

В.П. Гусинін, д.т.н., с.н.с.

Національне космічне агентство України

С.В. Водоп'ян, к.т.н., с.н.с.**Р.В. Дзюбчук, ад'юнкт**

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова

АЛГОРИТМ ПОШУКУ НАЙКОРОТШОГО ШЛЯХУ В ГРАФІ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ ДЛЯ ЗАДАЧІ ПЛАНУВАННЯ КОСМІЧНОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

У статті запропоновано варіант алгоритму пошуку найкоротшого шляху в графі з урахуванням обмежень, які необхідно враховувати при плануванні космічного радіолокаційного спостереження: за енергоресурсом, за ємністю запам'ятовуючого пристрою, за обмеженим часом планування. Імітаційне моделювання роботи алгоритму показало, що він є точним та має обчислювальну складність $O(NM) \dots O(I^N)$.

Постановка проблеми. Космічні апарати дистанційного зондування Землі (КА ДЗЗ) широко й ефективно використовуються багатьма країнами світу майже у всіх сферах народного господарства, в тому числі для пошуку корисних копалин та енергоносіїв, оцінки земельного і лісового потенціалів регіонів і країн, проведення моніторингу надзвичайних ситуацій, вирішення задач планування транспортних мереж, прокладки трубопроводів, картографування тощо. Основні напрями використання космічної інформації в інтересах національної безпеки й оборони України сформульовані в Законі "Про Загальнодержавну (Національну) космічну програму України на 2003–2007 роки" [1]. Крім того, в цій програмі передбачено створення вітчизняних космічних систем радіолокаційного та оптико-електронного спостереження середнього та високого розрізнення.

Планування цільового застосування КА ДЗЗ є одним із основних шляхів підвищення їх ефективності. В [2] показано, що одним із поширених способів математичного описання складних систем є використання теорії множин та графів, яка стала потужним засобом дослідження і розв'язання багатьох задач, що виникають при проектуванні та дослідженні складних інформаційних систем [2]–[8]. Це пояснюється тим, що більшість бінарних відносин між об'єктами систем зручно представити у вигляді графів. Одним із основних методів оптимізації на графах є зведення вихідної задачі до задачі пошуку екстремального шляху. Проте при врахуванні реальних можливостей КА ДЗЗ на модель спостереження накладаються додаткові обмеження, що ускладнює застосування відомих алгоритмів.

Аналіз останніх досліджень. У роботі [3] проведено аналіз деяких формальних методів планування, який показав перспективність графових методів, зокрема при використанні алгоритму Форда. Проте автори встановили, що даний алгоритм може застосовуватися лише при певних початкових умовах і подальшого розвитку даного напрямку не вели. У роботі [9] запропоновано варіант формалізації задачі планування на основі графової моделі, а в роботі [10] розроблено графову модель процесу спостереження, яка враховує обмежений ресурс КА, сумісність режимів роботи бортової апаратури, час переорієнтації осі візування в межах смуги огляду та дозволяє звести задачу оптимізації до задачі знаходження найкоротшого шляху в графі. Проведений аналіз відомих алгоритмів знаходження найкоротших шляхів в графі – Дейкстри, Форда, Флойда, Данцига, "подвійного пошуку" показав, що розглянуті алгоритми мають високу ефективність для графів, в яких на шляхи не накладаються додаткові обмеження [3]–[8]. Для розробленої в [10] моделі спостереження у вигляді секвенціального графа класичні алгоритми мають експонентний ріст обчислювальної складності при збільшенні розмірності задачі, що не дозволяє їх застосовувати для практичних задач планування. У зв'язку з цим ставиться задача розробки нового алгоритму пошуку найкоротшого шляху, який би враховував обмежені можливості КА.

Мета статті – розробка та дослідження алгоритму планування космічного радіолокаційного спостереження на основі графової моделі.

