

Д.В. Обідін¹, Д.В. Макарчук¹, О.І. Костенко², Н.О. Мішукова³

¹ Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

² Національна академія Національної гвардії України, Харків

³ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОД ОЦІНКИ МУЛЬТИСТРУКТУРНОГО СИГНАЛУ ПОМИЛОК ІНЕРЦІАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Показано, що навігаційні системи технічних об'єктів забезпечують вироблення інформації виходячи з призначення об'єкта: обробка вектора навігаційних параметрів, що використовується у подальшому в системах управління рухом, інформація про відхилення об'єкта від заданої точки; інформація про положення об'єкта відносно інших об'єктів тощо. Обґрунтовано, що вимоги до точності визначення навігаційних параметрів можуть істотно відрізнятися для різних об'єктів, визначаючи обсяг і складність навігаційного обладнання. Метою статті є розробка методу оцінки мультіструктурного сигналу помилок інерціальних навігаційних систем. У випадку інерціальної системи алгоритм роботи має вигляд системи диференціальних рівнянь для вектора навігаційних параметрів, що включає до свого складу координати об'єкта та складові швидкості його руху. Для похибок вироблення навігаційних параметрів справедливо нелінійне диференціальне рівняння типу, де складовими вектора параметрів є похибки вимірювання прискорень акселерометром і помилки їх кутової орієнтації. При цьому найбільш небезпечними є складові вектора похибок датчиків навігаційної системи, пов'язані з похибками вироблення у часі навігаційних параметрів (їх накоплення). Пропонується розширити мультіструктурний опис вектора похибок за рахунок врахування неоднозначності вимірювання у послідовні моменти дискретного часу. Один з варіантів спрощення завдання полягає у використанні гаусової апроксимації апостеріорної щільності на кожному кроці дискретного часу. Запропоновані співвідношення фільтра Калмана для кожної з моделей, що дають часткові оцінки похибок і їх коваріації. При цьому формула для обчислення апостеріорних ймовірностей моделей навігаційних систем утворюють субоптимальний алгоритм фільтрації мультіструктурного сигналу. Важливою особливістю цього алгоритму є те, що часткові оцінки і коваріації не потребують окремого запам'ятовування. Їх можна послідовно (у межах одного кроку дискретного часу) обчислювати за допомогою перебудованого фільтра Калмана та засилати до суматорів осереднення. Додаткове завантаження оперативної пам'яті при реалізації пульсуючого фільтра порівняно з фільтром Калмана пов'язане лише з перерахунком апостеріорних ймовірностей.

Ключові слова: вектор похибок, інерціальні навігаційні системи, навігаційні параметри, структурний аналіз.

Вступ

Постановка проблеми. Призначенням навігаційної системи або комплексу навігаційних систем, наприклад на кораблі, є вироблення в результаті проведення вихідних вимірювань і їх подальшої обробки вектора навігаційних параметрів, що використовується у подальшому в системах управління рухом корабля, забезпечення безпеки плавання тощо [1–3]. Крім цих параметрів навігаційні системи забезпечують вироблення й іншої інформації виходячи з призначення об'єкта: інформація про відхилення об'єкта від заданої точки, при проходженні складної траєкторії; інформація про положення об'єкта відносно осі фарватеру тощо [2].

У зв'язку з цим, вимоги до точності наведеного універсального набору можуть істотно відрізнятися для різних об'єктів, визначаючи обсяг і складність навігаційного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як правило, до складу навігаційного обладнання технічної системи, наприклад, корабля, входять системи безперервної дії: або система зчитування координат [4–7], що використовує вимірювач швидкості та

курсу й здійснює інтегрування проекцій вектора швидкості на горизонтальні осі географічної системи координат, або інерціальна система [8–11], чутливими елементами якої є вимірювачі прискорень (акселерометри) і гіроскопи [2; 11].

Використання цих систем відбувається не тільки через безперервність їх дій, а і через її автономність, тобто відсутність контактів з будь-якими зовнішніми джерелами інформації, а й можливість вироблення за допомогою їх практично всіх компонентів вектора $\psi(t)$ основних навігаційних параметрів.

