

УДК 621.396.98

І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов, Б.О. Чумак, Т.С. Деденок

Об'єднаний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Харків

**ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ РУХОМ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ ПО ПРОГРАМНІЙ ТРАЄКТОРІЇ**

*Запропоновані принципи побудови системи обробки інформації, яка дозволяє в реальному масштабі часу отримувати оптимальну управляючу функцію на основі мінімізації модифікованого функціоналу якості управління рухом космічного апарату.*

*наземна радіотехнічна станція, обробка інформації, автоматизована система управління, космічний апарат, програмна траєкторія*

**Вступ**

Спостереження та супровід космічних апаратів (КА) забезпечуються мережею наземних радіотехнічних станцій (РТС) з використанням, закладених в них алгоритмів обробки сигналів і програмного забезпечення. Оброблена траєкторна інформація використовується для прогнозування руху КА з метою подальшого управління ним.

**Аналіз літератури.** Як було доведено [1, 2] якість управління та корекції орбіти КА погіршується при виникненні похибок в ході обробки вимірювальної інформації та розрахунках балістичних даних.

З метою усунення вказаних недоліків поставимо **задачу** синтезу системи обробки інформації (СОІ) в автоматизованій системі управління (АСУ) рухом КА по програмній траєкторії, що виконує задачі обчислення даних спостереження і супроводу КА в реальному масштабі часу при забезпеченні оптимальних характеристик управління.

**Результати досліджень**

У відповідності з вимогами до АСУ КА подвійного та воєнного призначення якість вирішення поставлених перед нею задач має бути досягнутою при заданих показниках оперативності. Побудову системи обробки інформації будемо проводити з урахуванням принципів функціонування сумішених ра-

діотехнічних систем (СРТС) [3]. Отже, вектор  $\vec{y}(t)$  спостережуваних функцій описується рівнянням [3]:

$$\vec{y}(t) = \vec{R} [t, \vec{\lambda}(t), \vec{Q}(t)] + \vec{n}(t). \quad (1)$$

Рівняння, що пов'язує вектор стану, управляючі функції  $\vec{u}(t)$  і збурення записується у вигляді:

$$\frac{d\vec{\lambda}(t)}{dt} = \vec{f} [\vec{\lambda}(t), \vec{u}(t), \vec{a}(t)] + \Gamma(t) \vec{\xi}(t). \quad (2)$$

СОІ має вирішувати задачу мінімізації функціоналу [4]:

$$E_0(t) = \langle J_0(t) / \delta \vec{y}(\sigma) \rangle = \langle \delta \vec{\lambda}_{\text{вим}}^T(T) \underline{E}_0 \delta \vec{\lambda}_{\text{вим}}(T) + \delta \vec{\lambda}_{\text{бал}}^T(T) \underline{L}_0 \delta \vec{\lambda}_{\text{бал}}(T) + \int_0^T [\delta \vec{\lambda}_{\text{вим}}^T(\tau) \underline{Q}_0 \delta \vec{\lambda}_{\text{вим}}(\tau) + \delta \vec{\lambda}_{\text{бал}}^T(\tau) \underline{Y}_0 \delta \vec{\lambda}_{\text{бал}}(\tau) + \delta \vec{u}^T(\tau) \underline{P}_0(\tau) \delta \vec{u}(\tau)] d\tau / \delta \vec{y}(\sigma) \rangle. \quad (3)$$

Оптимальна управляюча функція визначається співвідношенням [4]

$$\delta \vec{u}(t) = -\underline{G}_0(t) \delta \hat{\vec{\lambda}}(t). \quad (4)$$

З урахуванням функціоналу (3), який повинен бути мінімізований, і розділення похибок за природою виникнення, запишемо лінеаризоване рівняння у вигляді

$$\frac{d\delta \vec{\lambda}(t)}{dt} = \underline{S}_0 \delta \vec{\lambda}(t)_{\text{вим}} + \underline{M}_0 \delta \vec{\lambda}(t)_{\text{бал}} +$$

$$+\underline{B}_0(t)\delta\bar{u}(t)+\underline{H}_0(t)\left[\delta\bar{y}(t)-\underline{C}_0(t)\delta\bar{\lambda}(t)\right]. \quad (5)$$

