

УДК 629.735.051:681.513.5(045)

Л.М. Блохін, д-р техн. наук
О.В. Літвинова
Р.Р. Корновський
М.А. Півень

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ФІЛЬТРА В КАНАЛІ КУРСУ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

НАУ, кафедра систем управління
E-mail: fsu@nau.edu.ua

Наведено алгоритм і результати вибору оптимальної структури фільтра каналу курсу існуючої навігаційної системи для її модернізації. У процесі синтезу були використані дані динамічної атестації каналу курсу досліджуваної навігаційної системи.

Algorithms and results of choice of optimum structure of filter in the canal of the real navigation system's course for its modernization were presented. Data of dynamic testing of the canal of course of navigation system were used during the process of synthesis.

Вступ

Характерними рисами розвитку сучасної техніки є неперервне ускладнення створюваного обладнання та необхідність його роботи в оптимальних режимах в умовах впливу різних параметричних і сигнальних збурюючих факторів, причинами та джерелами яких є як зовнішні, так і внутрішні явища. Дія цих факторів має стохастичний характер і призводить до так званих поступових та раптових відмов обладнання.

Для виключення поступових відмов та утримання показника якості [1] в найкращих значеннях необхідно реалізовувати оптимальні структури систем управління або корекції, наприклад, фільтрів-спостерігачів.

Методи багатовимірної оптимальної фільтрації дають можливість знаходити найкращі за точністю структури обчислювачів для вирішення різних задач навігаційних вимірювань, в яких отримана інформація використовується не тільки для формування у подальшому законів замкненого управління, а й для безпосереднього її відображення, контролю та відновлення якості управління об'єктом.

Аналіз досліджень і публікацій

Як відомо з праць [2–6], корисну інформацію з вихідних сигналів бортового вимірювального пристрою, який функціонує в штатних режимах руху об'єкта або близьких до нього (таких, що імітуються), можна отримати, використавши виходи будь-якого з датчиків інформації після виконання відповідних процедур оптимальної фільтрації. При цьому необхідно брати до уваги, що реальні динамічні умови, в яких відбувається функціонування пристрою, мають стохастичний характер, а точність відокремлення корисної інформації фактично визначається випадковими факторами та їх належним урахуванням.

Для експериментального визначення стохастичних характеристик корисної та шумової інформації вимірювачів, що функціонують у штатних режимах, проводяться етапи динамічної атестації бортових вимірювачів в умовах, які наближені до натурних [2].

Отримана в результаті атестації інформація є достатньою для вибору оптимальних структур фільтрів і успішного вирішення задачі синтезу оптимальних спостерігачів відповідних виходів вимірювального пристрою.

В основі динамічної атестації лежать процедури та задачі структурної ідентифікації моделей динаміки досліджуваного вимірювача.

Постановка завдання

Використовуючи дані, отримані після проведення етапів динамічної атестації та структурної ідентифікації, необхідно вирішити задачу синтезу оптимальної структури фільтра для каналу курсу досліджуваної навігаційної системи.

Вихідні дані для процедури синтезу

Для вирішення задачі структурної ідентифікації та задачі синтезу оптимальної структури фільтра курсового каналу навігаційної системи використовували результати динамічної атестації вимірника курсу водного рухомого об'єкта на стенді-імітаторі кутової хитавиці судна, близької до натурної та виникаючої в крейсерському русі важкого судна.

Результати динамічної атестації являли собою характеристики входу та виходу досліджуваного тракту у вигляді спектральної $S_{\psi\psi}$ і взаємних спектральних щільностей $S_{\psi\eta_Z}$, $S_{\eta_Z\psi}$ програмного сигналу курсу (рискання платформи стенду) та вихідного сигналу вимірника курсу $S_{\eta_Z\eta_Z}$, з якого паралельно знімали сигнали, отримані для стабілізації гіроплатформи.

