

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ФІЛЬТРАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РУХУ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ПРИ БАГАТОКАНАЛЬНОМУ СПОСТЕРЕЖЕННІ

к.т.н. Б.О. Чумак, к.т.н. О.В. Дремлюга, І.Г. Лисаченко  
(подав д.т.н., проф. О.І. Стрелков)

*Досліджені можливості комплексування вимірювальних систем. Запропонований алгоритм фільтрації поточних параметрів руху космічних апаратів. Дана оцінка виграшу в точності при комплексуванні вимірювальних систем по проміжних каскадах, причому одна із систем є слідкуюча, а інша – не слідкуюча.*

**Вступ.** В даний час для наземного автоматизованого комплексу управління (НАКУ) України існує проблема оперативного визначення поточних параметрів руху (ППР) та прогнозування орбіти космічних апаратів (КА). Особливо важливим є якісне вирішення цих задач на етапах виведення та корекції руху КА в реальному масштабі часу. При цьому надійність керування істотно залежить від часу пошуку КА по просторово-часовому полю, а також від точності ППР КА за час сеансу зв'язку. У зв'язку з цим найважливішими задачами є, по-перше, зменшення часу пошуку і виявлення КА в зоні видимості радіотехнічних засобів, і, по-друге, точне визначення ППР КА з метою подальшого прогнозу його орбіти. Крім того, за час сеансу, що залишився, зв'язку необхідно встигнути виконати ряд технологічних операцій, що входять у повний цикл керування КА.

В даній роботі досліджується можливість підвищення надійності керування КА за рахунок використання надмірної вимірювальної інформації, отриманої різними засобами.

**Постановка задачі.** Ставиться задача синтезувати систему лінійної фільтрації, що оптимальна за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки, яка використовує спільну обробку вимірів, отриманих двома і більш різними вимірювальними системами. Оцінити виграш в точності при комплексуванні декількох вимірювальних систем.

Отже, нехай процес, що фільтрується, буде заданим стохастичним диференціальним векторно-матричним рівнянням [1 - 2]:

$$\frac{d\lambda}{dt} + \underline{F}(t)\bar{\lambda}(t) = \bar{n}_0(t), \quad \bar{\lambda}(0) = \bar{\lambda}_0. \quad (1)$$

Даний процес фільтрується з використанням спостережень  $\mathbf{k}$  вимірвачів (каналів)

$$\mathbf{Y}_1(t) = \lambda(t) + \mathbf{n}_1(t), \dots, \mathbf{Y}_k(t) = \lambda(t) + \mathbf{n}_k(t).$$

Запишемо рівняння спостереження в векторно-матричному вигляді [1]:

$$\bar{Y} = H\bar{\lambda} + \bar{n}_\lambda(t). \quad (2)$$

Відомо, що система лінійної фільтрації, що оптимальна за критерієм мінімуму середнього квадрата похибки, описується рівняннями [2]:

$$\frac{d\hat{\lambda}}{dt} = F(t)\hat{\lambda} + K(t) \left[ \bar{Y}(t) - H(t)\hat{\lambda} \right]; \quad K(t) = R(t)H^T(t)N_\lambda^{-1}(t); \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dt} = N_0(t) + FR + RF^T - RH^T N_\lambda^{-1} HR,$$

де  $K(t)$  – матричний коефіцієнт підсилення;  $R(t)$  – кореляційна матриця похибок фільтрації.

При цьому вираз (3), що визначає структуру оптимального вимірника буде мати вигляд

$$\frac{d\hat{\lambda}}{dt} = -F(t)\hat{\lambda} + 2\sigma_\lambda^2 \sum_{i=1}^k N_{oi}^{-1}(y_i - \hat{\lambda}). \quad (4)$$

Структура фільтра наведена на рис. 1. Для отримання оптимальної оцінки, в смислі, зазначеному вище, слід, поперше, поточні виміри додавати зважено (вага визначається точністю фільтрації), по-друге, необхідно знати параметри зовнішніх шумів та завад, зокрема, спектральну щільність потужності цих шумів.

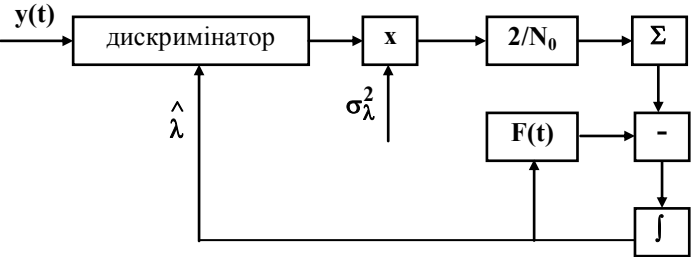


Рис. 1. Структура оптимального фільтра

Дисперсія похибки фільтрації може бути знайдена з виразу (4):

$$\frac{d\sigma_\lambda^2}{dt} = 2F(t)\sigma_0^2 + 2F(t)\sigma_\lambda^2 - 2\sigma_\lambda^2 \sum_{i=1}^k N_{oi}^{-1}, \quad (5)$$

де  $\sigma_0^2$  – початкове (апріорне) значення дисперсії розподілення фільтрованого параметра.

