УДК 623.462.22: 621.371.332.4

М.В. Бархударян, К.К. Кулагін, О.М. Мішуков, Б.О. Чумак

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПЕРСПЕКТИВНИЙ МЕТОД ОБРОБКИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ПОЛІГОННИХ ВИПРОБУВАННЯХ

Запропоновані математичні моделі, які дозволять забезпечити отримання максимального обсягу вимірювальної інформації заданої вірогідності за визначений термін контролю та управління об'єктами. Отримані рівняння для оцінки вектору стану об'єкту ОВТ і для точності даної оцінки.

Ключові слова: *точність вимірювань, полігонний вимірювально-обчислювальний комплекс, оцінки траєкторії, функціонал якості.*

Вступ

Постановка проблеми та аналіз літератури. Проведення льотних випробувань зразків озброєння та військової техніки (ОВТ), особливо за необладнаними трасами, вимагає за досить короткий термін спостерігання об'єкта випробувань (або об'єкта навігації) отримати необхідну кількість достовірної вимірювальної інформації, щоб в кінцевому підсумку одержати знову ж таки достовірні оцінки тактико-технічних характеристик випробуваного зразка ОВТ.

При цьому ми приходимо до важливого висновку, що: найкращим, з точки зору забезпечення проведення випробувань ОВТ та/або навчань військ з бойовою стрільбою, буде полігонний вимірювально-обчислювальний комплекс (ПВОК), який забезпечує отримання максимального обсягу інформації заданої вірогідності за визначений термін контролю та управління об'єктами.

На жаль сучасний стан випробувального полігону, а також вимірювальних засобів (ПВОК) не дозволяє в повній мірі забезпечити задану якість отриманої вимірювальної інформації.

В роботі [1] запропоновані математичні моделі, які дозволяють мінімізувати значення узагальненого функціоналу якості контролю і управління об'єктом ОВТ по номінальній траєкторії. Були отримані рівняння для оцінки вектору стану об'єкту ОВТ і для точності даної оцінки (відповідно вирази (1) і (2)), а також відповідні структури фільтра Калмана і оцінки точності Калмановської фільтрації:

$$\frac{d\delta\vec{\hat{\lambda}}(t)}{dt} = F_0(t)\delta\vec{\hat{\lambda}}(t) + \underline{S}_0(t)\delta\hat{\lambda}_{вим} + \\ + \underline{M}_0(t)\delta\hat{\lambda}_{стр}(t) + \underline{H}_0(t)\delta\vec{y}(t); \quad (1)$$

$$\frac{d\underline{\Sigma}_0(t)}{dt} = \underline{S}_0(t)\underline{\Sigma}_{вим}(t) + \underline{S}_0^T(t)\underline{\Sigma}_{вим}(t) + \\ \underline{M}_0(t)\underline{\Sigma}_{0стр}(t) + \underline{M}_0(t)\underline{\Sigma}_{0\,стр}^T(t) + \underline{\Gamma}(t)\underline{\Theta}(t)\underline{\Gamma}^T(t) - \\ -\underline{\Sigma}^T{}_0(t)\underline{C}_0^T(t)\underline{N}^{-1}(t)\underline{C}_0(t)\underline{\Sigma}_0(t). \quad (2)$$

де $\delta\vec{\lambda}(t)_{вим}$ – погрішності визначення вектора стану за результатами вимірювань засобами ПВОК; $\delta\vec{\lambda}(t)_{стр}$ – погрішності визначення вектора стану за результатами вимірювань засобами стріляючих підрозділів;

$\underline{S}_0(t) = \dfrac{\partial\vec{f}\left[\vec{\lambda}(t),\vec{u}(t)\right]}{\partial\vec{\lambda}(t)_{вим}}$ та $\underline{M}_0(t) = \dfrac{\partial\vec{f}\left[\vec{\lambda}(t),\vec{u}(t)\right]}{\partial\vec{\lambda}(t)_{стр}}$ – перехідні матриці.

При цьому спостереження та супровід об'єкту ОВТ забезпечуються наземними засобами (радіотехнічними, оптико-електронними та квантово-оптичними станціями, тощо), об'єднаними в комплекс засобів стріляючих підрозділів та ПВОК, з використанням, закладених в них алгоритмів обробки сигналів і програмного забезпечення. Оброблена траєкторна інформація використовується для прогнозування руху об'єкту ОВТ з метою подальшого управління ним.

