

Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, акустика та навігація

УДК 629.7.058.54

М.Ф. Пічугін, Д.В. Карлов, О.О. Клімішен, І.М. Пічугін, А.С. Воловодюк

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ СИСТЕМИ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЛАНУВАННЯ КОСМІЧНОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

У роботі, на підставі аналізу застосування космічних систем подвійного призначення, визначені показники якості планування космічного радіолокаційного спостереження, які враховують низку факторів, що впливають на якість вихідного радіолокаційного зображення, а також негативний вплив яких частково можливо компенсувати за рахунок раціонального планування роботи спеціальної апаратури.

Ключові слова: показники якості, критерії оптимальності, радіолокаційне спостереження, планування.

Вступ

Актуальність. Аналіз тенденцій розвитку космічних засобів спостереження [1–2] підкреслює зростаюче значення зазначених систем для вирішення сучасних завдань інформаційного забезпечення як керівництва держави так й органів військового управління Збройних Сил. Окреме місце при цьому займають космічні системи подвійного призначення, які здатні виконувати завдання в інтересах як цивільних відомств так й силових, серед яких, у першу чергу відмічаються Збройні Сили. Згідно існуючої Загальнодержавної (Національної) космічної програми України та минулих програм одним з основних завдань є створення космічних бортових комплексів [3]. Одним зі шляхів вирішення цього завдання є розробка бортового радіолокатора із синтезованою апертурою (РСА), який матиме високі інформаційні можливості, дозволить вести спостереження в будь-який час доби та практично незалежно від метеорологічних умов. Проте РСА є одними з найбільш дорогих в розробці та виробництві, при експлуатації потребують відносно великих енергозатрат. Тому нагальною є потреба дослідження шляхів підвищення ефективності використання даних засобів при мінімальних витратах, що важко без раціонального планування їх застосування.

Постановка завдання. Ефективність використання космічних засобів спостереження залежить від багатьох факторів. Основними з них є: технічні характеристики апаратури (розміри смуги та зони огляду, характеристики приймально-передавального пристрою та антенно-фідерного тракту, розрізняльна здатність за азимутом та дальністю), характеристики об'єктів спостереження (розміри, замас-

кованість, матеріал покриття), задачі, які покладаються на систему спостереження (виявлення, визначення типу та класу, виявлення змін у стані об'єкта), характеристики засобів, які залучаються для управління космічним апаратом (КА), методики управління та планування роботи спеціальної апаратури КА, параметрів радіолінії «Земля-борт» та «борт-Земля»).

Аналіз даних факторів показує, що підвищити ефективність використання космічних засобів розвідки без значних додаткових витрат можливо шляхом покращення методики планування роботи спеціальної апаратури КА.

На даний час планування здійснюється людиною-оператором в основному за допомогою евристичних методів. Широке їх розповсюдження пов'язано зі складністю формалізації задачі планування через велику кількість факторів та умов, які необхідно враховувати. Проте при використанні евристичних методів важко передбачити ефективність та надійність розроблених планів, що не дозволяє в повній мірі використати можливості бортової спеціальної апаратури. Тому виникає потреба в розробці автоматизованої методики планування. Основою будь-якої методики планування є показники якості та критерії оптимальності, на основі яких здійснюється вибір одного варіанту серед всієї множини можливих.

Аналіз останніх досліджень. Питання оцінки ефективності цільового застосування космічних систем спостереження розглядалася в роботах [3–6]. В роботах [5–6] основна увага приділялася плануванню роботи оптико-електронних засобів та практично не враховувалися особливості проведення радіоло-

каційного спостереження. Запропоновані в [4] часткові показники ефективності орієнтовані в основному на вирішення задачі оптимізації кількості об'єктів пошуку, а не на побудову плану їх спостереження. В [5] в якості основного показника ефективності запропоновано математичне сподівання відверненого збитку. Проте даний показник ефективності розглядався в ракурсі оптимального розподілу космічних комплексів інформаційного забезпечення за об'єктами спостереження та є складним для розрахунку. Загальним, на погляд авторів, недоліком розглянутих в [4–6] системах показників ефективності космічної розвідки є відсутність або наявність апріорної оцінки якості вихідної продукції, тобто, радіолокаційних зображень земної поверхні.

Мета статті – побудова системи показників якості планування космічного радіолокаційного спостереження та критерію оптимальності.

Виклад основного матеріалу

Показники якості радіолокаційного спостереження. Основна складність у виборі показників якості космічного радіолокаційного спостереження полягає у відсутності однозначного трактування поняття «якість процесу спостереження». Так, в [3] було відмічено узагальнені показники, що пов'язують характеристики радіолокатора, точність оцінки параметрів руху платформи і параметри радіолокаційного спостереження. Крім того, 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'єкту.

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

В якості основних показників якості радіолокаційного спостереження запропоновані:

1. Коефіцієнт пріоритетності $k_{\Pi} [=0...1]$. Під пріоритетністю будемо розуміти необхідність проведення спостереження за певним районом в залежності від його важливості та умов оперативної обстановки.