При цьому стаціонарне рішення має вигляд [2]:

$$\sigma_\lambda^2 = \frac{F(t)}{2} \left( \sum_{i=1}^k N_{oi}^{-1} \right)^{-1} \left[ \left( 1 + \frac{4\sigma_0^2}{f} \sum_{i=1}^k N_{oi}^{-1} \right)^{1/2} - 1 \right]. \quad (6)$$

Структура алгоритму здобування похибки фільтрації має вигляд, наведений на рис. 2. Як виходить з виразів (5) і (6) та рис.2 для того, щоб знати поточне значення похибки фільтрації ППР за допомогою декількох

вимірювальних систем, слід, по-перше, знати величини спектральних густин потужностей шумів у кожному каналі, а, по-друге, слід знати початкове значення даної похибки для вирішення диференційного рівняння.

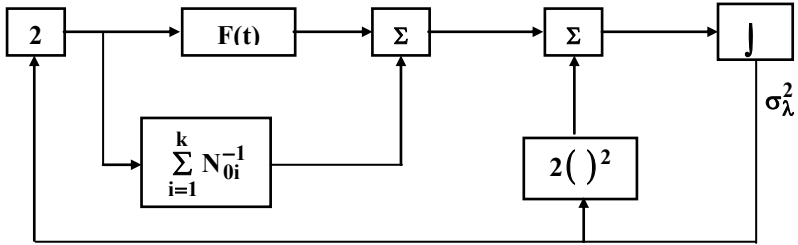


Рис. 2. Алгоритм здобуття похибки фільтрації

Перша з даних проблем може вирішуватись за допомогою застосування блоків точності, які описані у відомих джерелах [1, 2]. Друга проблема може бути вирішеною найкращим чином за допомогою знання прогностичних значень похибок балістичного забезпечення. Отже, проблема попереднього вводу системи вимірювання до режиму слідування за об'єктом і забезпечення при цьому заданої похибки вимірювання є важливою і серйозною проблемою.

Введемо тепер відношення сигнал/шум в  $i$ -му спостереженні  $\mu_i$  та сумарне відношення сигнал/шум  $\mu_\Sigma$  в усіх  $k$  каналах

$$\mu_i = \frac{4\sigma_0^2}{F(t)N_{0i}}, \quad \mu_\Sigma = \sum_{i=1}^k \mu_i = \frac{4\sigma_0^2}{F(t)} \sum_{i=1}^k N_{0i}^{-1}. \quad (7)$$

Тоді одержимо нормоване до апіорного значення дисперсії

$$\sigma_{\lambda_n}^2 = 2\sigma_\lambda^2 \mu_\Sigma^{-1} (\sqrt{1 + \mu_\Sigma} - 1).$$

При умові рівноточних вимірювань справедливою є рівність:  $\mu_\Sigma = k\mu_i$ . У цьому випадку

$$\sigma_{\lambda_n}^2 = 2\sigma_\lambda^2 (k\mu_i)^{-1} (\sqrt{1 + k\mu_i} - 1). \quad (8)$$

На підставі виразу (8) можна зробити висновки:

- при застосуванні декількох вимірників, а точніше при сумісній обробці даних з декількох вимірників, дисперсія похибки фільтрації зменшується; якщо значення відношення сигнал/шум  $\mu_i \gg 1$ , то це зменшення складає величину приблизно  $\sqrt{k}$ ;

- оскільки час встановлення стаціонарного стану в системі фільтрації залежить від відношення сигнал/шум [3] (дане відношення в системі з  $k$  каналами є згідно виразу (7) більшим), то час встановлення в багатоканальному вимірнику буде меншим;

- з точки зору стаціонарної похибки фільтрації багатоканальний вимірник буде еквівалентним одноканальному, в якому відношення сиг-

нал/шум  $\mu_i$  замінено на  $\mu_\Sigma$ .

В умовах обмеженого часу взаємодії наземних та бортових систем, що беруть участь в процесі управління, а також в умовах невеликого обсягу апіорної інформації про фільтровані процеси певним резервом підвищення точності є застосування комплексування вимірників.

Відомо декілька принципів комплексування [3], наприклад, по виходу і по проміжних каскадах. Суттєвим недоліком комплексування по виходу є неможливість послабити (компенсувати) нелінійні явища взаємодії сигналів та завад, що виникають у вимірниках. Особисто це стосується слідкуючих вимірників, в яких можливим є зрив слідкування [4]. Дане зауваження цілком стосується наземних вимірювальних засобів НАКУ України, оскільки абсолютна більшість з них є слідкуючими.

В цьому ракурсі пропонується комплексування двох вимірювальних систем в проміжних каскадах. При цьому одна з систем є слідкуючою, а друга – неслідкуючою, проте обидві системи вимірюють однакові параметри  $\lambda(t)$  (рис. 3).

