

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ ПЛАНУВАННЯ КОСМІЧНОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ ГРАФОВОЇ МОДЕЛІ

к.т.н. Д.В. П'яковський, к.т.н. С.В. Водоп'ян, Р.В. Дзюбчук
(подав д.т.н., проф. Д.В. Голкін)

Розглянуто особливості багатofакторного планування радіолокаційного спостереження, запропонована система показників якості та часткових критеріїв якості радіолокаційного спостереження. Показано, що процес планування космічного спостереження може бути представлений у вигляді графової моделі.

Постановка проблеми. В сучасних умовах космічні системи задіяні у вирішенні таких задач, як спостереження динаміки процесів в атмосфері та на океанічній поверхні, картографування, дослідження природних ресурсів Землі тощо. Для цього останнім часом все ширше застосовують радіолокатори із синтезованою апертурою (РСА). Вони мають високі інформаційні можливості та здатні вести спостереження незалежно від умов освітленості, вимірювати швидкість вітру, контролювати стан поверхні океану та ін. [1, 2].

Для ефективного використання можливостей космічних систем спостереження необхідно здійснювати планування роботи бортових засобів. Але задача планування є складною через необхідність врахування великої кількості факторів та велику обчислювальну складність. Дана проблема частково вирішується використанням евристичних методів. Проте вони мають низьку надійність та ефективність, що може призвести до катастрофічних наслідків (наприклад, втрати зв'язку з космічним апаратом).

Зменшити вплив помилок експертів можна шляхом автоматизації процесу планування, для чого необхідно формалізувати дану задачу.

Аналіз останніх досліджень. Задачі планування роботи бортових засобів розглядалися в [3 – 5]. Проте в даних роботах основна увага приділялась оптико-електронному спостереженню і не враховувалась специфіка радіолокаційного спостереження [6 – 9]. Роботи [10, 11] присвячені здебільшого питанням планування на етапі створення космічних систем.

Задачі оптимізації космічного спостереження в основному вирішують двома шляхами: евристичним та на основі математичних моделей. Евристичний підхід ґрунтується на використанні досвіду спеціалістів, які займа-

ються складанням оптимальних маршрутів спостереження та дозволяє за допустимий час розробити план спостереження задовільної якості [3, 4]. Проте даний підхід має істотні недоліки: досвід експертів поки що не піддається строго формалізованому узагальненню; вимагає спеціально підготовлених фахівців з розвинутими евристичними та комбінаторними здібностями; при необхідності рішення багатокритеріальних задач ймовірність складення людиною оптимального плану досить низька; важко передбачити ефективність та надійність плану, отриманого евристичним шляхом.

У роботі [4] проаналізовано деякі формальні методи планування. Показано, що методи лінійного та динамічного програмування ефективні лише в часткових випадках та при невеликій розмірності задачі. Проведений авторами порівняльний аналіз математичних методів оптимізації показав перспективність графових моделей, зокрема при використанні алгоритму Форда. Але основна проблема задачі оптимального планування на основі графових моделей, яка заключається у високій обчислювальній складності, ще не вирішена.

Постановка завдання. Задачу оперативного планування радіолокаційного спостереження можна сформулювати таким чином: відомими є заявки на спостереження N наземних об'єктів протягом часу $T_{\text{СП}}$. Для кожного i -го об'єкта вказуються його координати (φ_i, λ_i) , коефіцієнт пріоритетності $k_{\text{П}}$. Відомі початкові умови руху платформи $(a, e, i, \omega, \Omega, t_n)$ [10], тактико-технічні характеристики РСА $(d, \delta_{\text{аз}}, \delta_{\text{Rn}}, f, \Delta F, F_p, \tau_i, f_n, \Phi_{\text{min}}, \Phi_{\text{max}}, L, P_{\text{пер}}, G_{\text{пер}}, G_{\text{пр}}, T_{\text{синг}}, E_{\text{затрдоп}}, E_{\text{ЗПдоп}})$ [6, 7].