Вироблення навігаційних параметрів у цих системах ґрунтується на так званому алгоритмі "ідеальної роботи", який при безнадмірній системі датчиків первинної інформації (вимірювачів швидкості та курсу, а також прискорення та кутів, які задають положення гіроскопів) і в припущенні відсутності похибок цих датчиків забезпечує безпомилкове вироблення навігаційних параметрів [1; 5]. Реалізація алгоритму "ідеальної роботи" забезпечує незбуреність систем корисним сигналом, за який тут виступають дійсні значення навігаційних параметрів. Незважаючи на те, що незалежність помилок систем

від істинного руху об'єкта з урахуванням мультиплікативних складових похибок, неминучого згладжування високочастотних переміщень об'єкта за рахунок інерційності датчиків виконується наближено, алгоритм роботи системи зчислення координат і інерціальної системи прагнуть максимально наблизити до алгоритму "ідеальної роботи" [12–14].

Метою статті є розробка методу оцінки мультиструктурного сигналу помилок інерціальних навігаційних систем.

Виклад основного матеріалу

Використання цих співвідношень для вироблення координат об'єкту з урахуванням похибок вимірювання швидкості Δv_y , Δv_x , курсу ΔK і вертикальної координати Δh зумовлює досить складну, нелінійну залежність помилок вироблення координат $\Delta \varphi$, $\Delta \lambda$ від вихідних похибок вимірювачів, яку можна записати у вигляді

$$\Delta \dot{\psi} = S(\tilde{\psi}, \Delta \psi, \Delta), \quad (1)$$

де $\tilde{\psi}$ – значення вектора навігаційних параметрів (координат об'єкту), вироблене системою числення; $\Delta \psi = \tilde{\psi} - \psi$ похибка виробітки; Δ – вектор похибок датчиків навігаційної системи. У нашому випадку вважаємо $\Delta = (\Delta v_y, \Delta v_x, \Delta K, \Delta h)$.

У випадку інерціальної системи, алгоритм "ідеальної роботи" має вигляд системи диференціальних рівнянь для вектора ψ навігаційних параметрів, що включає до свого складу координати об'єкта і складові швидкості його руху. Як і в попередньому випадку, для похибок $\Delta \psi$ вироблення навігаційних параметрів, строго кажучи, справедливо нелінійне диференціальне рівняння типу (1), де складовими вектора Δ виявляються похибки вимірювання прискорень акселерометром і помилки їх кутової орієнтації.

Найбільш небезпечними є складові вектора Δ похибок датчиків навігаційної системи пов'язані з похибками $\Delta \psi$ вироблення навігаційних параметрів рівняннями виду

$$\Delta \dot{\psi} = S(\tilde{\psi}, \Delta), \quad (2)$$

що визначають наростаючий характер похибок $\Delta \psi$ у часі. Легко зрозуміти, що в разі системи зчислення компоненти вектора Δ володіють цією властивістю. Подібною властивістю характеризується та дрейф гіроскопа інерціальної системи відносно осі світу, що приводить до збільшення помилки з плином часу процесі відходу.

У більшості випадків прийнятним виявляється лінеаризоване представлення рівняння (1)

$$\Delta \dot{\psi} = \dot{S}_1 \Delta \psi + \dot{S}_2 \Delta, \quad (3)$$

де $\dot{S}_1 = \left. \frac{\partial S}{\partial \Delta \psi} \right|_{\Delta \psi=0}$; $\dot{S}_2 = \left. \frac{\partial S}{\partial \Delta} \right|_{\Delta=0}$ – матриці відповідних розмірностей.

При отриманні рівняння (3) враховано, що $S(\tilde{\psi}, 0, 0) = 0$, що є наслідком використання алгоритму "ідеальної роботи". Ясно, що матриці \dot{S}_1 , \dot{S}_2 , будучи в загальному випадку функціями $\tilde{\psi}(t)$, залежать від часу, визначаючи нестационарний характер диференціального рівняння (3).

Опис помилок навігаційних систем методом простору стану є традиційним [2; 4]. Однак для багатьох важливих завдань обробки інформації використання моделі (3) неповно відображає реальну ситуацію; більш адекватною є мультиструктурна модель [2]

$$X(k) = A^{I(k)}(k) X(k-1) + G^{I(k)}(k) W(k). \quad (4)$$

Тут індекс $I(k)$ є цілочисельним випадковим коефіцієнтом зі значеннями $i = \overline{1, I}$, часова еволюція якого описується ланцюгом Маркова [13–14] з перехідними ймовірностями:

$$p^{ij}(k) = P[I(k) = i / I(k-1) = j]. \quad (5)$$

Відповідно до (4) навігаційна система може перебувати в одному з I станів, які змінюють один одного в випадкові моменти часу та характеризуються різними моделями типу (2), що описують похибки системи на послідовних інтервалах часу.

Розширимо мультиструктурний опис, припустивши, що й властивості вимірювання $Y(k)$ задані неоднозначно, причому, як і в разі моделі (4), допускається зміна опису $Y(k)$ у послідовні моменти дискретного часу.

