

А.А. Завада, к.т.н.

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова  
Національного авіаційного університету

### МЕТОДИКА УТОЧНЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦІЛЬОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

*У статті розглядається задача уточнення параметрів руху космічних апаратів оптико-електронного спостереження з використанням цільової інформації. Пропонується методика, за допомогою якої можна здійснювати автономну навігацію космічних апаратів. Особливістю запропонованої методики є застосування нелокального підходу до мінімізації цільової функції на основі методу Нелдера–Міда, що дозволяє розширити область збіжності задачі та отримувати більше корисної інформації про шуканий мінімум при малому об'ємі вимірювальної інформації.*

**Вступ. Постановка проблеми.** Однопунктна технологія управління обумовлює відносно низьку оперативність визначення параметрів руху космічних апаратів (КА) наземними засобами та необхідність прогнозу цих параметрів на значних інтервалах часу до наступного циклу їх уточнення. Просторові похибки оцінки положення КА оптико-електронного спостереження (ОЕС) на інтервалі прогнозу між вказаними циклами у проекції на земну поверхню можуть перевищувати розміри полів зору цільової апаратури, що не дозволяє зняти запланований район.

Вирішальну роль у механізмі створення похибки оцінки параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів, поряд з похибками самих вимірів, відіграють похибки моделі руху, які виникають через неточність описання зв'язків між вимірювальними величинами та оцінюваними параметрами. Ці похибки залежать від часового інтервалу між моментом вимірювання і моментом оцінювання параметрів руху КА. Даний часовий інтервал визначається технологічним циклом балістико-навігаційного забезпечення (БНЗ) управління КА і обумовлений накопиченням необхідного об'єму траєкторних вимірів для збіжності алгоритму оцінювання початкових умов руху супутника. Відповідно до штатного циклу БНЗ накопичення траєкторних вимірів проводиться на 6 мірних витках. При меншому (скороченому, порівняно зі штатним) об'ємі вимірювальної інформації штатні методи оцінювання чи не дозволяють отримати розв'язок, чи точність оцінки може бути недостатньою для виконання цільового завдання КА ОЕС.

Для зйомки запланованого району спостереження з високим розрізненням необхідно проводити уточнення параметрів руху КА якомога ближче за часом до моменту зйомки, що дозволяє зменшити вплив похибок моделі руху КА. Одним зі шляхів підвищення оперативності уточнення параметрів руху КА є здійснення його автономної навігації, яка потребує залучення додаткової вимірювальної інформації.

**Аналіз та постановка завдання.** З аналізу літературних джерел встановлено, що більшість із запропонованих підходів підвищення точності навігації КА спрямовано на отримання траєкторних вимірів шляхом залучення додаткових засобів. Так широко відомі підходи, засновані на використанні супутникових навігаційних систем, супутників-ретрансляторів для передачі вимірювальної інформації за відсутності КА в зоні радіовидимості наземних засобів, організації псевдосупутникової навігації [1, 2]. Недоліками таких підходів є складність комплексної обробки вимірювальної інформації, отриманої різними засобами, та значні фінансові витрати. Крім того, не завжди можливо використати інформацію супутникових радіонавігаційних систем з технічних або організаційних причин [1–3].

Головне протиріччя при підвищенні точності навігації КА в умовах однопунктної технології управління полягає в необхідності скорочення часового інтервалу прогнозування для забезпечення необхідної точності балістичних розрахунків, з одного боку, та збільшенні часу накопичення необхідного об'єму траєкторних вимірів (часового інтервалу прогнозування) для забезпечення збіжності крайової задачі, з іншого боку.

Одним зі шляхів підвищення точності навігації КА при неможливості використання інформації супутникових навігаційних систем є здійснення автономної навігації КА ОЕС з використанням цільової інформації (використання так званих оптичних траєкторних вимірів). Вимірами поточних навігаційних параметрів виступають координати прив'язки отриманих знімків до еталонної карти оптичного поля. Однак такий спосіб навігації істотно обмежує об'єм траєкторних вимірів, що пов'язано з просторово-часовою нестаціонарністю оптичних полів та обмеженістю районів земної поверхні, придатних до ефективного розв'язання кореляційно-екстремальної задачі з прив'язки отриманих знімків.

Таким чином, для здійснення уточнення параметрів руху КА ОЕС з використанням цільової інформації постає питання розробки алгоритму визначення параметрів руху КА за скороченим об'ємом траєкторних вимірів.

