

chance to define optimum conditions of realisation of processes, that finally leads to increase of production efficiency and quality of production.

Key words: *thermodynamic characteristics, potential of moisture transport, moisture content, specific isothermal massenkoff, reference body, mass-transfer degree*

УДК 631.315:629.783

СТРУКТУРА НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ БЕЗПІЛОТНОЇ ПОЛЬОВОЇ МАШИНИ

Л. В. Аніскевич, доктор технічних наук
Ю. О. Росамаха, здобувач*
e-mail: rosamaha.vchenyij@ukr.net

Анотація. *Проведено аналітичний опис системи автоматичного управління режимом руху безпілотної польової машини шляхом використання розімкненого інваріантного способу комплексної обробки навігаційної інформації, який може бути застосований для інтегрованих комплексів на базі супутникової та курсо-швидкісної навігаційних підсистем. Перевірка ефективності функціонування розробленої математичної моделі навігаційно-управляючого комплексу безпілотної польової машини відбувається шляхом проведення імітаційного моделювання. Таке моделювання дозволяє оцінити правильність формування рівняння спостережень, екстраполяції оцінки вектора похибок навігаційних підсистем, корекції оцінок вектору стану системи та матриці поправок тощо. Також з'являється можливість порівняння якості розрахунку навігаційної інформації для різних схем інтеграції підсистем і методик обробки навігаційної інформації, у тому числі і запропонованої неінваріантної компенсаційної схеми побудови навігаційно-управляючого комплексу.*

Ключові слова: *безпілотно польова машина, навігаційний комплекс, датчик швидкості, датчик курсу, навігаційна інформація*

Постановка проблеми. *Серед запропонованих нововведень при конструюванні мобільної сільськогосподарської техніки, з'явилися автоматизовані системи управління рухом, що мають безсумнівний економічний потенціал. Наприклад, відносно недорогі так звані "візирні системи" (lighbar), що встановлюються в кабіні*

***Науковий керівник – доктор технічних наук Л. В. Аніскевич**

© Л. В. Аніскевич, Ю. О. Росамаха, 2016

МТА, дозволяють оператору ефективно дотримуватись встановленого напрямку руху без застосування класичних маркерів.

Ці системи можуть бути використані за умов низької видимості, що збільшує можливий час використання техніки. Зменшення подвійних проходів і пропусків сприяє зростанню ефективності використання технологічних матеріалів, таких як добрива, насіння, пестициди тощо.

Системи паралельного водіння МТА можуть працювати в режимі автопілотування, коли відхилення від заданої траєкторії, що розраховується за допомогою апаратури глобальної системи позиціонування (ГСП), через спеціальні пристрої вводяться безпосередньо в систему управління ходовою частиною МТА, забезпечуючи рух по маршруту без втручання механізатора. Як правило, автопілот складається з пристрою паралельного водіння, контролера і виконавчого механізму, який підключається до гідравліки трактора.

Аналіз останніх досліджень. В зв'язку з розвитком нових систем землеробства та впровадженням сучасних технологій природокористування все більш широкого застосування набувають системи роботизованого виконання польових технологічних завдань, наприклад операцій збору та реєстрації місцевизначених польових даних, а також використання машинно-тракторних агрегатів на таких операціях, де задіяні шкідливі для людини речовини і об'єкти тощо. Застосування наземних засобів автоматизованого збору польових даних дозволяє зменшити витрати робочого часу на проведення операцій моніторингу стану екосистем, підвищити просторову точність виконання польових завдань і забезпечити безперервність процесів моніторингу природних ресурсів. Поставлені задачі обумовлюють необхідність вирішення проблем безпілотного керування машинно-тракторними агрегатами в сучасних системах природокористування. Використання безпілотних систем для управління рухом польових мобільних об'єктів захищає здоров'я оператора на операціях внесення пестицидів, висококонцентрованих хімічних речовин, мінеральних добрив тощо, дає можливість знизити собівартість виконання польових механізованих операцій шляхом економії витрат на оплату праці оператора.

Основна задача при навігації безпілотних польових машин (БПМ) – забезпечення інформацією про кінематичні рухи системи з визначенням координат місцезнаходження в полі і спрямовування БПМ по заданому маршруту. Для вирішення такої задачі необхідно мати бортову навігаційну систему і алгоритми обчислення навігаційної інформації. Розвиток сучасних навігаційних комплексів

іде по шляху інтеграції різних за принципом функціонування навігаційних підсистем, до складу яких входить апаратура ГСП, курсо-швидкісні та інерціальні датчики і обчислювачі, за допомогою яких на основі алгоритмів фільтрації здійснюється комплексна обробка всіх наявних вимірювань в цілях отримання максимальної точності визначення навігаційних параметрів при заданому складі апаратури [1–3].