Нехай

$$Y(k) = H^{I(k)}(k) X(k) + V^{I(k)}(k), \quad (6)$$

де $V^{I(k)}(k)$ – білий шум з коваріацією $R^{I(k)}(k)$.

Марковський характер часової еволюції номера $I(k)$ моделі, що приводить до Марковської властивості вектора

$$[\bar{X}^T(k), \tilde{Y}^T(k)]^T,$$

де $\bar{X}^T(k) = [X^T(k), I^T(k)]^T$, $\tilde{Y}(k) = Y(k-1)$,

дозволяє використовувати для вирішення задачі рекурентне співвідношення для апостеріорної щільності

$$\pi[\bar{x}(k)] = f[x(k), i(k) / Y_0^k].$$

Отримаємо

$$\pi[\bar{x}(k)] = \frac{f^i[Y(k) / x(k)] \times \sum_j \int \left\{ f^i[x(k) / x(k-1)] P^{ij}(k) \times \right.}{\sum_{i,j} \int \int \left\{ f^i[Y(k) / x(k)] \times f^i[x(k) / x(k-1)] \times f^i[x(k) / x(k-1)] p^{ij}(k) \times \right.}} \left. \times \pi[\bar{x}(k-1)] dx(k-1) \right\}, \quad (7)$$

де $f^i [Y(k)/x(k)] = f [Y(k)/x(k), i(k)]$;

$f^i [x(k)/x(k-1)] = f [x(k)/x(k-1), i(k)]$ – функція правдоподібності та перехідна щільність, відповідної i -ї моделі сигналу на k -му кроці.

При отриманні (7) враховано рівність

$$f [\bar{x}(k)/\bar{x}(k-1)] = f^i [x(k)/x(k-1)] p^{ij}(k).$$

Зручніше, проте, дещо інша форма для рекурентного співвідношення. Введемо

$$\begin{aligned} \pi^i [x(k)] &= f [x(k)/Y_0^k, i(k)] = \\ &= \frac{\int \sum_j f \left[\begin{matrix} x(k), i(k), j(k-1), \\ x(k-1), Y_0^k / Y_0^{k-1} \end{matrix} \right] dx(k-1)}{\iint \sum_{i,j} f \left[\begin{matrix} x(k), i(k), j(k-1), \\ x(k-1), Y_0^k / Y_0^{k-1} \end{matrix} \right] dx(k-1) dx(k)}. \end{aligned}$$

Після перетворень знаходимо

$$\begin{aligned} \pi^i [x(k)] &= f [x(k)/Y_0^k, i(k)] = \\ &= f^i [Y(k)/x(k)] \times \\ &= \frac{\int \left\{ f^i [x(k)/x(k-1)] \times \right. \\ &\quad \left. \times \sum_j p^{ij}(k) g^j(k-1) \pi^j [x(k-1)] dx(k-1) \right\}}{\sum_j p^{ij}(k) p^{ij}(k) g^j(k-1)}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \rho^{ij} &= \iint \left\{ f^i [Y(k)/x(k)] f^i [x(k)/x(k-1)] \times \right. \\ &\quad \left. \times \pi^i [x(k)/x(k-1)] dx(k-1) dx(k) \right\} = \\ &= f [Y(k)/Y_0^{k-1}(k), i(k), i(k-1)]; \end{aligned} \quad (9)$$

$g^j(k-1)$ – апостеріорна ймовірність j -го стану на $(k-1)$ -му кроці.

$$g^i(k) = f [i(k)/Y_0^k] =$$

$$\text{Для } = \frac{\int f [Y(k), i(k), j(k-1)/Y_0^{k-1}]}{\sum_{ij} f [Y(k), i(k), j(k-1)/Y_0^{k-1}]},$$

з використанням позначення (9) легко отримати рекурентне співвідношення

$$\begin{aligned} g^i(k) &= \frac{\sum_j f [Y(k)/Y_0^{k-1}, i(k), j(k-1)] p^{ij}(k) g^j(k-1)}{\sum_{ij} f [Y(k)/Y_0^{k-1}, i(k), j(k-1)] p^{ij}(k) g^j(k-1)} = \\ &= \frac{\sum_j \rho^{ij}(k) p^{ij}(k) g^j(k-1)}{\sum_{ij} \rho^{ij}(k) p^{ij}(k) g^j(k-1)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Співвідношення (8–10) з урахуванням

$$\pi [x(k)] = \sum_j g^i(k) \pi^i [x(k)] \quad (11)$$

утворюють рекурентну схему перерахунку $\pi [x(k-1)]$, задану у формі (1), у $\pi [x(k)]$ з використанням поточного вимірювання $Y(k)$.