2. Повнота виконання заявок Π . Під повнотою будемо розуміти відношення сум коефіцієнтів пріоритетності об'єктів m , які включені до плану до сум коефіцієнтів пріоритетності всіх об'єктів згідно заявок N

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

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

Введення виразу (1) для обрахування повноти виконання заявок обумовлено тим, що визначення Π як відношення m до N [4] не враховує важливості включених до плану об'єктів та не відображає реальної міри виконання заявок.

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

4. Розрізнення на місцевості. Розрізнення на місцевості має дві складові: розрізнення за азимутом і розрізнення за дальністю. Для сфокусованих РСА потенційне розрізнення за азимутом дорівнює половині горизонтального розміру бортової антени [3] та не залежить від дальності до об'єкту спостереження та довжини хвилі. Тому покращити значення розрізняювальної здатності за азимутом за рахунок оптимального планування практично неможливо. В зв'язку з цим в подальшому даний показник не розглядається.

Потенційне розрізнення за горизонтальною дальністю δ_{R_g} залежить від розрізняювальної здатності за нахильною дальністю δ_{R_n} та від кута візування φ [3]

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

де c – швидкість поширення електромагнітних коливань;

ΔF – ширина спектру зонduючого сигналу.

5. Яскравість та контрастність зображень. Очевидно, що величина яскравості та контрастності зображень буде тим більшою, чим більше відношення сигнал/шум. Тому в подальшому зручніше оперувати відношенням сигнал/шум.

Відношення енергії сигналу до енергії шуму на виході РСА із стисненням імпульсів має вигляд [3]

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

де $P_{\text{сєр}}$ – середня потужність випромінювання;

A_r – ефективна поверхня антени;

ρ – коефіцієнт розсіювання від земної поверхні;

k – стала Больцмана;

T_0 – стандартна опорна температура (290 K);

F_p – коефіцієнт шуму приймача;

R – дальність до об'єкту;
 λ – довжина хвилі;
 V – швидкість космічного апарату.

У випадку, коли шумова перешкода набагато більша за власний шум приймального пристрою, то kT_0F_p в формулі (3) можна замінити потужністю шумової перешкоди на одиницю смуги частот, яка сприймається боковими пелюстками антени РСА [3]

$$q' = \frac{P_{\text{сеп}} A_T^2 \rho \delta_{R_n} (\sin \varphi)}{8\pi R^3 \lambda V} \cdot \frac{R_j^2 B_j}{g P_j G_j}, \quad (4)$$

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

Запропоновані показники якості планування космічного радіолокаційного спостереження дозволяють врахувати основні фактори, які впливають на якість вихідного радіолокаційного зображення та негативний вплив яких частково можна компенсувати за рахунок раціонального планування роботи РСА.

Критерії оптимальності. Для вибору одного плану радіолокаційного спостереження серед значної кількості можливих варіантів необхідно визначити правила вибору – критерії оптимальності. Пропонується в якості критеріїв оптимальності вибрати інтегральні показники, які суттєвим чином враховують і інші фактори. Це максимум відношення сигнал/шум q , максимум оперативності (мінімальний час виконання заявок) $T_{\text{сн}}$ та повноти виконання заявок Π (заявки задоволено повністю або максимально можливо), мінімум розрізнувальної здатності σ_R при врахуванні обмежень на енергоресурс $E_{\text{затр доп}}$, ємність запам'ятовуючого пристрою $E_{\text{зп доп}}$ та на час переорієнтації з одного об'єкту на інший t_p . Таким чином, система часткових критеріїв оптимальності буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \max \sum_{i=1}^N (q_{ij}); \quad \min \sum_{i=1}^N \sigma_{R_{\text{сг}ij}}, \quad \text{за умов } T_{\text{сн}} \rightarrow \min; \\ \Pi \rightarrow \max; \quad E_{\text{зп}} \leq E_{\text{зп доп}}; \quad E_{\text{затр}} \leq E_{\text{затр доп}}; \quad (5) \\ t_p \leq t_{p \text{ доп}} \end{aligned}$$

де $q_{ij}, \sigma_{R_{\text{сг}ij}}$ – апріорні значення відношення сиг-

нал/шум та розрізнення по горизонтальній дальності для i -го об'єкту на j -му витку;

$t_{p \text{ доп}}$ – допустимий час переорієнтації (розраховується за прогнозом руху КА).

Виконання умов (5) на практиці часто є неможливим внаслідок конкуренції між різними частковими критеріями якості. В зв'язку з цим 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 [7].

