

УДК 629.78

В.В. Ожінський

Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Євпаторія

## СПОСОБИ І НАПРЯМКИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ПЛАНУВАННІ РОБОТИ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

Проведено аналіз основних наукових праць, які досліджують процес застосування космічних апаратів за призначенням. Розглянуто типи ресурсів та напрямки оптимізації планів проведення операцій управління космічними апаратами (КА). Вказано перспективні напрямки подальших досліджень.

**Ключові слова:** інтервал планування, цільова функція, ресурси, операція, функція доцільності.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Задача планування роботи КА та їх угруповань, за цільовим призначенням – цілеспрямована діяльність, яка полягає в отриманні оптимальних результатів від застосування КА (космічних систем) при відповідних обмеженнях, викликаних умовами функціонування. Постановка задачі планування передбачає наявність конкуруючих властивостей процесу між якістю виконання цільових завдань КА та, наприклад, кількості відзнятих районів КА спостереження та кількості витрачених ресурсів. Вибір компромісного варіанту між якістю виконання цільових завдань та витраченими ресурсами і є процедурою вирішення задачі планування як оптимізаційної задачі. Оскільки космічні системи є дуже складними існує також велика кількість різноманітних додаткових обмежень. Необхідно також враховувати, що КА – надскладний об'єкт управління, функціонуючий в особливому середовищі – космічному просторі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При постановці задачі планування операцій управління КА підходи зарубіжних [1 – 16] та вітчизняних [17 – 20] науковців дещо різняться. Як обґрунтовано стверджують ряд авторів, на пострадянському просторі системно не велись фундаментальні дослідження в цьому напрямку, а використовувались попередні напрацювання. Тому цікавим є дослідження зарубіжного досвіду в даній галузі. Окремі винятки [17 – 20] досліджень процесу планування роботи космічних систем лише підтверджують приведену вище думку. Варто зазначити значні досягнення авторів [18] в формалізації процесів, які протікають в космічних системах та закладення фундаменту власної наукової школи, яка принципово відрізняється від [1 – 16].

**Метою статті** є аналіз основних методів оцінювання ефективності застосування космічних апаратів за призначенням, що застосовуються провідними світовими космічними агентствами, висвітлення не розв'язаних на теперішній час проблем планування роботи КА та напрямків подальших наукових досліджень.

### Викладення основного матеріалу

Аналіз [1 – 16, 21 – 24] показує, що зарубіжні науковці використовують в більшості універсальні моделі систем планування (не обов'язково космічні), які налагоджуються для кожного конкретного випадку (конкретної місії). В якості обмежень виступають технологічні обмеження космічної системи та ресурси КА. Узагальнено використовується такий підхід [15, 16]:

нехай маємо

$$\bar{x} = [t_1, t_2, \dots, t_M, r_1^p, r_2^p, \dots, r_M^p, r_1^e, r_2^e, \dots, r_{N-1}^e]^T,$$

де  $T$  – інтервал планування;  $t_i$  – час проведення операцій, він прямо пов'язаний з тим, як КА використовує ресурси  $r_i^e$ , та деякими іншими змінними, які в дослідженні операцій називають цільовими змінними  $r_j^p$ .

В цьому випадку метою є мінімізація часу виконання та максимізація ресурсів [15, 16]:

Функція  $C(t_i)$  включає декілька видів цільових функцій. Одна з них намагається мінімізувати сумарний час проведення усіх запланованих операцій:

$$C(t_i) = \sum_{i=1}^M t_i$$

Якщо головною метою є мінімізація часу від початку до кінця планування то формула (1) набуде такого вигляду:

$$C(t_i) = t_M$$

Основні типи ресурсів, якими оперують [1 – 16] та напрямки їх оптимізації приведені в табл. 1.