Використовуючи (11), для оцінки на j -му кроці отримуємо

$$\hat{X}(k) = \int x(k) \pi [x(k)] dx(k) = \sum_j g^i(k) \hat{X}^i(k); \quad (12)$$

для коваріації помилки цієї оцінки маємо:

$$\begin{aligned} P(k) &= \int [x(k) - \hat{X}(k)] [x(k) - \hat{X}(k)]^T \pi [x(k)] dx(k) = \\ &= \sum_j g^i(k) \int \left\{ \begin{matrix} \left[\begin{matrix} [x(k) - \hat{X}(k)] + [\hat{X}^i(k) - X(k)] \end{matrix} \right] \times \\ \times \left[\begin{matrix} [x(k) - \hat{X}^i(k)] + [\hat{X}^i(k) - X(k)] \end{matrix} \right]^T \times \\ \times \pi^i [x(k)] dx(k) \end{matrix} \right\} = \sum_j g^i(k) \left\{ P^i(k) + [\hat{X}^i(k) - \hat{X}(k)] [\hat{X}^i(k) - \hat{X}(k)]^T \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Завдання фільтрації мультіструктурного сигналу є окремим випадком загальної постановки завдання фільтрації марковського сигналу, що приводить до рекурентного співвідношення для апостеріорної щільності виду (7). Її особливість визначається гаусовим видом щільності $f(i) [Y(k)/x(k)]$ і $f^{(i)} [x(k)/x(k-1)]$, що залежить від виду співвідношень при фіксованому номері $I(k)$ моделі.

Дійсно, припускаючи гаусовою апріорну щільність $f[x(0)]$ вектора $X(0)$, для будь-якого набору номерів моделі на k послідовних кроках $I_0^k = I(0), \dots, I(k)$ апостеріорна щільність $\pi^{I_0^k} [x(k)]$ виявляється гаусо-

вою з параметрами $\hat{X}^{I_0^k}, P^{I_0^k}(k)$, обумовленими в силу співвідношень фільтра Калмана, відповідного послідовності моделей I_0^k на кроках $0, 1, 2, \dots$. Для отримання оптимальної оцінки необхідно зважування часткових оцінок з апостеріорними ймовірностями $g^{I_0^k}(k)$ різних моделей I_0^k .

Опускаючи питання про визначення ймовірностей $g^{I_0^k}(k)$, відзначимо принципову трудність реалізації оптимального фільтра для мультіструктурного сигналу: вона полягає в необмеженому наростанні кількості можливих наборів номерів з ростом k . Дійсно, нехай цілочисельний процес $I(k)$ може при-

йняти на кожному кроці значення від 1 до I ; тоді кількість різних наборів номерів моделей до k -му кроці складе у загальному випадку величину I^{k+1} .

Необхідні спрощення можуть бути досягнуті лише при відмові від прагнення до оптимального результату у вирішенні задачі оцінювання. Один з варіантів спрощення завдання полягає у використанні гаусової апроксимації апостеріорної щільності $\pi[x(k)]$ на кожному кроці дискретного часу.

Нехай $\pi[x(k-1)]$ вже апроксимована нормальною щільністю з математичним очікуванням $\hat{X}(k-1)$ і коваріацією $P(k-1)$. Оскільки у разі розглядається багатоальтернативної моделі (4) і (6) забезпечується гаусів вид перехідної щільності $f^i[x(k)/x(k-1)]$ і функції правдоподібності $f^i[Y(k)/x(k)]$ при фіксованому номері моделі на k -му кроці, у результаті та $\pi[x(k)]$, яка визначається з (8), також виявиться гаусовою з параметрами $\hat{X}^i(k)$ і $P^i(k)$, причому перерахунок $\hat{X}(k-1)$, $P(k-1)$ у $\hat{X}^i(k)$ і $P^i(k)$ здійснюється в силу співвідношень фільтра Калмана.

