

УДК: 004.9

Кавац В.В., Капустін Є.І., Кирилов О.І., Кирилова Н.А.

"Дніпрокосмос" філія Національного центру управління та випробувань космічних засобів,  
м. Дніпро, Україна

## СПОСІБ ЗАВДАННЯ ЗЙОМКИ РАЙОНІВ, ЯКІ МАЮТЬ ВЕЛИКУ ПРОТЯЖНІСТЬ ТА АЛГОРИТМ ПЛАНУВАННЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

*Досвід експлуатації космічної системи "Січ-2" показав, що спосіб завдання районів моніторингу координатами лівого верхнього та правого нижнього кутів прямокутника при плануванні зйомок довільно орієнтованих протяжних ділянок поверхні Землі, або великих площин зі складним абрисом межі, приводило до значних часових витрат на проведення зйомки (неоптимальне використання ресурсу приладів корисного навантаження супутника) і зйомці зайвих територій. В статті пропонується спосіб завдання зйомки довільно орієнтованих протяжних ділянок поверхні Землі "ламанною" лінією і алгоритми планування реалізації цих зйомок програмним забезпеченням Центру управління польотом (ЦУП) супутника. Оцінка ефективності застосування запропонованих алгоритмів здійснена з застосуванням доопрацьованого програмного забезпечення планування роботи корисного навантаження супутника "Січ-2".*

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, космічна система, прилади корисного навантаження супутника, район моніторингу поверхні Землі, Центр управління польотом супутника, програмне забезпечення, смуга захоплення приладу, заявка на зйомку.

**Вступ.** Цільовим призначенням космічної системи (КС) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є отримання і надання споживачам космічних зображень (даних ДЗЗ) для подальшого їх застосування у різних сферах господарської та наукової діяльності держави [1].

Завдання космічного моніторингу поверхні Землі, які ставляться перед конкретною КС ДЗЗ (моніторинг агропромислового комплексу, лісного господарства, басейну річок, тощо) в значній мірі визначаються технічними характеристиками приладів корисного навантаження (ширина смуги захоплення при зйомці, просторове розрізнення, спектральні канали зйомки, тощо) і бортових систем супутника (енергозабезпечення, кути та час розворотів супутника, параметри стабілізації супутника при зйомці, похибки визначення початкових умов руху супутника, тощо).

**Завдання.** Для виконання завдань космічного моніторингу, які ставляться перед КС ДЗЗ, повинна бути визначена стратегія виконання зйомок, яка складається зі способів завдання районів зйомки та алгоритмів планування реалізації цих зйомок.

Досвід експлуатації космічної системи "Січ-2" показав, що спосіб завдання районів моніторингу прямокутником (координати лівого верхнього та правого нижнього кута прямокутника) при плануванні зйомок об'єктів, які мають велику протяжність під значним кутом до траси підсупутникової точки (наприклад: берегова лінія морського узбережжя, басейни річок, тощо), або велику площину зі складним абрисом межі, приводило до значних часових витрат на проведення зйомки (неоптимальне використання ресурсу приладів корисного навантаження супутника) і зйомці зайвих територій. Наприклад, процент площини району зйомки у прямокутнику, яким були задані координати цього району, складав: Дніпропетровська область - 57%, басейн річки Арканзас (приток Міссісіпі) - менш 1%, затока

у Херсонській області, при впадінні у Чорне море річок Південний Буг та Дніпро – 36% [1, с.7]. В зарубіжних космічних системах ДЗЗ високої розподільної здатності (супутники "Ikonos", "QuickBird", "EROS" та інші) зйомка довільно орієнтованих прямолінійних протяжних ділянок поверхні Землі здійснюється шляхом перенацілювання супутника в процесі зйомки. Для підвищення чутливості знімальної апаратури цих супутників застосовується режим зйомки з накопиченням, що дозволяє збільшити час експозиції строки за рахунок зниження швидкості переміщення проекції строки фотоприймача по поверхні Землі шляхом перенацілювання супутника під час зйомки. Супутники, що реалізують режим зйомки з накопиченням ("QuickBird", "Orbview" та інші), також дозволяють отримати знімки з заданою орієнтацією сцени в напрямку північ-південь, або захід-схід (рис. 1).