Мета статті – розробка математичних моделей обробки вимірювальної інформації, які дозволять забезпечити отримання максимального обсягу інформації заданої вірогідності за визначений термін контролю та управління об'єктами.

Основний матеріал

Запропонований підхід до отримання вимірювальної інформації є доволі продуктивним, проте, при проведенні випробувань на досить протяжних трасах виникає проблема щодо отримання даної інформації на усій (особливо на дальній) ділянці польоту об'єкту. В цих умовах пропонується в якості додаткових даних залучати інформацію, яка може бути отриманою за допомогою навігаційної космічної системи (НКС).

Модель такого застосування засобів наземної та космічної інфраструктури при проведенні випробувань наведена на рис. 1, де уведено позначення СОІ – системи обробки інформації.

В якості споживача обробленої вимірювальної інформації править система управління рухом об'єкта навігації (ОН) – носія засобів озброєння. Підсумком роботи об'єднаної системи обробки, та-

© М.В. Бархударян, К.К. Кулагін, О.М. Мішуков, Б.О. Чумак

ким чином, є формування управляючих функцій $\bar{U}(t)$, забезпечуючих необхідний рух об'єкта навігації та бойове застосування його засобів озброєння, а також розрахунок точності управління $\underline{\Sigma}(t)$.

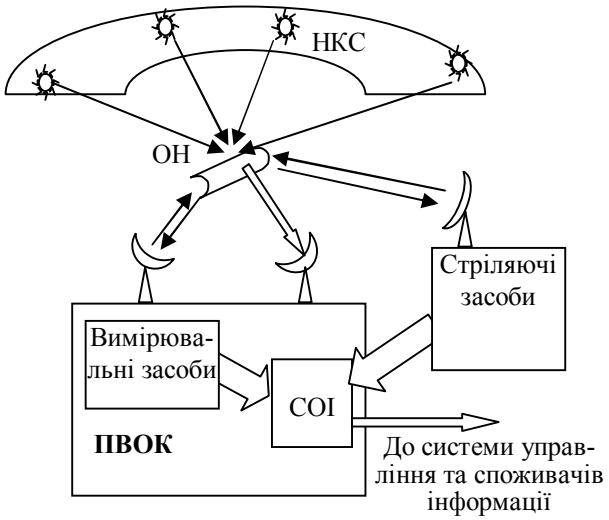

Рис. 1. Застосування засобів наземної та космічної інфраструктури при проведенні випробувань

Задача управління звичайно поділяється на дві [2]: оцінки траєкторії та формування управляючих функцій.

Таке розділення можливе, коли використовується квадратичний критерій якості управління, і всі випадкові збурення є гаусовими. Оптимальна оцінка траєкторії $\bar{\lambda}_{он}(t)$ вимагає знання динамічних характеристик об'єкта навігації (ОН). Вхідною інформацією при цьому правлять результати навігаційних вимірювань $\hat{\bar{R}}_{он}(t)$ та їх точність $\hat{\underline{\Sigma}}_{\hat{R}}(t)$.

У випадку високоманеврових об'єктів навігації оцінку траєкторії краще здійснювати шляхом вирішення рівнянь навігації за вибіркою мінімального обсягу. Якість оцінки при цьому буде визначатися якістю проведених вимірювань та геометрією розташування об'єкта навігації відносно навігаційних космічних апаратів (НКА). Суттєвою при цьому є ефемеридна інформація $\hat{\bar{\lambda}}_{НКА}(t)$, що приймається по радіоканалам з НКА, а також характеристики її точності $\hat{\bar{\underline{\Sigma}}}_{НКА}(t)$. На сьогоднішній день остання інформація є відсутньою в контурі управління, що не дозволяє оцінити якість вирішення навігаційної задачі.

Проведемо аналіз якості оцінок місцезнаходження та швидкості ОН по виборці вимірювань мінімального обсягу. Уявимо результати навігаційних вимірювань у вигляді

$$\hat{\bar{R}}_{k\,OH} = y(t) = \bar{R}_k\left(\bar{\lambda}_{k\,OH}, \bar{\lambda}_{k\,HKA}\right) + \bar{n}_k. \qquad (3)$$

де $\bar{R}_k\left(\bar{\lambda}_{k\,OH}, \bar{\lambda}_{k\,HKA}\right)$ – істині значення навігаційних функцій, які зв'язують результати вимірювань з вектором стану об'єкта навігації $\bar{\lambda}_{k\,OH}$ та відомим вектором ефемерид навігаційних космічних апаратів; $\bar{n}_k$ – вектор похибок навігаційних вимірювань на момент $t_k = k\Delta t$; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – відстань квантування вимірювальної інформації за часом.