Постановка завдання. Графову модель процесу планування можна представити у вигляді зваженого графа, вершини якого будуть відповідати комбінаціям об'єкт/витік, а дуги – можливим варіантам зйомки наземних об'єктів. Постає завдання в дослідженні даної графової моделі з метою знаходження плану радіолокаційного спостереження, при якому будуть виконуватися наступні вимоги [9]:

$$\min \sum_{i=1}^N \psi_{ij}, \quad P \rightarrow \max, \quad \text{при} \tag{1}$$

$$E_{ЗП} \leq E_{ЗП\text{доп}}, \quad E_{затр} \leq E_{затр\text{доп}}, \quad t_{р\text{ит}} \leq t_{р\text{доп}}. \tag{2}$$

де ψ_{ij} – апріорна оцінка узагальненого показника якості для кожної комбінації об'єкт i /витік j ;

N – кількість наземних об'єктів, які підлягають спостереженню;

P – показник, який характеризує ступінь виконання заявок;

$E_{ЗП}$ – апріорна оцінка заповнення бортового запам'ятовуючого пристрою при реалізації розробленого плану;

$E_{затр}$ – апріорна оцінка енергетичних витрат при реалізації розробленого плану;

$t_{р\text{ит}}$ – прогнозований інтервал часу між моментом закінчення спостереження n -го об'єкта та початком спостереження m -го об'єкта;

$t_{р\text{доп}}$ – час, необхідний для перенацілювання бортової апаратури з n -го об'єкта на m -тий.

Підготовка вхідних даних.

Математичну модель космічного видового спостереження представлено у вигляді зваженого графа через представлення його матрицею суміжності, масиви ваг вершин D , “штрафів” Δ_E , $\Delta_{ЗП}$, обмежень θ_l , θ_{EM} [10].

З метою формування масиву ваг вершин графа у відповідність до кожної вершини графа пропонується поставити комбінацію об'єкт/виток. Для цього проіндексуємо всі вершини графа від 1 до K , де $K = N \cdot M$, M – кількість витків КА за інтервал планування. Тоді ваги вершин можна апріорно охарактеризувати за допомогою узагальненого показника якості ψ за виразом [9]:

$$\psi_K = \lambda_1 \frac{1}{1 - \delta_{R_0K}} + \lambda_2 \frac{1}{1 - q_{0K}} + \lambda_3 \frac{1}{1 - T_{0K}}, \tag{3}$$

де δ_{R_0K} , q_0 , T_0 – нормовані значення часткових показників якості;

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

З метою формування масиву ваг D вершин графа G у відповідність кожній вершині графа v_K пропонується поставити комбінацію об'єкт/виток. Тоді ваги вершин графа можна апріорно охарактеризувати за допомогою узагальненого показника якості ψ (3).

Масиви “штрафів” Δ_E , $\Delta_{ЗП}$ формуються виходячи із обмежень, які накладаються на процес космічної видової розвідки за енергоресурсом та ємністю бортового запам'ятовуючого пристрою [10]. Елементи масиву “штрафів” за енергоресурсом КА Δ_E визначаються за апріорною оцінкою витрат енергії при зйомці K -го об'єкта за виразом:

$$\delta_{EK} = t_{sK} E_K, \tag{4}$$

де t_{sK} – прогнозована тривалість можливого спостереження K -го об'єкта, с;

E_K – швидкість розрядки акумуляторних батарей з врахуванням можливості їх зарядки при спостереженні K -го об'єкта, Вт/с.

Масив “штрафів” за ємністю бортового запам'ятовуючого пристрою $\Delta_{ЗП}$ визначається виходячи із апріорної оцінки об'єму інформації, яка записується при спостереженні наземних об'єктів.

Повний об'єм інформації про визначені об'єкти спостереження можна визначити за виразом

$$J_{KCC} = J_E \cdot \frac{S_{KCC}}{S_{EL}}, \tag{5}$$

де J_E – об'єм інформації одного елемента розрізнення на місцевості, біт;

S_{KCC} – знята площа об'єкта спостереження, м²;

S_{Eli} – площа елемента розрізнення на місцевості, м².

З врахуванням виразу (5) елементи матриці «штрафів» за ємністю БЗП визначаються за правилом:

$$\delta_{зПК} = J_{кссК}, \quad (6)$$

де $J_{кссК}$ – апіорна оцінка об'єму інформації при спостереженні K -го об'єкта, біт.

Масиви обмежень розраховуються виходячи із технічних характеристик КА та радіолінії «борт-Земля».

Елементи масиву обмежень за енергоресурсом КА визначаються за виразом:

$$\theta_{EM} = E_{dj}, \quad (7)$$

де E_{dj} – допустима розрядка акумуляторних батарей на j -му витку, Вт;

а за ємністю БЗП:

$$\theta_l = t_{nl} V_{nl}, \quad (8)$$

де t_{nl} – тривалість l -го сеансу передачі інформації з КА на Землю, с;

V_{nl} – швидкість передачі спеціальної інформації під час проведення l -го сеансу передачі інформації з КА на Землю, біт/с.

