

С.Ф. ТЕЛЕНИК, д-р техн. наук, зав. каф. НТУУ "КПІ" (м. Київ),
І.Ю. ГРИШИН, канд. техн. наук, доц. РВНЗ "КГУ" (м. Ялта)

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО ПОСЛІДОВНОГО ПЛАНУВАННЯ ВИМІРІВ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ В РЕЖИМІ СУПРОВОДЖЕННЯ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

У роботі розроблений метод квазіоптимального управління багатофункціональною радіолокаційною системою в режимі супроводження космічних об'єктів. Метод заснований на виводах і результатах аналізу раніше розробленого методу оптимального управління. Розглянуті випадки зображення моделі траєкторії поліномами другого і першого порядку. Для кожного випадку отримані вирази для формування управляючих дій. Лл.: 3. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: метод оптимального управління, багатофункціональна радіолокаційна система, режим супроводження космічних об'єктів, планування вимірів, поліном.

Постановка проблеми. Відомі методи оптимального управління радіолокаційною системою в режимі супроводження об'єктів [1 – 3]. Проте вони відрізняються значною складністю, високими вимогами до обчислювальних ресурсів для їх реалізації, неможливістю використання в системах управління реального часу. Тому необхідно розробити метод управління, що вимагає істотно менших обчислювальних витрат, який може бути реалізований в заданому часовому циклі системи управління реального часу.

Аналіз літератури. Відомий метод оптимального управління радіолокаційною системою в режимі супроводження [1], який досить детально досліджений в роботах [2, 3]. Для його розробки застосований математичний апарат принципу максимуму в матричній формі [4]. У вказаних роботах показана перевага методу оптимального управління відносно існуючих підходів до управління радіолокаційними системами в режимі супроводження. Недоліком даного методу є неможливість отримати аналітичне вирішення унаслідок нелінійності об'єкту управління. Розв'язання знаходиться методом послідовних наближень [5] і вимагає значних обчислювальних витрат, що не дозволяє застосувати його в системах управління реального часу. Слід зазначити, що результати, отримані в ході дослідження оптимальних методів, не противоречат выводам теорії планування експерименту [6], а доповнюють і розширюють її. Також слід врахувати ту обставину, що в кожному циклі потрібно вирішувати задачу бінарного лінійного програмування великої розмірності, для вирішення якої може бути застосований метод [7], проте він вимагає ще доопрацювання для можливого практичного використання. Дані обставини показують практичну неможливість використання оптимальних методів в системах управління реального часу.

Мета статті – запропонувати метод управління багатофункціональною радіолокаційною системою (МФ РЛС) в режимі супроводження космічних об'єктів, що практично реалізується в системах управління реального часу.

Вихідні передумови. Аналіз результатів функціонування оптимального алгоритму управління енергетичними ресурсами МФ РЛС в режимі супроводження, синтезованого і детально дослідженого в роботах [1 – 3], дозволив розробити запропонований метод оптимального послідовного планування вимірів.

Траєкторії руху космічних об'єктів (КО) відносяться до класу детермінованих функцій часу і параметрів. Параметри траєкторії руху КО і їх перші похідні оцінюються за результатами радіолокаційних спостережень, другі похідні визначаються безпосередньо з рівняння руху, а вищі похідні – визначаються шляхом послідовного диференціювання рівнянь руху [8]. У радіолокаційних системах для представлення траєкторії руху КО користуються поліномами другого степеня (квадратична траєкторія), а на обмеженому інтервалі спостереження поліномами першого степеня (лінійна траєкторія) [9].

Використовуючи метод, розглянутий в [2, 3] для квадратичного і лінійного зображення траєкторій КО, отримані оптимальні плани проведення вимірів. Аналіз цих планів дозволив виявити оптимальну структуру управління радіолокаційними спостереженнями.

Для квадратичного та лінійного зображення траєкторії КО, оптимальне управління вимірами має структуру, представлену відповідно на рис. 1 і рис. 2.