**Викладення основного матеріалу.** Структурно алгоритм визначення параметрів руху КА з використанням цільової інформації зображень на рисунку 1.

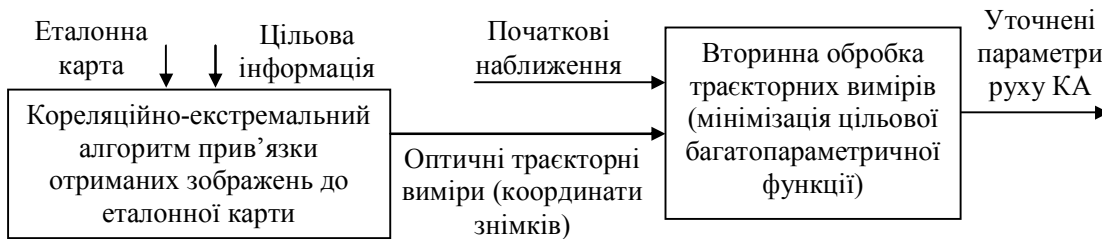


Рис. 1. Схема визначення параметрів руху КА

Для розв'язання задачі прив'язки зображень до еталонної карти застосовують кореляційно-екстремальні методи [4], які базуються на спектральному аналізі та моделях просторового розподілу інтенсивності навігаційного поля. Однак у багатьох випадках, особливо під час обробки полів, що містять довгі об'єкти, другий підхід дає кращі результати, порівняно з багатовимірним спектральним аналізом [4, 5].

Розглянемо прив'язку отриманого зображення (розміром  $N \times N$ ) до еталонного поля у двовимірному (розміром  $M \times M$ ) та тривимірному (розміром  $M \times M \times M$ ) випадках. Розмір зображення значно менший за розмір еталонної моделі.

Пристрій вимірювання навігаційного поля жорстко закріплений на КА, який здійснює два види керованого руху: поступальний – центра мас та обертальний – відносно центра мас.

Крім того, на платформу діють збурюючі фактори, які призводять до зсуву платформи як по кутових  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$ , так і по лінійних  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  координатах. Унаслідок чого виникає відхилення поточного положення платформи від прогнозованого.

Необхідно визначити оцінку величин  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  (для поверхневого поля) і  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  (для просторового поля), які характеризують зсув поточного зображення відносно еталона (рис. 2), що дає можливість оцінити положення КА на орбіті.

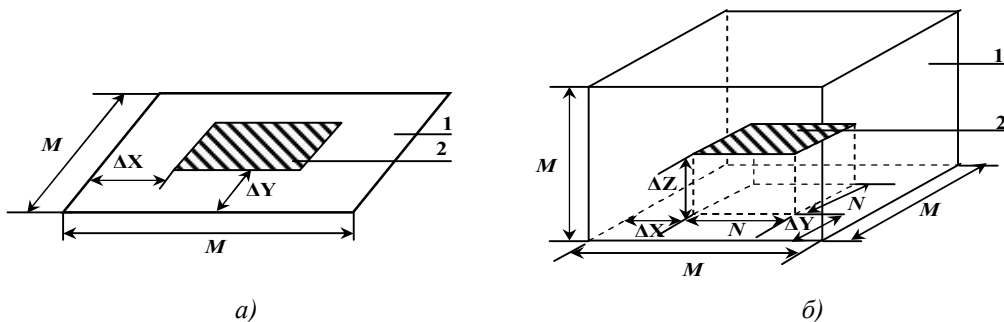


Рис. 2. Ілюстрація прив'язки еталонного та виміряного навігаційних полів:

а – двовимірний зсув; б – тривимірний зсув;

1 – еталонна модель поля; 2 – поточний вимір навігаційного поля

Розв'язання кореляційно-екстремальної задачі на борту КА є достатньо складним як з алгоритмічної, так і з технічної точок зору. Слід також зазначити, що на земній кулі існує не так багато районів, над якими прозорість атмосфери не гірше 2 балів, що відповідає умовам проведення якісної зйомки земної поверхні [5]. Таким чином, враховуючи швидкості руху КА та просторово-часову нестаціонарність оптичного поля, можна отримувати достатньо обмежений об'єм вимірювальної інформації.

Результати проведеного аналізу штатного алгоритму оцінки параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів та практика БНЗ управління супутниками “Січ-1”, “Океан-О”, “АУОС-СМ-КФ” показали, що при скороченому об'ємі траєкторних вимірів та значних відхиленнях початкових наближень штатний алгоритм не забезпечує потрібної точності оцінки параметрів руху КА або взагалі не дозволяє отримати розв'язок через погану обумовленість задачі оцінювання.

