

ЗАХАРІН Ф.М., провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

САМОЙЛЕНКО О.В., старший науковий співробітник, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

МЕДВЕДЄВ Г.А., начальник науково-дослідного відділу

АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕЛЬЄФОМЕТРИЧНИХ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ В НАВІГАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСАХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Пропонується аналіз перспектив розвитку
рельєфометричних кореляційно-екстремальних
навігаційних систем (КЕНС) в навігаційних
комплексах літальних апаратів (ЛА), що можуть
бути враховані при удосконаленні ЛА військової
авіації України*

При проведенні модернізації навігаційних комплексів ЛА для підвищення точності визначення навігаційних параметрів широко використовують радіотехнічні коректори, перш за все супутникові навігаційні системи. Але в багатьох випадках існують обмеження щодо використання джерел радіонавігаційної інформації. За таких умов виникає об'єктивна необхідність введення до складу навігаційних комплексів ЛА систем навігації за фізичними полями Землі або, інакше кажучи, геофізичними полями (ГФП) [1].

Геофізичні поля можна розділити на два великих класи: поверхневі поля Землі, параметри яких визначені тільки на земній поверхні, та просторові поля, параметри яких визначені в кожній точці навколоземного простору.

До поверхневих полів відносяться: поле рельєфу земної поверхні, що характеризується взаємним розташуванням висот; оптичне поле земної поверхні, що характеризується геометричними, яскравими і спектральними ознаками зображення; теплове поле земної поверхні, що характеризується передбачуваною температурою цих об'єктів; поле радіолокаційного контрасту, що характеризує відбивні властивості місцевості в радіодіапазоні довжин хвиль та ін.

До просторових полів відносяться: магнітне поле Землі, що характеризується напруженістю і напрямком магнітних силових ліній; гравітаційне поле Землі, що характеризується силою притягіння.

Характеризуючи використання ГФП у якості інформаційного джерела навігаційної системи, вагомим показником відповідного поля є радіус просторової кореляції та змінюваність поля у часі. Наприклад, для рельєфометричних систем він залежить від характеристик місцевості (для пустель він може складати сотні метрів, а для гірської місцевості – десятки метрів).

До основних класів навігаційних систем з використанням інформації про ГФП належать:

картографічні, для яких необхідна картографічна інформація (наприклад, матриці значень поля) та відповідне програмно-алгоритмічне забезпечення;

стереоскопічні, які працюють по полям зображень земної поверхні, але не передбачають наявності карти поля зображень (для функціонування таких систем потрібна картографічна інформація про рельєф земної поверхні).

У зв'язку з наявністю на борту ЛА радіовисотоміра та баровисотоміра найбільш просто можуть бути реалізовані рельєфометричні навігаційні системи.

Навігація за картами фізичних полів, таких як магнітне поле, поле рельєфу та ін., отримала назву кореляційно-екстремальної навігації. Кореляційно-екстремальна навігація основана на співставленні інформації, що отримана безпосередньо бортовим датчиком поля, з інформацією про поле (карту), що зберігається в бортовому запам'ятовуючому пристрої. Кореляційно-екстремальна навігаційна підсистема може являтися складовою частиною пілотажно-навігаційного комплексу (ПНК). Можливі різні схеми алгоритмів кореляційно-екстремальної навігації, а саме: безошукові, пошукові та рекурентно-пошукові.

Теоретичні основи алгоритмічного забезпечення розроблені такими провідними вченими як академік РАН Красовський О.А., професор Белоглазов І.М. та ін.

Так, безошукові схеми побудови КЕНС основані на лінійному фільтрі Калмана першого наближення. Для реалізації цього типу схем необхідне таке визначення початкових оцінок координат місцезнаходження літального апарату, коли середньоквадратична похибка визначення координат менша просторового радіуса кореляції поля. Тоді за допомогою стандартного алгоритму калманівського типу знаходяться уточнені оцінки координат та інших параметрів руху об'єкту.