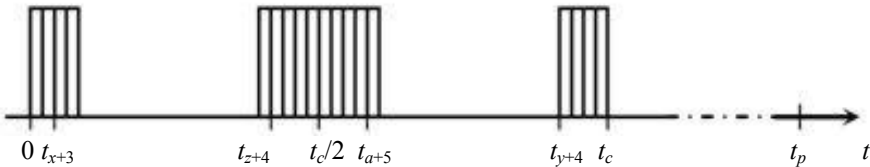


Рис. 1. Розподіл вимірів при квадратичній моделі траєкторії

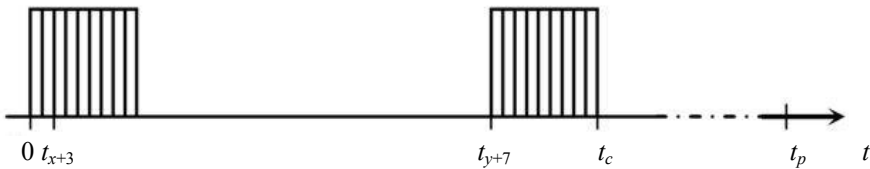


Рис.2. Розподіл вимірів при лінійній моделі траєкторії

З рис. 1 видно, що виміри групуються на кінцях інтервалу супроводження і біля його середини. З рис. 2 видно, що в разі використання лінійної моделі зображення траєкторії виміри групуються на кінцях інтервалу супроводження.

Виявлені закономірності є основою запропонованого методу.

Математична постановка задачі. Необхідно мінімізувати помилки оцінювання параметрів траєкторій всіх супроводжуваних КО на заданому рубежі [3]. Помилки оцінювання параметрів траєкторій КО задаються кореляційними матрицями $\Psi_i(t)$, $i=1, \dots, N$, де N – кількість супроводжуваних КО. Припустімо, що $\Psi_i(t_k/t_p)$ – величина приросту помилки по положенню у момент часу t_p (заданому рубежі), при призначенні в момент t_k зондування в напрямі i -го КО. Відповідно до [10] вираз для $\Psi_i(t_k/t_p)$ має вигляд

$$\Psi_i(t_k/t_p) = \Psi_i(t_p)\Phi^T(t_k - t_p)H^T [H\Phi(t_k - t_p)\Psi_i(t_p)\Phi^T(t_k - t_p)H^T + R_i]^{-1} H\Phi(t_k - t_p)\Psi_i(t_p), \quad (1)$$

де $\Psi_i(t_p) = \Phi(t_p)\Psi_i(0)\Phi^T(t_p)$;

$$\Phi(t_p) = \begin{Bmatrix} 1 & t_p \\ 0 & 1 \end{Bmatrix} - \text{оператор екстраполяції на момент часу } t_p;$$

$$\Psi_i(0) = \begin{Bmatrix} \sigma_{\dot{u}_0}^2 & K_{ui} \\ K_{ui} & \sigma_{\dot{u}_0}^2 \end{Bmatrix} - \text{кореляційна матриця помилок оцінювання}$$

параметрів траєкторії i -го КО у момент $t_k = 0$; де $\sigma_{\dot{u}_0}^2, \sigma_{\dot{u}_0}^2$ – дисперсії помилок оцінок координати і швидкості відповідно; K_{ui} – кореляційний момент;

$H = \begin{Bmatrix} 1 & 0 \end{Bmatrix}$ – лінійний оператор відповідності оцінюваних параметрів і вимірюваних координат;

$$R_i = \begin{Bmatrix} \sigma_{u_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{u_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{u_3}^2 \end{Bmatrix} - \text{кореляційна матриця помилок вимірів параметрів}$$

i -го КО. Тут $\sigma_{u_1}^2, \sigma_{u_2}^2, \sigma_{u_3}^2$ – дисперсії помилок виміру відповідних координат

КО. Дана матриця у випадку, що розглядається в статті, вироджується в дисперсію помилки виміру координати, тобто $R_i = \|\sigma_u^2\|$.

Кореляційна матриця помилок оцінювання положення i -го КО у момент часу t_p , з урахуванням того, що зондування проводиться в момент t_k , визначається наступною рекурентною процедурою

$$\Psi_i(t_p) = \Psi_i(t_p) - \Delta\Psi_i(t_p)\Phi^T(t_k/t_p). \quad (2)$$

Для вирішення завдання мінімізації помилок оцінювання положення всіх КО, супроводжуваних на рубежі, необхідно зазадати [2, 3]

$$\sum_{i=1}^N Sp[\Psi_i(t_p)] \Rightarrow \inf_{\langle u \rangle}, \quad (3)$$

при тих же обмеженнях, що і в [3].