Ясно, що при такому підході маємо з (5)

$$p^j(k) = P[I(k) = 1] = p^i(k). \quad (14)$$

У разі (14) співвідношення (8) набирає вигляду

$$\pi^i[x(k)] = \frac{f^i[Y(k)/x(k)]}{\rho^i(k)} = \int f^i[x(k)/x(k-1)] \pi[x(k-1)] dx(k-1), \quad (15)$$

$$\text{де } \rho^i(k) = f[Y(k)/Y_0^{k-1}, i(k)], \quad (16)$$

а рівність (10) можна записати в такий спосіб:

$$g^i(k) = \frac{\rho^i(k)p^i(k)}{\sum_i \rho^i(k)p^i(k)}. \quad (17)$$

Для щільності (16) у разі лінійної фільтрації (а саме до цієї ситуації ми прийшли, використовуючи гаусову апроксимацію для $\pi[x(k-1)]$) маємо

$$\rho^i(k) = f_v[v^i(k)] = \frac{\exp\left\{-\frac{[v^i(k)]^T}{2D^i(k)}v^i(k)\right\}}{\sqrt{(2\pi)^m |D^i(k)|}}, \quad (18)$$

де $v^i(k)$ – нев'язка фільтрації Калмана, відповідної i -ї моделі на k -му кроці; $D^i(k)$ – її коваріація.

Використовуючи (12) і (13) для гаусової апроксимації $\pi[x(k)]$ аналогічним чином визначаємо $\hat{X}(k)$, $P(k+1)$ і т. д.

Таким чином, співвідношення фільтра Калмана для кожної з моделей, що дають часткові оцінки $\hat{X}^i(k)$ і коваріації $P^i(k)$, формула (17) для обчислення апостеріорних ймовірностей $g^i(k)$ моделей, що використовує визначення $\rho^i(k)$ через невязки фільтрів по формулі (18), і, нарешті, обчислення оцінки $\hat{X}(k)$ і коваріації $P(k)$ за допомогою оцінки часткових оцінок і коваріацій за формулами (12) і (13) утворюють субоптимальний алгоритм фільтрації мультіструктурного сигналу.

Чередування "розгалужень", пов'язаних з отриманням часткових оцінок для кожної з моделей, і "згорток" (12–13), що забезпечують гаусову апроксимацію апостеріорної щільності поточного кроку, дозволяють назвати цей фільтр пульсуючим.

Важливою особливістю цього алгоритму є те, що часткові оцінки і коваріації не потребують окремого запам'ятовування. Їх можна послідовно (у межах одного кроку дискретного часу) обчислювати за допомогою перебудованого фільтра Калмана та засилати в осереднюючі суматори. Додаткове завантаження оперативної пам'яті при реалізації пульсуючого фільтра порівняно з фільтром Калмана пов'язане лише з перерахунком за формулою (17) апостеріорних ймовірностей.

Розглянутий варіант пульсуючого фільтра є найпростішим. При наявності обчислювальних можливостей операцію "згортки" алгоритму, пов'язану з гаусовою апроксимацією апостеріорної щільності, можна проводити не на кожному кроці дискретного часу, а по закінченні інтервалу часу в K кроків. При цьому кількість наборів моделей, які реалізуються у цьому випадку, досягне величини I^K . Такий K -пульсуючий фільтр забезпечить більш високу якість оцінювання мультіструктурного сигналу. Вибір тривалості інтервалу K слід проводити методами статистичного моделювання, домагаючись прийнятної величини дійсної точності оцінювання.

Найпростіший варіант пульсуючого фільтра близький до оптимального в разі, коли мала помилка гаусової апроксимації апостеріорної щільності $\pi[x(k)]$. Якщо припустити гаусовий характер часткових щільностей $\pi^i[x(k)]$, що входять у вираз (11), ясно, що ця близькість буде забезпечуватися при виконанні на кожному кроці співвідношень $g^i(k) \approx 1$; $g^i(k) \approx 0$, $i \neq i_*$, де i_* – номер однієї з моделей, з високою достовірністю виявлений за вимірюваннями Y_0^k .

Необхідність у застосуванні пульсуючого фільтра викликана прагненням до скорочення обчислювальних витрат при фільтрації мультіструктурного сигналу з можливою зміною номера моделі від кро-

ку до кроку дискретного часу. Положення істотно змінюється в окремому випадку, коли виконується співвідношення

$$p^{ij}(k) = \begin{cases} 1; & i = j; \\ 0; & i \neq j, \end{cases} \quad (19)$$

що забороняють переходи від моделі до моделі.

В умовах (19) співвідношення (8) приймає вид

$$\pi^i[x(k)] = \frac{f^i[Y(k)/x(k)]}{\rho^i(k)} = \quad (20)$$

$$= \iint f^i[x(k)/x(k-1)] \pi^i[x(k-1)] dx(k-1),$$

де $\rho^i(k) = f[Y(k)/Y_0^{k-1}, i]$.