Точність фільтрації  $\underline{\Sigma}_0(t)$  визначається модифікованим диференціальним рівнянням Ріккати [4]

$$\begin{aligned} \frac{d\underline{\Sigma}_0(t)}{dt} = & \underline{S}_0(t)\underline{\Sigma}_{\text{вим}}(t)+\underline{\Sigma}_{\text{вим}}(t)\underline{S}_0^T(t)+ \\ & +\underline{M}_0(t)\underline{\Sigma}_{0\text{бал}}(t)+\underline{M}_0(t)\underline{\Sigma}_{0\text{бал}}^T(t)+ \\ & +\underline{\Gamma}(t)\underline{\Theta}(t)\underline{\Gamma}^T(t)-\underline{\Sigma}_0^T(t)\underline{C}_0^T(t)\underline{N}^{-1}(t)\underline{C}_0(t)\underline{\Sigma}_0(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Рівняння (5) вирішується за допомогою СОІ, яка реалізує фільтрацію Калмана. Структура блоку фільтра Калмана (БФК) наведена в [5]. Схема взаємодії БФК та СОІ наведена на рис. 1. При цьому на виходах фільтра формуються оптимальні оцінки фільтрованого процесу та управляючої функції при залученні оцінок вимірюваних навігаційних функцій та балістичних прогнозних значень руху КА.

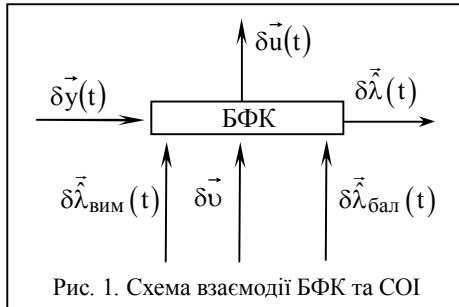


Рис. 1. Схема взаємодії БФК та СОІ

Визначення точності даних оцінок здійснюється шляхом вирішення рівняння Ріккати при застосуванні блоку точності калмановської фільтрації (БТКФ), структура якого наведена в [5]. Схема взаємодії БТКФ та СОІ наведена на рис. 2. Як зазначено в [2] для підвищення точності управління КА по програмній траєкторії необхідно покращувати якість вимірювань, які залучаються до обробки, якість балістичного прогнозу руху, а також зменшувати вплив можливих зовнішніх збурень.

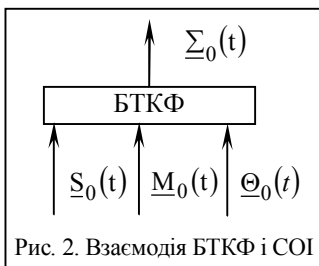


Рис. 2. Взаємодія БТКФ і СОІ

При такому підході необхідно мати поточні оцінки розсіювання дисперсії вимірювальної інформації, яка характеризується ймовірністю знаходження похибки вимірювання в заданих межах

$$P_{\lambda(t)} = P\left(\lambda_{\text{ісг}}(t) - \sigma_{\text{доп}} < \hat{\lambda}(t) < \lambda_{\text{ісг}}(t) + \sigma_{\text{доп}}\right). \quad (7)$$

Для оцінки якості вимірювальної інформації слід порівнювати величину порогової надійності вимірювальної інформації  $P_{\text{інф}}$  з величиною  $P_{\lambda(t)}$ . При цьому, якщо

$$P_{\lambda(t)} - P_{\text{інф}} \geq 0, \quad (8)$$

то даний вимір надходить в обробку для вирішення

задач балістичного забезпечення. В протилежному випадку проводяться додаткові вимірювання. Для знаходження даної ймовірності і порівняння її з пороговою величиною застосовується блок розрахунку достовірності (БРД). Схема БРД наведена на рис. 3, де БП – блок порівняння.