Розробка методу. Використовуючи вираз (2), розв'язання задачі (3) може бути отримане у вигляді послідовної процедури, що вимагає на кожному кроці вибирати той, у якого

$$\max_i \left\{ Sp \left[H\Psi_i(t_k/t_p) \right] \right\}. \quad (4)$$

Враховуючи структуру оптимального вирішення, кожен крок пошуку складається з декількох моментів часу. Для квадратичного зображення траєкторії руху КО таких моментів чотири (t_x, t_y, t_z, t_a) . Вони показані на рис. 1. Для лінійного (рис. 2) – два (t_x, t_y) . На першому кроці $t_x = 0$, $t_y = t_c - \Delta T$, $t_z = t_c/2 - \Delta T$, $t_a = t_c/2$, де ΔT – задана дискретність вимірювань. На кожному кроці для цих моментів часу по кожному об'єкту формуються:

а) квадратичне зображення траєкторії КО $\Delta\Psi_i(t_x/t_p)$, $\Delta\Psi_i(t_y/t_p)$, $\Delta\Psi_i(t_z/t_p)$, $\Delta\Psi_i(t_a/t_p)$;

б) лінійне зображення траєкторії КО $\Delta\Psi_i(t_x/t_p)$, $\Delta\Psi_i(t_y/t_p)$.

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_i(t_x) &= Sp[H\Psi_i(t_x/t_p)H^T], \\ \Delta\Phi_i(t_y) &= Sp[H\Psi_i(t_y/t_p)H^T], \end{aligned}$$

$$\Delta\varphi_i(t_z) = Sp[H\Psi_i(t_z/t_p)H^T],$$

$$\Delta\varphi_i(t_a) = Sp[H\Psi_i(t_a/t_p)H^T].$$

З сукупності значень $\Delta\varphi_i$, на кожному кроці, проводиться вибір максимального, яке визначить номер КО і момент його зондування:

а) квадратичне зображення траєкторії КО

$$u_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \Delta\varphi_i^*(t_k) = \max_i [\Delta\varphi_i(t_x), \Delta\varphi_i(t_y), \Delta\varphi_i(t_z), \Delta\varphi_i(t_a)], \\ 0, & \text{для всіх остальных } i. \end{cases} \quad (5)$$

б) лінійне зображення траєкторії КО

$$u_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \Delta\varphi_i^*(t_k) = \max_i [\Delta\varphi_i(t_x), \Delta\varphi_i(t_y)], \\ 0, & \text{для всіх інших } i. \end{cases} \quad (6)$$

Вибором моменту часу виміру на попередньому кроці визначаються моменти часу на наступний крок:

а) квадратичне зображення траєкторії КО

$$(t_{x+1}, t_{y+1}, t_{z+1}, t_{a+1}) = \begin{cases} (t_x + \Delta T, t_y, t_z, t_a), & \text{если } t_k = t_x, \\ (t_x, t_y - \Delta T, t_z, t_a), & \text{если } t_k = t_y, \\ (t_x, t_y, t_z - \Delta T, t_a), & \text{если } t_k = t_z, \\ (t_x, t_y, t_z, t_a + \Delta T), & \text{если } t_k = t_a; \end{cases} \quad (7)$$

б) лінійне зображення траєкторії КО

$$(t_{x+1}, t_{y+1}) = \begin{cases} (t_x + \Delta T, t_y), & \text{если } t_k = t_x, \\ (t_x, t_y - \Delta T), & \text{если } t_k = t_y. \end{cases} \quad (8)$$

Процес продовжується, поки не буде вичерпаний весь ресурс, виділений на режим супроводження.

Результати моделювання. Шляхом математичного моделювання досліджувалася робота оптимального методу планування вимірів [3], розробленого на основі принципу максимуму Понтрягіна (метод 1), і запропонованого в даній статті (метод 2). Результати порівняльного аналізу цих методів приведені на рис. 3.