Якщо випадковий вектор $\bar{n}_k$ розподілений за гаусовим законом з відомими характеристиками

$$\langle \bar{n}_k \rangle = \bar{\delta}n_{k;}; \left\langle \overset{\circ}{\bar{n}}_k \overset{\circ}{\bar{n}}_l^T \right\rangle = \underline{N}_k \bar{\delta}_{kl},$$

де $\bar{\delta}n_{k;}$ – вектор систематичних похибок вимірювань; $\underline{N}_k$ – матриця дисперсій і коваріацій випадкових похибок на момент t_k, то вважається, що похибки вимірювань мають характер білого шуму.

Якщо врахувати погрішності Δt_k прив'язування шкали часу ОН до шкали часу, в якій розраховані ефемериди, а також погрішності $\Delta\bar{\lambda}_{k\,HKA}$ розрахунку ефемерид, то вираз (3) можна написати у вигляді:

$$y_k = \bar{R}_k\left(\bar{\lambda}_{k\,OH}, \bar{\lambda}_{k\,HKA}\right) + \bar{n}_k + \dot{\bar{R}}_k\left(\bar{\lambda}_{k\,OH}, \bar{\lambda}_{k\,HKA}\right)\Delta t_k + \\ + \underline{G}_k\left(\bar{\lambda}_{k\,OH}, \bar{\lambda}_{k\,HKA}\right)\Delta\bar{\lambda}_{k\,HKA}; \qquad (4)$$

$$\underline{G}_k = \frac{\partial \bar{R}_k}{\partial \bar{\lambda}_{k\,HKA}}. \qquad (5)$$

Розглянемо підсумковий вектор похибок вимірювань та координатно-часового забезпечення

$$\bar{n}_{k\Sigma} = \bar{n}_k + \dot{\bar{R}}_k \Delta t_k + \underline{G}_k \Delta\bar{\lambda}_{k\,HKA}. \qquad (6)$$

Середнє значення цього вектору:

$$\delta\bar{n}_{k\Sigma} = \delta\bar{n}_k + \dot{\bar{R}}_k \delta t_k + \underline{G}_k \delta\bar{\lambda}_{k\,HKA}. \qquad (7)$$

Матриця дисперсій та коваріацій

$$\underline{N}_{lk\Sigma} = \underline{N}_k \delta_{kl} + \dot{\bar{R}}_k \rho_{kl} \dot{\bar{R}}_l^T + \underline{G}_k \underline{\Gamma}_{kl} \underline{G}_l^T \qquad (8)$$

де, зокрема, будемо вважати

$$\rho_{kl} = \sigma^2_{\Delta tk}\delta_{kl}; \quad \underline{\Gamma}_{kl} = \underline{\Sigma}_{\Delta\bar{\lambda}_k}\delta_{kl}. \qquad (9)$$

Логарифмічна функція правдоподібності вектора $\bar{\lambda}_{k\,OH}$ при зазначених умовах має вигляд:

$$\ln p\left\{\bar{y}_k \middle/ \bar{\lambda}_{k\,OH}\right\} = \ln C_p - \left(\bar{y}_k - \bar{R}_k - \bar{\delta}n_{k\Sigma}\right)^T \times \\ \times \underline{N}_{k\Sigma}^{-1}\left(\bar{y}_k - \bar{R}_k - \bar{\delta}n_{k\Sigma}\right). \qquad (10)$$

Проводячи лінеаризацію навігаційних функцій $\bar{R}_k$ в оточенні апріорних даних $\bar{\lambda}_{от\,OH}$, одержимо:

$$\bar{R}_k \approx \bar{R}_{k0} + \underline{C}_{k0}\left(\bar{\lambda}_{k\,OH} - \bar{\lambda}_{от\,OH}\right); \qquad (11)$$

$$\underline{C}_{k0} = \left.\frac{\partial \bar{R}_k}{\partial \bar{\lambda}_{k\,OH}}\right|_{\bar{\lambda}_{k\,OH} = \bar{\lambda}_{от\,OH}}. \qquad (12)$$

При цьому ітераційний алгоритм оцінки вектору стану ОН за методом максимальної правдоподіб-

ності визначається за співвідношенням [3]:

$$\bar{\hat{\lambda}}_{k\,OH(N+1)} = \bar{\hat{\lambda}}_{k\,OH\,N} + \underline{C}^{-1}_{k(N)}\left[\bar{y}_k - \bar{R}_{k(N)} - \delta\bar{n}_{k\Sigma}\right] \tag{13}$$

де N – номер ітераційного циклу.