Узагальнюючи проаналізований матеріал [1 – 16] можливо визначити проблему планування, як проблему раціонального розподілу операцій управління за часом в умовах ресурсних обмежень (WCP "window-constrained packing problem") [1 – 16]. Вирішення задачі полягає у раціональному розподілі часових інтервалів (циклограм роботи бортової апаратури КА) на інтервалі планування. Для простоти

розуміння розглянемо космічну систему із одного КА спостереження, планування необхідно здійснити на інтервалі планування  $[0, T]$ . Ідеальним є випадок, коли операції, які необхідно запланувати розташо-

вуються послідовно, без перетинів на інтервалі планування, цілком зрозуміло, що на практиці такі ситуації трапляються досить рідко, тому моделі часто є надто спрощеними [17 – 21].

Таблиця 1

Типи ресурсів і напрямки оптимізації

Тип	Ресурси	Мета оптимізації
Обмежені	Наукові (цільові)	Максимізувати кількість отриманої цільової інформації Мінімізувати кількість отриманої цільової інформації
Частково обмежені	Пальне	Мінімізувати витрати Максимізувати зекономлені
Відновлювані	Температура	Мінімізувати приріст Максимізувати відведення
	Пам'ять	Мінімізувати втрачені дані Максимізувати збережені дані
	Заряд батарей	Мінімізувати використання батарей Максимізувати заряд батарей

Маємо  $n$  операцій  $jobs_i \{job_i, i = 1, \dots, n\}$ , реалізація операції можлива в заданому зручному інтервалі (часовому моменту зручному для здійснення операцій):  $[W_{0i}, W_{fi}]$  (обмеженням є існування лише одного зручного інтервалу для реалізації для кожної з операцій). Операція планується у відповідності до визначеного проміжку ( $d_i$ ) (дисципліна без переривання обслуговування), який визначається ( $d_{mini} \leq d_i \leq d_{maxi}$ ), де границі  $d_{mini}$  та  $d_{maxi}$  задані для кожної операції. Тобто кожна операція має мінімальну та максимальну тривалість (рис. 1).

Існує декілька підходів до розстановки операцій всередині зручного моменту (наприклад, залежить від кутів розвороту на площу зйомок).

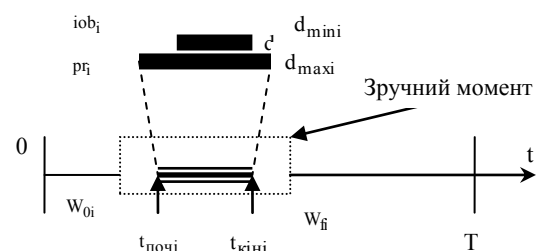


Рис. 1. Схема реалізації операції

На практиці, звичайно, цей процес ускладнюється відповідно до прецесії орбіти КА, специфіки виконуваних задач і характеризується функцією доцільності  $S(t)$  (рис. 2) [1 – 16].