Сумісне використання декількох навігаційних підсистем дозволяє, з одного боку, обмежити зростання похибок, наприклад, інерціальної навігаційної системи і, з іншого боку, понизити шумову складову похибок супутникової навігаційної системи (СНС), підвищити темп видачі інформації бортовим споживачам, істотно підняти рівень перешкодозахищеності. На сучасному етапі ядром інтегрованої системи є курсо-швидкісна навігаційна система (КШНС) та інерціальна навігаційна система (ІНС), які завдяки своїй автономності і можливості з високою швидкістю оновлювати інформацію, дають можливість розраховувати як позиційну, так і кутову інформацію.

Мета досліджень. Особливість функціонування навігаційного комплексу полягає в тому, що шляхом оптимальної обробки вихідних сигналів про параметри руху і орієнтації машини від КШНС та СНС необхідно отримати показники точності роботи комплексу в цілому вищими ніж точність роботи кожної з підсистем, що входять до складу комплексу.

Результати досліджень. В якості основної системи приймемо КШНС, а СНС виступатиме в ролі коригуючої. Задача оптимальної організації навігаційних підсистем в загальний навігаційно-управляючий комплекс є задачею інтеграції та побудови комплексу, а виконання операцій корекції навігаційної інформації є головним завданням навігаційного комплексу.

Для реалізації викладених вище алгоритмів побудови системи автоматичного управління рухом БПМ необхідно мати інформацію про поточні значення шляхової швидкості, кута постановки управляючих коліс, кута курсу, координат центра мас машини та похідних:

$$V(t), \varphi_p(t), \psi(t), \psi'(t), X(t), X'(t), Z(t), Z'(t). \quad (1)$$

Для отримання вказаної інформації використана наступна схема інтеграції навігаційних підсистем в бортовий навігаційний комплекс (НК) (рис. 1).

До складу бортового навігаційно-управляючого комплексу входять:

– супутникова навігаційна система, що працює в диференціальному режимі, а антена розташована в центрі мас

машини;

- датчик швидкості (ДШ), який вимірює поточну шляхову швидкість;
- датчик курсу (ДК), який вимірює кут курсу машини;
- азимутальний гіроскоп (АГ) – датчик швидкості зміни кута курсу.

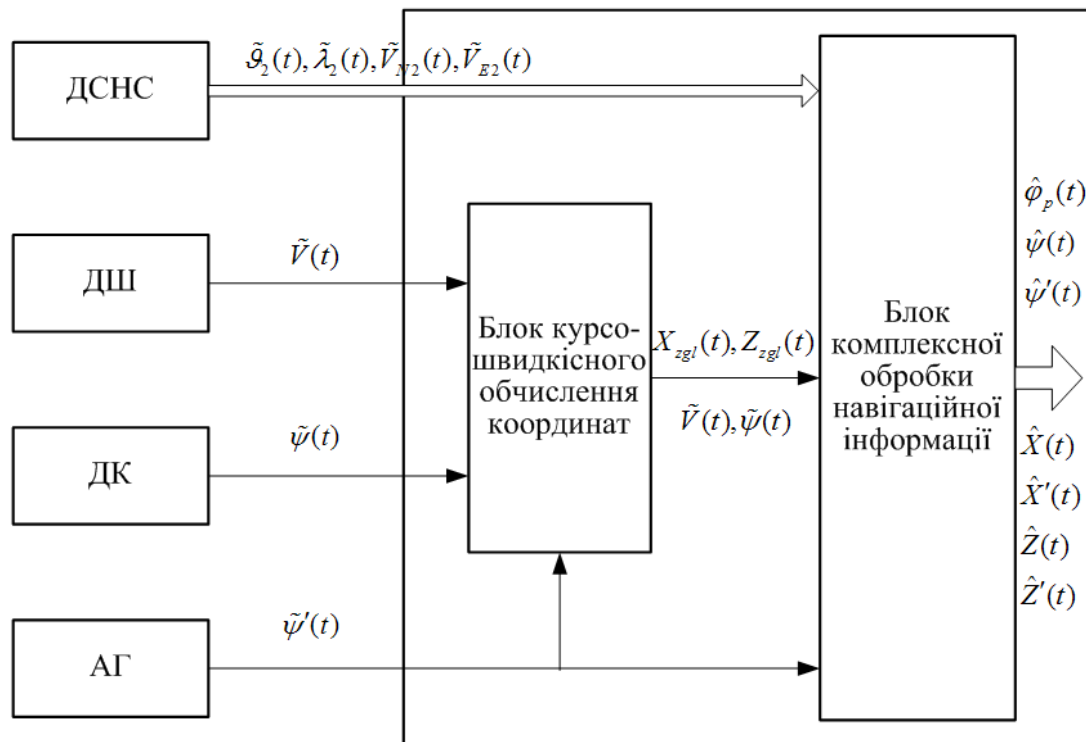


Рис. 1. Блок-схема бортового навігаційного комплексу.