Пошукові схеми передбачають введення гіпотез щодо координат та ін. параметрів руху об'єкта, розрахунку спеціального функціоналу для кожної гіпотези, який характеризує відповідність кожної гіпотези і бортових вимірів поля. В якості істинної вибирається гіпотеза, значення функціоналу для якої є мінімальним. Для реалізації такого типу схеми в якості первинного джерела визначення координат може бути достатньо груба навігаційна система.

Рекурентно-пошукові (комбіновані) схеми об'єднують переваги безошукових та пошукових схем та, по суті, зводяться до паралельної реалізації декількох фільтрів калманівського типу, кожний з яких відповідає визначеній гіпотезі. В якості вихідної оцінки параметрів руху об'єкту приймається вихідна інформація такого фільтру, якому відповідає мінімум спеціального функціоналу.

Розглянемо детально найбільш перспективну рекурентно-пошукову схему алгоритмів кореляційно-екстремальної навігації (рекурентно-пошукове оцінювання)

Математична постановка задачі в рекурентно-пошуковому оцінюванні здійснюється таким чином.

Задано дискретну динамічну систему [2, 3]

$$X_{i+1} = A_i(D)X_i + \xi_i, \quad (1)$$

$$Z_i = H_i(D)X_i + F_i(D) + \eta_i, \quad i = 0, 1, \dots, N, \quad (2)$$

де

$$X_i = (X_{i1}, \dots, X_{in})^T, \quad Z_i = (Z_{i1}, \dots, Z_{in})^T,$$

$$\xi_i = (\xi_{i1}, \dots, \xi_{in})^T, \quad \eta_i = (\eta_{i1}, \dots, \eta_{in})^T, \quad (3)$$

$$F_i(D) = [F_{i1}(D), \dots, F_{in}(D)]^T,$$

множина гіпотез $G = \{D_1, \dots, D_j, \dots, D_l\}$ та апіорні вірогідності цих гіпотез $p_j = P(D_j), j = 1, \dots, l$. Матриці об'єкту $A_i(D)$ і каналу спостереження $H_i(D), F_i(D)$, а також коваріаційної матриці $Q_i(D), R_i(D)$ центрованих нормальних впливів ξ_i, η_i , що обурюють, і параметри початкового нормального розподілу $p(X_0|D)$ залежать від $D \in G$ гіпотези, що має місце під час проведення спостережень на інтервалі $i = 0, 1, \dots, N$:

$$M \langle \xi_i | D \rangle = 0, \quad M \langle \eta_i | D \rangle = 0, \quad M \langle \xi_i \eta_q^T | D \rangle = 0$$

для $\forall D$,

$$M \langle \xi_i \xi_q^T | D \rangle = Q_i(D) \delta_{iq}, \quad M \langle \eta_i \eta_q^T | D \rangle = R_i(D) \delta_{iq}, \quad (4)$$

$$p(X_0 | D) \in N[m(D), G(D)],$$

δ_{iq} – символ Кронекера, $m(D), G(D)$ – математичне сподівання і коваріаційна матриця розподілу вектора X_0 . Потрібно за проведеними спостереженнями Z_0, \dots, Z_N щонайкраще оцінити вектор стану X_N і вибрати гіпотезу D_j . Матриці Q_i, R_i для будь-якого моменту часу і будь-якої можливої гіпотези D_j вважаємо невиродженими.

Отже, нехай маємо кінцеву множину гіпотез $G = \{D_1, \dots, D_j, \dots, D_l\}$ і задані апіорні імовірності гіпотез $p_j = P(D_j)$. У дискретні моменти часу $i = 0, 1, \dots, N$ спостерігається сигнал

$$Z_i = H_{ji} X_i + F_{ji} + \eta_i, \quad (5)$$

залежний від вектора стану X_i лінійної дискретної динамічної системи, що описується рівнянням

$$X_{i+1} = A_{ji} X_i + \xi_i. \quad (6)$$

Матриці об'єкту $A_{ji} = A_i(D_j)$, каналу спостереження $H_{ji} = H_i(D_j), F_{ji} = F_i(D_j)$, статистичні характеристики збурень η_i, ξ_i і початкового розподілу вектора стану X_0 залежать від гіпотези, що має місце на інтервалі спостереження $i = 0, 1, \dots, N$. Спостерігачеві апіорі невідомо, яка з гіпотез виконується. Випадкові збурювання η_i, ξ_i – центровані нормально розподілені дискретні «білі» шуми, їх умовні коваріаційні матриці рівні

$$M \langle \xi_i \xi_q^T | D_j \rangle = Q_{ji} \delta_{iq},$$

$$M \langle \xi_i \eta_q^T | D_j \rangle = 0, \quad M \langle \eta_i \eta_q^T | D_j \rangle = R_{ji} \delta_{iq}. \quad (7)$$

