

DOI: 10.18372/2310-5461.40.13284

УДК 621.3(045)

О. М. МишуковХарьковский национальный университет Воздушных Сил
orcid.org/0000-0001-6101-122X
e-mail: mishukov_al@gmail.com;**А. С. Луценко**Харьковский национальный университет Воздушных Сил
orcid.org/0000-0002-7242-625X
e-mail: lutsenko@gmail.com;**В. В. Цураніч**, старш. викладачДержавний університет інфраструктури та технологій
orcid.org/0000-0001-5530-5619
e-mail: suranich_val@ukr.net;**В. С. Шаповалов**, старш. викладачДержавний університет інфраструктури та технологій
orcid.org/0000-0002-3950-0331
e-mail: shapovalov@ukr.net;**В. М. Радченко**, канд. біол. наук, доц.Державний університет інфраструктури та технологій
orcid.org/0000-0003-5692-2365
e-mail: radchenko_vik@ukr.net

МЕТОД СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЙМАЛЬНОГО КАНАЛУ УПРАВЛІННЯ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Вступ

На етапі управління польотом літальних апаратів значна роль відводиться дослідженню їх тактико-технічних характеристик систем управління. Основним шляхом забезпечення високої точності управління польотом є побудова їх приймальних каналів оптимальним чином.

Синтез характеристик приймального каналу системи управління літальними апаратами за частковим показником якості, зокрема, мінімуму середньоквадратичної похибки вимірювань навігаційних параметрів руху, можливий, якщо завдання відтворення закону руху звести до завдання відтворення одного або декількох параметрів цього закону, що залишаються незмінними за час вимірювання. Як показує аналіз, це можливо у таких випадках [1–6].

1. Випадок квазірегулярних траєкторій, тобто траєкторій, відомих повністю, за винятком декількох параметрів a_1, \dots, a_n . Такий характер мають траєкторії літальних апаратів на ділянках їх вільного (пасивного) польоту.

2. Випадок невеликого часу обробки. Якщо час Δt , що відводиться на обробку траєкторного сигналу буде значно меншим, ніж повний час польоту T_n літальних апаратів.

Закон руху літальних апаратів в цьому випадку може бути з достатньо високою точністю апроксимований поліномом, наприклад, такого вигляду:

$$\lambda(t) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \varphi_k(t), \quad (1)$$

де $t \in (0, T)$.

Або, за безперервного часу

$$\lambda(t) = \vec{\lambda}^T \vec{\varphi}(t), \quad (2)$$

де «Т» — символ транспонування.

Ефективність виконання завдань управління рухом літальних апаратів щодо знаходження визначених траєкторій, як наведено вище, буде суттєво залежати від оптимізації обробки інформації у вимірювальних засобах. Таким чином поставимо задачу синтезу оптимального приймача наведених засобів.

Постановка завдання

Метою роботи є розробка методу синтезу оптимального приймального каналу системи управління літальних апаратів.

За фізичним змістом задачі вхідний процес $\lambda(t)$ можна представити у вигляді суми детермінованих функцій $\varphi_k(t)$ із сталими, але невідомими

мими під час сеансу роботи коефіцієнтами λ_k [1; 2], що математично подамо у вигляді

$$\lambda(t) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \varphi_k(t), \quad (3)$$

де $t \in (0, T)$.

Вхідний сигнал, який надходить до приймального пристрою виміральної системи, у загальному випадку можна подати у вигляді адитивної суміші корисної та завадової складових [3–5]:

$$y(t) = S[t, \lambda(t)] + n(t). \quad (4)$$

При цьому фільтрований параметр сигналу λ закодований у корисному сигналі.

Синтез приймального каналу управління літальними апаратами

Відносно завади будемо вважати, що її статистичні характеристики відомі, а саме:

$$\langle n(t) \rangle = 0 \text{ — статистичне середнє;}$$

$$\langle n(t), n(t + \tau) \rangle = 0,5N_0\delta(t + \tau) \text{ — кореляційна}$$

функція.

Тут $0,5N_0$ — двобічна спектральна густина потужності шумів.

Дуже часто за функцію $\varphi_k(t)$ застосовують відомі функції ряду Тейлора [6], тобто

$$\varphi_k(t) = \frac{t^k}{K!}, \text{ (при цьому } \varphi_0(t) = 1, \varphi_1(t) = t,$$

$\varphi_2(t) = 0,5t^2$ та ін.)