Структура формування оцінок вектору стану ОН наведена на рис. 2.

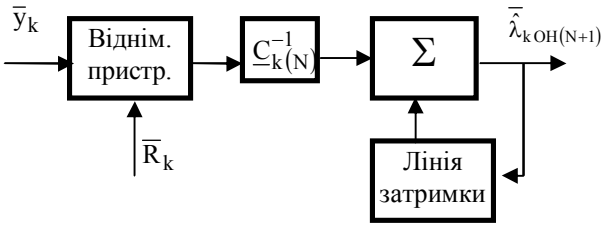

Рис. 2. Структура формування оцінок вектору стану ОН

При умові збіжності ітераційного процесу потенційна точність оцінки вектору стану об'єкту навігації буде визначатися за співвідношенням:

$$\hat{\underline{\Sigma}}_{OH\,k(N)} = \underline{C}^{-1}_{k(N)}\underline{N}_{k\Sigma}\underline{C}^{-1T}_{k(N)}. \tag{14}$$

Це співвідношення в першому наближенні характеризує якість рішення навігаційної задачі при фіксованій навігаційно-балістичній обстановці та $\tilde{\tilde{\hat{\lambda}}}_{к-1}$ $\underline{\Phi}_{к,к-1}$ $\tilde{\tilde{\hat{\lambda}}}_{к-1}$ відомих похибках засобів як радіотехнічного, так і координатно-часового забезпечення. Його можна також використовувати при обґрунтуванні вимог до якості навігаційного забезпечення ОН.

Наступним кроком оцінки траєкторії ОН згідно рис. 1 є об'єднання в системі обробки інформації оцінок, одержаних у відповідності з алгоритмом (1) та (2), а також оцінок, отриманих за алгоритмом (13). Фактично вимагається об'єднати вимірювання, отримані засобами ПВОК, засобами стріляючих підрозділів, а також космічними засобами. Дане об'єднання пропонується здійснювати методом згладжування.

При оцінці траєкторії методом згладжування, як відомо [4] обробці підлягають оцінки, що одержані після фільтрації Калмана. При цьому обробка здійснюється у зворотному часі, і припускається, що

$$\tilde{\tilde{\hat{\lambda}}}_N = \tilde{\bar{\lambda}}_N, \tag{15}$$

де $\tilde{\tilde{\hat{\lambda}}}_N$ – калмановська оцінка; $\tilde{\bar{\lambda}}_N$ – оцінка за методом згладжування; N – кількість оцінок Калмановської фільтрації. Алгоритм формування оцінки $\tilde{\bar{\lambda}}_{k-1}$ визначається рекурентним співвідношенням [5]:

$$\tilde{\bar{\lambda}}_{k-1} = \tilde{\tilde{\hat{\lambda}}}_{k-1} + \underline{G}_{k-1}\left[\tilde{\bar{\lambda}}_k - \underline{\Phi}_{k,k-1}\tilde{\tilde{\hat{\lambda}}}_{k-1}\right]; \tag{16}$$

$$k = N, N-1, ..., 1,$$

де $\underline{G}_k$ – матриця оптимального інтерполятора.

Дана матриця визначається з виразу:

$$\underline{G}_{k-1} = \tilde{\underline{\Sigma}}_{k-1}\underline{\phi}_{k,k-1}\dot{\underline{\Sigma}}^{-1}_k, \tag{17}$$

де $\tilde{\underline{\Sigma}}_{k-1}$ – матриця дисперсій та коваріацій похибок оцінок траєкторій; $\underline{\phi}_{k,k-1}$ – перехідна матриця; $\dot{\underline{\Sigma}}^{-1}_k$ – матриця, що характеризує якість оцінки, яка прогнозується .

Якість згладжених оцінок характеризується матрицею $\breve{\underline{\Sigma}}_k$, яка задовольняє рекурентному співвідношенню:

$$\breve{\underline{\Sigma}}_{k-1} = \tilde{\underline{\Sigma}}_{k-1} - \underline{G}_{k-1}\left[\dot{\underline{\Sigma}}_k - \breve{\underline{\Sigma}}_k\right]\underline{G}^{T}_{k-1}; \tag{18}$$

$$k = N, N-1, ..., 1$$

за умови $$\tilde{\underline{\Sigma}}_N = \breve{\underline{\Sigma}}_N. \tag{19}$$

Очевидно, що другий доданок правої частини виразу (18) завжди додатний або дорівнює нулю. З іншого боку елементи цієї матриці не перевищують елементів матриці $\tilde{\underline{\Sigma}}_{k-1}$.