Для апостеріорної ймовірності номера моделі із (10) отримаємо рекурентне співвідношення

$$g^i(k) = \frac{\rho^i(k)g^i(k-1)}{\sum_i \rho^i(k)g^i(k-1)}, \quad (21)$$

а для апостеріорної щільності $\pi[x(k)]$, оптимальної оцінки $\hat{X}(k)$ і коваріації $P(k)$ помилки цієї оцінки справедливі загальні формули (11–13). У разі якщо апіорна щільність $f[x(0)]$ представляється зваженою сумою гаусових щільностей $f[x(0)]$, то рекурентні співвідношення для різних i реалізуються у вигляді набору фільтрів Калмана, ітеруючих оцінки $\hat{X}^i(k)$ і коваріації $P^i(k)$. Ця процедура, доповнена обчисленням апостеріорних ймовірностей з

початковою умовою $g^i(0) = p^i$, де p^i – апіорна ймовірність i -ї моделі, утворює так званий полігаусовий фільтр.

Висновки

У статті запропонований метод оцінки моделі мультіструктурного сигналу помилок навігаційних систем, який на відміну від існуючих, відображає реальну ситуацію при формуванні сигналу помилок за рахунок введення співвідношення фільтра Калмана для кожної з моделей, що дають часткові оцінки і коваріації та обчислення апостеріорних ймовірностей цих моделей через нев'язки фільтрів.

Визначено, що співвідношення фільтра Калмана для кожної з моделей, що дають часткові оцінки і коваріації, обчислення апостеріорних ймовірностей моделей, що використовують визначення через нев'язки фільтрів і обчислення оцінки стану навігаційної системи і коваріації за допомогою оцінки часткових оцінок і коваріації, утворюють субоптимальний алгоритм фільтрації мультіструктурного сигналу. Важливою особливістю цього алгоритму є те, що часткові оцінки і коваріації не потребують окремого запам'ятовування, а завантаження оперативної пам'яті при реалізації пульсуючого фільтра порівняно з фільтром Калмана пов'язане лише з перерахунком апостеріорних ймовірностей.

Подальші дослідження пропонується направити на розробку методу адаптивної обробки навігаційної інформації в умовах невизначеності.

Список літератури

1. К вопросу построения автоматизированной системы мониторинга параметров высокоточного навигационного поля / В.В. Каретников, И.В. Пашенко, А.И. Соколов, И.Г. Кузнецов // Морская радиоэлектроника. – 2015. – № 2 (52). – С. 24-27.
2. Соловьев И. Морская радиоэлектроника / И. Соловьев. – Санкт-Петербург: Политехника, 2003. – 185 с.
3. Rogers, R.M. "Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems", AIAA Educational Series, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, VA. – 2003.
4. Grewal, M.S., Weill L.R. and Andrews A.P. "Global Positioning Systems, Inertial navigation and integration", Wiley, New York. – 2007.
5. Алешин Б.С., Веремченко К.К. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Б.С. Алешин, К.К. Веремченко. – М.: Наука, 2006. – 424 с.
6. Gerasimov, S.V., Shapran, Iu.С. and Stakhova, M.O. (2018), Measures of efficiency of dimensional control under technical state designation of radio-technical facilities, Information Processing Systems, Vol. 1(152), pp. 148-154. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.152.21>.
7. Герасимов С.В. Розробка та дослідження методу розрахунку достовірності вимірювального контролю параметрів радіотехнічних систем морського транспорту / С.В. Герасимов, Ю.С. Шапран, В.В. Кірвас // Системи озброєння і військова техніка. – 2017. – № 4 (52). – С. 5-10.
8. Басов В.Г. Измерительные сигналы и функциональные устройства их обработки / В.Г. Басов. – Минск: БГУИР, 119 с.
9. Norman Friedman "The Naval Institute Guide to World Naval Weapon System", Naval Institute Press, 858 p. – 2006.
10. Герасимов С.В. Методика обґрунтування номенклатури параметрів контролю радіотехнічних систем і призначення їх допустимих відхилень / С.В. Герасимов, В.В. Грідіна // Системи обробки інформації. – 2018. – № 2(153). – С. 159-164. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.153.20>.
11. Admiralty list of radio signals "Global maritime distress and safety system (GMDSS)". Vol. 5. NP 285. – 2000. – 338 p.
12. Theoretical basic concepts for formation of the criteria for measurement signals synthesis optimality for control of complex radio engineering systems technical status / A.Iu. Bratslavskia, S.V. Gerasimov, G.M. Zubritskii, O.I. Timochko, O.O. Timochko // Системи обробки інформації. – 2017. – № 5 (151). – С. 151-157. <https://doi.org/10.30748/soi.2017.151.20>.