Відповідно до принципу найменших квадратів оцінки параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів визначаються з умови:

$$F(\tilde{q}) = \sum_{i=1}^n \left( d_i(t) - \tilde{d}_i(\tilde{q}, t) \right)^2 \Rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $\tilde{q} = \{\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{V}_x, \tilde{V}_y, \tilde{V}_z\}$  – вектор початкових умов руху КА в гринвіцькій системі координат;

$d_i(t)$  – траекторний вимір, отриманий у момент часу  $t_i$ ;

$\tilde{d}_i(\tilde{q}, t)$  – розрахункове значення траекторного виміру, отримане за допомогою прогнозування руху КА з використанням моделі руху КА.

Найбільш загальними методами мінімізації виразу (1) є методи перебору значень аргументів та градієнтні методи.

Для мінімізації цільової багатопараметричної функції (1) у штатному алгоритмі використовується градієнтний метод Ньютона, який спирається на локальні (в околицях поточної точки) лінійні моделі цільової функції. Перевагами методу Ньютона є відносно проста обчислювальна схема та квадратична збіжність в області розв'язку. Недоліки методу Ньютона: лінеаризація цільової функції, яка обумовлює додаткові похибки оцінювання параметрів руху КА; локальність підходу обумовлює критичність методу до точності початкового наближення, що не дозволяє ефективно використовувати штатний алгоритм при значних відхиленнях розрахункових параметрів орбіти від дійсних. Для відносно непродуктивних електронно-обчислювальних машин (ЕОМ), на які розраховувалися штатні алгоритми БНЗ, та при невисоких вимогах до точності результатів оцінювання  $\tilde{q}$  переваги методу Ньютона мають вирішальне значення. Враховуючи зростання продуктивності сучасних ЕОМ, а також зростання вимог за точністю розв'язання задач БНЗ для КА ОЕС, необхідно використовувати методи мінімізації, що позбавлені вказаних недоліків.

У роботі проведений порівняльний аналіз таких методів оптимізації: методу Ньютона, простої ітерації, січної, найскорішого спуску, Гауса–Зайделя (покоординатного спуску), Хука–Дживса (прямого пошуку) та Нелдера–Міда (деформівного багатогранника). Аналіз проводився за критеріями: швидкість збіжності, обчислювальна ефективність, точність початкових наближень, розмірність вектора початкових наближень, розрахунок похідних, критичність до об'єму вимірювальної інформації, потенційна точність результату. Результати аналізу свідчать про те, що при малому об'ємі траекторних вимірів та значних відхиленнях вектора початкових наближень від реальних параметрів руху в умовах однопунктної технології управління для мінімізації функції (1) доцільно використовувати нелокальні підходи, що дозволяють отримати максимально можливу кількість інформації про цільову функцію [6, 7].

Враховуючи переваги методу Нелдера–Міда (простота реалізації, відсутність лінеаризації цільової функції, властивість області деформівного багатогранника вироджуватися в точку лише при досягненні мінімуму цільової функції), його обчислювальна схема взята за основу при розробці збіжного алгоритму оцінювання параметрів руху КА за скороченим об'ємом траекторних вимірів. Збіжність покращується завдяки тому, що на самому початку мінімізації вдається отримати суттєвий об'єм відносно цільової функції за рахунок розглядання великої кількості вершин області початкових наближень, на кожному етапі оптимізаційного пошуку інформація, необхідна для реалізації чергової ітерації, отримується за рахунок розгляду 7 вершин даної області.

Розроблена методика уточнення параметрів руху КА ОЕС з використанням цільової інформації містить такі етапи:

1. Отримання оптичних траекторних вимірів (прив'язка отриманих знімків до еталонної карти шляхом розв'язання кореляційно-екстремальної задачі).

2. Побудова області початкових наближень.

Для застосування методу оптимізації Нелдера–Міда необхідно  $w = 7$  значень вектора початкових наближень (на одиницю більше кількості оцінюваних параметрів). Для формування області початкових наближень пропонується два підходи: перший – область початкових наближень формується відповідно до граничних значень похибок виведення КА на орбіту (при первинному визначенні параметрів руху після запуску); другий – область формується відповідно до максимального відхилення розрахункового часу знаходження КА в точці траверзу від моменту часу, визначеного за результатами сеансу зв'язку з КА.