Елементи матриці суміжності графової моделі знаходяться за наступним правилом

$$p_{nm} = \begin{cases} 1, & \text{якщо існують ребра, що з'єднують вершини } n \text{ і } m, \\ 0, & \text{– в іншому випадку.} \end{cases} \quad (9)$$

Вважатимемо, що ланка між вершинами n і m існує, якщо об'єкти можуть спостерігатися одночасно або час перенацілювання бортової апаратури з n -го об'єкта на m -ий менше прогнозованого проміжку часу між попаданням об'єктів до смуги огляду БСК. Під можливістю спостереження двох чи більше об'єктів одночасно розуміється те, що об'єкти одночасно потрапляють до смуги огляду бортової апаратури та необхідні режими роботи апаратури при спостереженні даних об'єктів сумісні між собою.

Можливість переорієнтації КА з одного об'єкта розвідки на інший в смузі огляду оцінюється виходячи з технічних характеристик бортової апаратури, орієнтації апаратури при спостереженні попереднього об'єкта та проміжку часу між прольотом КА над даними об'єктами. Ведення спостереження K -го об'єкта можливе при виконанні умови:

$$t_{nK} - t_{кК-1} \geq \frac{B}{\beta} + T_{an}, \quad (10)$$

де t_{nK} – початок спостереження K -го об'єкта, с;

$t_{кК-1}$ – кінець спостереження $(K-1)$ -го об'єкта, с;

B – кут між папрядком осі бортової апаратури на K -тий та $(K-1)$ -тий об'єкти, град.;

β – кутова швидкість переорієнтації осі бортової апаратури, град/с;

T_{an} – час підготовки апаратури до ввімкнення (при вимиканні її після зйомки $(K-1)$ -го об'єкта), с.

Алгоритм планування космічного радіолокаційного спостереження на основі графової моделі. Розроблений алгоритм ґрунтується на ідеї хвильового та жадібного алгоритмів [8]. Для роботи алгоритму створюється кілька допоміжних масивів: Q , E – масиви вершин, відповідні їм масиви довжин D , V , шляхів M_n , M_p і «штрафів» $R1_n$, $R2_n$. Перед початком роботи алгоритму всі допоміжні масиви є пустими.

Основні пункти алгоритму (рис. 1):

- вихідний граф G розбивається на підграфи G_k таким чином, щоб до одного підграфа входили вершини графа G , які мають однакові значення коефіцієнта пріоритетності;
- в підграфі з максимальним коефіцієнтом пріоритетності знаходять шлях мінімальної довжини з врахуванням обмежень;
- вершини підграфа G_k , що входять до знайденого шляху, включаються до масиву результуючого шляху M_p , а масиви обмежень θ_{EM} та θ_l коректуються відповідно до «штрафів», накладених на вибрані вершини;

- перевіряється умова закінчення алгоритму – переглянуті всі підграфи G_k ;
- вивід номерів вершин, які включені до результуючого масиву M_p .

При виконанні п. 2 розглянутого алгоритму задіяно допоміжний алгоритм знаходження мінімального шляху з врахуванням обмежень серед вершин з однаковим пріоритетом (рис. 2).