Якщо зйомку робити в процесі перенацілювання супутника (з ненульовими кутівими швидкостями орієнтації), то можливо обрати оптимальний напрямок сканування і знімати довільно розташовані протяжні ділянки поверхні Землі за один виток (рис. 2, 3, 4).

Режим зйомки з накопиченням висуває відповідні вимоги, як до супутника в частині забезпечення необхідної переорієнтації КА в процесі зйомки, так і до програмного забезпечення планування зйомки, управління супутником та оброблення знімків.

**Основний матеріал статті.** Враховуючі, що бортові системи українських супутників ДЗЗ серії "Січ", що розроблюються у теперішній час, не реалізують наведені вище режими зарубіжних супутників, в цій статті пропонується розглянути спосіб завдання зйомки довільно орієнтованих протяжних ділянок поверхні Землі "ламанною" лінією і алгоритм планування реалізації цих зйомок програмним забезпеченням планування роботи корисного навантаження супутника.



Рис. 1. Зйомка з заданою орієнтацією сцени



Рис. 2. Об'єкт зйомки

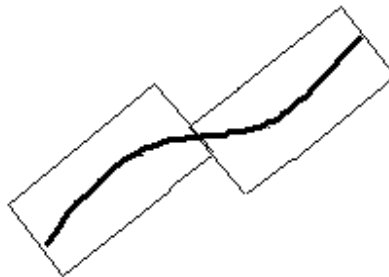


Рис. 3. Зйомка на двох витках

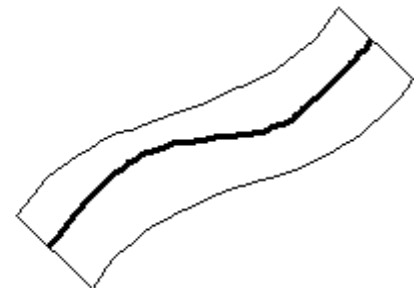


Рис.4. Зйомка на одному витку

В основу побудови алгоритму покладено розбиття району зйомки, заданого "ламаною лінією", на точки, які є центрами елементарних прямокутників [2] з довжиною сторони, яка не повинна перевищувати: відстань, яку пролітає супутник за одну секунду, ширину смуги захоплення сканера, ширину кроку перенацілювання сканера при плануванні зйомки та довжину сторін екстену району зйомки.

Заявка у вигляді "ламана лінія" для об'єктів невеликої ширини і тривалої протяжності зі зміною напрямку його розташування задається багатомірним масивом координат точок, які є вершинами ламаної.

У таблиці 1 наведений фрагмент масиву координат опису об'єкту зйомки (річка Конго) заданого у вигляді "ламаної" лінії (рис. 5).

В заявці на зйомку, крім масиву координат опису району зйомки, обов'язково задаються наступні параметри [3]:

- період спостереження;
- апаратура зйомки;
- умови зйомки (мінімальний кут місця Сонця, розрізненість або максимальний кут відхилення супутника під час зйомки від надиру, тощо);
- найменування району зйомки;
- відсоток покриття району для реалізації заявки. Сформована Оператором космічної системи заявка на зйомку у вигляді \*.xml – файлу передається до Центру управління польотом (ЦУП) супутником.

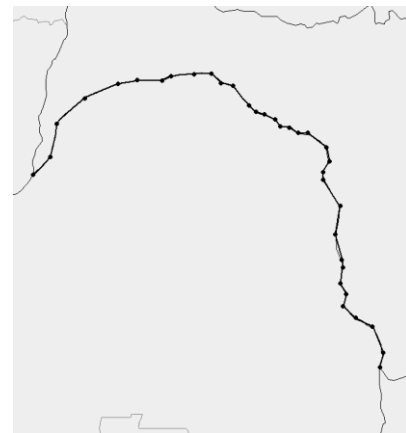


Рис. 5. Об'єкт зйомки (річка Конго), заданий у вигляді "ламаної" лінії

Оброблення наданої до ЦУП заявки на зйомку здійснюється програмним забезпеченням планування роботи корисного навантаження супутника в наступній послідовності:

- введення заявки на зйомку до Баз даних (БД) ЦУП;
- "розбивка" району зйомки, визначення координат точок "розбивки" та підрахунок його площі;
- планування району зйомки виходячи з параметрів, що задані у заявці (мінімальний кут місця Сонця, розрізненість або максимальний кут відхилення супутника під час зйомки від надиру, відсоток покриття району для реалізації).