Необхідно вибрати із множини можливих, “конкуруючих” варіантів такий план зйомки наземних об'єктів $M_{\text{опт}}$, при якому вихідний ефект системи F_M був би максимальним з врахуванням обмежень за енергоресурсом КА $E_{\text{затрдоп}}$, ємністю запам'ятовуючого пристрою $E_{\text{ЗПдоп}}$ і з врахуванням заводової обстановки в районах спостереження

$$F_M = \max \sum_{i=1}^N F_{ij}, \quad (1)$$

де F_{ij} – апіорне значення показника якості i -го об'єкта на j -му витку, $j \in [1, n]$, де $n = T_{\text{СП}} / T_o$ – кількість витків КА протягом часу $T_{\text{СП}}$ при періоді обертання КА T_o .

Пропонується вирішувати задачу в два етапи. На першому етапі здійснюється розрахунок показника якості для кожної комбінації об'єкт/виток. Результати прогнозу представляються у вигляді масиву (табл. 1), елементами якого є апіорні оцінки показника якості спостереження i -го об'єкта на j -му витку. В подальшому на основі масиву будується графова модель процесу

спостереження, вершини якої будуть відповідати комбінаціям об'єкт/виток, а дуги можливим варіантам зйомки наземних об'єктів.

Таблиця 1

Масив апіорних оцінок показників якості

Об'єкт \ Виток	1	2	3	...	N
1	F_{11}	F_{12}	F_{13}	...	F_{1N}
2	F_{21}	F_{22}	F_{23}	...	F_{2N}
...
n	F_{n1}	F_{n2}	F_{n3}	...	F_{nN}

На другому – на основі графової моделі здійснюється процедура комбінаторного перебору варіантів плану зйомки природних об'єктів. Після цього проводиться вибір кращого варіанту плану за вибраним критерієм при заданих обмеженнях за енергоресурсом та за ємністю запам'ятовуючого пристрою.

Вибір показників якості радіолокаційного спостереження. Основним недоліком відомих підходів до задачі планування є відсутність однозначного трактування поняття “якість процесу спостереження”. Так, в [7] запропоновані узагальнені показники, що пов'язують характеристики радіолокатора, точність оцінки параметрів руху платформи і параметри радіолокаційного спостереження. В [8] пропонується згортка часткових критеріїв, які характеризують зображення, а саме: розрізняювальної здатності, відношення рівня бокових пелюсток діаграми спрямованості до головного, максимального рівня бокових пелюсток та викривлення форми головного пелюстка діаграми спрямованості. Іноді основним показником якості спостереження вважається якість радіолокаційного зображення, а саме розрізнення на місцевості, відносні флуктуації яскравості зображень та контраст зображень об'єкта.

У роботі пропонується врахувати основні з запропонованих раніше показників якості спостереження та доповнити їх новими з врахуванням обмежень на запас енергії і ємність бортового запам'ятовуючого пристрою.

У якості основних показників якості радіолокаційного спостереження запропоновані:

1. Коефіцієнт пріоритетності $k_n = [0...1]$. Під пріоритетністю будемо мати на увазі необхідність проведення спостереження за певним районом у залежності від його важливості та умов оперативної обстановки.

2. Повнота виконання заявок П. Під повнотою будемо мати на увазі відношення сум коефіцієнтів пріоритетності об'єктів m , які включені до плану до сум коефіцієнтів пріоритетності всіх об'єктів згідно заявок

$$\Pi = \sum_{i=0}^m k_{\Pi i} / \sum_{i=1}^N k_{\Pi i} . \quad (2)$$

Очевидно, що $\Pi \in [0..1]$ і $\Pi = 1$, якщо всі об'єкти (райони) включені до плану спостереження.

Введення виразу (2) для обчислення повноти виконання заявок обумовлено тим, що класичне визначення Π як відношення m до N не враховує важливості включених до плану об'єктів та не відображає реальної міри виконання заявок.