Будемо вважати, що фільтрується поточна дальність $D(t)$. Тоді її можна представити у вигляді

$$D(t) = D_0 \cdot 1 + \dot{D}t + \ddot{D}\frac{t^2}{2} + \dots$$

Задача оцінки процесу (3), який закодований у сигналі $S[t, \lambda(t)]$, зводиться до сумісної оцінки векторного параметра:

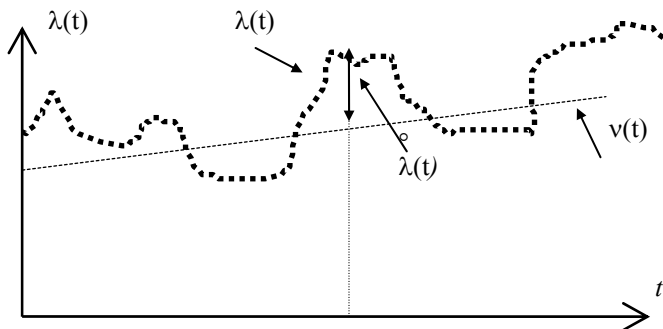
$$\bar{\lambda}^T = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n\}. \quad (5)$$

Для нашого випадку

$$\bar{\lambda}^3 = \{D, \dot{D}, \ddot{D}, \dots\}.$$

Необхідно відзначити, що не завжди процес, що спостерігається, можна представити так, як зазначено вище, тому що в такому представленні вилучена випадкова компонента процесу.

Щоб її врахувати введемо центровані процеси (рис. 1).



$$\langle \lambda(t) \rangle = v(t),$$

$$\lambda(t) = v(t) - \overset{\circ}{\lambda}(t),$$

$$\langle \overset{\circ}{\lambda}(t) \overset{\circ}{\lambda}(t + \tau) \rangle = R_\lambda(t, \tau).$$

Рис. 1. Приклад центрованих процесів

Задачу сумісної оцінки векторного параметра (3) вирішимо методом, максимальної правдоподібності [7].

Для сигналу відомої форми $S[t, \lambda(t)]$ логарифмічна функція правдоподібності має вигляд [8]

$$\ln p\left(\frac{y(t)}{\lambda(t)}\right) = -\frac{1}{N_0} \int_0^T \{y(t) - S[t, \lambda(t)]\}^2 dt, \quad (6)$$

де $y(t)$ визначається співвідношенням (4).

Точність оцінки векторного параметра $\bar{\lambda}$ характеризується матрицею

$$\Sigma_{\bar{\lambda}} = \Phi^{-1},$$

де Φ — інформаційна матриця Фішера з елементами

$$\Phi_{ki} = - \left\langle \frac{\partial^2 \ln p \left[\frac{y(t)}{\lambda(t)} \right]}{\partial \lambda_k \partial \lambda_i} \right\rangle, \quad k, i = 0, 1, \dots, n.$$

Структура системи має зміщувати пристрій оцінок векторного параметра $\bar{\lambda}$, які можна визначити із системи рівнянь:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_k} \ln p\left(\frac{y(t)}{\lambda(t)}\right) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \left\{ \left\{ y(t) - S[t, \bar{\lambda}, \bar{\varphi}(t)] \right\} \times \left[\frac{\partial}{\partial \lambda_k} S[t, \bar{\lambda}, \bar{\varphi}(t)] \right] \right\} dt = 0,$$

де $k = 0, 1, \dots, n$.

Вираз для елемента матриці Фішера в даному випадку буде мати такий вигляд:

$$\Phi_{ki} = \frac{2}{N_0} \int_0^T \frac{\partial S(t, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_k} \frac{\partial S(t, \bar{\lambda})}{\partial \lambda_i} dt. \quad (7)$$

Алгоритм фільтрації (оцінки) процесу $\lambda(t)$ зводиться до визначення суми:

$$\hat{\lambda}(t) = \sum_{k=1}^n \hat{\lambda}_k \varphi_k(t) = \bar{\varphi}^T \hat{\lambda}. \quad (8)$$