Початкові умови розподілу вектора X_0 нормальні

$$p(X_0|D_j) \in N(m_j, G_j), j = 1, \dots, l, \quad (8)$$

де $m_j = m(D_j)$ та $G_j = G(D_j)$ – умовне математичне сподівання і коваріаційна матриця розподілу $p(X_0|D_j)$. Тоді оптимальний в сенсі максимуму $p(x_N, j|z^N)$ алгоритм оцінювання вектора стану X_N і вибору гіпотези D_j включає три групи рівнянь:

рівняння оцінок

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_{ji+1} &= A_{ji} \hat{x}_{ji} + K_{ji+1} \Delta_{ji+1} \\ \Delta_{ji+1} &= z_{ji+1} - H_{ji+1} A_{ji} \hat{x}_{ji} - F_{ji+1} \\ K_{ji+1} &= \Gamma_{ji+1} H_{ji+1}^T R_{ji+1}^{-1} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

рівняння коваріаційної матриці

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{ji+1}^{-1} &= M_{ji+1}^{-1} + M_{ji+1}^T R_{ji+1}^{-1} H_{ji+1} \\ M_{ji+1}^{-1} &= Q_{ji}^{-1} - Q_{ji}^{-1} A_{ji} \Pi_{ji} A_{ji}^T Q_{ji}^{-1} \\ \Pi_{ji}^{-1} &= \Gamma_{ji}^{-1} + A_{ji}^T Q_{ji}^{-1} A_{ji} \end{aligned} \right\} X_2 \quad (10)$$

і рівняння функціоналів

$$\left. \begin{aligned} I_{ji+1} &= I_{ji} + \Delta_{ji+1}^T \sum_{ji+1}^{-1} \Delta_{ji+1} \varepsilon_{ji+1}, \\ \varepsilon_{ji+1} &= \ln \left(|Q_{ji} R_{ji+1} \Pi_{ji}^{-1}| \right), \\ \sum_{ji+1}^{-1} &= R_{ji+1}^{-1} - R_{ji+1}^{-1} H_{ji+1}^{-1} \Gamma_{ji+1} H_{ji+1}^T R_{ji+1}^{-1} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

які розраховуються для всіх гіпотез, що перевіряються, та для моментів часу $i = 0, 1, \dots, N$.

Співвідношення (9), (10), (11) вирішуються за наступних початкових умов:

для рівняння оцінок

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_{j0} &= m_j + K_{j0} \Delta_{j0}, \\ \Delta_{j0} &= z_0 - H_{j0} m_j - F_{j0}, \\ K_{j0} &= \Gamma_{j0} H_{j0}^T R_{j0}^{-1}; \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

для рівнянь коваріаційної матриці

$$\Gamma_{j0}^{-1} = G_{j0}^{-1} + H_{j0}^T R_{j0}^{-1} H_{j0}, \quad (13)$$

для рівнянь функціоналів

$$\left. \begin{aligned} I_{j0} &= \Delta_{j0}^T \sum_{j0}^{-1} \Delta_{j0} + \varepsilon_{j0} \\ \varepsilon_{j0} &= \ln \left(|G_j R_{j0} p_j^{-2}| \right) \\ \sum_{j0}^{-1} &= R_{j0}^{-1} - R_{j0}^{-1} H_{j0} \Gamma_{j0} H_{j0}^T R_{j0}^{-1} \quad j = l \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

За формулами (9)–(14) розраховуються кінцеві значення функціоналів I_{jN} . Як найбільш вірогідна вибирається гіпотеза D_v , що мінімізує функціонал I_{jN} :

$$I_{vN} = \min I_{jN},$$

а оцінка \hat{x}_{vN} , що видається відповідною цій гіпотезі дискретним фільтром Калмана, є оптимальною оцінкою вектора стану X_N .