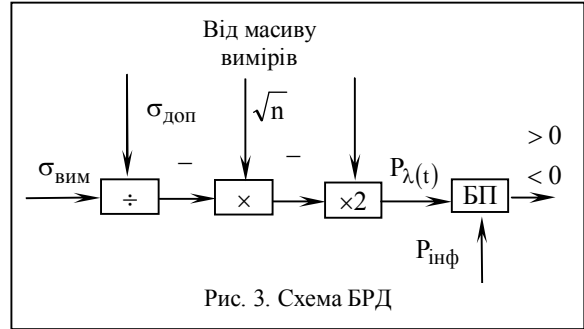


Рис. 3. Схема БРД

Для мінімізації функціоналу (3) слід забезпечити за визначений час достовірний розрахунок значення відхилення прогнозного вектору від оціненого  $\hat{\lambda}_{\text{вим}}(t)$

$$\hat{\lambda}_{\text{пр}}(t) - \hat{\lambda}_{\text{вим}}(t) = \Delta\hat{\lambda}. \quad (9)$$

Наступною необхідною операцією для мінімізації функціоналу (3) є розрахунок оптимальної величини управляючої дії відповідно до розузгодження між вимірним значенням вектору стану  $\bar{\lambda}_{\text{вим}}(t)$  КА та його прогнозним значенням, а саме

$$\Delta\hat{\lambda}_1(t) \cdot (-\underline{G}^{-1}) = \Delta\bar{U}_1(\tau), \tau \in [t_0, t_{\text{пр}}], \quad (10)$$

де  $\Delta\bar{U}_1(\tau)$  – перше наближення ітераційного процесу визначення величини управляючої дії;  $\underline{G}^{-1}$  – зворотна перехідна матриця. Схема блоку розрахунку управляючої дії (БРУД) наведена на рис. 4.

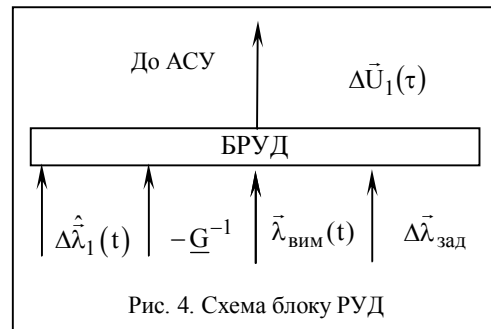


Рис. 4. Схема блоку РУД

Ітераційний цикл припиняється при виконанні

$$|\Delta\bar{\lambda}_1 - \Delta\bar{\lambda}_{i+1}| \leq \Delta\bar{\lambda}_{\text{зад}}. \quad (11)$$

При цьому, оцінка величини управляючої дії вважається вірогідною.

Як було визначено в [3], точність вимірювань навігаційних параметрів руху КА визначається сумарною дисперсією похибки

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{\text{фл}}^2 + \sigma_{\text{дин}}^2 + \sigma_{\text{ап}}^2 + \sigma_{\text{ан}}^2. \quad (12)$$

Оптимізація управління КА відбувається лише за умов мінімальних похибок визначення вимірювальної

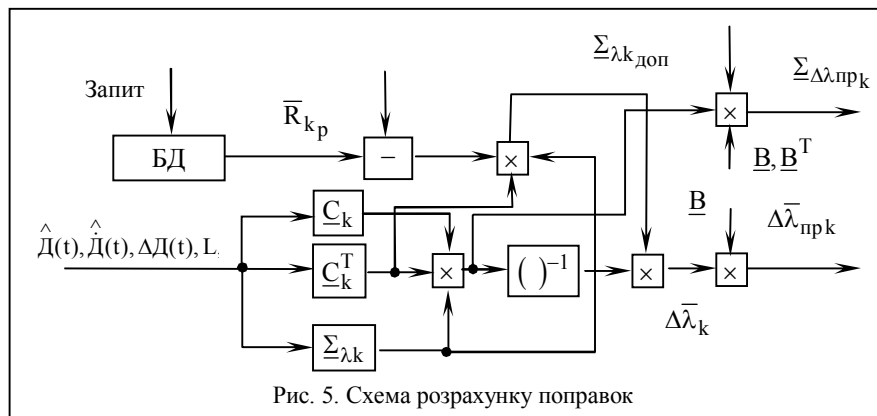


Рис. 5. Схема розрахунку поправок

інформації. Мінімізація сумарної дисперсії похибок вимірювань досягається шляхом оптимізації (адаптації) параметрів слідкуючих фільтрів, що входять до складу приймальних пристроїв СРТС. При цьому слід обов'язково знати з високою достовірністю точне значення параметрів сигнально-задавої та динамічної обстановки знову ж таки в реальному масштабі часу.

