

В. М. Васильєв, В. О. Рогожин, Б. І. Долінце

СХЕМА КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ І СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ЇЇ ДОСЛІДЖЕННЯ

Запропоновано схему комплексування інерціальної й супутникової навігаційних систем з використанням схеми корекції. Проведено дослідження характеристик комплексної інерціально-супутникової навігаційної системи (ІНС) та аналіз її точності у статичному режимі роботи.

Постановка проблеми. До сучасних бортових навігаційних систем ставляться високі вимоги глобальності, незалежності від гідрометеорологічних умов, підстильної поверхні, рельєфу рослинності, що оточує, забудови, часу доби й року, безперервності, необмеженої пропускну здатності, практичної незалежності від висоти над поверхнею землі й інших умов руху об'єкта навігації, перешкодозахищеності та ін.

Відомо, що істотне поліпшення тактичних і технічних характеристик навігаційних систем може бути досягнуто при комплексній обробці інформації, що надходить від різних вимірників навігаційних параметрів.

Зазвичай вдається досягти великого позитивного ефекту при об'єднанні радіотехнічних та нерадіотехнічних вимірників. Це зумовлено насамперед тим, що похибки цих систем мають статистичні характеристики, які дуже відрізняються один від одного, і, власне, це дає значний вигравш від комплексування.

Комплексна ІНС – це синтез двох самостійних систем – інерціальної навігаційної системи (ІНС) і супутникової навігаційної системи (СНС), що дозволяє об'єднати переваги й компенсувати недоліки, властиві кожній із систем окремо.

Комплексування дає можливість використовувати більш дешеве обладнання й одночасно задовольняти необхідним експлуатаційним і точнісним характеристикам.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Комплексуванню навігаційних систем присвячено досить велику кількість досліджень і публікацій [1–5]. У роботах [1–4] розглянуто методи комплексування навігаційних вимірників на основі взаємної компенсації і фільтрації їх похибок із застосуванням оптимальних стохастичних методів оцінювання сигналів вимірників. Застосування оптимальних методів вимагає наявності адекватних математичних моделей похибок вимірювань та їх статистичних характеристик. При цьому комплексна обробка проводиться з використанням обчислювальних засобів. Застосовують також спосіб комплексування з включенням додаткових коректувальних елементів у коло зворотного зв'язку схеми комплексування [4–6]. Застосування таких схем не вимагає комп'ютерної обробки сигналів вимірників.

Формулювання завдання дослідження. Запропоновано систему комплексування інерціальної і супутникової навігаційних систем з використанням схеми корекції.

Завдання полягає в дослідженні характеристик цієї системи і точності визначення відповідних навігаційних параметрів.

Схема комплексування ІНС і СНС з коректорами

Запропоновану схему комплексування інерціальної і супутникової навігаційних систем з використанням схеми корекції показано на рис. 1 [6]. На схемі позначено похибки визначення координати, швидкості та прискорення комплексної інерціально-супутникової навігаційної системи: $\Delta S_m = S_m - S$ – похибка визначення координати S ; $\Delta V_m = V_m - V$ – похибка визначення швидкості V ; $\Delta \dot{V}_m = \dot{V}_m - \dot{V}$ – похибка визначення прискорення \dot{V} , а також β – кутова похибка горизонтування ІНС; Δa – похибка акселерометра; ω_{op} – кутова швидкість дрейфу ІНС; g – прискорення вільного падіння; $\Delta S_k = S_k - S$, $\Delta V_k = V_k - V$ – похибки супутникової навігаційної системи відповідно за координатою і швидкістю.