Точність фільтрації характеризується виразом

$$\sigma_{\hat{\lambda}}^2(t) = \sum_{k,i=1}^n \Phi_{ki}^{-1} \varphi_k(t) \varphi_i(t). \quad (9)$$

Розглянемо детальніше структуру вимірювача. Запишемо

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_k} \ln p \left(\frac{y(t)}{\lambda(t)} \right) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \left(\begin{matrix} \{y(t) - S[t, \bar{\lambda}, \bar{\varphi}(t)]\} \times \\ \times \frac{\partial S[t, \bar{\lambda}(t)]}{\partial \lambda(t)} \frac{\partial \lambda(t)}{\partial \lambda_k} dt \end{matrix} \right) = 0,$$

де $k = 0, 1, \dots, n$, $\frac{\partial \lambda(t)}{\partial \lambda_k} = \varphi_k(t)$.

Із цього співвідношення виходить уявлення матриці Фішера у вигляді

$$\Phi_{ki} = \frac{2}{N_0} \int_0^T \left\{ \frac{\partial S[t, \lambda(t)]}{\partial \lambda(t)} \right\}^2 \frac{\partial \lambda(t)}{\partial \lambda_k} \frac{\partial \lambda(t)}{\partial \lambda_i} dt. \quad (10)$$

де $\frac{\partial \lambda(t)}{\partial \lambda_i} = \varphi_i(t)$.

Із співвідношення (10) виходить, що обробка прийнятого коливання $y(t)$ поділяється на високочастотну обробку сигналу

$$I[y(t)] = \{y(t) - S[t, \lambda(t)]\} \frac{\partial S[t, \lambda(t)]}{\partial \lambda(t)} \quad (11)$$

та згладжування результатів цієї обробки на інтервалі часу $t \in (0, T)$ з функцією вагомості $\varphi_k(t)$. Подальша обробка зводиться до оцінки векторного параметра $\bar{\lambda}$ і фільтрації процесу згідно з (9).

При нелінійній залежності сигналу від векторного параметра можна застосувати метод лінеаризації цієї залежності у сполученні з методом послідовних наближень [8]:

$$\bar{\lambda}_{(N+1)} = \bar{\lambda}_{(N)} + \underline{\Phi}_{(N)}^{-1} \bar{z}_{(N)}[y(t)], \quad (12)$$

де N — номер ітераційного циклу.

При цьому $\bar{z}_{(N)}$ являє собою вектор з компонентами

$$z_{k(N)}[y(t)] = \frac{2}{N_0} \int_0^T \left(\begin{matrix} \{y(t) - S[t, \hat{\lambda}_{(N)}(t)]\} \times \\ \times \frac{\partial S[t, \hat{\lambda}_{(N)}(t)]}{\partial \lambda(t)} \varphi_k(t) dt \end{matrix} \right), \quad (13)$$

$$\hat{\lambda}_{(N)}(t) = \sum_{k=1}^n \hat{\lambda}_{k(N)} \varphi_k(t). \quad (14)$$

Фактично виразом (13) описується алгоритм перетворювання вхідної суміші в оптимальному дискримінаторі. Відзначимо, що ітераційне обчислювання закінчується при виконанні умови:

$$\left| \hat{\lambda}_{k(N+1)} - \hat{\lambda}_{k(N)} \right| \leq \Phi_{kk(N)}^{-1} \text{зад}, \quad (15)$$

де $\Phi_{kk(N)}^{-1} \text{зад}$ — задана точність фільтрації.

Після закінчення ітераційного процесу оцінка $\bar{\lambda}_{(N)}$ приймається як результат обробки сигналу, а точність цієї оцінки характеризується матрицею

$$\underline{\Sigma}_{(N)} = \underline{\Phi}_{(N)}^{-1}. \quad (16)$$

Розглядуваний вимірювач передбачає обробку сигналу на усьому інтервалі спостереження, тобто попереднє запам'ятовування сигналу на інтервалі $t \in (0, T)$. Структура вимірювача наведена на рис. 2.

Часто виникає необхідність в оцінюванні процесу:

$$\mu(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt}. \quad (17)$$

У даному випадку це можна трактувати як фільтрацію поточної радіальної швидкості. При цьому процес можна представити у вигляді:

$$\mu(t) = \sum_{k=1}^n \lambda_k f_k(t), \quad (18)$$

де $f_k(t) = \frac{d\varphi_k(t)}{dt}$ — відома функція.