3. Оперативність. Під оперативністю будемо мати на увазі проміжок часу T між моментом початку інтервалу оперативного планування й моментом видачі результатів спостереження на землю.

4. Розрізнення на місцевості. Розрізнення на місцевості характеризується двома складовими: розрізненням за азимутом і розрізненням за дальністю. Для сфокусованих РСА потенційне розрізнення за азимутом дорівнює половині горизонтального розміру бортової антени [6, 7]. Потенційне розрізнення за горизонтальною дальністю δ_{Rg} залежить від розрізнявальної здатності за нахильною дальністю δ_{Rn} та від кута візування φ [7]:

$$\delta_{Rg} = \frac{c}{2 \cdot \Delta F \cdot \sin \varphi} , \quad (3)$$

де c – швидкість поширення електромагнітних коливань; ΔF – ширина спектру зондуючого сигналу.

5. Яскравість та контрастність зображень. Очевидно, що величина яскравості та контрастності зображень буде тим більшою, чим більше відношення сигнал/шум.

Відношення енергії сигналу до енергії шуму на виході РСА із стисненням імпульсів має вигляд [6]:

$$q = \frac{P_{сеп} A_r^2 \rho \delta_{Rn} (\sin \varphi)}{8 \pi k T_0 F_p R^3 \lambda V} , \quad (4)$$

де $P_{сеп}$ – середня потужність випромінювання; A_r – ефективна поверхня антени; ρ – коефіцієнт розсіювання від земної поверхні; k – стала Больцмана; T_0 – стандартна опорна температура (290 К); F_p – коефіцієнт шуму приймача; R – дальність до об'єкта; λ – довжина хвилі; V – швидкість космічного апарата.

З виразу (4) випливає, що відношення енергії сигналу до енергії шуму обернено пропорційне третьому ступеню дальності до об'єкту спостереження. Тому відношення q для об'єктів, розміщених в ближній до траси

польоту носія РСА частині смуги огляду, буде значно більшим ніж для об'єктів, розміщених в дальній частині смуги огляду (для КА на висоті 600 км – в 4–12 разів).

Якщо шумова перешкода набагато більша за власний шум приймального пристрою, то замість kT_0F_p в формулу (4) можна підставити потужність шумової перешкоди на одиницю смуги частот, яка сприймається боковими пелюстками антени РСА [6]:

$$q' = \frac{P_{\text{сер}} A_r^2 \rho \delta_{Rn} (\sin \varphi) R_j^2 B_j}{8\pi R^3 \lambda V g P_j G_j}, \quad (5)$$

де R_j – дальність до джерела перешкоди; B_j – ширина спектру перешкоди; g – рівень бокових пелюсток діаграми спрямованості відносно головного; P_j – потужність перешкоди; G_j – коефіцієнт підсилення антени за перешкодою.

Формула (5) дозволяє враховувати вплив джерел навмисних та ненавмисних перешкод на основі апріорної інформації про їх розміщення, характеристики та час роботи.

Визначення критерію оптимальності. Для вибору оптимального плану радіолокаційного спостереження пропонується в якості критеріїв оптимальності вибрати інтегральні показники, які суттєвим чином враховують і інші фактори. Це максимум відношення сигнал/шум q , максимум оперативності та повноти виконання завдання Π , мінімум розрізняльної здатності при врахуванні обмежень на енергоресурс $E_{\text{затрдоп}}$, ємність запам'ятовуючого пристрою $E_{\text{зПдоп}}$. Таким чином, система часткових критеріїв оптимальності буде мати вигляд

$$\max \sum_{i=1}^N (q_{ij}), \min \sum_{i=1}^N \sigma_{Rgij}, \text{ при } T_{\text{сн}} \rightarrow \min, \Pi \rightarrow \max, \\ E_{\text{зП}} \leq E_{\text{зПдоп}}, E_{\text{затр}} \leq E_{\text{затрдоп}}, \quad (6)$$

де q_{ij} , σ_{Rgij} – апріорні значення відношення сигнал/шум та розрізнення по горизонтальній дальності для i -го об'єкта на j -му витку.