Таблиця 1  
Фрагмент масиву координат опису об'єкту зйомки у вигляді "ламаної" лінії

Довгота	Широта
26.9111	-5.6699
27.0306	-5.2841
26.7550	-4.5767
26.2773	-4.3562
25.9741	-4.0255
26.0568	-3.6948
25.8914	-3.4284
25.9466	-2.8404
25.7536	-2.1147
25.8639	-1.3614
25.4229	-0.6540
25.4137	-0.4427
25.5883	-0.1396
25.5332	0.2187
25.0371	0.5861
24.7615	0.5770
24.5410	0.7515
24.3205	0.7515
24.1368	0.9628
23.8704	1.0914
23.6223	1.1557
23.3100	1.4956
23.0344	1.8631
22.7129	1.9458
22.4740	2.1754
22.2076	2.2030
21.5921	2.1479
21.3165	2.0927
...	...

"Розбивка" на точки здійснюється на кожній ланці "ламаної" лінії (рис. 6). Координати точок "розбивки" ( $L_n$ ,  $\varphi_n$ ) визначаються за формулами [1]:

$$L_n = \begin{cases} L_b + step\_deg\_onLat * \cos \alpha, & \text{якщо } L_b \leq L_n \\ L_b - step\_deg\_onLat * \cos \alpha, & \text{якщо } L_b > L_n \end{cases} \quad (1)$$

$$L_n = \begin{cases} \varphi_b + step\_deg\_onLong * \sin \alpha, & \text{якщо } \varphi_b \leq \varphi_n \\ \varphi_b - step\_deg\_onLong * \sin \alpha, & \text{якщо } \varphi_b > \varphi_n \end{cases} \quad (2)$$

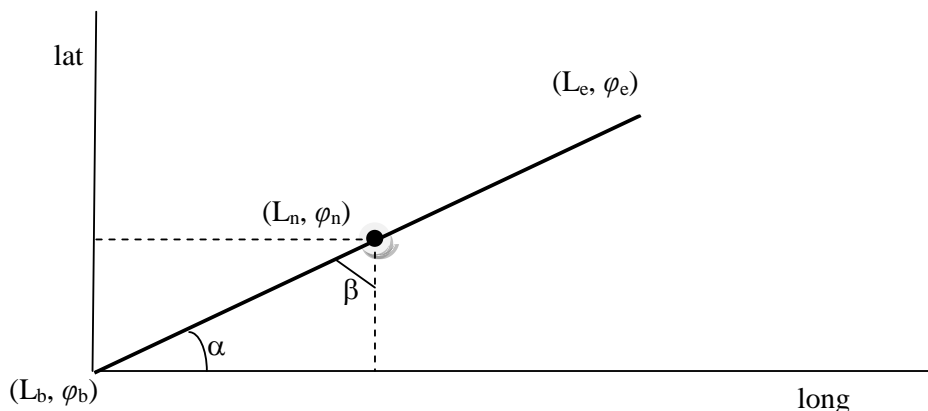


Рис. 6. "Розбивка" на точки однієї ланки заявки на зйомку у вигляді "ламаної" лінії

де  $L_n$ ,  $\varphi_n$  – відповідно довгота та широта вузла ламаної лінії або попередньо розрахованої точки;  $step\_deg\_onLat$  – крок "розбивки" в градусах на широті розраховується за формулою:

$$step\_deg\_onLong = \frac{step\_km}{2} * \pi * R * \frac{\cos(\varphi_n)}{360} \quad (3)$$

де  $R$  – радіус Землі;  $step\_deg\_onLong$  – крок "розбивки" в градусах на довготі розраховується за формулою:

$$step\_deg\_onLong = \frac{step\_km}{NumberKM} \quad (4)$$

де  $NumberKM$  – кількість км в 1 град. по меридіану;  $step\_km$  – крок в кілометрах (виходячи зі смуги захоплення) розраховується за формулою:

$$\alpha = \arctg(\varphi_e - \varphi_b) * \left( 2\pi * R * \frac{\cos(\varphi_b)}{360} \right) \quad (6)$$

Площа району спостереження – це кількість точок "розбивки" району зйомки.