Таким чином, вимірювач процесу $\mu(t)$ суміщає в собі блок оцінки векторного параметра $\bar{\lambda}$ і блок скалярного перемноження:

$$\hat{\mu}(t) = \sum_{k=1}^n \hat{\lambda}_k f_k(t) = \bar{f}^T(t) \hat{\lambda}. \quad (19)$$

Точність фільтрації процесу $\mu(t)$ визначається виразом

$$\sigma_{\hat{\mu}}^2(t) = \sum_{k,i=1}^n \Phi_{ki}^{-1} f_k(t) f_i(t). \quad (20)$$

При проведенні випробувань літальних апаратів часто виникає ситуація, коли

$$\lambda(t) = \lambda(t, \bar{q}_0) + \sum_{k=1}^n \Delta q_k \varphi_k(t, \bar{q}_0), \quad (21)$$

де \bar{q}_0 — вектор апріорних значень параметрів траєкторії; $\Delta \bar{q}$ — вектор невідомих поправок до параметрів траєкторії;

$$\varphi_k(t, \bar{q}_0) = \left. \frac{\partial \lambda(t, \bar{q})}{\partial q_k} \right|_{\bar{q}=\bar{q}_0}. \quad (22)$$

За вектор \bar{q} часто використовують вектор «початкових умов», тобто вектор, компонентами якого є три координати та три швидкості в геоцентричній системі відліку у фіксований момент часу.

$$\Phi_{ki} = -\frac{2}{N_0} \int_0^T \left\{ \frac{\partial S[t, \hat{\tau}_{(N)}(t), \Delta\varphi_{(N)}(t)]}{\partial \tau(t)} \right\}^2 \times \left(\times \varphi_k(t) \varphi_i(t) dt \right) -$$

$$-\frac{2}{N_0} \int_0^T \left\{ \frac{\partial S[t, \hat{\tau}_{(N)}(t), \Delta\varphi_{(N)}(t)]}{\partial \tau(t)} \right\}^2 \omega_0^2 \varphi_k(t) \varphi_i(t) dt.$$

Для радіосигналів зазвичай виконується умова

$$\int_0^T S(t, \lambda) \frac{dS(t, \lambda)}{d\lambda} dt \approx 0,$$

якщо λ — неенергетичний параметр (часова затримка, фаза, частота).

Ця обставина дозволяє побудувати систему обробки прийнятого коливання без вхідного віднімального пристрою, а саме

$$z_k[y(t)] = \frac{2}{N_0} \times$$

$$\times \int_0^T \left(y(t) \cos[\omega_0 t - \Delta\hat{\varphi}_{(N)}(t)] \times \left(\times \frac{\partial S[t - \hat{\tau}_{(N)}(t)]}{\partial \tau(t)} \varphi_k(t) dt \right) \right) +$$

$$+ \frac{2}{N_0} \int_0^T \left(y(t) S[t - \hat{\tau}_{(N)}(t)] \omega_0 \times \left(\times \sin[\omega_0 t - \Delta\hat{\varphi}_{(N)}(t)] \varphi_k(t) dt \right) \right).$$

Побудова вимірювальних каналів наведеним вище методом дає можливість забезпечити найкращі (найвищі) характеристики точності. Такі вимірювачі доцільно застосовувати за невеликих інтервалах спостереження.

Висновки

Відзначимо, що головна прикладна сторона щодо впровадження синтезованої системи фільтрації міститься в розробці та практичній реалізації цифрових мікропроцесорних пристроїв: дис-

кримінаторів, блоків точності, фільтрів, блоків оцінки загальної точності фільтрації.