Математичні моделі оцінки траєкторії та точності (16) та (18) наведені на рис. 3 та рис. 4 відповідно.

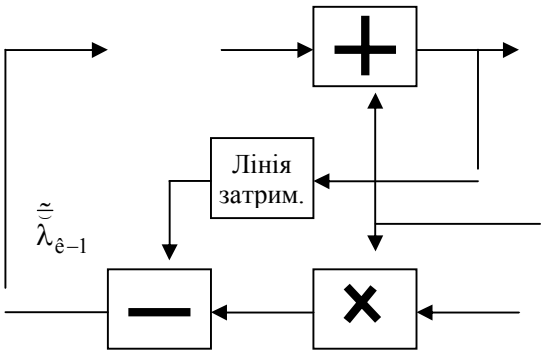

Рис. 3. Математична модель оцінки формування траєкторії

Результати моделювання показують, що результуюча точність визначення оцінок траєкторії за даним алгоритмом на 7 – 12% вища, ніж точність Калмановських оцінок.

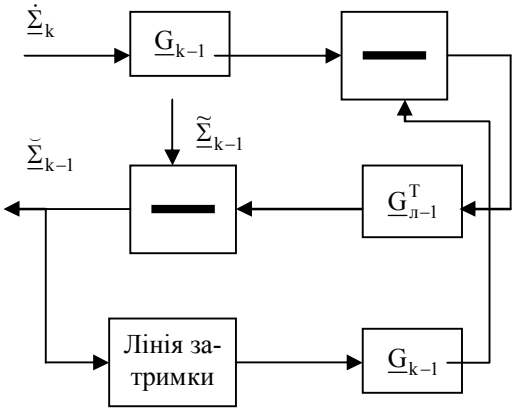

Рис. 4. Математична модель формування оцінки точності

Висновок

Таким чином, запропоновані математичні мо-

делі дозволять забезпечити отримання максимального обсягу інформації заданої вірогідності за визначений термін контролю та управління об'єктами. Отримані рівняння для оцінки вектору стану об'єкту ОВТ і для точності даної оцінки.

Все це в сукупності дозволить максимізувати достовірність отримання ТТХ зразків ОВТ при проведенні льотних випробувань в умовах полігону.

Список літератури

1. Чумак Б.О. Математична модель обробки вимірювальної інформації засобами полігонного вимірювально-обчислювального комплексу / Б.О. Чумак, О.М. Мішуков, К.К. Кулагін // Системи озброєння і військова техніка: наук. ж. – Х.: ХУПС. – 2010. – №. 3(23). – С. 19-21.

2. Чумак Б.О. Математична модель оптимальної обробки вимірювальної інформації при управлінні космічними апаратами по програмній траєкторії / Б.О. Чумак, І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов. – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. – К.:НАНУ, 2005. – Вип. 32. – С. 131-136.

3. Чумак Б.О. Тактико-технічна модель системи підвищеної оперативності автоматизованого управління польотом космічного апарату / Б.О. Чумак, І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х., 2005. – Вип. № 4(4). – С. 73-76.

4. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радіосистем / С.Е Фалькович, Э.Н. Хомяков – М.: Р и С, 1981. – 288 с.

5. Тихонов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.

Надійшла до редколегії 17.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Н.В. Бархударян, К.К. Кулагин, А.М. Мишуков, Б.А. Чумак

Предложены математические модели, которые позволят обеспечить получение максимального объема измерительной информации заданной достоверности за определенное время контроля и управления объектами. Получены уравнения для оценки вектора состояния объекта вооружения и военной техники и для точности данной оценки

Ключевые слова: *точность измерений, полигонный измерительно-вычислительный комплекс, оценки траектории, функционал качества.*

PERSPECTIVE METHOD OF TREATMENT OF MEASURING INFORMATION AT GROUND TESTS

N.V. Burkhudaryan, K.R. Kulagin, O.M. Mishukov, B.O. Chumak

Mathematical models which will allow to provide the receipt of maximal volume of measuring information of the set authenticity for set time of control and management objects are offered. Got equalization for the estimation of vector of the state of object of armament and military technique and for exactness of this estimation.

Keywords: *exactness of measurings, ground measuring-calculating complex, estimations of trajectory, functional of quality.*