При плануванні зйомки:

1) на першому етапі визначається попадання точок "розбивки" у смугу захоплення виходячи з наданих у заявці параметрів; точка "розбивки", що попала у смугу захоплення та запланована к зйомці вважається відзнятою;

2) на другому, та усіх наступних етапах розраховується попадання точок "розбивки" у смугу захоплення виходячи з коефіцієнта новизни району зйомки та наданих у заявці параметрів [4]. Планування району зйомки виконується доки не буде знято вказаний в заявці відсоток покриття району зйомки.

Перевірка ефективності запропонованого способу завдання району спостереження і алгоритмів планування здійснення зйомки, була проведена програмним комплексом "Спеціальне програмне забезпечення. Підсистема планування роботи корисного навантаження КА" (СПЗ ППКН) 25527406.00083-01, який використовувався при експлуатації КА "Січ-2" (далі по тексту – діючим комплексом) і його доопрацьованою версією.

Планування роботи проводилось на місячному інтервалі (період дії заявки 01.10 – 31.10) з використанням балістичної інформації, яка була розрахована та занесена в БД ЦУП КА "Січ-2" у період його експлуатації.

Заявки, які були занесені в БД відрізнялись тільки

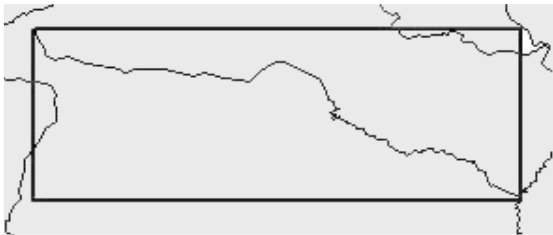


Рис. 7. Завдання району зйомки (річка Арканзас) у вигляді прямокутника

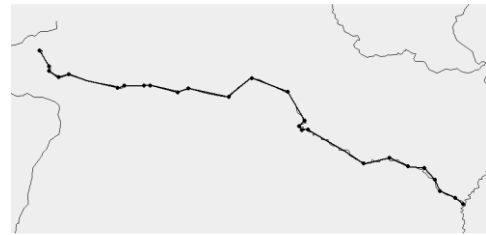


Рис. 8. Завдання району зйомки (річка Арканзас) у вигляді "ламаної" лінії

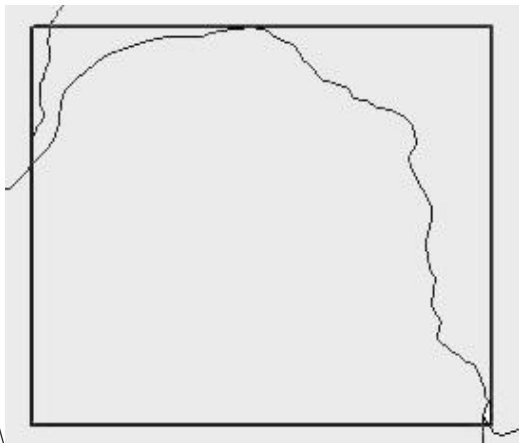


Рис. 9. Завдання району зйомки (річка Конго) у вигляді прямокутника

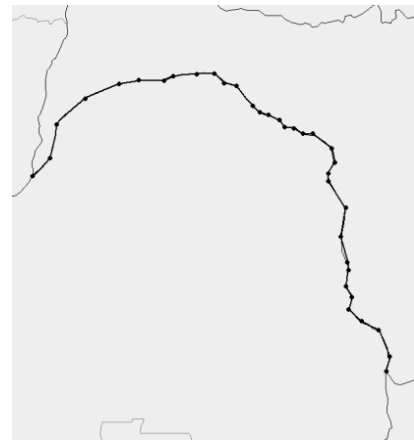


Рис. 10. Завдання району зйомки (річка Конго) у вигляді "ламаної" лінії

Таблиця 2

Результати планування зйомки заявок, що задані координатами прямокутника та "ламаною" лінією

Найменування району зйомки (спосіб завдання району зйомки)	Кількість зйомок	Загальна тривалість зйомки, сек.	Потрібний об'єм пам'яті, Гігабайт	Загальна тривалість скидання даних, сек.	Відсоток виконання	Примітка
Річка Арканзас (прямокутник)	29	1208	19.24	5389	45,6	Планування діючим комплексом
Річка Арканзас ("ламана" лінія)	27	143	4.82	1353	94,17	Планування доопрацьованим комплексом
Річка Конго (прямокутник)	25	1019	16.34	4579	38,34	Планування діючим комплексом
Річка Конго ("ламана" лінія)	21	198	5.12	1444	91,32	Планування доопрацьованим комплексом

**Висновки.** Запропонований у цій статті спосіб завдання зйомки протяжних ділянок поверхні Землі "ламанюю" лінією і алгоритми планування реалізації цих зйомок доцільно використати у складі програмного забезпечення ЦУП супутника

"Січ-2-1". Одночасно слід розглянути можливість розповсюдження запропонованих алгоритмів для планування зйомки об'єктів зі складним абрисом межі.