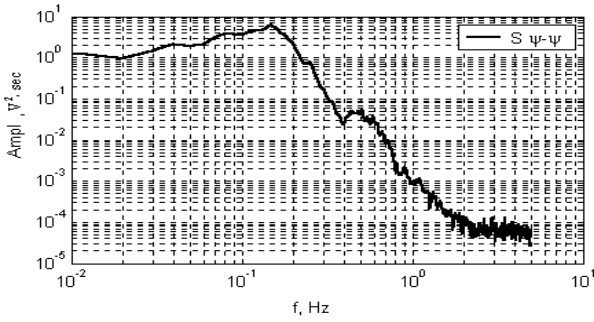


Рис. 1. Спектральна щільність програмного сигналу курсу (платформи стенда) $S_{\psi\psi}$ (нормуючий коефіцієнт вимірювача курсу $K_0 = 6,1$ град/В)

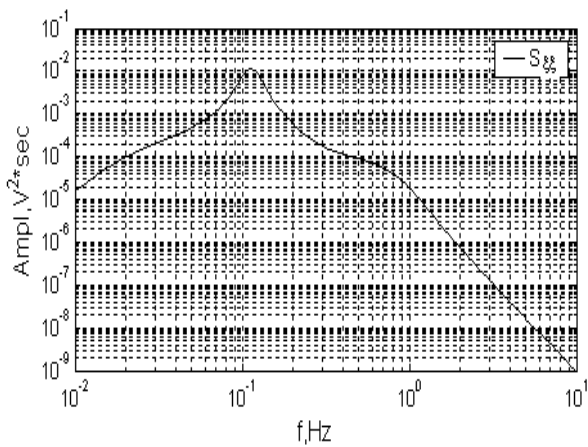
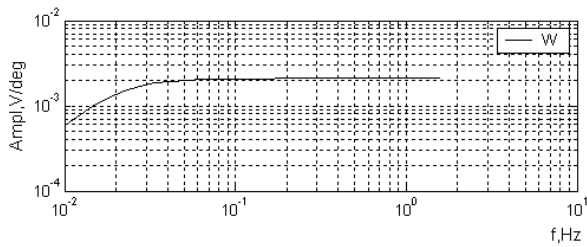
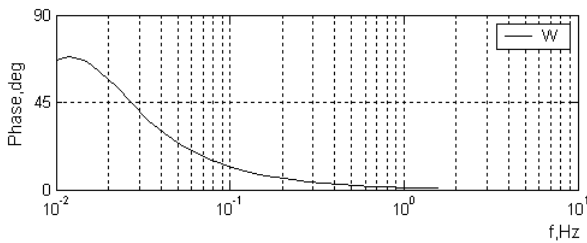


Рис. 2. Спектральна щільність неконтрольованої завади вимірювань $S_{\xi\xi}$



а



б

Рис. 3. Передавальна функція досліджуваного тракту « $\psi - \eta_z$ » $W(s)$: а – амплітудна характеристика; б – фазова характеристика

У процесі структурної ідентифікації досліджуваного каналу курсу були отримані спектральна щільність неконтрольованої завади вимірювань $S_{\xi\xi}$ і передавальна функція вимірювального тракту $W(s)$.

Після аналізу отриманих експериментальних залежностей, їх редукування потрібні для вирішення задачі синтезу оптимальної структури фільтра-спостерігача в досліджуваному вимірювальному тракту навігаційної системи характеристики були записані у вигляді:

$$S_{\psi\psi} = \frac{12,6^2}{\pi} \left| \frac{(0,53^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,53s + 1)}{1,33^2 s^2 + 2 \cdot 0,15 \cdot 1,33s + 1} \right|^2 \times \frac{1}{(0,32^2 s^2 + 2 \cdot 0,15 \cdot 0,32s + 1)} \quad (1)$$

$$S_{\xi\xi} = \frac{0,01^2}{\pi} \left| \frac{(11,9s + 1)}{(1,33^2 s^2 + 2 \cdot 0,15 \cdot 1,33s + 1)} \right|^2 \times \frac{1}{(0,072s + 1)} \quad (2)$$

$$W(s) = 0,00026 \cdot \frac{22,7^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 22,7s + 1}{8^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 8s + 1} \quad (3)$$

де $S_{\psi\psi}$ – спектральна щільність програмного сигналу курсу (платформи стенда), град² · с; $S_{\xi\xi}$ – спектральна щільність неконтрольованої завади вимірювань, В²·с; $W(s)$ – передавальна функція вимірювального тракту « $\psi - \eta_z$ » (програмний сигнал курсу – вихідний сигнал вимірювача курсу), В/град.

Графічне відображення залежностей (1) – (3) у вигляді логарифмічних амплітудних та фазових частотних характеристик для наочності показано на рис. 1–3.

Як впливає з моделі (3) і рис. 3, передавальна функція досліджуваного тракту являє собою диференціально-інтегральну ланку.