Рис.1

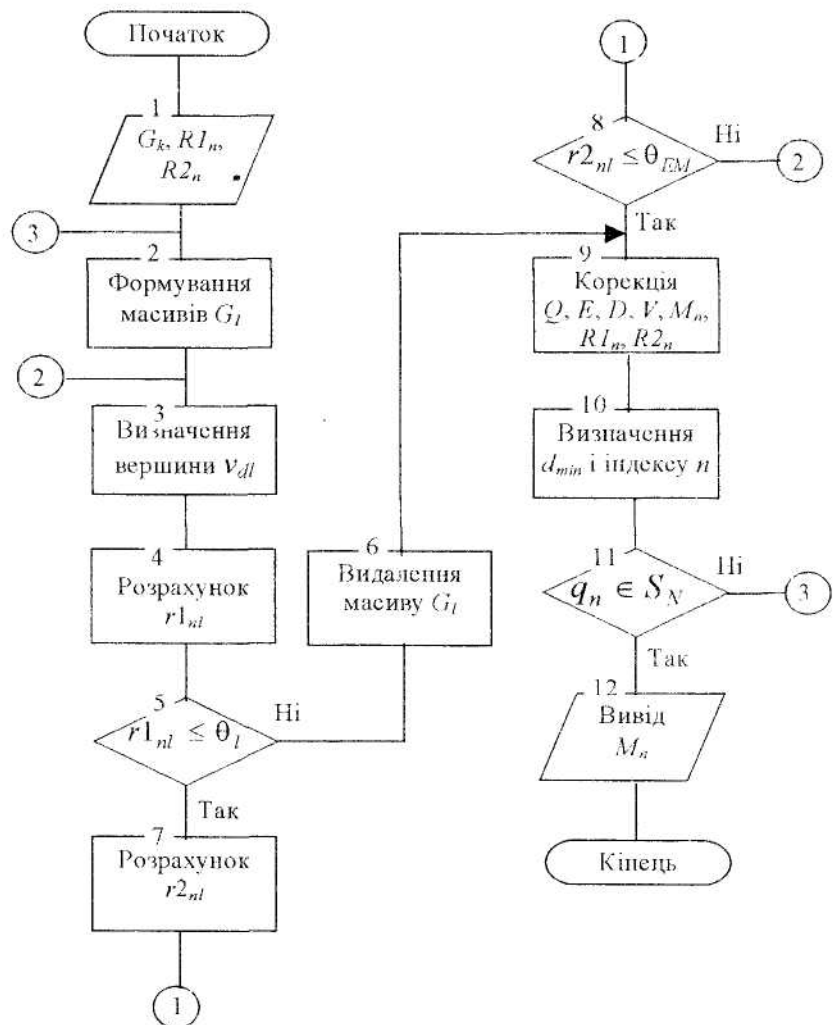


Рис.2

Робота даного алгоритму полягає в наступному.

1. Визначається значення масиву G_l як множина вершин підграфа G_k з мінімальною вагою, які входять до підмножин вершин S_1 та Z_l . Тобто виконується операція $G_l \subset (S_1 \cap Z_l)$, $l = 1, 2, \dots, L$, де L – кількість сеансів передачі спеціальної інформації на інтервалі планування. Для $l = 1, 2, \dots, L$ серед вершин підмножин G_l знаходяться вершини v_{dl} з мінімальною вагою.

2. Для кожної вибраної вершини $v_{dl} \in G_l$ знаходиться значення “штрафу” $r1_{nl}$ за виразом

$$r1_{nl} = r1_{n-1l} + r1_{v_{dl}}, \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad (11)$$

де $r1_{n-1l}$ – значення “штрафу” за ємністю запам’ятовуючого пристрою, який накладений на $n-1$ вершину, що включені до найкоротшого шляху;

$r1_{v_{dl}}$ – значення “штрафу” за ємністю запам’ятовуючого пристрою, який накладений на вершину v_{dl} .

3. Перевіряється умова $r1_{nl} \leq \theta_l$. Якщо умова виконується, то перехід до п. 4. В іншому випадку дана вершина та відповідний їй масив G_l виключається з подальшого розгляду.

4. Для кожної вершини $v_{dl} \in G_l$ знаходиться значення “штрафу” $r2_{nl}$ за виразом

$$r2_{nl} = r2_{n-1l} + r2_{v_{dl}}, \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad (12)$$

де $r2_{n-1l}$ – значення “штрафу” за витратами енергоресурсу, який накладений на $n-1$ вершину, що включені до найкоротшого шляху;

$r2_{v_{dl}}$ – значення “штрафу” за витратами енергоресурсу, який накладений на вершину v_{dl} .

5. Перевіряється умова $r2_{nl} \leq \theta_{EM}$. Якщо умова виконується, то вершина v_{dl} включається до масиву Q , її вага d заноситься до масиву D . В іншому випадку дана вершина виключається з подальшого розгляду і в масиві G_l вибирається наступна вершина з мінімальною вагою та перехід до п. 4.

6. Корекція масивів Q , G_l , D , M_n , $R1_n$, $R2_n$. У масиви шляхів M_n заносяться номери вершин, які включені до масиву Q ($n = \overline{1, |Q|}$). В масиви „штрафів” $R1_n$, $R2_n$ заносяться „штрафи” вершин масиву Q .

7. Вибрається вершина розгалуження. Для цього в масиві D визначається мінімальний елемент d і його індекс n . При цьому вершина, яка відповідає індексу n , виключається із масиву Q .

8. Перевіряється умова закінчення роботи алгоритму – вибрана вершина належить підмножині S_N . Якщо умова виконується, то виконується перехід до п. 10 алгоритму, в іншому випадку – до п. 9.

9. Знаходиться множина E вершин, які суміжні вибраній та входять до підмножини S_k . Формується масив їх ваг V як сума ваги вибраної вершини та d та здійснюється перехід до п. 2.