### Список літератури:

1. Розроблення алгоритмів планування зйомки районів, координати яких задаються точкою, ламаною лінією або багатокутником. Звіт про НДР АУАШ.81.0024.059 ОТ. Дніпропетровська філія НЦУВКЗ "Дніпрокосмос". № держреєстрації в УкрІНТЕІ 01161U006327. 2016. – 59 с.
2. Волошин В.И. Принципы построения алгоритмов планирования работы полезной нагрузки КА высокого разрешения для съемки районов поверхности Земли большой площади / В.И. Волошин, Е.И. Капустин., А.И. Кириллов., Н.А. Кириллова. С.О Засуха / Дистанційне зондування Землі. Інформаційні технології збирання та використання даних аерокосмічного спостереження Землі: Збірник наукових статей державного підприємства "Дніпрокосмос". Випуск 1. – Д.; Проспект, 2007. – С. 61- 63.
3. Волошин В.И Информационные технологии в управлении работой полезной нагрузки космических аппаратов по дистанционному зондированию Земли / В.И. Волошин, Е.И. Капустин., А.И. Кириллов., Н.А. Кириллова. С.О Засуха / Нац. акад. наук Украины, Национальное космическое агентство Украины, Ин-т космических исследований НАНУ и НКАУ. Четвертая Украинская конференция по космическим исследованиям , 19-26 сентября 2004 г., Крым, Понизовка: Сб. тезисов, 2004. – С. 142.
4. Кириллов А.И. Формирование и отображение планов работы полезной нагрузки космических аппаратов и полученных данных дистанционного зондирования Земли с применением программных пакетов ГИС-технологий / А.И. Кириллов, Н.А. Кириллова, Е.И. Махонин / Нац. акад. наук Украины, Национальное космическое агентство Украины, Ин-т космических исследований НАНУ и НКАУ. Четвертая Украинская конференция по космическим исследованиям , 19-26 сентября 2004 г., Крым, Понизовка: Сб. тезисов, 2004. – С. 173.
5. Кольхалов М.С. Применение ГИС-пакета Mapobjects в программном комплексе планирования полезной нагрузки КА / М.С. Кольхалов, Е.И. Капустин, А.И. Кириллов / Международная научно-практическая конференция "Университетские микроспутники – перспективы и реальность". Сборник тезисов. 19-23 июня 2006 г., НЦУИКС, Евпатория. Днепропетровск, НЦАОМУ. – С. 151.

