участки за один виток, т. е. более оперативно.

Кроме того, съемка с ненулевыми угловыми скоростями позволяет увеличить время экспозиции и снимать малоконтрастные или слабоосвещенные объекты (т. н. режим «съемка с накоплением»), а также вести съемку с соседних витков при прохождении КА в стороне от снимаемого объекта.

Это позволяет повысить радиометрические характеристики данных ДЗЗ и более качественно выполнять процедуры обработки спутниковых снимков [5, 7, 15, 16].

1. Долинец Ю. С., Мозговой Д. К. Технология спутниковой съемки с ненулевыми угловыми скоростями // Людина і космос: Зб. тез. X Міжнар. молодіжної науково-практичної конф. — Дніпропетровськ, 2008. — С. 495.
2. Кравец О. В., Корчинский В. М., Мозговой Д. К. Классификация малоразмерных объектов на спутниковых снимках // Экология и ноосферология. — 2009. — 20, № 3–4. — С. 26–30.
3. Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Хорошилов В. С. и др. Программное управление ориентацией КА видовой разведки // Космическая техника. Ракетное вооружение. — 2011. — Вып. 1. — С. 54–59.
4. 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.
5. Мозговой Д. К., Корчинский В. М., Кравец О. В. Використання вейвлетів в обробці супутникових знімків високого просторового розрізнення // Вісник ДНУ. Сер. Ракетно-космічна техніка. — 2009. — Вып. 13, 1, № 17/4. — С. 65–71.
6. Мозговой Д. К. Технология съемки протяженных объектов // Людина і космос: Зб. тез. X Міжнар. молодіжної науково-практичної конф. — Дніпропетровськ, 2007. — С. 439.
7. Мозговой Д. К. Применение комбинированных масок для фильтрации периодических помех // Прикладна геометрія та інженерна графіка (Спецвипуск): Міжвідомчий науково-технічний зб. — Київ: Укр. асоціація з прикладної геометрії, 2008. — С. 175–179.
8. Мозговой Д. К. Управление ориентацией КА ДЗЗ высокой разрешающей способности // Вісник ДНУ. Сер. Ракетно-космічна техніка. — 2009. — Вып. 13, 1, № 17/4. — С. 59–65.
9. Мозговой Д. К., Бушуев Е. И., Стефанишин Я. И. Подходы к построению и эксплуатации национальной спутниковой группировки // VII Укр. конф. по кос-

мическим исследованиям: Сб. тез., 3–8 сентября 2007 г., Евпатория. — Евпатория: НЦУИКС, 2007. — С. 188.

10. Мозговой Д. К., Водопьянов И. Н. Распознавание объектов с использованием радиометрических и геометрических признаков // Наукові проблеми розробки, модернізації та застосування інформаційно-вимірвальних систем космічного і наземного базування: Тез. доп. XV науково-технічної конф. (20–21 квітня 2006 р., Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С. П. Корольова). — Житомир: ЖВІРЕ, 2006. — Ч. 1. — С. 19.
11. Мозговой Д. К., Волошин В. И. Спутниковая съемка протяженных объектов // Вісник ДНУ. Сер. Ракетно-космічна техніка. — 2006. — Вып. 10, 2, № 9/2. — С. 239–241.
12. Мозговой Д. К., Волошин В. И. Технология съемки прибрежных зон // Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины: Тез. докл. Междунар. конф. молодых ученых (12–14 июня 2007 г., Кацивели). — Севастополь, 2007. — С. 21–22.
13. Мозговой Д. К., Волошин В. И., Бушуев Е. И., Салтыков Ю. Д. Использование новых технологий съемки для повышения эффективности КА МС-2-8 // VII Укр. конф. по космическим исследованиям: Сб. тез. — Евпатория: НЦУИКС, 2007. — С. 182–183.
14. Мозговой Д. К., Волошин В. И., Водопьянов И. Н. Классификация малоразмерных объектов с использованием радиометрических и геометрических признаков // Вісник ДНУ. Сер. Ракетно-космічна техніка. — 2006. — Вып. 10, 2, № 9/2. — С. 236–238.
15. Мозговой Д. К., Кравец О. В. Классификация малоразмерных объектов на спутниковых снимках // Екологія та ноосферологія. — 2009. — 20, № 3–4. — С. 26–30.
16. Мозговой Д. К., Кравец О. В. Распознавание малоразмерных объектов с использованием библиотеки классов // Вісник ДНУ. Сер. Ракетно-космічна техніка. — 2009. — Вып. 13, 1, № 17/4. — С. 71–75.

Надійшла до редакції 24.10.11

O. L. Makarov, D. K. Mozgovoy, A. M. Kulabukhov,
V. S. Khoroshilov, O. L. Ol'shevs'kiy, G. V. Petrenko,
V. M. Popel'

SATELLITE IMAGING TECHNOLOGY IN REDIRECTION PROCESS

We describe the basic steps of simulating and planning for satellite imaging of long and poorly contrasted objects during redirection for imaging efficiency increase when Earth's remote sensing spacecrafts equipped with high-resolution optoelectronic imaging are used.