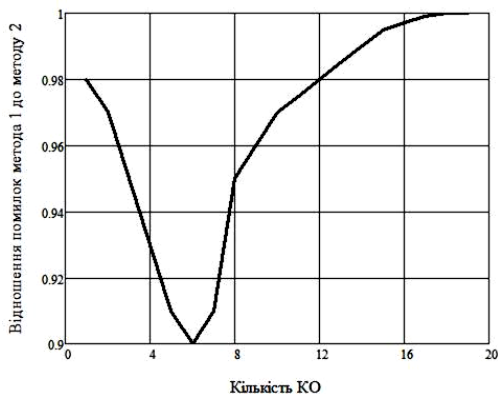


Рис. 3. Порівняння помилкових характеристик методів 1 і 2

Висновки. В результаті виконаної роботи розроблений метод послідовного планування вимірів МФ РЛС, який при чималій кількості супроводжуваних КО не поступається оптимальному методу, проте вимагає істотно менших обчислювальних ресурсів і може знайти застосування в системах управління реального часу.

Список літератури: 1. Гришин, І.Ю. Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом / І.Ю. Гришин, М.К. Можар, В.И. Есин // Тезиси докладов 2-й Всесоюзной научно-технической конференции. – Туапсе, 1991. – С. 48–49. 2. Гришин І.Ю. Проблеми управління зенітними ракетними комплексами / І.Ю. Гришин, М.К. Можар, В.М. Решетник // Наука и оборона. – 1994. – Вып. 3. – С. 27–32. 3. Гришин І.Ю. Метод оптимального распределения энергетических ресурсов многопозиционного радиолокационного комплекса при сопровождении воздушных объектов / І.Ю. Гришин // V International Conference “Strategy of Quality in Industry and Education”, June 6 – 13, 2009, Varna, Bulgaria, Proceedings, Vol. II. – International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus, Special number. – P. 532–534. 4. Athans M. The matrix minimum principle. Massachusetts Institute of Technology Electronic Systems Laboratory Report ESL-R-317, Cambridge, Massachusetts, 1967. – 19 p. 5. Крылов И.А. Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления / И.А. Крылов, Ф.Л. Черноусько // Журн. вычислит. мат. и мат. физ. – 1972. – Т. 12. – № 1. – С. 14–34. 6. Математическая теория планирования эксперимента. Серия: Справочная математическая библиотека. Под ред. С.М. Ермакова. – М.: Наука, 1983. – 392 с. 7. Grishin I. Linear programming: a new polynomial-time algorithm / I. Grishin, G. Potapov // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – № 1 (107). – 2007. – С. 113–119. 8. Саврасов Ю.С. Методы определения орбит космических объектов / Ю.С. Саврасов. – М.: Машиностроение, 1981. – 174 с. 9. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю.С. Саврасов. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с. 10. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.

УДК 681.518.25

Метод оптимального последовательного планирования измерений многофункциональной радиолокационной системы в режиме сопровождения космических объектов / Гришин І.Ю. // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2009. – № 43. – С. 184 – 190.

В работе разработан метод квазиоптимального управления многофункциональной радиолокационной системой в режиме сопровождения космических объектов. Метод основан на выводах и результатах анализа ранее разработанного метода оптимального управления. Рассмотрены случаи представления модели траектории полиномами второго и первого порядка. Для каждого случая получены выражения для формирования управляющих воздействий. Ил.: 3. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: метод оптимального управления, многофункциональная радиолокационная система, режим сопровождения космических объектов, планирование измерений, полином.

UDC 681.518.25

Method of measurements optimum consecutive planning of the multipurpose radar-tracking system in the mode of space objects support / Grishin I.J. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2009. – №. 43. – P. 184 – 190.

In paper the method of quasioptimum control by the multifunctional radar-tracking system in a mode of space objects support is developed. The method is grounded on outputs and results of the analysis before the developed method of optimum control. Cases of representation of trajectory model are considered by polynomials of the second and first order. For each case expressions for creation of control actions are received. Figs: 3. Refs: 10 titles.

Keywords: method of optimum management, multifunction radio-location system, mode of accompaniment of space objects, planning measurings, polynomial.

Поступила в редакцию 10.09.2009