13. Qriffsiths B.E. Optimal control of jump-linear gaussian systems / B.E. Qriffsiths, K.A. Loparo // *Int. J. of control.* – 1985. – Vol. 42. N. 4. – P. 791-819.
14. Страхов А.Ф. Автоматизированные измерительные комплексы / А.Ф. Страхов. – М.: Энергоиздат, 1990. – 216 с.

References

1. Karetnikov, V.V., Pashchenko, I.V., Sokolov, A.I. and Kuznetsov, I.G. (2015), “*K voprosu postroyeniya avtomatizirovannoy sistemy monitoringa parametrov vysokotochnogo navigatsionnogo polya*”, [To the question of constructing an automated system for monitoring the parameters of a high-accuracy navigation field], *Marine Radio Electronics*, No. 2 (52), pp. 24-27.
2. Solov'ev, I. (2003), “*Morskaya radioelektronika*” [*Marine Radio Electronics*], Politexnika, Sankt-Peterburg, 185 p.
3. Rogers, R.M. (2003), “*Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*”, AIAA Educational Series, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, VA.
4. Grewal, M.S., Weill, L.R. and Andrews, A.P. (2007), “*Global Positioning Systems, Inertial navigation and integration*”, Wiley, New York.
5. Aleshin, B.S. and Veremeenko, K.K. (2006), “*Oriyentatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob'yektov: sovremennyye informatsionnyye tekhnologii*”, [*Orientation and navigation of mobile objects: modern information technologies*], Science, Moscow, 424 p.
6. Herasimov, S., Shapran, Yu. and Stakhova, M. (2018), Measures of efficiency of dimensional control under technical state designation of radio-technical facilities, *Information processing systems*, No. 1 (152), pp. 148-154. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.152.21>.
7. Herasimov, S., Shapran, Yu. and Kirvas, V. (2017), Development and research of the method of calculating the reliability of the measurement control parameters of radio engineering systems of maritime transport, *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4 (52), pp. 5-10.
8. Basov, V.G., (2013), “*Izmeritel'nye signaly I funktsional'nye ustroystva ix obrabotki*” [*Measuring calls and functional units of their treatment*], BGUIR, Minsk, 119 p.
9. Norman Friedman (2006), “*The Naval Institute Guide to World Naval Weapon System*”, *Naval Institute Press*, 858 p.
10. Herasymov, S.V. and Hridina, V.V. (2018), “*Metodyka obgruntuvannia nomenklatury parametriv kontroliu radio-tekhnichnykh system i pryznachennia yikh dopustymykh vidkhylen*” [*Method justification nomenclature control parameters of radio systems and purpose of their permissible deviations*], *Information Processing Systems*, Vol. 2(153), pp. 159-164. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.153.20>.
11. (2000), Admiralty list of radio signals “*Global maritime distress and safety system (GMDSS)*”, Vol. 5, NP 285, 338 p.
12. Bratslavskaya, A.Iu., Gerasimov, S.V., Zubritskii, G.M., Timochko, O.I. and Timochko, O.O. (2017), Theoretical basic concepts for formation of the criteria for measurement signals synthesis optimality for control of complex radio engineering systems technical status, *Information Processing Systems*, Vol. 5(151), pp. 151-157. <https://doi.org/10.30748/soi.2017.151.20>.
13. Qriffsiths, B.E. and Loparo, K.A. (1985), Optimal control of jump-linear gaussian systems, *Int. J. of control*, Vol. 42, N. 4, pp. 791-819.
14. Strakhov, A.F. (1990), “*Avtomatizirovannyye yzmeritel'nye komplekсы*” [*Automated measuring complexes*], Energoizdat, Moscow, 216 p.

Надійшла до редколегії 7.06.2018

Схвалена до друку 17.07.2018

Відомості про авторів:

Обідін Дмитро Володимирович

доктор технічних наук професор
професор Кіровоградської льотної академії
Національного авіаційного університету,
Кропивницький, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9923-9024>

Макарчук Дмитро Володимирович

магістр
Аспірант Кіровоградської льотної академії
Національного авіаційного університету,
Кропивницький, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4299-6614>

Костенко Олександр Іванович

викладач
Національної академії
Національної гвардії України,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5603-5403>

Information about the authors:

Dmytro Obidin

Doctor of Technical Sciences Professor
Professor of Kirovohrad Airborne Academy
of the National Aviation University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9923-9024>

Dmytro Makarchuk

Master
Post graduate of Kirovohrad Airborne Academy
of the National Aviation University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4299-6614>