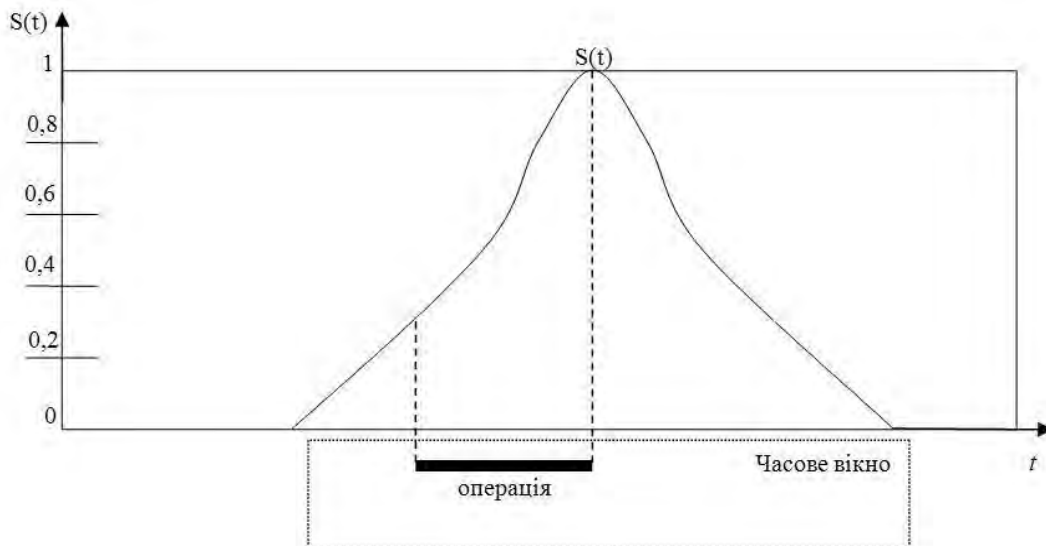


Рис. 2. Графік функції доцільності

Кожна з операцій має свій пріоритет,  $1 \leq H_i \leq 10$ .

Значення пріоритету операцій по-перше жорстко визначаються при розробці космічної системи,

по-друге динамічно змінюється при плануванні роботи КА, наприклад відповідно від параметрів районів зйомки  $f_i$  [1 – 14]:

$$H_{P3} = f_0 + (f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_n)$$

Значення функції пріоритету залежить від замовника інформації, пріоритетності роботи апаратури, завдання зйомки, екстреності заявки тощо. Аналіз усіх підходів дозволяє стверджувати, що часткові функції пріоритету вибрані досить правильно, але формування загального пріоритету та нормування часткових функцій здійснюється за значно спрощеними, не завжди логічними схемами [17 – 21]. Узагальнюючи викладене задача раціонального розподілу операцій управління за часом в умовах ресурсних обмежень формулюється наступним чином: маємо  $n$  заявок на проведення операцій, кожна з яких має [3 – 10]:

зручний інтервал проведення операції  $[W_o, W_f]$ ;

функцію доцільності зручного інтервалу  $s(t), t \in [W_o, W_f]$ ;

мінімальну  $d_{\min}$  та максимальна  $d_{\max}$  тривалість; пріоритет  $h_i$ .

Максимізувати цільову функцію  $O$ :

$$O = \sum_{i=1}^n x_i \cdot h_i \cdot ar_i,$$

де  $ar_i$  – сумарне значення функції доцільності:

$$ar_i = \sum_{t=start_i}^{stop_i} S_i(t),$$

де  $start_i$  – час початку зйомки;

$stop_i$  – час кінця зйомки, в умовах обмежень:

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max},$$

$$d_{\max} \leq W = W_{f0} - W_{0i},$$

$$W_{0i} \leq start_i \leq W_{fi} - d_i, x_i \in \{0,1\},$$

де значення  $x = 1$  означає, що операція запланована.

Пропонується також і максимізація не тільки за  $O$ , але й за більш простими критеріями такими як:

відсоток реалізованих заявок;

відсоток простою апаратури;

сумарна площа знятих за інтервал планування районів.

Цільова функція (2) в даному випадку є однією (частковим випадком) з цільових змінних  $r_j^p$  формули (1). Аналіз показує, що оптимальне рішення може бути знайдене досить просто методом перебору всіх можливих варіантів, але цей шлях вимагає дуже великої кількості кроків. При збільшенні кількості операцій, які мають бути заплановані, кількість кроків буде зростати за експонентою.

Варто зосередити увагу на те, що для того, щоб вірно поставити задачу планування, необхідним є: наявність ресурсів оптимізації, можливість кількісної оцінки оптимізованої величини та врахування обмежень. І, якщо з наявними ресурсами питання в цілому вирішене то інші питання потребують всебічних досліджень. Оптимізований варіант плану має оцінюватися якоюсь кількісною мірою, наприклад

критерієм оптимальності. Критерієм оптимальності називають кількісну оцінку якості об'єкту, яка оптимізується. Саме на основі обраного критерію оптимізації обирається вигляд цільової функції, яка є залежністю критерію оптимальності від параметрів, які впливають на її значення. Вид критерію оптимальності визначається конкретними цільовими задачами космічної системи [17 – 20]. В такому випадку задача планування зводиться до задачі знаходження екстремуму цільової функції. З цієї причини впливає основний недолік запропонований у [1 – 16], та підтверджений доповідями типу [21] різних космічних агенцій, який полягає в значному спрощенні цільової функції. Відбувається по-суті використання окремих допоміжних показників ефективності проведення операцій при плануванні. Тобто дослідженню операцій [25], яке готує вихідні кількісні дані приділяється недостатня увага.