Вихідна інформація азимутального гіроскопа відповідає виразу:

$$\tilde{\psi}'(t) = \psi'(t) + \Delta\omega + \eta_\omega(t), \quad (2)$$

де: $\Delta\omega$ – систематична похибка гіроскопа;

$\eta_\omega(t)$ – некорельована випадкова помилка, що має нульове математичне сподівання і відоме середньоквадратичне відхилення σ_ω .

Алгоритми комплексної обробки навігаційної інформації, яка надходить від датчиків і навігаційних підсистем з різними схемами інтеграції, базуються, в основному, на застосуванні варіацій методу Калмана [4].

Метод Калмана направлений на отримання точних, безперервно оновлюваних оцінок орієнтації і швидкості руху об'єкту за результатами ряду неточних вимірювань його місцеположення. Датчики орієнтації і місцеположення, швидкості і прискорення видають результати вимірювань з систематичними і випадковими похибками та шумами. Фільтр Калмана використовує імовірнісну модель обробки навігаційної інформації, що дозволяє понизити дію

похибок та шумів і отримати правильні оцінки стану об'єкту в різні моменти часу. Положення системи описується вектором кінцевої розмірності – вектором стану. У кожен момент часу лінійний оператор діє на вектор стану і переводить його в інший вектор стану (детермінована зміна стану), додається деякий вектор нормального шуму (випадкові чинники), а також вектор управління, що відповідає за функціонування системи.

При використанні фільтру Калмана для отримання оцінок вектора стану процесу по серії зашумлених вимірювань необхідно представити модель даного процесу відповідно до структури фільтру – у вигляді матричного рівняння певного типу. Для кожного такту роботи фільтру необхідно відповідно визначити матриці еволюції процесу, матрицю спостережень, коваріаційну матрицю процесу, коваріаційну матрицю шуму вимірювань, а також матрицю коефіцієнтів керуючих дій. Застосування методу Калмана, як оптимального дискретного фільтра для комплексної обробки навігаційної інформації, дає наступні переваги:

- дозволяє проводити оптимальну корекцію навігаційної інформації при одночасній роботі декількох коригуючих підсистем при довільній циклограмі підключення та виключення підсистем та імітації відмов елементів навігаційного комплексу;

- навігаційна інформація обробляється кроками безпосередньо по мірі їх надходження з використанням алгоритму розв'язку сукупності диференціальних та алгебраїчних рівнянь.

Традиційний спосіб комплексної обробки навігаційної інформації від двох навігаційних підсистем – КШНС та ДСНС базується [5] на формуванні різницевих вимірів – тобто різниць оцінок навігаційних параметрів, що отримані на виходах КШ підсистеми та ДСНС. З використанням цих різницевих вимірювань вирішується задача оцінювання (фільтрації) поточних похибок систем числення координат на фоні випадкових похибок ДСНС. Такий підхід, при лінійному характері моделі еволюції похибок КШ підсистеми розрахунку координат в часі, дозволяє при використанні лінійного оптимального фільтру отримати незміщені оцінки похибок розрахунку координат при забезпеченні їх незалежності (інваріантності) від шуканих навігаційних параметрів БПМ. Оцінки помилок, що отримуються на виході фільтра, використовуються для виправлення вихідної навігаційної інформації. Блок-схема такої методики розрахунку навігаційної інформації представлена на (рис. 2).

Передбачається, що вихідні сигнали датчика курсу відповідають виразу виду:

$$\tilde{\psi}(t_k) = \psi(t_k) + \Delta\psi + \eta(t_k), \quad (3)$$

де: $\Delta\psi$ – систематична похибка датчика курсу;

$\eta(t_K)$ – некорельована випадкова похибка, що має нульове математичне очікування і відоме середньоквадратичне значення σ_ψ ;

$\psi(t_K)$ – фактичне значення кута курсу БПМ у момент часу $t = t_K$, тобто кута між віссю X, що лежить в площині меридіану на початку координат і направлена відповідно на північ та повздовжньою віссю БПМ.

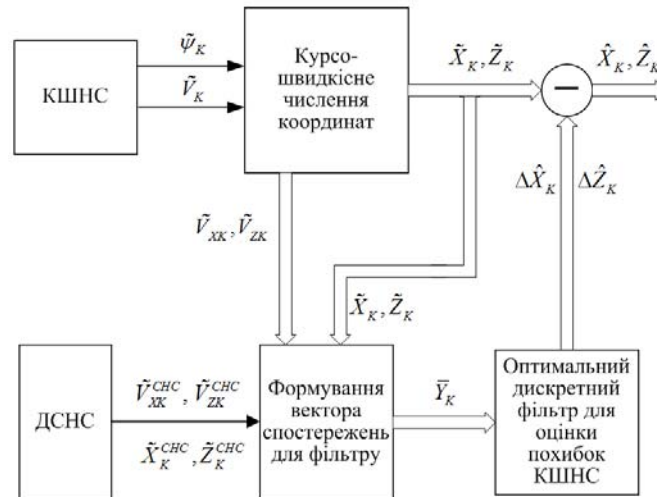


Рис. 2. Блок-схема розімкненого інваріантного способу комплексної обробки навігаційної інформації від КШНС та ДШНС.