Безпосереднє виконання умов (6) на практиці часто є неможливим внаслідок конкуренції між різними частковими критеріями якості. Тому необхідно перейти від окремих однофакторних умов оптимізації до деякого узагальненого критерію якості, який міг би забезпечити оптимальність у системному розумінні за рахунок взаємних поступок часткових критеріїв якості. Потрібна така згортка критеріїв якості, яка в різних ситуаціях виражала б різні принципи оптимальності: в напружених ситуаціях – принцип мінімаксу, в спокійних умовах – принцип інтегральної оптимальності, в проміжних випадках приводила б до парето-

оптимального рішення. Цим вимогам відповідає формальна модель векторної оптимізації професора А.М. Вороніна [12]:

$$\psi^* = \arg \min_{\psi \in \Gamma_\psi} \sum_{k=1}^s [1 - y_{0k}(\psi)]^{-1}, \quad (7)$$

де s – кількість часткових критеріїв якості; $y_{0k}(\psi)$ – нормоване значення часткового критерію якості.

Запропонована згортка часткових критеріїв (7) на основі нелінійної схеми компромісів [12] має властивість безперервної адаптації до ситуації прийняття багатокритеріального рішення, дозволяє працювати з частковими критеріями якості різної розмірності та приймати багатокритеріальне рішення формалізовано, без безпосередньої участі людини.

Використовуючи вирази (6), (7) та запропоновану в [3] методику, узагальнений показник якості для кожної комбінації об'єкт i /виток j з врахуванням виразів (6), (7) та методик [3, 5] матиме вигляд

$$\psi_{ij} = \lambda_1 \frac{1}{1 - \delta_{Rg0ij}} + \lambda_2 \frac{1}{1 - 1/q_{0ij}} + \lambda_3 \frac{1}{1 - T_{0ij}}, \quad (8)$$

де δ_{Rg0} , q_0 , T_0 – нормовані значення часткових показників якості;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коефіцієнти пріоритетності показників якості, $\sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1$.

Тоді з врахуванням виразу (8) систему критеріїв оптимальності (6) можна звести до вигляду:

$$\min \sum_{i=1}^N \psi_{ij}, \text{ при } \Pi \rightarrow \max; \quad (9)$$

$$E_{зП} \leq E_{зПдоп}, E_{затр} \leq E_{затрдоп}. \quad (10)$$

Структура алгоритму оптимізації плану радіолокаційного спостереження Землі з борту космічної платформи запропоновано у вигляді, представленою на рис. 1.

1. Аналіз вхідних даних: заявки на спостереження наземних об'єктів, в яких вказуються їх координати та вимоги щодо часу проведення спостереження та оперативності подання готової інформації; відомості про місцезнаходження та технічні характеристики джерел навісних та ненавісних перешкод; орбітальні характеристики космічного апарата; тактико-технічні характеристики РСА.

2. Оцінка потенційних можливостей системи по виконанню поданих заявок (відповідність вимог, які висуваються в заявках, технічним характеристикам системи).

3. Прогноз руху космічного апарату на період планування спостереження (звичайно 1...7 діб).