Оскільки функціонування КА (тим більше угруповання) є надскладною задачею, тому рішення в ньому та планування операцій має здійснюватись на основі цілої сукупності критеріїв [25, 26]. Будь-яке рішення (план) є компромісом, в якому перевага віддається тому варіанту, який не будучи оптимальним ні за яким критерієм, є прийнятним за рядом критеріїв. Компромісний характер рішення виникає вже при оцінюванні ефективності планування в діапазоні умов, у випадку планування роботи КА компроміс посилюється через необхідність задоволення ряду критеріїв. На практиці задача планування не може та не має зводитись до простої математичної задачі знаходження максимуму (чи мінімуму) одного числа [17 – 21, 25, 26], як робиться в [1 – 16], через це ефективність застосування космічних апаратів за призначенням досить низька.

## Висновки

Проведений аналіз вказує на велику кількість нерозв'язаних проблем при плануванні проведення операцій управління КА. Шлях, яким проводяться дослідження [1 – 16] веде в напрямку створення та використання спрощених та узагальнених моделей, які не враховують великої кількості різноманітних обмежень викликаних як специфікою функціонування КА в космічному просторі так і структурно-функціональною складністю всієї космічної системи. Як наслідок, при створенні угруповань КА ці проблеми постають ще гостріше. Тому необхідними є дослідження пов'язані з оптимізацією систем планування в напрямках підвищення автономності їх функціонування та удосконалення існуючих моделей.

## Список літератури

1. E. Gat. *News from the Trenches: An Overview of Unmanned Spacecraft for AI Researchers. AAAI Spring Symposium on Planning with Incomplete Information for Robot Problems, 1996.*