Вибір оптимальної структури фільтра

За результатами структурної ідентифікації каналу курсу досліджуваної навігаційної системи проведемо процедуру синтезу [1] оптимальної структури фільтра для цього каналу.

Також обчислимо показник якості та зробимо оцінку, наскільки точніше буде проводитися вимірювання курсу при реалізації оптимальної фільтрації на практиці.

Вибір оптимальної структури фільтра для каналу курсу існуючої навігаційної системи вирішимо як задачу вінерівської оптимальної фільтрації на підставі відомого [1] алгоритму фільтрації.

На рис. 4 показано відому за результатами структурної ідентифікації матрицю (3) передавальних функцій вимірювача вектора програмних сигналів r , яка позначена через K .

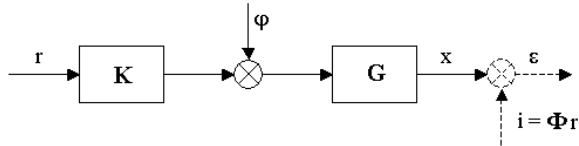


Рис. 4. Структурна схема, що пояснює одновимірну оптимальну фільтрацію

Вимірювання вектора r супроводжується завданнями – вектором φ , модель динаміки якого була визначена за формулою (2). Вектори r і φ – центровані випадкові процеси з відомими матрицями спектральних і взаємних спектральних щільностей S_{rr} , $S_{r\varphi}$, $S_{\varphi r}$, $S_{\varphi\varphi}$. Нормована спектральна щільність вектора r визначена виразом (1). У цьому разі вважаємо, що сигнали r і φ – некорельовані між собою, тому

$$S_{r\varphi} = S_{\varphi r} = 0.$$

Функція \hat{O} – це функція бажаного перетворення вхідних сигналів r у вихідні сигнали системи x (у цьому разі $\hat{O} = E_n$), i – вектор бажаних сигналів, функція G – шукана матриця передавальних функцій фільтра, структура якого повинна бути синтезована, ε – вектор випадкових помилок $\varepsilon = x - i$ системи.

Як функціонал якості вимірювань досліджуваного каналу курсу використовується вираз

$$e = M[\varepsilon'(t)R\varepsilon(t)] = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} tr(S'_{\varepsilon\varepsilon} R) ds, \quad (4)$$

де M – знак математичного сподівання; R – вагова додатньо визначена поліноміальна матриця; tr – слід матриці; $S'_{\varepsilon\varepsilon}$ – транспонована матриця спектральних щільностей помилки системи.

Алгоритм вибору оптимальної структури G має вигляд [1]:

$$G = \Gamma^{-1}(T_0 + T_+)D^{-1}; \quad (5)$$

$$\Gamma_*\Gamma = R;$$

$$DD_* = WS'_{\psi\psi}W_* + WS'_{\xi\psi}W_* + S'_{\psi\xi}W_* + S'_{\xi\xi}; \quad (6)$$

$$T = T_0 + T_+ + T_- = \Gamma\Phi(S'_{\psi\psi}W_* + S'_{\xi\psi})D_*^{-1}, \quad (7)$$

де Γ , D – результати вінерівської факторизації виразів R і DD_* відповідно; T_0 , T_+ , T_- – результати вінерівської сепарації тут уведені позначення $r = \psi$, $x = \eta_z$, $\varphi = \xi$, $K = W$.

Після необхідних підрахунків на комп'ютері в системі MatLab за алгоритмом (5)–(7) оптимальна структура фільтра в каналі курсу досліджуваної навігаційної системи набуває вигляду:

$$G = 794 \frac{(8^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 8s + 1)(0,66s + 1)}{(16,6^2 s^2 + 2 \cdot 0,78 \cdot 16,6s + 1)(2,4s + 1)} \times \frac{(0,42s + 1)(0,22s + 1)(0,072s + 1)}{(0,32^2 s^2 + 2 \cdot 0,24 \cdot 0,32s + 1)}. \quad (8)$$

Графічне уявлення виразу (8) знайденої оптимальної структури фільтра в каналі курсу у вигляді логарифмічних амплітудної та фазової характеристик показано на рис. 5.