Проте, в існуючих системах управління літальними апаратами канали побудовані в основному за квазіоптимальними схемами. Отже, такі системи можна модернізувати таким чином, щоб оптимізувати їх показники точності. Для цього пропонується використовувати запропонований метод синтезу оптимального приймача системи контролю та управління літальними апаратами.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Моисеев Г. В.**, Моисеев В. С. Основы теории создания и применения имитационных авиационных комплексов: монографія. М.: Издательский центр, 2013. 208 с.
2. **Смирнов Н. Н.**, Владимиров Н. И., Черненко Ж. С. и др. Техническая эксплуатация летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1990. 423 с.
3. **Веселовский К.** Системы подвижной радиосвязи: пер. с польск. Под ред. А. И. Ледовского. М.: Горячая линия–Телеком, 2006. 536 с.
4. **Громаков Ю. А.** Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М.: Эко–Трендз, 2007. 238 с.
5. **Павлушенко М.**, Евстафьев Г., Макаренко И. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза. М.: Изд-во «Права человека», 2005. 611 с.
6. **Бендат Дж.**, Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.
7. **Биргер И. А.** Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1998.
8. **Шалыгин А. С.**, Палагин Ю.И. Прикладные методы статистического моделирования. Л.: Машиностроение, 1986. 256 с.

Мишуков О. М., Луценко А. С., Цураніч В. В., Шаповалов В. С., Радченко В. М.

МЕТОД СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЙМАЛЬНОГО КАНАЛУ УПРАВЛІННЯ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

У роботі показано, що на етапі управління польотом літальних апаратів значна роль відводиться дослідженню їх тактико-технічних характеристик систем управління. Основним шляхом забезпечення високої точності управління польотом є побудова їх приймальних каналів оптимальним чином. Обґрунтовано, що закон руху літальних апаратів може бути з достатньо високою точністю апроксимований поліномом. Відзначено, що головна прикладна сторона щодо впровадження синтезованої системи фільтрації міститься в розробці та практичній реалізації цифрових мікропроцесорних пристроїв: дискримінаторів, блоків точності, фільтрів, блоків оцінки загальної точності фільтрації.

Ключові слова: літальний апарат; управління польотом; приймальний канал; параметри руху; оптимальність.

Mishukov O., Lutsenko A., Suranich V., Shapovalov V., Radchenko V.

SYNTHESIS METHOD OF OPTIMUM RECEIVABLE CHANNEL OF LITERAL APPARATUS MANAGEMENT

The paper shows that at the stage of flight control of aircraft, a significant role is played by the investigation of their tactical and technical characteristics of control systems. The main way of ensuring high accuracy of flight control is to construct their receiving channels in an optimal way. Synthesis of characteristics of the receiving channel of the control

system of aircraft by the partial quality index, in particular, the minimum of the average quadratic error of measurement of navigational parameters of motion, is possible if the task of restoration of the law of motion is reduced to the task of reproducing one or more parameters of this law, which remain unchanged in time measurement. It is substantiated that the law of motion of aircraft can be reasonably approximated by a polynomial with sufficient accuracy. The purpose of the work is to develop a method for synthesizing the optimal receiving channel of the aircraft management system. The proposed structural scheme of the instrument of the parameters of the aircraft. The construction of measuring channels by the proposed method enables to provide the best (highest) characteristics of accuracy. Such measuring devices should be used at small intervals of observation. It is noted that the main application side for implementation of the synthesized filtration system is contained in the development and practical implementation of digital microprocessor devices: discriminators, precision blocks, filters, units for evaluating the overall accuracy of filtration. It has been shown that in existing airborne control systems, the channels are mainly based on quasi—optimal circuits. Consequently, such systems can be upgraded in such a way as to optimize their accuracy. To this end, it is proposed to use the proposed method for synthesizing the optimal receiver of the control and control system of aircraft.

Keywords: aircraft; flight control; receiving channel; traffic parameters; optimality.

**Мишуков А. М., Луценко А. С., Цураніч В. В., Шаповалов В. С., Радченко В. Н.
МЕТОД СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЕМНОГО КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

В работе показано, что на этапе управления полетом летательных аппаратов значительная роль отводится исследованию их тактико—технических характеристик систем управления. Основным путем обеспечения высокой точности управления полетом является построение их приемных каналов оптимальным образом. Обосновано, что закон движения летательных аппаратов может быть с достаточно высокой точностью аппроксимирована полиномом. Отмечено, что главная прикладная сторона по внедрению синтезированной системы фильтрации содержится в разработке и практической реализации цифровых микропроцессорных устройств: дискриминаторов, блоков точности, фильтров, блоков оценки общей точности фильтрации.

Ключевые слова: летательный аппарат; управление полетом; приемный канал; параметры движения; оптимальность.

Стаття надійшла до редакції 13.09.2018 р.

Прийнято до друку 17.11.2018 р.