Вихідні сигнали датчика шляхової швидкості описуються рівнянням виду:

$$\tilde{V}(t_K) = V(t_K)(1 + \delta_V) + \eta_{Vd}(t_K), \quad (4)$$

де: δ_V – систематична похибка масштабного коефіцієнта датчика шляхової швидкості;

$\eta_{Vd}(t_K)$ – некорельована випадкова похибка, що має нульове математичне очікування і відоме середньоквадратичне значення σ_{Vd} ;

$V(t_K)$ – фактичне значення шляхової швидкості центру мас БПМ у момент часу $t = t_K$.

Вихідні сигнали ДШНС відповідають наступним формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{X}^{CHC}(t_K) &= X(t_K) + \eta_X(t_K); \\ \tilde{Z}^{CHC}(t_K) &= Z(t_K) + \eta_Z(t_K); \\ \tilde{V}_X^{CHC}(t_K) &= V_X(t_K) + \eta_{V_X}(t_K); \\ \tilde{V}_Z^{CHC}(t_K) &= V_Z(t_K) + \eta_{V_Z}(t_K), \end{aligned} \quad (5)$$

де: $\eta_X(t_K)$, $\eta_Z(t_K)$, $\eta_{V_X}(t_K)$, $\eta_{V_Z}(t_K)$ – некорельовані випадкові похибки ДШНС у вимірюванні ортодромічних координат і складових шляхової

швидкості центру мас БПМ, що мають нульові математичні очікування і відомі середньоквадратичні значення $\sigma_X, \sigma_Z, \sigma_{V_X}, \sigma_{V_Z}$; $X(t_K), Z(t_K)$ – фактичні значення координат центра мас БПМ у момент часу $t=t_K$; $V_X(t_K), V_Z(t_K)$ – фактичні значення шляхових швидкостей центра мас БПМ у момент часу $t=t_K$.

Числення координат від курсо-швидкісної підсистеми БПМ виконується за формулами:

$$\begin{aligned} X_S(t_{K+1}) &= X(t_0) + \tilde{V}_X(t_K) \text{Cos} \tilde{\psi}(t_K) \Delta T; \\ Z_S(t_{K+1}) &= Z(t_0) + \tilde{V}_X(t_K) \text{Sin} \tilde{\psi}(t_K) \Delta T, \end{aligned} \quad (6)$$

де: $X(t_0), Z(t_0)$ – задані початкові умови; ΔT – крок дискретизації, що дорівнює періоду оновлення інформації від ДСНС.

Прийнято, що вектор шляхової швидкості центра мас БПМ співпадає по напрямленню з повздовжньою віссю машини, тобто кут зносу дорівнює нулю. Для колісної БПМ ця передумова виконується, якщо у якості опорної точки використовується не центр мас машини, а центр вісі задніх коліс і рух БПМ по опорній поверхні виконується без ковзання. З урахуванням виразів (2)–(6) дискретна модель еволюції похибок курсо-швидкісної навігаційної підсистеми представлена у вигляді:

$$\Delta \bar{X}_{K+1} = \Phi_K \Delta \bar{X}_K + B_1 \bar{\varepsilon}_{1K} + B_2 \bar{\varepsilon}_{2K}, \quad (7)$$

де: $\Delta \bar{X}_K = (\Delta X_K, \Delta Z_K, \delta_V, \Delta \psi)^T$;

$\Delta X_K, \Delta Z_K$ – помилка числення координат центра мас БПМ;

$\bar{\varepsilon}_{1K}, \bar{\varepsilon}_{2K}$ – чотиримірні вектори-стовпці некорельованих випадкових збурень з нульовими математичними очікуваннями і одиничними дисперсіями – вектори "білого" шуму.

Матриці Φ_K, B_1, B_2 мають вигляд:

$$\Phi_K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \tilde{V}_{X_K} \Delta T & -\tilde{V}_{Z_K} \Delta T \\ 0 & 1 & \tilde{V}_{Z_K} \Delta T & \tilde{V}_{X_K} \Delta T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\xi \delta_V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_\xi \Delta \psi \end{pmatrix} \cdot \Delta T^{\frac{1}{2}}; \quad (9)$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} \sigma_{V_d} \text{Cos} \tilde{\psi}_K & -\delta_\psi \tilde{V}_{Z_K} & 0 & 0 \\ \sigma_{V_d} \text{Sin} \tilde{\psi}_K & \delta_\psi \tilde{V}_{X_K} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \Delta T^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