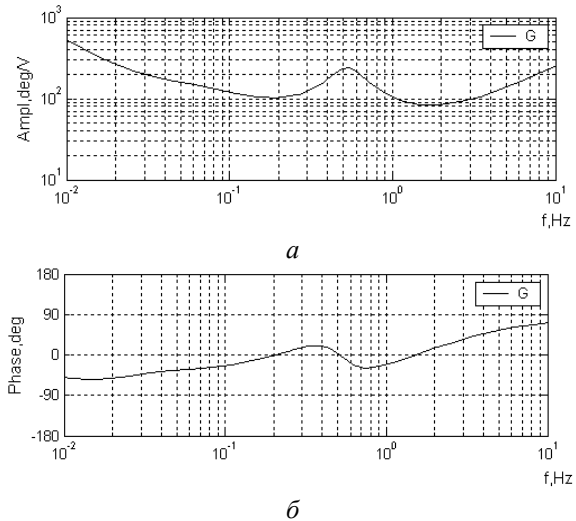


Рис. 5. Логарифмічні амплітудна (а) та фазова (б) частотні характеристики оптимального фільтра G

Зробивши апроксимацію графічної залежності (рис. 5), отримаємо спрощену (редуковану) модель оптимального фільтра у вигляді

$$G \approx 794 \frac{(1,87s + 1)(0,09^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,09s + 1)}{(16s + 1)} \times \frac{(0,8s + 1)}{(0,35^2 s^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,35s + 1)}. \quad (9)$$

Використавши вираз (4) та залежність (9), обчислимо відносну мінімальну дисперсію помилки оптимальної системи (синтезованого каналу курсу):

$$\lambda = \frac{e}{\sigma_\psi^2}; \quad \lambda = 3,56, \quad (10)$$

де σ_ψ^2 – дисперсія відхилення від програмного курсу літака.

Для порівняння обчислимо показник якості (точність) досліджуваного каналу без фільтра. Модель динаміки помилки вимірювань у каналі курсу з урахуванням передавальної функції вимірювача (3) та коефіцієнта передачі k_0 можна визначити за формулою:

$$S_{\varepsilon\varepsilon(i)} = |W - k_0|^2 S_{\psi\psi} + S_{\xi\xi}. \quad (11)$$

Функціонал якості в цьому разі буде мати вигляд:

$$e_{(i)} = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} S_{\varepsilon\varepsilon(i)} ds. \quad (12)$$

Після необхідних обчислень на комп'ютері в системі MatLab, використовуючи вирази (11) та (12), отримали:

$$\lambda_{(i)} = \frac{e_{(i)}}{k_0^2 \sigma_\psi^2}; \quad \lambda_{(i)} = 576,7. \quad (13)$$

Порівнюючи вирази (10) та (13), отримаємо коефіцієнт ефективності (зменшення дисперсії помилки вимірювань після проведення процедури синтезу):

$$\frac{\lambda_{(i)}}{\lambda} \approx 162. \quad (14)$$

Як видно з виразу (14), за допомогою проведеного синтезу оптимальної структури фільтра для каналу курсу дисперсія помилки вимірювань зменшилася в 162 рази.

Висновки

1. Виконано процедуру синтезу оптимальної структури фільтра досліджуваного тракту з використанням даних структурної ідентифікації каналу курсу.
2. Обчислено показник якості та продемонстровано, наскільки точніше (на два порядки) буде виконуватися вимірювання курсу при реалізації оптимальної фільтрації на практиці.

Література

1. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління: Підруч. для ВНЗ. – К.: НАУ, 2003. – 208 с.
2. Блохін Л.М. Нові ідеї щодо вінерівської оптимальної фільтрації, які суттєво підвищують її ефективність // Матеріали IV Міжнар. наук. конф. “Авіа-2002”. Т. 2. – К. – С. 23.5 – 23.9.
3. Блохін Л.Н. Модернизированная многомерная ви́неровская фíльтрация // Кибернетика и вычислительная техника. – 2002. – Вып. 136. – С. 77 – 88.
4. Блохін Л.Н. Активизированная оптимальная фíльтрация в задачах высокоточного управления и биомедицинской диагностики // Кибернетика и вычислительная техника. – 2001. – Вып. 130. – С. 39–48.
5. Блохін Л.М. Наукова проблема створення “надоптимальної” багатовимірної вінерівської фільтрації для задач навігації, управління рухом та обробки стохастичної інформації // Вісн. ПНЦ ТАУ. – 2003. – №3. – С. 57 – 60.
6. Екимов В.В. Вероятностные методы в строительной механике корабля. – Л.: Судостроение, 1966. – 328 с.

Стаття надійшла до редакції 20.03.06.