Таким чином, область початкових наближень має вигляд:

$$\tilde{Q}_{np}^{(k)} = \{\tilde{q}_{np1}^{(k)}, \dots, \tilde{q}_{np7}^{(k)}\},$$

де  $\tilde{q}_{npw}^{(k)} = \{\tilde{x}_{npw}^{(k)}, \tilde{y}_{npw}^{(k)}, \tilde{z}_{npw}^{(k)}, \tilde{V}_{x_{npw}}^{(k)}, \tilde{V}_{y_{npw}}^{(k)}, \tilde{V}_{z_{npw}}^{(k)}\}$ ;

$w = \overline{1,7}$  – індекс відповідної вершини області початкових наближень;

$k$  – номер ітерації.

3. Обчислення мінімізованої функції відповідно до методу найменших квадратів для всіх вершин області початкових наближень:

$$F_w^{(k)}(\bar{q}_{npw}^{(k)}) = \sum_{i=1}^n (d_i - \tilde{d}_i(\bar{q}_{npw}^{(k)}))^2, \quad w = \overline{1,7}, \quad (2)$$

де  $\tilde{d}_i(\bar{q}_{npw}^{(k)})$  – розрахункові значення вимірюваного параметра.

4. Визначення  $\bar{q}_{\min}^{(k)}$  та  $\bar{q}_{\max}^{(k)}$  – вершин області початкових наближень, у яких функція (2) набуває відповідно найменшого і найбільшого значень.

5. Визначення центра тяжіння всіх вершин, виключаючи  $\bar{q}_{\max}^{(k)}$ :

$$\tilde{q}_{cj}^{(k)} = \frac{1}{6} \left[ \left( \sum_{w=1, i \neq h}^7 \tilde{q}_{npw, j}^{(k)} \right) \right], \quad j = \overline{1,6},$$

де індекс  $j$  означає координатний напрямок;  $h$  – номер вершини  $\bar{q}_{\max}^{(k)}$ .

6. Перевірка умови закінчення пошуку:

$$\left\{ \frac{1}{7} \sum_{w=1}^7 [F_w(\tilde{q}_{npw}^{(k)}) - F(\tilde{q}_c^{(k)})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \varepsilon, \quad (3)$$

де  $\varepsilon$  – порогове значення критерію закінчення пошуку;

$F(\tilde{q}_c^{(k)})$  – значення цільової функції в центрі тяжіння.

Від величини  $\varepsilon$  залежить кількість ітерацій  $k$  при пошуку мінімуму цільової функції (1), а також точність знаходження даного мінімуму. При виборі значення величини  $\varepsilon$  необхідно враховувати, що через неминучу наявність систематичних і випадкових похибок нульове значення мінімізованої функції не може бути досягнуте, отже, недоцільно задавати дуже мале значення  $\varepsilon$ . Результати досліджень показали, що кращим, з погляду обчислювальних витрат і точності одержуваного розв’язку, є значення  $\varepsilon = 10^{-7}$ .

7. Якщо умова закінчення пошуку (3) не виконується, то відповідно до методу Нелдера–Міда здійснюється перетворення області початкових наближень  $\bar{Q}_{np}^{(k)}$  із застосуванням однієї з операцій: віддзеркалення, розтягнення, стиснення і редукція. Потім робота алгоритму повторюється з п. 3, при цьому  $k = k + 1$ .

У результаті роботи алгоритму мінімізації область початкових наближень стискається, наближаючись до точки з мінімальним значенням функції (2). Тобто в результаті мінімізації отримуємо:

$$\bar{q}_{npL} = \arg \min_{\bar{q}_{np} \in \bar{Q}_{np}} \sum_{i=1}^n [d_i - \tilde{d}_i(\bar{q}_{np})]^2,$$

де  $\bar{q}_{npL} = \bar{q}$  – результат уточнення параметрів руху КА на момент часу  $t_0$ .

За допомогою імітаційного моделювання здійснена оцінка незміщеності розробленої методики уточнення параметрів руху КА. Під незміщеністю методики розуміється те, що за відсутності систематичних та випадкових похибок ( $\eta = \xi = 0$ ) оцінка  $\bar{q}$  наближається до точного значення  $\bar{q}^*$ . Результати оцінки наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Оцінка незміщеності розробленої методики

Координати КА	Дійсні ПУ $\bar{q}^*$	Уточнені ПУ $\bar{q}$	Відхилення $ \Delta \bar{q} $
x, км	6003,214325	6003,214272	0,000053
y, км	3623,164556	3623,164642	0,000086
z, км	0,000000	0,000030	0,000030

Значення відхилень  $|\Delta \bar{q}|$  характеризують потенційну точність розробленої методики уточнення параметрів руху КА. З аналізу отриманих даних видно, що просторовий зсув положення КА за відсутності похибок траєкторних вимірів і моделі не перевищує розмірів самого КА.