Рівняння (9)...(14) повністю визначають алгоритм рекурентно-пошукового оцінювання.

Схема оптимального алгоритму оцінювання зображена на рис.1, де τ означає

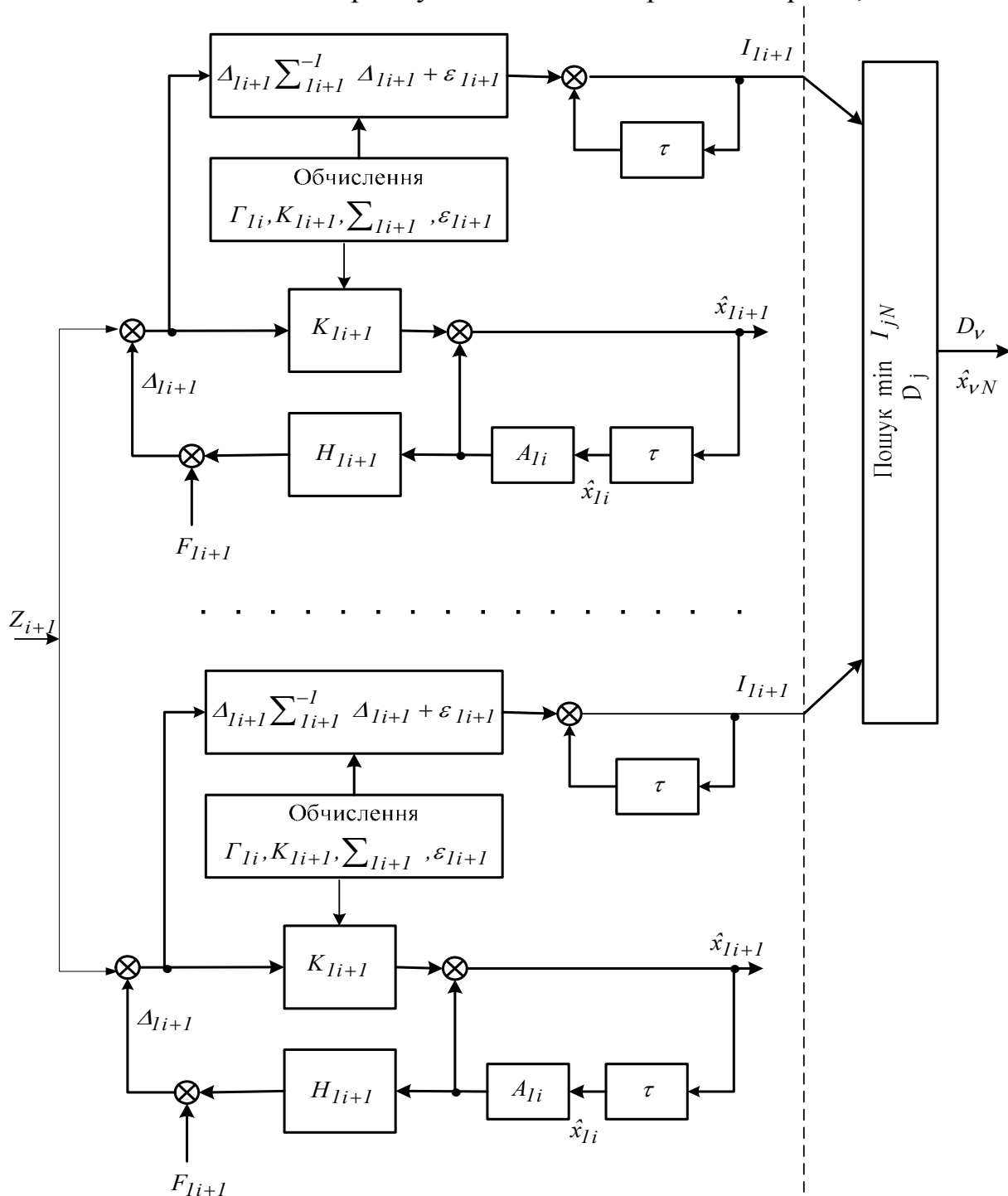


Рис.1. Схема рекурентно-пошукового алгоритму оцінювання

блок одиничного запізнювання. Видно, що алгоритм оцінювання структурно розпадається на дві частини: рекурентну, де моделюються дискретні фільтри Калмана і розраховуються значення функціоналів I_{ji} , і пошукову, в якій відшукується $\min I_{jN}$. Цією обставиною і пояснюється назва алгоритму.

Для впровадження рельєфометричних КЕНС на ЛА необхідно використовувати радіовисотомір і баровисотомір та матричну форму побудови еталонів рельєфу, коли робоча карта представляється у вигляді таблиці чисел, що відображує стохастичне поле рельєфу місцевості в умовній прямокутній системі координат XOY . Для районів земної поверхні з полем рельєфу середньої "інтенсивності" та за умов представлення робочих карт КЕНС в матричній формі, і використання звичайної для відновлення поля рельєфу ГІС-інтерполяції (ГІС-геоінформаційні системи) максимально припустимий інтервал дискретизації складає $\approx 50...75$ м.

Процес формування сигналу поля рельєфу на борту ЛА супроводжується помилками вимірювання, які характеризуються середньоквадратичною помилкою $\sigma_{\approx \text{вим}}$, що залежить від характеристик радіовисотоміра і системи оцінювання параметрів руху ЛА у вертикальній площині. Величину [4] назвемо узагальненою помилкою

$$\sigma_{\approx} = \sqrt{\sigma_{\approx k}^2 + \sigma_{\approx n}^2 + \sigma_{\approx \text{вим}}^2}$$

вимірювання поля - шумом системи. Тоді під співвідношенням сигнал/шум у системі будемо розуміти відношення середньоквадратичного значення поля рельєфу до середньоквадратичного значення узагальненої помилки вимірювання поля рельєфу.