Враховуючи умови (5), скалярну згортку А.М. Вороніна [3] та запропоновану в [8] методику узагальнений показник якості для кожної комбінації «об'єкт i /виток j » матиме вигляд:

$$\Psi_{ij} = \lambda_1 \frac{1}{1 - \delta_{R_{\text{сг}0j}}} + \lambda_2 \frac{1}{1 - q_{0j}} + \lambda_3 \frac{1}{1 - \tau_{0ij}}, \quad (6)$$

де $\delta_{R_{\text{сг}0j}}, q_{0j}, \tau_{0j}$ – нормовані значення часткових показників якості;

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

Нормовані апріорні оцінки показників якості, які при подальшій обробці слід мінімізувати (оперативність, розрізнувальна здатність), розраховуються за виразом

$$\gamma_{0j} = \frac{\gamma_{ij}}{\gamma_{\text{гран}i}}, \quad (7)$$

а ті, які потребують максимізації (відношення сигнал/шум) –

$$\gamma_{0j} = \frac{\gamma_{\text{гран}i}}{\gamma_{ij}}, \quad (8)$$

де $\gamma_{ij}, \gamma_{\text{гран}i}$ – відповідно апріорна оцінка та граничне значення показника якості для кожної комбінації «об'єкт i /виток j ».

Тоді з врахуванням виразу (6) систему критеріїв оптимальності (5) можна звести до вигляду:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N \Psi_{ij}, \quad \text{за умов } \Pi \rightarrow \max; \quad (9) \\ E_{\text{зп}} \leq E_{\text{зп доп}}; \quad E_{\text{затр}} \leq E_{\text{затр доп}}; \quad t_p \leq t_{p \text{ доп}} \end{aligned}$$

Висновки

Таким чином, набула подальшого розвитку система показників якості радіолокаційного спостереження, яка відрізняється від відомих поєднанням основних показників якості, які оцінюють план спостереження з показниками якості радіолокаційного зображення.

Запропонована згортка часткових критеріїв (9) на основі нелінійної схеми компромісів [7] має властивість безперервної адаптації до ситуації прийняття багатокритеріального рішення, дозволяє працювати з частковими критеріями якості різної розмірності та приймати багатокритеріальне рішення формалізоване, без безпосередньої участі людини-оператора.

Список літератури

1. Толубко В.Б. Тенденції використання космічного простору у сучасних умовах при вирішенні військових завдань / В.Б. Толубко, С.В. Козелков // Системи навігації управління та зв'язку. – К., 2008. – Вип. 3(7). – С. 4-11.
2. Тенденції розвитку аерокосмічних засобів спостереження: навч. посіб. / А.М. Алімпієв, Б.М. Іващук, Д.В. Карлов та ін. – Х.: ХНУПС, 2016. – 132 с.
3. Можливий підхід до побудови системи показників якості планування космічної радіолокаційної розвідки / М.Ф. Пичугін, С.П. Куліков, Д.А. Іценко та ін. // Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України. – К.: ЦНДІ ЗС України, 2004. – № 3(28). – С. 130-137.
4. Підхід до формування комплексної оцінки ефективності цільового застосування космічних систем подвійного призначення в інтересах космічної розвідки / С.П. Куліков, Д.А. Іценко, Д.В. Пекарев, А.В. Савчук //

Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України. – К.: ЦНДІ ЗС України, 2003. – № 4(25). – С. 86-93.

5. Куліков С.П. Методика оптимального розподілу космічних комплексів інформаційного забезпечення за об'єктами спостереження / С.П. Куліков, Д.А. Іценко, О.О. Білобородов // Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України. – К.: ЦНДІ ЗС України, 2003. – № 4(25). – С. 94-101.

6. Машков О.А. Методика оптимізації планування роботи орбітальних засобів космічних систем спостереження / О.А. Машков, С.П. Фриз // Збірник наукових праць ЖВІРЕ. – Житомир: ЖВІРЕ, 2002. – Вип. 6. – С. 80-91.

7. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем / А.Н. Воронин. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.

8. Варіант аналізу ефективності космічної системи оптико-електронного спостереження / Д.М. Випорханюк, Д.А. Іценко, В.В. Омельчук, В.І. Присяжний // Збірник наукових праць ЖВІРЕ. – Житомир: ЖВІРЕ, 2002. – Вип. 5. – С. 24-31.

Надійшла до редколегії 7.02.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПЛАНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

М.Ф. Пичугин, Д.В. Карлов, А.О. Климишен, И.М. Пичугин, А.С. Воловодук

В работе на основе анализа применения космических систем двойного назначения определены показатели качества планирования космического радиолокационного наблюдения, которые учитывают ряд факторов, которые влияют на качество выходного радиолокационного изображения, а также те факторы негативное влияние которых частично возможно компенсировать за счет рационального планирования работы специальной аппаратуры.

Ключевые слова: показатели качества, критерии оптимальности, радиолокационное наблюдение, планирование.

ANALYSIS OF SYSTEM INDEXES QUALITY OF PLANNING SPACE RADIO-LOCATION SUPERVISION

M. Pichugin, D. Karlov, O. Klimishen, I. Pichugin, A. Volovoduk

In-process on the basis of analysis application of the space systems double-duty the indexes quality are certain planning of space radio-location supervision, which take into account the row of factors, which influence on quality of output radio-location image, and also negative influence which it is partly possible to compensate due to the rational planning of work of the special apparatus.

Keywords: indexes of quality, criteria of optimality, radio-location supervision, planning.