В роботі проведені експериментальні дослідження розробленої методики. На рисунку 3 наведена візуалізація процесу уточнення параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів при різних відхиленнях початкових наближень від шуканого результату з використанням штатного алгоритму і розробленої методики.

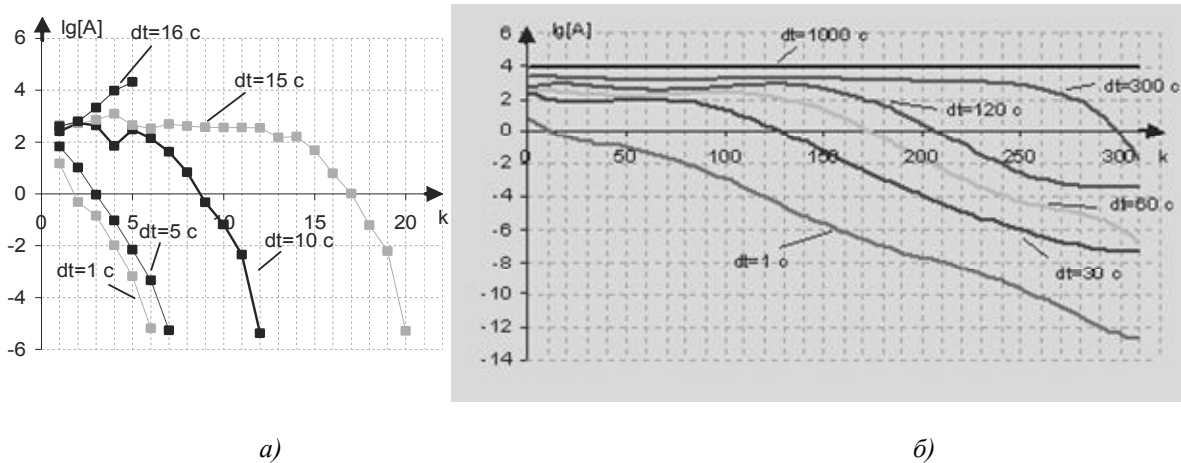


Рис. 3. Збіжність процесу оцінювання параметрів руху КА: а) на основі методу Ньютона; б) на основі методу Нелдера–Міда

На рисунку 3 використані позначення:  $k$  – кількість ітерацій процесу мінімізації цільової функції;  $dt$  – часове відхилення вектора початкових наближень від результату уточнення, яке характеризує розміри області збіжності;  $A = |\vec{q}^* - \vec{q}|$ .

З аналізу отриманих результатів видно, що штатний алгоритм має значно більшу швидкість збіжності, проте розроблена методика має істотно ширшу область збіжності, що дозволяє успішно розв’язувати задачі визначення початкових умов руху КА при значних відхиленнях розрахункових параметрів орбіти від реальних, що підтверджує теоретичні положення.

В роботі також проведені дослідження з організації автономної навігації КА ОЕС з використанням цільової інформації на основі розробленого алгоритму. Траекторними вимірами виступають координати прив’язки знімків високої розрізненості. Результати оцінки параметрів руху КА з використанням цільової інформації наведені в таблиці 2. У розрахунках були використані початкові дані: середньоквадратичне відхилення похибок визначення геодезичної широти та довготи знімків  $\sigma_B = \sigma_L = 4,3$  м; отримані 3 знімки з координатами (7,2240; 47,3710), (32,8070; 49,5070), (57,8050; 206,6080), координати знімків мають північну широту.

Таблиця 2

Результат оцінки параметрів руху КА

Показник	Час, с	Вздовж орбіти, км	За радіусом, км	По боку, км
Відхилення $ \Delta \vec{q} $	0,021	0,157095	0,015110	0,032898

З аналізу отриманих результатів видно, що застосування розробленої методики уточнення параметрів руху КА дозволяє отримати результат за скороченим об’ємом оптичних траекторних вимірів, при цьому точність оцінки відповідає точнісним вимогам для зйомки запланованого району спостереження перспективним КА ОЕС “Січ-3”.