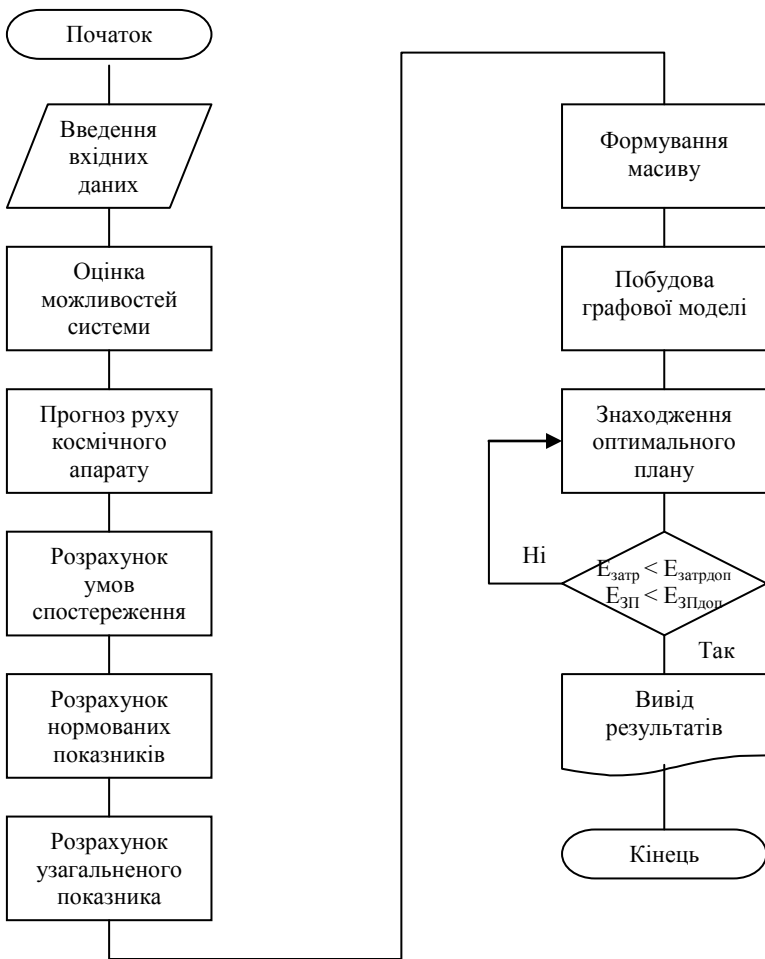


Рис. 1. Структура алгоритму планування радіолокаційного спостереження РСА космічного базування

4. Визначення можливостей РСА щодо ведення спостереження за вказаними об'єктами (на яких витках, в який час, на якій відстані).

5. Розрахунок відношення сигнал/шум та розрізняювальної здатності по горизонтальній дальності для кожної комбінації об'єкт/виток.

6. Розрахунок нормованих значень вибраних показників якості та узагальненого показника якості (8).

7. Формування масиву значень узагальненого показника якості та побудова графу, в якому кожна вершина відповідає комбінації об'єкт/виток, а значення даної вершини відповідає відповідному значенню узагальненого показника якості (рис. 2).

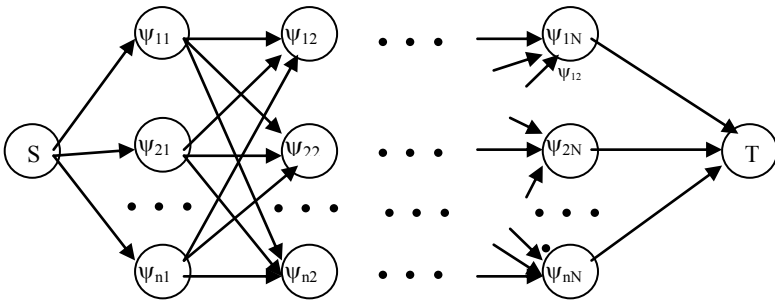


Рис. 2. Представлення масиву апіорних оцінок узагальненого показника якості у вигляді графу

8. Знаходження в графі найкоротшого шляху між умовними вершинами S і T. Даний шлях і буде задовольняти вимозі (9).

9. Перевірка відповідності плану обмеженням (10). Якщо “Так” – то це і є шуканий план спостереження, якщо “Ні” – то відкидається одна вершина графу для об'єкта з мінімальним значенням коефіцієнту пріоритетності та повторюються пункти 8 – 9 алгоритму, поки не буде знайдено план спостереження, який задовольнятиме обмеженням (10).

10. Виведення результатів планування на пристрій відображення.

У результаті роботи алгоритму отримуємо план роботи РСА з вказанням часу роботи радіолокатору та об'єктів, що будуть спостерігатись.