Alexander Kostenko

Instructor
of National Academy
of the National Guard of Ukraine,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5603-5403>

Мишукова Наталія Олександрівна
науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4368-8795>

Mishukova Nataliya
Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4368-8795>

МЕТОД ОЦЕНКИ МУЛЬТИСТРУКТУРНОГО СИГНАЛА ОШИБОК ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Д.В. Обидин, Д.В. Макаrchук, А.И. Костенко, Н.А. Мишукова

Показано, что навигационные системы технических объектов обеспечивают выработку информации исходя из назначения объекта: обработка вектора навигационных параметров, который используется в дальнейшем в системах управления движением, информация об отклонении объекта от заданной точки; информация о положении объекта относительно других объектов и тому подобное. Обосновано, что требования к точности определения навигационных параметров могут существенно отличаться для разных объектов, определяя объем и сложность навигационного оборудования. Целью статьи является разработка метода оценки мультиструктурного сигнала ошибок инерциальных навигационных систем. В случае инерциальной системы алгоритм работы выглядит в виде системы дифференциальных уравнений для вектора навигационных параметров, включает в свой состав координаты объекта и составляющие скорости его движения. Для ошибки выработки навигационных параметров справедливо нелинейное дифференциальное уравнение, где составляющими вектора параметров является погрешности измерения ускорений акселерометром и ошибки их угловой ориентации. При этом наиболее опасны составляющие вектора ошибок датчиков навигационной системы, связанные с погрешностями выработки во времени навигационных параметров (их накопления). Предлагается расширить мультиструктурное описание вектора ошибок за счет учета неоднозначности измерения в последовательные моменты дискретного времени. Один из вариантов упрощения задачи заключается в использовании гауссовой аппроксимации апостериорной плотности на каждом шагу дискретного времени. Предложенные соотношения фильтра Калмана для каждой из моделей дают частные оценки погрешностей и их ковариации. При этом формула для вычисления апостериорных вероятностей моделей навигационных систем образуют субоптимальный алгоритм фильтрации мультиструктурного сигнала. Важной особенностью предложенного алгоритма является то, что частные оценки и ковариации не требуют отдельного запоминания. Их можно последовательно (в пределах одного шага дискретного времени) вычислять с помощью перестроенного фильтра Калмана и проводить их усреднение. Дополнительная загрузка оперативной памяти при реализации пульсирующего фильтра по сравнению с фильтром Калмана связана только с пересчетом апостериорных вероятностей.

Ключевые слова: вектор погрешностей, инерциальные навигационные системы, навигационные параметры, структурный анализ.

METHOD OF ESTIMATION OF MULTISTRUCTURAL SIGNAL ERROR INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

D. Obidin, D. Makarchuk, O. Kostenko, N. Mishukova

It is shown that navigational systems of technical objects provide the generation of information based on the purpose of the object: processing of the navigation parameter vector, which is used later in motion control systems, information on the deviation of the object from a given point; information about the position of the object relative to other objects and the like. It is substantiated that the requirements to the accuracy of determining navigation parameters can differ significantly for different objects, determining the volume and complexity of navigation equipment. The purpose of the article is to develop a method for estimating the multi-structural error signal of inertial navigation systems. In the case of an inertial system, the algorithm works in the form of a system of differential equations for the vector of navigation parameters, includes in its composition the coordinates of the object and the components of the speed of its movement. For the error in the development of navigation parameters, the nonlinear differential equation is valid, where the components of the parameter vector are the accelerometer measurement errors by the accelerometer and the errors in their angular orientation. At the same time, the components of the error vector of navigation system sensors that are associated with the errors in the development of navigation parameters (their accumulation) in time are most dangerous. It is proposed to extend the multi-structural description of the error vector by taking into account the measurement ambiguity at consecutive discrete-time moments. One of the options for simplifying the problem is to use the Gaussian approximation of a posteriori density at each step of the discrete time. The proposed Kalman filter relations for each of the models give partial error estimates and their covariance. In this case, the formula for calculating the a posteriori probabilities of navigational system models forms a sub-optimal algorithm for filtering a multi-structural signal. An important feature of the proposed algorithm is that particular estimates and covariance's do not require separate memorization. They can be calculated successively (within one step of discrete time) by means of a reconstructed Kalman filter and averaged. The additional load of RAM in the realization of the pulsating filter in comparison with the Kalman filter is related only to the recalculation of a posteriori probabilities.

Keywords: vector of errors, inertial navigation systems, navigation parameters, structural analysis.