10. Виведення результату і кінець роботи алгоритму.

Результатом роботи розглянутого алгоритму є визначення послідовності та часу зйомки наземних об'єктів.

Оцінка точності та обчислювальної складності алгоритму. Оцінку точності розробленого алгоритму проведено у відповідності до наведених в [4] визначень: алгоритм називається точним, якщо на всіх допустимих наборах вхідних даних задачі він забезпечує отримання оптимального рішення.

Проведення імітаційного моделювання роботи розробленого алгоритму на спеціально сконструйованих вхідних даних і порівняння результатів з вирахованими “вручну” та методами повного та зрізаного переборів показали повну ідентичність отриманих результатів. На основі цього зроблено висновок, що розроблений алгоритм є точним.

Обчислювальна складність розробленого алгоритму лежить в межах $O(NM) \dots O(I^N)$ в залежності від характеру обмежень, де N – кількість об'єктів спостереження, M – кількість витків КА, l – кількість сеансів передачі інформації на Землю на інтервалі планування. Найменшу обчислювальну складність $O(NM)$ алгоритм має для об'єктів з різними пріоритетами, а $O(I^N)$ – з однаковим пріоритетом.

Для задач значної розмірності час розрахунків може перевищити відведений на планування час. В даних випадках рекомендується підграфи вершин з однаковими пріоритетами розбити на кілька додаткових підграфів, що дозволить зменшити обсяг розрахунків, проте призведе до зменшення точності алгоритму. Зменшити час розрахунків майже без втрати оптимального рішення можливо шляхом розробки та використання аналогових та цифрових моделей графів [11].

На рис. 3 наведено залежність часу розрахунку від розмірності задачі для методів повного та зрізаного переборів, а також розробленого алгоритму при умові спостереження однотипних об'єктів та при трьох сеансах передачі інформації на інтервалі планування.