2. R. A. Morris, J. L. Bresina and S. M. Rodgers. *Automatic Generation of Heuristics for Scheduling. Proceedings of the 15th IJCAI*, 1997.
3. J. L. Bresina, R. A. Morris and W. R. Edginton. *Optimizing Observation Scheduling Objectives. Proceedings of the 1997 NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space*, 1997.
4. H. Muraoka, R. H. Cohen, T. Ohno and N. Doi. *AS-TER Observation Scheduling Algorithm. SpaceOps98*, 1998.
5. N. Muscettola, B. Pell, O. Hansson and S. Mohan. *Automating Mission Scheduling for Space-Based Observatories in Robotic Telescopes: Current Capabilities, Present Developments, and Future Prospects for Automated Astronomy*, G. W. Henry and J. A. Eaton (editors), *Astronomical Society of the Pacific, Provo, UT, ASP Conference Series No. 79*, 1995.
6. J. Pemberton. *Toward scheduling over-constrained remote sensing satellites. In Proceedings of the 2d International Workshop on Planning and Scheduling for Space*, 2000.
7. W. Wolfe and S. Sorensen. *Three scheduling algorithms applied to the earth observing domain. Management Science*, 46(1), 2000.
8. Jo Berymyn. *Proba spacecraft family. Small mission solution for emerging applications.// The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008*.
9. M. R. Garey and D. S. Johnson. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co.,—1979.
10. M. Lemaitre, G. Verfaillie, F. Jouhaud, L. Lachiver, and N. Bataille. *How to manage a new generations of agile earth observation satellites? // Proceedings of International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, 2000.
11. W. Potter and J. Gash. *A photo album of earth: Scheduling landsat 7 mission daily activities. In Proceeding of International Symposium on Space Missions Operations and Ground Data Systems*, 1998.
12. Cesta A., Cortellessa, G. Fratini, S. Oddi, MrSPOCK: *Long-term Planning for the ESA Mars Express Mission, Submitted to the 6th International Workshop on Planning and Scheduling for Space, IWPS-09, 19<sup>th</sup>–21st July 2009, Pasadena, CA*
13. Pralet C., and Verfaillie G. *AIMS: A Tool for Long-term Planning of the ESA INTEGRAL Mission, Submitted to the 6th International Workshop on Planning and Scheduling for Space, IWPS-09, 19th-21st July 2009, Pasadena, CA*.
14. Lavagna M., and Castellini F., *Advanced Planning and Scheduling Initiative's XMAS tool: AI for automatic scheduling of XMM-Newton long term plan, Submitted to the 6th International Workshop on Planning and Scheduling for Space, IWPS-09, 19th-21st July 2009, Pasadena, CA*.
15. Zilberstein S. *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Automated Planning and Scheduling / S. Zilberstein, Z. Koehler, Koenig. – Massachusetts: Massachusetts institute of technology, 2003. – 250 с.: іл. ISBN 1-57735-200-9 45*.
16. Christopher G. *Planning and Scheduling proximity operation for autonomous orbital rendezvous. – Massachusetts: Massachusetts institute of technology, 2003. – с.6 - 143*.
17. Ожінський В.В. Аналіз способів планування роботи космічних апаратів бортовим комплексом управління / В. В. Ожінський // *Водний транспорт*. –К.: КДАВТ, 2011. – Вун.12. – С.13–20.
18. Фриз П.В., *Можливий підхід до формалізації процесів у космічних системах спостереження/ В.М. МIRONENKO, П.В. Фриз, С.П. Фриз // Збірник наукових праць ЖВІРЕ. – Житомир.: ЖВІРЕ, – №10. – С 60 - 71*.
19. Ожінський В.В. *Планування роботи бортових систем КА при використанні координатних методів управління/ В.В. Ожінський, В.Г. Парфенюк // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Житомир.: ЖДТУ – 2011. – № 1(56)*.
20. *Спосіб планування роботи бортових систем КА: Пат. № 557496 Україна, МПК G05B 19/04 В.В. Ожінський, О.М. Загорюлько, В.Г. Парфенюк, П.П. Топольницький (Україна). – № u2010 12685; Заявл. 26.10.10; Опубл.25.02.11; Бюл №4. – 6 с.*
21. Best R. *Imagery Intelligence: Issues for Congress, Jr Specialist in National Defense Foreign Affairs / Richard A. Best / – Congressional Research Service: The Library of Congress*, 1997.
22. Evans B. G. *Satellite Communication Systems / Evans B. G.; The Institution of Engineering and Technology. – London.: The Institution of Engineering and Technology, 2008. – 727 с. – ISBN 0 85296 899 X*.
23. Elbert B. L. *Introduction to Satellite Communication / Elbert B. L. – [Third Edition]. – Norwood.: ARTECH HOUSE, 2008. – 447 с. ISBN-13: 978-1-59693-210-4*.
24. Maini A. K. *Satellite Technology Principles and Applications / A. K. Maini, V. Agrawal; Laser Science and Technology Centre, Defence Research and Development Organization Ministry of Defence, India. – West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 674 с. – ISBN 978-0-470-66024-9*.
25. Венцель Е. С. *Введение в исследование операций / Е.С. Венцель. – М.: Сов. радио, 1964. – 384 с.*
26. Воронин А.Н. *Многокритериальный синтез динамических систем / А. Н. Воронин. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.*

Поступила в редколлегию 2.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.М. Воронін, Національний авіаційний університет, Київ.

## СПОСОБЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.В. Ожинский

Проанализированы основные научные труды, исследующие процесс применения космических аппаратов по целевой назначению. Рассмотрены типы ресурсов и направления оптимизации планов проведения операций управления космическими аппаратами. Указаны перспективные направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** интервал планирования, целевая функция, ресурсы, операция, функция целесообразности.

## METHODS AND TRENDS IN OPTIMIZATION OF SPACECRAFT PLAN

V.V. Ozhinskyi

The main proceedings of investigating process the use of spacecraft for their intended purpose are analyzed. The types of resources and deployment optimization spacecraft control operations. Directions for future research are promised.

**Keywords:** interval planning, objective function, resources, operations, functions, feasibility.