Мінімальне значення дисперсії сумарної похибки вимірів з далькості в СРТС дорівнює [1]

$$\sigma_{\Delta \Sigma}^2 \min(t) \cong 0,99 \frac{\ddot{D}^{2/5}(t) \cdot c^{8/5} \cdot \tau_0^{8/5} \cdot N_0^{4/5} \left(1 + \frac{\pi^2 N_0 R_{\text{инф}}}{16 P_c(t)}\right)^{4/5}}{P_c^{4/5}(t)}, \quad (13)$$

для каналу супроводу з швидкості

$$\sigma_{\Delta \Sigma}^2 \min(t) \cong 1,04 \frac{D^{2/3}(t) \cdot \lambda_0^{4/3} \cdot N_0^{2/3} \left(1 + \frac{R_{\text{инф}} \cdot N_0}{2 \cdot P_c(t)}\right)^{2/3}}{\pi^{4/3} \cdot P_c^{2/3}(t) \cdot K_c^{4/3}}. \quad (14)$$

Для розрахунку поправок до початкових умов руху використовується співвідношення [1]

$$\Delta \bar{\lambda}_k = \left( C_k^T \Sigma_{\lambda k} C_k \right)^{-1} C_k^T \Sigma_{\lambda k} \Delta \bar{R}_k, \quad (15)$$

де  $\Delta \bar{R}_k = \bar{R}_{kp} - \hat{R}_k$  – різниця між вектором розрахункових та вимірних значень навігаційних параметрів руху;  $\Sigma_{\lambda k}$  – матриця дисперсій та коваріацій похибок визначення компонентів вектору стану.

Схема розрахунку поправок наведена на рис. 5, де БД – база даних (архів вимірів і цілевказівок (ЦВ)).

Похибки прогнозу параметрів руху розраховуються за формулою

$$\Delta \bar{\lambda}_{\text{прк}} = B [\Delta \bar{R}_k, \Sigma_{\lambda k}] \cdot \Delta \bar{\lambda}_k, \quad (16)$$

де  $B$  – оператор прогнозу вектору стану.

Для оцінки точності отриманого результату, тобто якості прогнозу розраховується матриця

$$\hat{\Sigma}_{\Delta \lambda \text{ прк}} = B_k \hat{N}_k B_k^T, \quad (17)$$

де  $N_k$  – діагональна матриця дисперсій похибок вимірювань навігаційних функцій.

При використанні функції правдоподібності відносно інформативного параметра  $\lambda$  і параметрів си-

гнально-задавоих обставин розраховуються оцінки:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} y(t) S(t, \hat{\lambda}) dt;$$

$$\hat{N}_0 = \frac{1}{2F(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} [y(t) - \hat{\varepsilon} S(t, \hat{\lambda})]^2 dt, \quad (18)$$

якість яких характеризується дисперсіями [7]:

$$\hat{\sigma}_{\hat{N}_0}^2 = \frac{\hat{N}_0^2}{2F(T_2 - T_1)}; \quad \hat{\sigma}_{\hat{\varepsilon}}^2 = \frac{\hat{N}_0}{2(T_2 - T_1)}. \quad (19)$$

Оцінка розсіювання величини дисперсії флуктуаційної похибки вимірювань параметрів руху КА, з урахуванням (18), (19), буде визначатися як [6]

$$\hat{\sigma}_{\sigma_{\text{дфл}}}^2 = \frac{c^2 \tau_i T_{\text{П}} \Delta f_{\text{ш}}}{2\pi} \left( \frac{\hat{\sigma}_{N_0}}{\hat{P}_c} - \frac{\hat{N}_0 \hat{\sigma}_{P_c}}{\hat{P}_c^2} \right) = \frac{c^2 \tau_i T_{\text{П}} \Delta f_{\text{ш}} \hat{N}_0}{2\pi \hat{P}_c} \left( \frac{1}{\sqrt{2F(T_2 - T_1)}} - \frac{\hat{\sigma}_{P_c}}{\hat{P}_c} \right), \quad (20)$$

де  $\hat{\sigma}_{P_c} = \hat{\sigma}_{\varepsilon}^2 = \hat{N}_0 / (2(T_2 - T_1))$ ;  $\hat{P}_c = \hat{\varepsilon}^2 / 2$ .