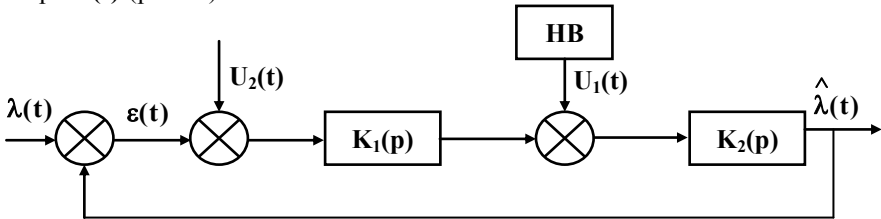


Рис. 3. Комплексування вимірювальних систем

Будемо вважати, що узгодження координат даних вимірників здійснюється без суттєвих похибок, що на практиці практично завжди виконується при застосуванні вторинної обробки інформації.

Вихідна напруга  $U_1(t)$  неслідкуючого вимірника (НВ) вводиться в слідкуючий вимірник між каскадами з передавальними функціями  $K_1(p)$  і  $K_2(p)$ . Цей випадок відповідний уведенню в синхронізм (слідкування за інформативним параметром сигналу) вимірювальних каналів радіотехнічних інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) з широкосмуговими шумоподібними сигналами (ШШС) за допомогою спеціальних синхросерій. Напруга  $U_1(t)$  може бути уявленою у вигляді

$$U_1(t) = H(p)[\lambda(t) + U_{13}(t)],$$

де  $H(p)$  – передавальна функція НВ;  $U_{13}(t)$  – приведена до виходу НВ похибка його вимірювань;  $U_2(t)$  – похибки, що виникають в слідкуючій системі, приведені до сигналу непогодження:  $\varepsilon(t) = \lambda(t) - \hat{\lambda}(t)$ .

Похибка відтворювання фільтрованого параметра  $\lambda(t)$  дорівнює (рис. 3):

$$\varepsilon(t) = \frac{H(p)K_2(p) - 1}{1 + K(p)} \lambda(t) + \frac{K(p)}{1 + K(p)} U_2(t) + \frac{H(p)K_2(p)}{1 + K(p)} U_1(t),$$

де  $K(p) = K_1(p)K_2(p)$ .

Звичайно таке комплексування вимірників відбувається перш за все в режимі виявлення сигналу і початкового уведення слідкуючого вимірника до режиму синхронізму з сигналом, що приймається. При цьому прагнуть, щоб динамічна похибка була відсутня. Умова відсутності цієї похибки має вигляд:  $H(p) K_2(p) = 1$ . У цьому випадку будемо мати

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{1 + K(p)} U_1(t) + \frac{K(p)}{1 + K(p)} U_2(t). \quad (9)$$

Припустимо, що  $K(p)/(1 + K(p)) = K_{\text{еф}}(p)$ , де  $K_{\text{еф}}(p)$  – передавальна функція еквівалентного фільтра, то вираз (9) буде мати вигляд

$$\varepsilon(t) = [1 - K_{\text{еф}}(p)]U_1(t) + K_{\text{еф}}(p)U_2(t). \quad (10)$$

Як виходить з (10), завадова складова  $U_1(t)$  є практично повністю скомпенсованою, а  $U_2(t)$  суттєво послаблена фільтром, отже результуюча точність вимірювань зростає. Побічно зменшення непогодження  $\varepsilon(t)$  приводить до зменшення ймовірності зриву слідкування в системі, що підвищує загальну ймовірність виконання задачі засобами НАКУ по управлінню рухом КА.

**Висновки.** Застосування даного виду комплексування вирішило дві задачі: по-перше, забезпечило оперативність пошуку КА, по-друге, підвищило точність фільтрації ППР. Крім того, у випадку зриву спостереження за КА забезпечувався його швидкий пошук і виявлення по вимірах, отриманих вимірником, що не стежить. Розрахунки показали, що застосування подібних систем дозволили підвищити точність фільтрації ППР у 1,8 рази, а оперативність – у 6 разів. Отже, застосування багатоканальних і (або) багатопараметричних вимірювальних систем, або сполучення даних вимірювань та комплексування декількох систем є досить ефективним засобом для підвищення точності визначення ППР об'єктів, що обслуговуються.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
2. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
3. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. - М.: Высшая школа, 1990. – 334 с.
4. Максимов М.В., Меркулов В.И. Радиоэлектронные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.

Надійшла 20.02.2002

**ЧУМАК Борис Олександрович**, канд. техн. наук, доцент, провідний науковий співробітник наукового центру при ХВУ. Галузь наукових інтересів - розробка та удосконалення інформаційно - вимірювальних систем для управління рухом літаючих об'єктів.

**ДРЕМ'ЮГА Олександр Володимирович**, канд. техн. наук, начальник науково - дослідної лабораторії наукового центру при ХВУ.

**ЛИСАЧЕНКО Ігор Григорович**, ад'юнкт ХВУ. Галузь наукових інтересів - розробка та

*удосконалення інформаційно - вимірювальних систем для управління рухом літаючих об'єктів.*