У теорії КЕНС доведено, що при співвідношенні $\sigma_{\approx \text{поля}} / \sigma_{\approx} < 2$, район відноситься до числа малоінформативних, в якому реалізація принципів екстремальної навігації ускладнена.

Таким чином, в якості алгоритмічного забезпечення рельєфометричної кореляційно-екстремальної навігаційної системи для навігаційного комплексу можна запропонувати використовувати рекурентно-пошукові (комбіновані) алгоритмічні схеми, які об'єднують переваги безпошукових та пошукових схем, та, по суті, зводяться до паралельної реалізації декількох фільтрів калманівського типу, кожний з яких відповідає визначеній гіпотезі, а вихідні оцінки параметрів руху об'єкту приймаються як вихідна інформація такого фільтру, якому відповідає мінімум спеціального функціоналу. З точки зору методологічного аспекту (наявності розробленого математичного апарату) реалізація рекурентно-пошукової схеми на борту ЛА знаходиться в межах сучасних можливостей.

Аналіз якості функціонування запропонованого рекурентно-пошукового алгоритму показав його високу ефективність, так як він побудований на базі добре відпрацьованого фільтру Калмана [3], із введенням додаткової процедури перевірки N гіпотез щодо локальної області місцезнаходження об'єкту в заданий момент часу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Справочник по теории автоматического управления// под ред. А.А.Красовського. – М.: Наука, 1987. – 711с.
2. Белоглазов И.Н., Ермилов А.С., Марченко Г.И. Рекуррентно-поисковое оценивание и синтез алгоритмов корреляционно-экстремальных навигационных систем. – Автоматика и телемеханика. – 1979. – №.7 – С. 20 – 32.
3. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах.– М.: Машиностроение, 1991. – 512с.
4. Меркулов В.А., Наумов А.И., Чигин Г.П. Алгоритмическое обеспечение баз данных цифровой картографической информации интегрированных комплексов летательных аппаратов. – М.: Известия академии наук. Теория и системы управления, 1999, №6, с. 119-130.

Надійшла до редакції 29.10.2009