На рис. 6 наведено спрощене технічне рішення спецпроцесору щодо реалізації визначення оцінок сигнально-задавоих обставин і визначення величини розсіювання дисперсії флуктуаційної похибки, де БО – блок оцінки, БР – блок розрахунку, БРК – блок розрахунку коефіцієнтів.

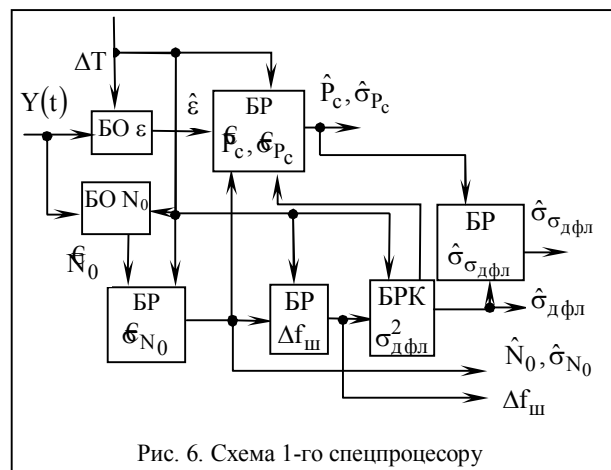


Рис. 6. Схема 1-го спецпроцесору

Як доведено [7], величина інтервалу  $\Delta T$  вибирається із умови незалежності відліків  $D_k$

$$\Delta T > T_{\text{инт}} = 1/\Delta f_{\text{ш}}. \quad (21)$$

Дане значення  $\Delta T$  формується спецпроцесором СОІ, де розраховуються величини:

$$\sigma_{\dot{D}_k}^2 = \frac{2\sigma_{D_k}^2}{\Delta T^2}; \quad (22)$$

$$\sigma_{\ddot{D}_k}^2 = \frac{6\sigma_{D_k}^2}{\Delta T^4}. \quad (23)$$

При цьому величина динамічної похибки розраховується за виразом

$$\sigma(t)_{\text{дин}} = \ddot{D}(t) / (4\Delta f_{\text{ш}}^2), \quad (24)$$

а розсіювання оцінки величини динамічної похибки вимірювань параметрів руху КА за виразом

$$\hat{\sigma}_{\sigma_{\text{дин}}}^2 = 3\hat{\sigma}_D^2 / (8\Delta T^4 \Delta \hat{f}_{\text{ш}}^4). \quad (25)$$

На рис. 7 наведено спрощену схему технічного рішення спецпроцесору, що реалізує метод оцінки динамічної похибки вимірювань параметрів руху КА та визначення розсіювання такої оцінки.

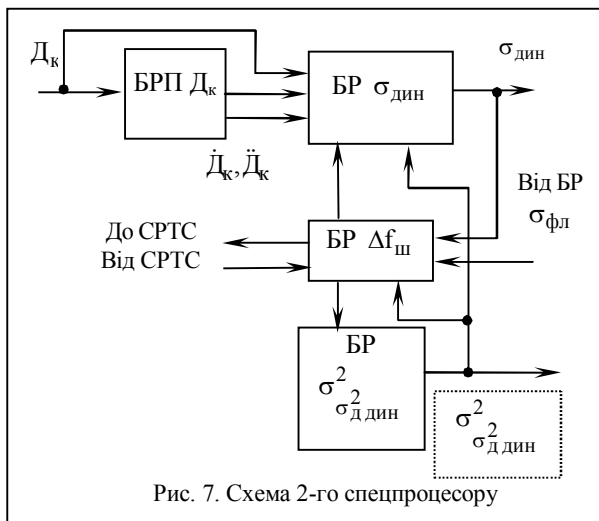


Рис. 7. Схема 2-го спецпроцесору

Принцип роботи моделі системи обробки інформації з урахуванням запропонованих рішень полягає в наступному.

Сигнал, що містить в собі інформацію про об'єкт, з простору інформаційних параметрів надходить до прийомної апаратури.

На першому етапі, в прийомній апаратурі проводиться виділення корисного сигналу на фоні впливу адитивних і мультиплікативних завад ( $\lambda_N, \lambda_M$ ). Результатом первинної обробки сигналу є оцінки наявності сигналу ( $\hat{\epsilon}_0 > \hat{N}_0$ ), оцінка його навігаційних ( $\hat{\lambda}$ ) і інформаційних ( $\hat{\lambda}_{\text{инф}}$ ) параметрів.