де: $\sigma_\xi \delta_V$, $\sigma_\xi \Delta \psi$ – задані параметри, що характеризують малі зміни помилок δ_V та $\Delta \psi$ у часі:

$$\tilde{V}_{X_K} = \tilde{V}_K \text{Cos} \tilde{\psi}_K, \quad \tilde{V}_{Z_K} = \tilde{V}_K \text{Sin} \tilde{\psi}_K.$$

Описана схема комплексної обробки навігаційної інформації дозволяє оцінювати похибки оптимального дискретного фільтра на основі інформації від ДСНС та вводити поправки у вихідну інформацію КШНС по координатам, складовим шляхової швидкості та куту курсу. У відповідності до складеної на даний момент класифікації [6], таку схему можна віднести до інваріантної розімкненої схеми. Удосконалення такої схеми може бути проведено шляхом введення в процедуру курсо-швидкісного числення координат зворотних зв'язків по помилкам, а також по оцінках систематичних похибок датчиків курсу та швидкості, тобто шляхом переходу до так званої замкненої інваріантної схеми. Періоди введення відповідних зворотних зв'язків по оцінках помилок координат і по оцінках систематичних помилок датчиків (у числі тактів оновлення інформації від ДСНС) доцільно вибирати з урахуванням швидкостей збігання вихідних оцінок фільтра по оцінках координат і систематичним помилкам датчиків КШНС. У моменти введення зворотних зв'язків у процедуру курсо-швидкісного числення координат відповідні компоненти вектора стану системи в фільтрі обнуляються і надалі оцінюються прирощення відповідних помилок КШНС. Перехід до замкненої інваріантної схеми дозволяє суттєво підвищити сталість процедур комплексної обробки навігаційної інформації [7].

Введення на l -у кроці у КШНС зворотних зв'язків по оцінках помилок з виходу фільтра призводить до наступного алгоритму числення коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} X_{ch(K+1)} &= X_{ch(K)}^+ + V_K^+ \text{Cos} \psi_K^+; \\ Z_{ch(K+1)} &= Z_{ch(K)}^+ + V_K^+ \text{Sin} \psi_K^+, \end{aligned} \quad (11)$$

де: $X_{ch(K)}^+ = X_{ch(K)} - \Delta \hat{X}_K$; $\psi_K^+ = \tilde{\psi}_K - \Delta \psi_l^S$;

$$Z_{ch(K)}^+ = Z_{ch(K)} - \Delta \hat{Z}_K; \quad V_K^+ = \tilde{V}_K (1 - \delta_{Vl}^S); \quad \delta_{Vl}^S = \delta_{Vl-1}^S + \hat{\delta}_{VK}^S; \quad \Delta \psi_l^S = \Delta \psi_{l-1}^S + \Delta \hat{\psi}_K^S;$$

$l=1,2,\dots$ – номер кроку введення зворотних зв'язків (корекції КШНС) через кожні L_0 кроків оновлення інформації ДСНС.

На такті введення корекції у алгоритм числення координат КШНС поправки у фільтрі обнуляються компоненти вектору оцінок помилок КШНС, а саме:

$$\Delta \hat{X}_K = (0, 0, 0, 0)^T. \quad (12)$$

Таким чином, оцінювання помилок скорегованої КШНС починається спочатку. Запропонованій послідовності виконання процедури розрахунку координат та кутів орієнтації БПМ відповідає інваріантна зі зворотними зв'язками по оцінках помилок курсошвидкісної підсистеми схема комплексної обробки навігаційної інформації (рис. 3).