### References:

1. Rozroblyannya algoritmiv planuvannya zjomyki rajoniv, koordinati yakih zadayutcaj tochkoyu, lamanoyu linieyu abo bogatokutnikom. Zvit pro NDR AUASH.81.0024.059 OT. Dnipropetrovska filiya NTSUVKZ "Dniprokosmos". № dergreestracii v UkrINTEI 01161U006327. 2016. – 59 p.
2. Voloshyn V.Y. Prynysury postroyeniya alhorytmov planirovaniya raboty poleznoi nahruzky KA vysokoho razresheniya dlia szemky raionov poverkhnosti Zemly bolshoi ploshchady / V.Y. Voloshyn, E.Y. Kapustyn., A.Y. Kyryllov., N.A. Kyryllova. S.O Zasukha / Dystantsiine zonduvannia Zemli. Informatsiini tekhnologii zbyrannia ta vykorystannia danykh aerokosmichnoho sposterezhennia Zemli: Zbirnyk naukovykh statei derzhavnoho pidpriemstva "Dniprkosmos". Vypusk 1. – D.; Prospekt, 2007 – P. 61 – 63.
3. Voloshyn V.Y. Ynformatsyonnye tekhnolohyy v upravlenyy rabotoi poleznoi nahruzky kosmycheskykh apparatov po dystantsyonnomu zondirovaniyu Zemly / V.Y. Voloshyn, E.Y. Kapustyn., A.Y. Kyryllov., N.A. Kyryllova. S.O Zasukha / Nats. akad. nauk Ukrainy, Natsyonalnoe kosmycheskoe ahentstvo Ukrainy, Yn-t kosmycheskykh yssledovanyi NANU y NKAU. Chetvertaia Ukrainskaia konferentsiia po kosmycheskym yssledovaniyam , 19-26 sentiabria 2004 h., Krym, Ponyzovka: Sb. tezysov, 2004 – P. 142.
4. Kyryllov A.Y. Formirovaniye y otobrazheniye planov raboty poleznoi nahruzky kosmycheskykh apparatov y poluchennykh dannyykh dystantsyonnoho zondirovaniya Zemly s pryomeneniyem prohrammnykh paketov HYS-tekhnolohiy / A.Y. Kyryllov, N.A. Kyryllova, E.Y. Makhonin / Nats. akad. nauk Ukrainy, Natsyonalnoe kosmycheskoe ahentstvo Ukrainy, Yn-t kosmycheskykh yssledovanyi NANU y NKAU. Chetvertaia Ukrainskaia konferentsiia po kosmycheskym yssledovaniyam , 19-26 sentiabria 2004 h., Krym, Ponyzovka: Sb. tezysov, 2004 – P. 173.
5. Kolykhalov M.S. Prymeneniye HYS-paketa Mapobjects v prohrammnom komplekse planirovaniya poleznoi nahruzky KA / M.S. Kolykhalov, E.Y. Kapustyn, A.Y. Kyryllov / Mezhdunarodnaia nauchno-praktycheskaia konferentsiia "Unyversytetskiye mykrosputnyky – perspektivy y realnost". Sbornyk tezysov. 19-23 yunია 2006 h., NTsUYKS, Evpatoriya. Dnepropetrovsk, NTsAOMU. – P. 151.

## СПОСОБ ЗАДАНИЯ СЪЕМКИ РАЙОНОВ, КОТОРЫЕ ИМЕЮТ БОЛЬШУЮ ПРОТЯЖЕННОСТЬ И АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Кавац В.В., Капустин Е.И, Кириллов А.И, Кириллова Н.А.

Опыт эксплуатации космической системы "Січ-2" показал, что задание района мониторинга координатами левого верхнего и правого нижнего углов прямоугольника при планировании съемок произвольно ориентированных протяженных участков поверхности Земли или больших площадей со сложным абрисом границы, приводило к значительным временным затратам на проведение съемок (неоптимальное использование ресурса приборов полезной нагрузки спутника) и к съемке лишних территорий. В статье предлагается способ задания съемки произвольно ориентированных протяженных участков поверхности Земли "ломаной" линией и алгоритм планирования реализации этих съемок программным обеспечением Центра управления полетом (ЦУП) спутника. Оценка эффективности применения предложенных алгоритмов выполнена с применением доработанного программного обеспечением планирования работы полезной нагрузки спутника "Січ-2".

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, космическая система, приборы полезной нагрузки спутника, район мониторинга поверхности Земли, Центр управления полетом спутника, программное обеспечение, полоса захвата прибора, заявка на съемку.

## THE WAY TO SPECIFY THE IMAGING OF AREAS THAT HAVE A LARGE EXTENT AND THE AN ALGORITHM FOR PLANNING ITS EXECUTION

V. Kavats, E. Kapustin, A. Kyrylov, N. Kyrylova

Experience of exploitation of the space system "Sich-2" demonstrated that the task of monitoring areas by coordinates upper-left and lower-right-hand corners of rectangle at planning of imaging of the arbitrarily oriented extensive areas of the Earth's surface or large areas with the complicated contour of border, resulted in considerable temporal expenses on realization of imaging (not optimal resource use of the satellites' payload instrumentation) and to the imaging of superfluous territories. In this article the way to specify the imaging of the arbitrarily oriented extensive areas of terrain is offered by a "polyline" and software algorithm scheduling realization of these imaging sessions in the Mission Control Center (MCC). Estimation of the effectiveness of the application of the proposed algorithms was carried out using the update "Sich-2" satellite payload scheduling program

**Keywords:** remote sensing of Earth, space system, satellite payload devices, terrain monitoring areas, Mission Control Center (MCC), software, acquisition bandwidth, request of imaging.