Слід зазначити, що на цьому ж етапі відбувається розділення навігаційних параметрів сигналу і

його семантичної складової, службової інформації цільового призначення ( $\hat{\lambda}_{\text{инф}}$ ), яка надходить до апаратури обробки.

На підставі оцінок по складових першого етапу проводиться загальна оцінка роботи апаратури в цілому ( $\hat{\Sigma}$ ).

Оцінений вектор стану, перетворений у вигляд, зручний для подальших обчислень, уводиться до апаратури вторинної обробки та фільтрації.

Після фільтрації аномальних вимірів проводиться ідентифікація ( $I_d$ ) отриманих вимірів з тими, що зберігаються в каталозі ЦВ.

Далі обчислюється оцінка похибки між цілєвказівками і вимірюваннями, з урахуванням якої приймається рішення про вірогідність отриманих вимірів ( $P_\lambda$ ).

Потім, з урахуванням цілєвказівок і  $P_\lambda$ , обчислюється величина управляючої дії. Особливо важливий такий підхід в умовах короткої тривалості інтервалів спостережень, тобто малої кількості «мірних витків» і просторових обмежень.

Чисельний аналіз реалізації запропонованої моделі показав, що час розрахунку уточнених ПУ на добовому інтервалі з використанням отриманих вимірювань при використанні чисельної моделі прогнозу складає від 3 до 6 секунд (для ПЕОМ з тактовою частотою 400 МГц).

У зв'язку з цим розрахунок уточнених ПУ у режимі реального часу є цілком доступним і необхідним для процесу усталеного і якісного супроводу і управління космічним апаратом.

На рис. 8 зображено запропоновану модель системи обробки інформації.