Висновки. В даній статті розроблено структуру алгоритму оптимізації плану радіолокаційного спостереження та обґрунтовано вибір критерію оптимальності радіолокаційного спостереження. Це дозволяє задовольнити за мінімальний час максимально можливу кількість заявок з достатньою якістю при врахуванні обмежень за енергоресурсом КА $E_{затрдоп}$, об'ємом запам'ятовуючого пристрою $E_{зпдоп}$ на борту КА та з мінімальним зношенням бортової апаратури.

Слід відмітити, що використання математичної графової моделі оптимізації процесу радіолокаційного спостереження має велику обчислювальну складність при виконанні понад 20 – 30 заявок на період 2 – 3 доби та не гарантує знаходження рішення за допустимий час [13]. Тому перспективно основні зусилля зосередити на розробці фізичних графових моделей для рішення даних задач, які скорочують тривалість розрахунків на кілька порядків [14].

ЛІТЕРАТУРА

1. Артюшин Л.М., Мосов С.П., П'яковський Д.В., Толубко В.Б. Аерокосмічна розвідка в локальних війнах сучасності: досвід, проблемні питання і тенденції: Монографія. – К.: НАОУ, 2002. – 208 с.
2. Застосування космічних систем для забезпечення дій збройних сил: Навчальний посібник / М.С. Пастушенко та ін. – Х.: ХВУ, 2003. – 192 с.
3. Машков О.А., Фриз С.П. Методика оптимізації планування роботи орбітальних засобів космічних систем спостереження // Зб. наук. праць ЖВІРЕ. – Житомир : ЖВІРЕ. – 2003. – Вип. 6. – С. 80 – 91.
4. Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
5. П'яковський Д.В., Водоп'ян С.В., Пекарев Д.В. Методика оптимального планування використання космічних апаратів, улічуючи вплив небагатоканальних факторів // Сб. научн. тр. I Межд. радиоэлектронного форума МРФ-2002. – Х.: АН ПРЭ, ХНУРЭ. – 2002. – Ч. I. – С. 89 – 92.
6. Скольник М. Справочник по радиолокации в 4-х т. – М.: Сов. радио. – Т. 1. Основы радиолокации, 1976. – 456 с. – Т. 2. Радиолокационные антенные устройства, 1977. – 408 с.
7. Калмыков А.И., Синицин Ю.А., Сытник О.В., Цимбал В.Н. Информативность радиолокационных систем зондирования Земли из космоса // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1989. – 32, № 9. – С. 1055 – 1062.
8. Сытник О.В., Кабанов А.В., Ефимов В.Б., Курекин А.С., Цимбал В.Н. Критерий качества радиолокационного изображения когерентных систем ДЗЗ // Космічна наука і технологія. – Т. 8, № 213. – С. 287 – 288.
9. Мельник Ю.А., Зубков С.Г., Степаненко В.Д. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
10. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
11. Скребушевский Б.С. Формирование орбит космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
12. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. – К.: Наук. думка, 1992. – 160 с.
13. Гудман С., Хидентиеми С. Введение в разработку и анализ алгоритмов. – М.: Мир, 1981. – 368 с.
14. Васильев В.В., Баранов В.Л. Моделирование задач оптимизации и дифференциальных игр. – К.: Наук. думка, 1989. – 296 с.

Надійшла 11.05.2004

П'ЯКОВСЬКИЙ Дмитро Володимирович, канд. техн. наук. Область наукових інтересів – методи та алгоритми підвищення ефективності систем дистанційного моніторингу; автоматичні багатоканальні системи управління та оцінювання.

ВОДОП'ЯН Сергій Васильович, канд. техн. наук, начальник відділу ЦСП. Область наукових інтересів – алгоритми багатоканальних автоматичних систем управління та оцінювання.

ДЗЮБЧУК Роман Васильович, ад'юнкт ЖВІРЕ. Область наукових інтересів – алгоритми оптимізації радіолокаційного спостереження.