**Висновки.** В роботі наведено результати вирішення актуального наукового завдання, яке полягає в розробці методики уточнення параметрів руху КА ОЕС з використанням цільової інформації в умовах однопунктної технології управління за скороченим об’ємом траекторних вимірів.

Розроблена методика заснована на нелокальному оптимізаційному підході, що дозволяє отримати максимально можливу кількість інформації про цільову функцію, це дає можливість оцінити параметри орбіти супутника за скороченим об’ємом траекторних вимірів. Відсутність лінеаризації цільової функції дозволяє підвищити гарантовану точність навігації КА ОЕС.

Застосування методики уточнення параметрів руху КА за скороченим об’ємом траекторних вимірів дозволяє підвищити гарантовану точність оцінки положення КА на момент виконання цільового завдання за рахунок зменшення впливу похибок моделі руху шляхом скорочення часу між циклами уточнення параметрів руху КА.

Розроблена методика дозволяє у 2 рази підвищити оперативність отримання оцінки початкових умов руху КА шляхом зменшення об’єму вимірювальної інформації, що необхідна для збіжності методу обробки траекторних вимірів.

Розроблена методика дозволяє в разі розширити область збіжності, виражену у відхиленні часових параметрів початкових наближень від шуканих оцінок, порівняно зі штатним алгоритмом, що дозволяє

використовувати її при первинному визначенні параметрів руху КА після виведення на орбіту при значних відхиленнях реальних параметрів орбіти від розрахункових в умовах непрацездатності штатного алгоритму.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Иванов Н.М.* Баллистика и навигация космических аппаратов : учеб. / *Н.М. Иванов.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2004. – 544 с.
2. *Ястребов В.Д.* Исследование методических проблем и разработка алгоритмов баллистического обеспечения управления КА при использовании однопунктной схемы измерений / *В.Д. Ястребов.* – М. : ЦНИИМАШ, 1993. – 174 с.
3. *Черный И.* США обеспокоены китайскими планами / *И.Черный*// Новости космонавтики. – 2003. – № 10. – С. 23.
4. Совмещение изображений в условиях неопределенности / *В.А. Андросов, Ю.В. Бойко, А.М. Бочкарев, А.П. Однорог* // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – № 4. – С. 54–70.
5. *Лебедев А.А.* Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование / *А.А. Лебедев, О.П. Нестеренко.* – М. : Машиностроение, 1991. – 346 с.
6. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование / *Д.Химмельблау.* – М. : Мир, 1975. – 534 с.
7. *Немировский А.С.* Сложность задач и эффективность методов оптимизации / *А.С. Немировский, Д.Б. Юдин.* – М. : Наука, 1980. – 429 с.

ЗАВАДА Андрій Анатолійович – кандидат технічних наук, начальник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- автоматизована обробка інформації у складних інформаційних системах;
- технічний захист інформації в автоматизованих системах.

Подано 22.07.2010

**Завада А.А.** Методика уточнення параметрів руху космічних апаратів оптико-електронного спостереження з використанням цільової інформації

**Завада А.А.** Методика уточнення параметрів руху космічних апаратів оптико-електронного спостереження з використанням цільової інформації

**Zavada A.A.** Method motion determination parameters of optical-electronic supervision spaces vehicles with using a special purpose information

УДК 621.396.969

**Методика уточнення параметрів руху космічних апаратів оптико-електронного спостереження з використанням цільової інформації / А.А. Завада**

В статье рассматривается задача уточнения параметров движения космических аппаратов оптико-електронного наблюдения с использованием целевой информации. Предлагается методика, с помощью которой можно осуществлять автономную навигацию КА. Особенностью методики является применение нелокального подхода к минимизации целевой функции на основе метода Нелдера-Мида, что позволяет расширить область сходимости задачи и получать больше полезной информации про искомый минимум при малом объеме измерительной информации.

УДК 621.396.969

**Method motion determination parameters of optical-electronic supervision spaces vehicles with using a special purpose information / A.A. Zavada**

The article examined the task of clarification of motion parameters of optical-electronic supervision spaces vehicles with the using a special purpose information. An method by means of which it is possible to realize self-navigation of spaces vehicles is offered. The feature of method is application of unlocal approach to minimization of a special purpose function on the basic of Nelder-Mideis method, that allows to extend the convergence region of algorithm and get more useful information about the sought minimum having the small volume of measuring information.