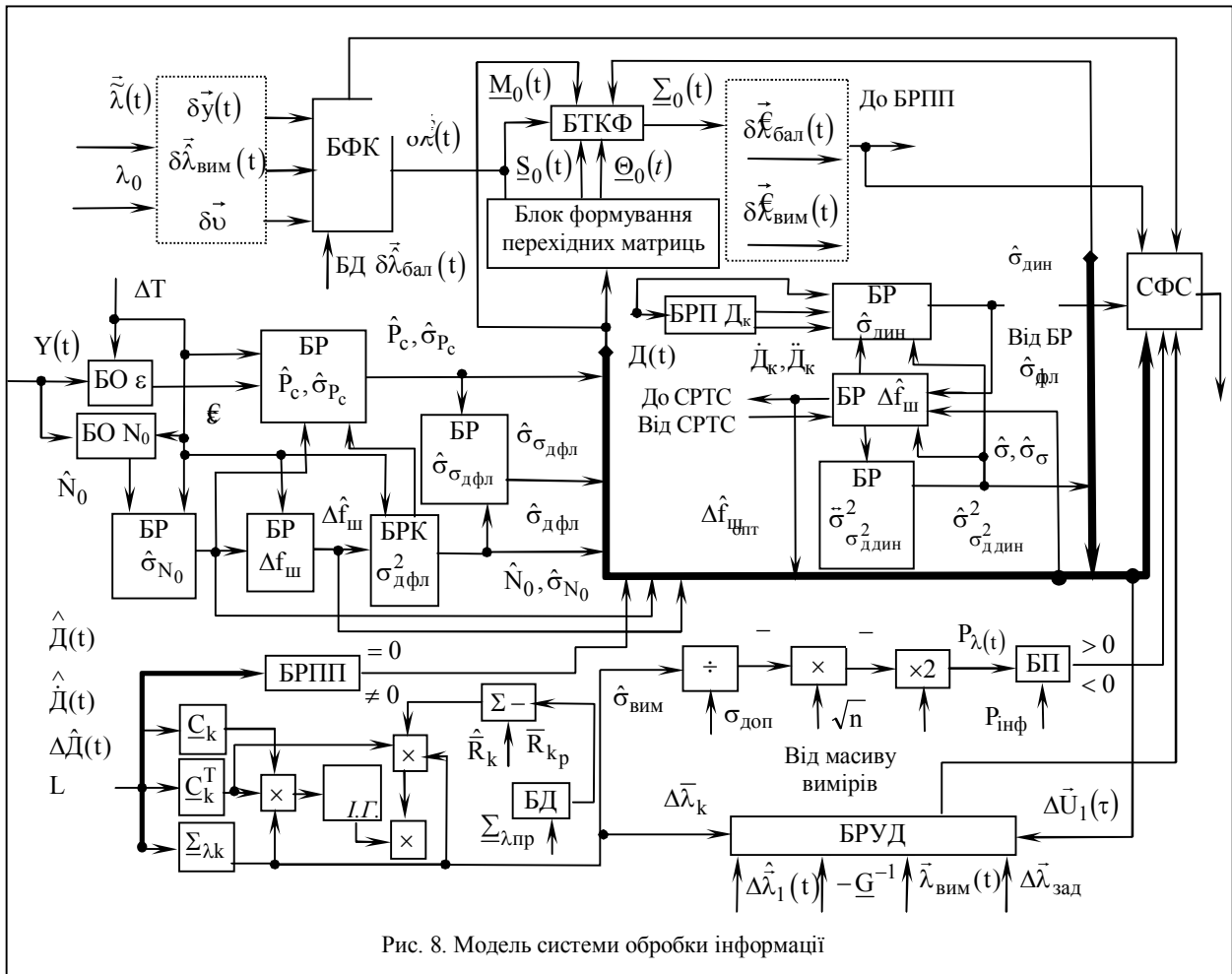
## Висновок

Запропонований підхід щодо принципів побудови системи обробки інформації дозволяє в реальному масштабі часу отримувати оптимальну управляючу функцію на основі мінімізації модифікованого функціоналу якості управління за рахунок використання в ній наступного:

- розробленої моделі модифікованого фільтра Калмана для визначення оптимальної управляючої функції і розробленої моделі оцінки точності Калмановської фільтрації;

- оцінки поточної точності вимірювальної інформації з визначенням величини розсіювання дисперсій оцінок компонентів вектора стану космічного апарату і прийняття рішення на управління з їх урахуванням;

- уточнення даних цілєвказівок шляхом використання як апіорної інформації про рух космічного апарату по програмній траєкторії, так і її уточнення за допомогою оновлення вимірювальної інформації підвищеної точності.



Запропоновані принципи дозволяють підвищити показники ефективності застосування автоматизованої системи управління рухом космічного апарату, а саме:

- підвищити оперативність у 2,9 рази;
- зменшити сумарні похибки вимірів на етапі первинної обробки у 1,5 – 2 рази;
- отримати виграш в точності визначення параметрів руху космічного апарату на добовому інтервалі в 1,5 – 2 рази;
- підвищити точність прогнозу руху у 1,9 рази.

### Список літератури

1. Аналіз впливу якості оцінок параметрів руху на оцінки прогнозу вектору стану КА / О.В. Дремлюга, І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов та інші. // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС. – 2006. – Вип. 4 (53). – С. 38-45.
2. Роянов О.М., Чумак Б.О., Ямницький В.А. Прогноз руху космічного апарату за результатами вимірювань суміщеною радіотехнічною системою // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2006. – № 3 (29). – С. 39-42.
3. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. – М.: РИИ, 1981. – 288 с.

4. Лисаченко І.Г., Роянов О.М., Чумак Б.О. Математична модель оптимальної обробки вимірювальної інформації при управлінні КА по програмній траєкторії // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – К.: НАНУ, ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2005. – Вип. 32. – С. 131-136.

5. Лисаченко І.Г., Роянов О.М., Чумак Б.О. Синтез фільтру зі змінним коефіцієнтом підсилення, який адаптується до складних умов застосування та мінімізує похибку слідування // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС. – 2005. – Вип. 5 (45). – С. 96-103.

6. Метод оцінки флуктуаційної похибки вимірювань параметрів руху космічного апарату з визначенням її достовірності / Т.С. Деденок, І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов, Б.О. Чумак, О.М. Богдановський // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС. – 2006. – Вип. 3. – С. 200-207.

7. Лисаченко І.Г., Роянов О.М., Чумак Б.О. Метод оцінки динамічної похибки вимірювань параметрів руху КА з визначенням її достовірності // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС. – 2005. – Вип. 2. – С. 184-188.

Надійшла до редакції 8.07.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.