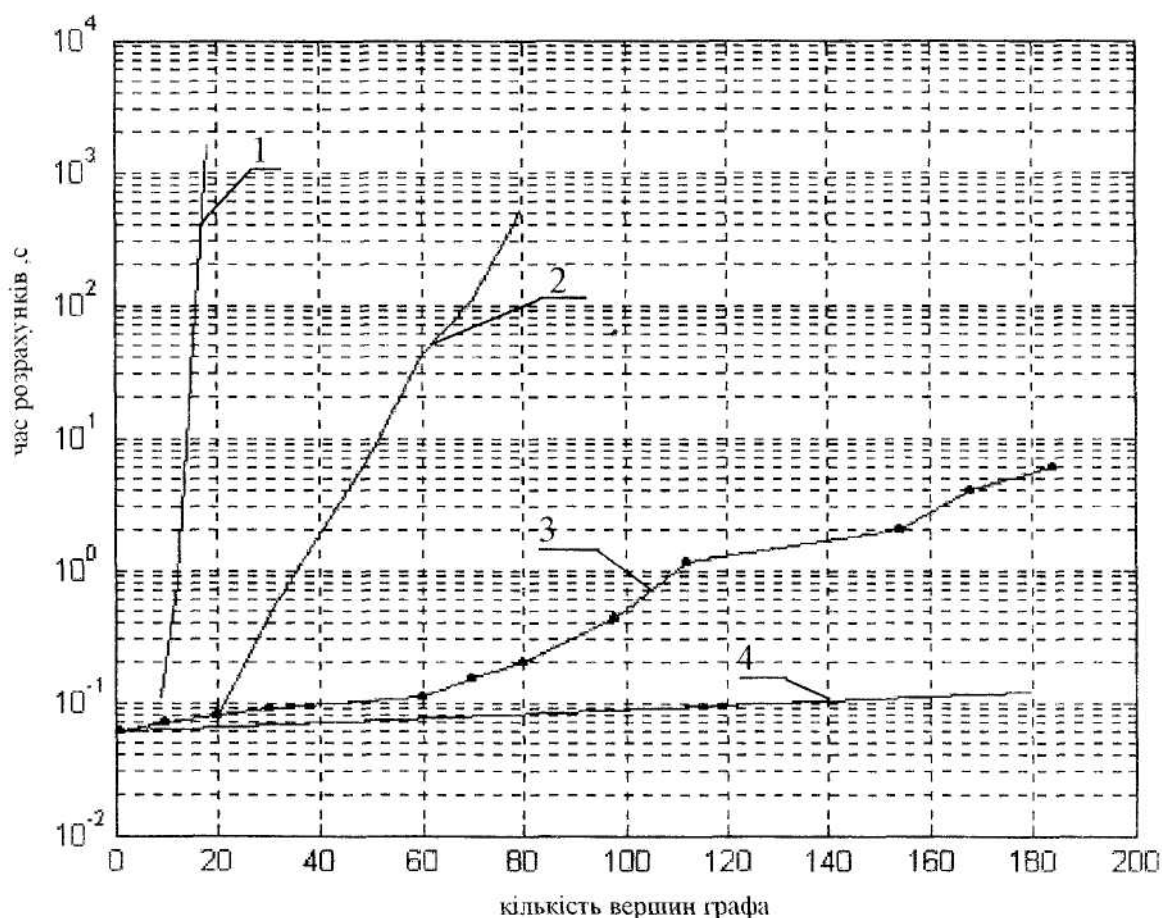


Рис. 3. Залежність часу розрахунку від розмірності задачі при різних методах дослідження графової моделі:

- 1 – повний перебір;
- 2 – зрізаний перебір;
- 3 – розроблений алгоритм;
- 4 – “жадібний” алгоритм

Для забезпечення достовірності моделювання всі досліджені методи реалізовані на одній мові програмування, та моделювання проводилося на одній ПЕОМ. Алгоритм протестовано на 50 різних наборах вхідних даних як цілочисельних, так і дробових. При кількості вершин у графі до 80 результати роботи алгоритму порівнювалися з результатами, отриманими повним та зрізаним переборами. При більшій кількості вершин результати роботи алгоритму порівнювалися з результатами роботи «жадібного» алгоритму при відсутності обмежень. В усіх випадках було отримано ідентичні результати.

Висновки.

1. Для задач, в яких на шляхи не накладаються додаткові обмеження, доцільно використовувати класичні алгоритми знаходження найкоротших шляхів у графі.
2. Для практичного застосування більш доцільним є розроблений алгоритм пошуку найкоротшого шляху в графі з урахуванням обмежень, який залежно від вхідних даних має обчислювальну складність $O(NM) \dots O(N^N)$.
3. Забезпечити необхідний час розрахунків можна шляхом штучного зменшення точності алгоритму, проте в усіх випадках точність його буде не нижчою, ніж у “жадібного” алгоритму.
4. Перспективним напрямком досліджень є розробка цифрових моделей графів на основі сучасної мікроелектроніки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Третя Загальнодержавна (Національна) космічна програма України на 2003–2007 роки. (Закон України №203–IV від 24.10.2002 року). – www.rada.gov.ua.
2. Кузьмин И.В. Оценка эффективности и оптимизация автоматических систем контроля и управления. – М.: Советское радио, 1971. – 296 с.
3. Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
4. Овчинников В.А. Алгоритмизация комбинаторно-оптимизационных задач при проектировании ЭВМ и систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 288 с.
5. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы. – М.: Мир, 1984. – 455 с.
6. Диниц Е.А. Экономные алгоритмы нахождения кратчайших путей в сети // Сб. трудов ВНИИ систем. исследований. – 1978. – № 4. – С. 36–44.
7. Майшика Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. – М.: Мир, 1981. – 323 с.
8. Липский В. Комбинаторика для программистов. – М.: Мир, 1988. – 213 с.
9. Г'яковський Д.В., Водоп'ян С.В., Дзюбчук Р.В. Формалізація задачі планування космічного радіолокаційного спостереження на основі графової моделі // Збірник наукових праць ХВУ "Системи обробки інформації". – Харків: ХВУ, 2004. – Випуск 7. – С. 185–193.
10. Баранов В.Л., Водоп'ян С.В., Дзюбчук Р.В. Підхід до побудови графової моделі планування космічного радіолокаційного спостереження // Збірник наукових праць. – Житомир: ЖВІРЕ, 2004. – Випуск № 8. – С. 66–73.
11. Васильев В.В., Баранов В.Л. Моделирование задач оптимизации и дифференциальных игр. – К.: Наукова думка, 1989. – 296 с.

ГУСИШН В'ячеслав Павлович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник начальника відділу Національного космічного агентства України.

Наукові інтереси:

– математичне моделювання динаміки польоту ракет-носіїв космічного призначення.

ВОДОП'ЯН Сергій Васильович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, заступник начальника наукового центру Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– алгоритми багатоканальних автоматичних систем управління та оцінювання.

ДЗЮБЧУК Роман Васильович – ад'юнкт Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– алгоритми автоматизованого планування радіолокаційного спостереження.

Подано 30.09.2004