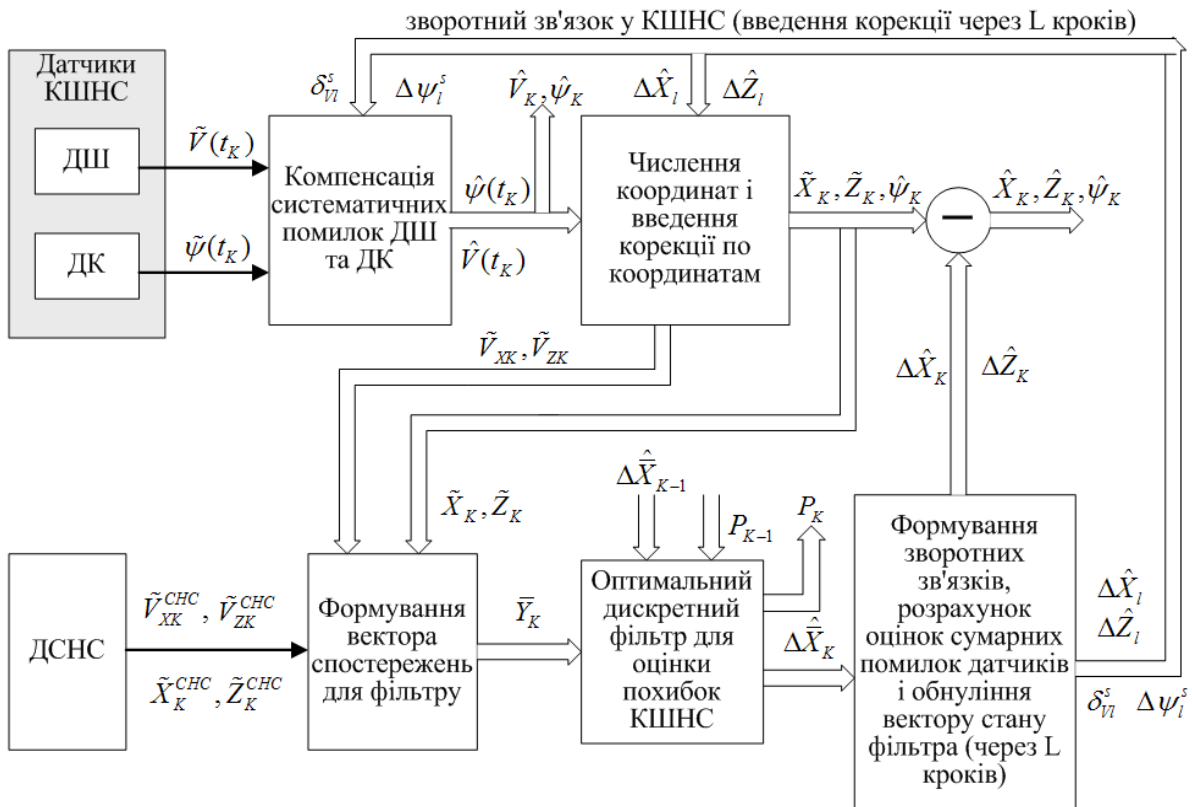


Рис. 3. Блок-схема інваріантної зі зворотними зв'язками комплексної обробки навігаційної інформації.

Для розрахунку компонент вектору $\Delta \hat{X}_K = (\Delta \hat{X}_K, \Delta \hat{Z}_K)^T$ оцінок помилок КШНС використовується інформація від ДСНС, яка поступає на блок формування вектора спостережень. На цей блок поступають також поточні розрахункові показники датчиків швидкості та курсу \tilde{V}_K та $\tilde{\psi}_K$ і координат \tilde{X}_K, \tilde{Z}_K . Вектор спостережень \bar{Y}_K має вигляд:

$$\bar{Y}_K = (\tilde{X}_K - \tilde{X}_K^{CHC}, \tilde{Z}_K - \tilde{Z}_K^{CHC}, \tilde{V}_{XK} - \tilde{V}_{XK}^{CHC}, \tilde{V}_{ZK} - \tilde{V}_{ZK}^{CHC})^T. \quad (13)$$

Компоненти вектора спостережень поступають на оптимальний дискретний фільтр для оцінки похибок КШНС. На виході з фільтру

коваріаційна матриця помилок оцінок P_K на K -у кроці запам'ятовується в стеку обчислювального комплексу і через один крок розрахунків подається на дискретний фільтр у стані P_{K-1} , а компоненти вектору помилок в фільтрі обнуляються. Вектор сумарних помилок датчиків $\Delta\hat{X}_K$ має компоненти:

$$\Delta\hat{X}_K = (\Delta\hat{X}_K, \Delta\hat{Z}_K, \hat{\delta}_{VK}, \Delta\hat{\psi}_K)^T. \quad (14)$$

Компоненти δ_{vi}^s та $\Delta\psi_i^s$ вектору $\Delta\hat{X}_K$ передаються на блок компенсації систематичних помилок датчиків швидкості та курсу КШНС, а $\Delta\hat{X}_i$ та $\Delta\hat{Z}_i$ – на блок числення координат.

В результаті проведення розрахунків за алгоритмом (13) і (14) отримуються скориговані значення кінематичних параметрів руху БПМ. Перевірка ефективності функціонування розробленої математичної моделі навігаційно-управляючого комплексу безпілотної польової машини відбувається шляхом проведення імітаційного моделювання. Таке моделювання дозволяє оцінити правильність формування рівняння спостережень, екстраполяції оцінки вектора похибок навігаційних підсистем, корекції оцінок вектору стану системи та матриці поправок тощо. Також з'являється можливість порівняння якості розрахунку навігаційної інформації для різних схем інтеграції підсистем і методик обробки навігаційної інформації, у тому числі і запропонованої неінваріантної компенсаційної схеми побудови навігаційно-управляючого комплексу. Алгоритм роботи блоку моделювання комплексної обробки навігаційної інформації представлено на (рис. 4).

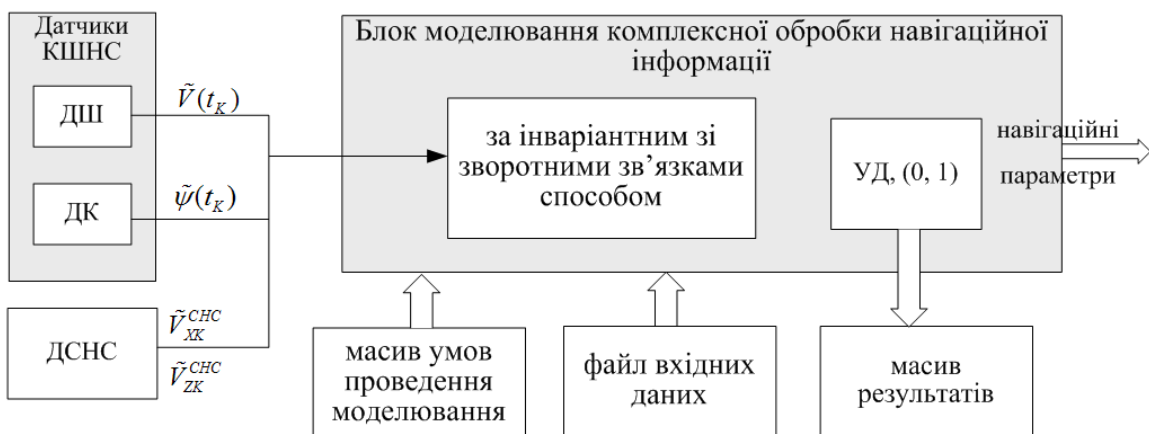


Рис. 4. Схема роботи блоку моделювання комплексної обробки навігаційної інформації.

При проведенні імітаційного моделювання було задано через масив умов і файл вхідних даних маршрут із заданою кількістю проміжних пунктів, швидкість руху машини (7 м/с при початковій

0 м/с), максимальний кут розвороту управляючих коліс, база машини, коефіцієнт бокового відхилення і ряд інших необхідних для функціонування БПМ параметрів.

Результати імітаційного моделювання проходження 10 проміжних пунктів маршруту показані на (рис. 5).

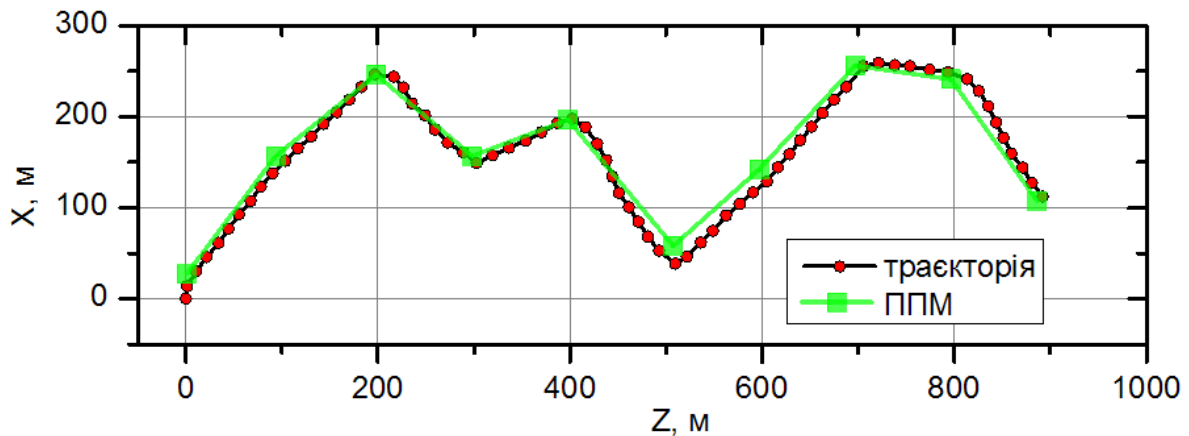


Рис. 5. Траєкторія руху БПМ при проходженні проміжних пунктів маршруту.

Як видно, сумісне використання КШНС та СНС дозволяє, з одного боку, обмежити зростання похибок КШНС і, з іншого боку, компенсувати шумову складову похибок СНС і, що важливо для надійної роботи навігаційного комплексу, підвищити темп видачі інформації бортовим споживачам.

Висновок. Величина середньоквадратичного відхилення координат фактичної траєкторії руху БПМ від заданої складала відповідно 3,6 м, що свідчить про високу якість функціонування навігаційного комплексу.

Список літератури

1. Степанов О. А. Состояние, перспективы развития и применения наземных систем навигации для подвижных объектов / О. А. Степанов // Гирология и навигация. – № 2 (49). – 2005. – С. 95–121.
2. Schmidt, G. T. INS/GPS Integration Architectures / Schmidt G. T., Phillips R. E. // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO NATO Lecture. – Series N232. – 2004. – P. 130–138.
3. Соловьев, Ю. А. Спутниковая навигация и ее приложения / Ю. А. Соловьев. – М.: ЭКО-ТРЕНЗ, 2003. – 325 с.
4. Kalman, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems / Kalman, R. E. // Journal of Basic Engineering. – 82 (1). – 1960. – P. 35–45.
5. Лебедев Д. В. Информационно-алгоритмические аспекты управления подвижными объектами / Д. В. Лебедев, А. И. Ткаченко. – К.: Наукова думка, 2000. – 312 с.
6. Справочное пособие по теории автоматического регулирования и управления / Под ред. Е. А. Попова. – М.: Машиностроение, 1973. – 584 с.

7. Степанов О. А. Особенности построения и перспективы развития навигационных интегрированных инерциально-спутниковых систем / Под ред. В. Г. Пешехонова. – Санкт-Петербург: Наука, 2004. – 120 с.

References

1. Stepanov, O. A. (2005). Sostoyaniye, perspektivy razvitiya y primeneniya nazemnykh system navyhatsyy dlya podvyzhnykh obektov [Condition, prospects of development and application of ground-based navigation systems for mobile objects]. Gyroscopy and navigation, 2 (49), 95–121.
2. Schmidt, G. T., Phillips, R. E. (2004). INS/GPS Integration Architectures. Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO NATO Lecture, Series N232, 130–138.
3. Solov'ev, Yu. A. (2003). Sputnikovaya navyhatsyya y ee prylozheniyya [Satellite navigation and its applications]. M.: EKO-TRENTZ, 325.
4. Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of Basic Engineering, 82 (1), 35–45.
5. Lebedev, D. V., Tkachenko, A. Y. (2000). Ynformatsyonno-alhorytmicheskiye aspekty upravleniyya podvyzhnyimi obektami [Information and algorithmic aspects of control of mobile objects]. K.: Naukova dumka, 312.
6. Popova, E. A. (1973). Spravochnoe posobie po teoryi avtomaticheskogo rehulyrovaniyya y upravleniyya [Handbook of the theory of automatic regulation and control] Pod red. M.: Mashynostroeniye, 584.
7. Stepanov, O. A. (2004). Osobennosti postroeniyya y perspektivy razvitiya navyhatsyonnykh yntehrirovannykh ynerstyal'no-sputnykovykh system [Features of construction and prospects of development of navigation integrated inertial-satellite systems]. Sankt-Peterburh: Nauka, 120.

СТРУКТУРА НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА БЕСПИЛОТНОЙ ПОЛЕВОЙ МАШИНЫ

Л. В. Анискевич, Ю. А. Росамаха

Аннотация. *Проведено аналитическое описание системы автоматического управления режимом движения беспилотной полевой машины путем использования разомкнутого инвариантного способа комплексной обработки навигационной информации, который может быть применен для интегрированных комплексов на базе спутниковой и курсо-скоростной навигационных подсистем.*

Проверка эффективности функционирования разработанной математической модели навигационно-управляющего комплекса беспилотной полевой машины происходит путем проведения имитационного моделирования. Такое моделирование позволяет оценить правильность формирования уравнения наблюдений, экстраполяции оценки вектора погрешностей навигационных подсистем, коррекции оценок вектора состояния системы и матрицы поправок и тому подобное. Также появляется возможность сравнения качества расчета навигационной информации для различных схем интеграции подсистем и

методик обработки навигационной информации, в том числе и предложенной неинвариантной компенсационной схемы построения навигационно-управляющего комплекса.

Ключевые слова: беспилотная полевая машина, навигационный комплекс, датчик скорости, датчик курса, навигационная информация

STRUCTURE OF NAVIGATION COMPLEX OF UNMANNED FIELD MACHINES

L. V. Aniskevich, Yu. O. Rosamaha

Abstract. Analytical description of the system of automatic control of motion for the pilotless field machine is conducted by the use of the unlinked invariant method of complex treatment of navigation information, which can be applied for computer-integrated complexes on the base of satellite and course-speed navigation subsystems.

Verification of efficiency of functioning of the developed mathematical model navigation and control complex field of unmanned machines is implemented by the simulation. This simulation allows to evaluate the correctness of the equations of observation, extrapolation of the estimates of the vector of errors of navigation subsystems, the correction of the estimates of the system state vector and the matrix of amendments and the like. Also it is possible to compare the quality of the calculation of the navigation information for different schemes of integration of subsystems and methods for processing navigation data, including the proposed advance compensation schemes for constructing navigation and control complex.

Key words: *unmanned field car, navigation system, speed sensor, rate sensor, navigation info*

УДК 531.32

АНАЛІЗ РІВНЯНЬ РУХУ МАТЕРІАЛЬНОЇ ЧАСТИНКИ ПО РАДІАЛЬНІЙ ЛОПАТЦІ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА

**Г. А. Голуб, доктор технічних наук
О. А. Марус, кандидат технічних наук
e-mail: gagolub@mail.ru**

Анотація. Пристрої для перемішування на основі обертових барабанів знаходить все більше поширення при розробці біотехнологічних процесів ферментації, а тому підвищення

© Г. А. Голуб, О. А. Марус, 2016