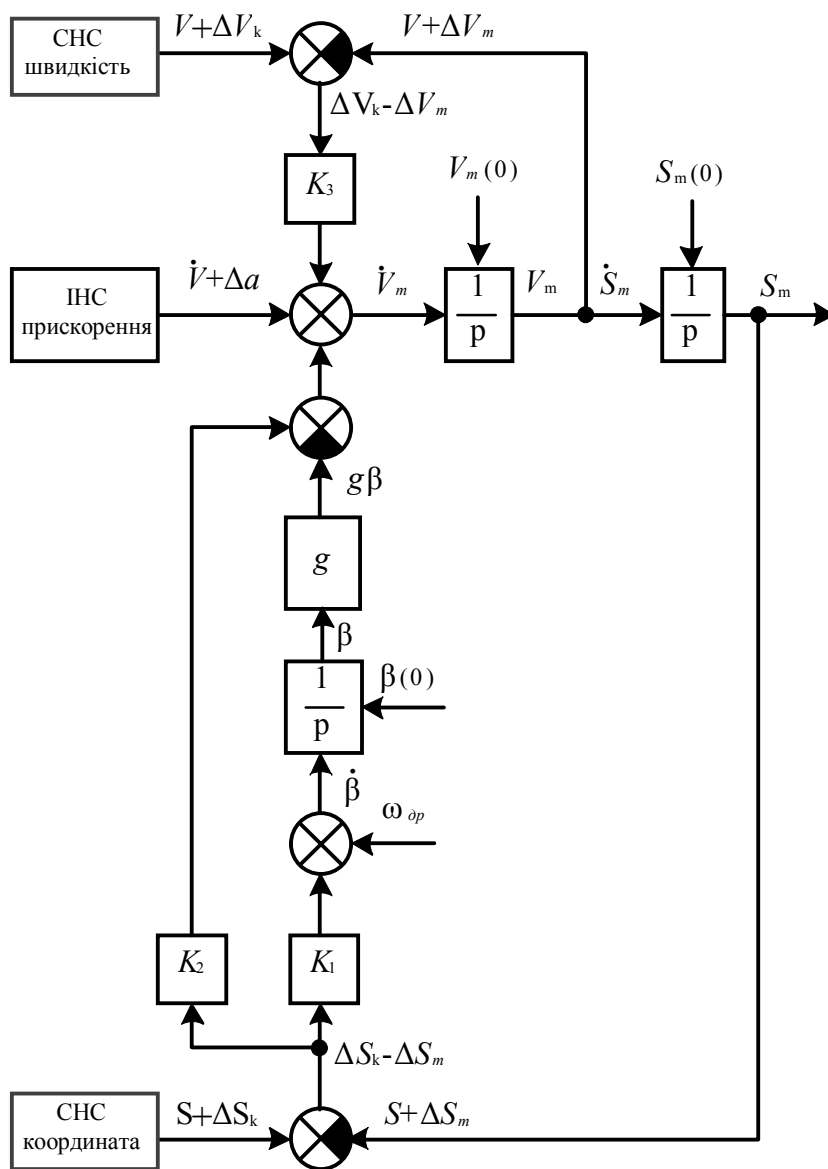


Рис. 1. Схема комплексування ІНС і СНС з коректорами

Відповідно до схеми запишемо рівняння, що описують зміну сигналів на виході трьох суматорів:

$$\begin{aligned}\dot{V}_m &= \dot{V} + K_3(V_k - V_m) + K_2(S_k - S_m) - g\beta + \Delta a; \\ \dot{\beta}_m &= K_1(S_k - S_m) + \omega_{op}; \\ \dot{S}_m &= V_m.\end{aligned}\tag{1}$$

Відносно до похибок ці рівняння запишемо у вигляді

$$\begin{aligned}\Delta \dot{V}_m &= K_3(\Delta V_k - \Delta V_m) + K_2(\pi) - g\beta + \Delta a; \\ \dot{\beta}_m &= K_1(\Delta S_k - \Delta S_m) + \omega_{op}; \\ \Delta \dot{S}_m &= \Delta V_m.\end{aligned}\tag{2}$$

Позначимо вектор змінних похибок (вектор стану системи)

$$X = [\Delta V_m, \beta, \Delta S_m]^T.\tag{3}$$

Позначимо також

$$b_v = K_3\Delta V_k + K_2\Delta S_k + \Delta a; \quad b_\beta = K_1\Delta S_k + \omega_{op}; \quad b_s = 0$$

і сформуємо вектор-стовпець вільних членів системи (2)

$$B = [b_v, b_\beta, b_s]^T.\tag{4}$$

Знайдемо характеристичний визначник досліджуваної системи:

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} (p + K_3) & g & K_2 \\ 0 & p & K_1 \\ -1 & 0 & p \end{vmatrix}.\tag{5}$$

Запишемо характеристичне рівняння системи (2):

$$p^3 + p^2K_3 + pK_2 - gK_1 = 0.\tag{6}$$

Для дослідження системи на усталеність скористаємось новим оператором:

$$p = P_\tau \omega.\tag{7}$$

Згідно з (7) рівняння (6) матиме вигляд

$$P_\tau^3 \omega^3 + P_\tau^2 \omega^2 K_3 + P_\tau \omega K_2 - gK_1 = 0,\tag{8}$$

де $\omega^3 = -gK_1$;

ω – частота власних коливань системи.

Пронормуємо рівняння (8). Поділимо (8) на ω^3 й отримаємо

$$P_\tau^3 + P_\tau^2 \frac{K_3}{\omega} + P_\tau \frac{K_2}{\omega^2} + 1 = 0. \quad (9)$$

Використовуючи критерій усталеності Вишнеградського, отримаємо для коефіцієнтів кубічного рівняння

$$\frac{K_3}{\omega} = 3, \quad \frac{K_2}{\omega^2} = 3. \quad (10)$$

Отримані вирази (10) використаємо для визначення оптимального значення коефіцієнтів підсилення K_2, K_3 , вибір яких робиться за умови забезпечення заданої якості перехідних процесів корекції ІНС, обумовленої значенням власної частоти системи, яку задаємо $\omega = 0,01 \text{ c}^{-1}$. У результаті знаходимо: $K_1 = -1,02 \cdot 10^{-7}$; $K_2 = 3,0 \cdot 10^{-4}$; $K_3 = 0,03$.

Дослідження похибок комплексної системи

Отримані математичні рівняння (2), що описують похибки визначення вихідних даних комплексної системи, дають змогу аналітично визначити та розрахувати значення похибок.

Запишемо рішення системи рівнянь (2) в операторній формі за формулами Крамера:

$$\Delta V_m(p) = \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)}; \quad \beta(p) = \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)}; \quad \Delta S_m(p) = \frac{\Delta_3(p)}{\Delta(p)}, \quad (11)$$

де $\Delta_i(p)$ – визначник, що виходить із $\Delta(p)$ (5) заміною i -го стовпця стовпцем вільних членів B (4) системи (2), тобто

$$\Delta_1(p) = \begin{vmatrix} b_v & g & K_2 \\ b_\beta & p & K_1 \\ b_s & 0 & p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (K_3 \Delta V_k + K_2 \Delta S_k + \Delta a) & g & K_2 \\ (K_1 \Delta S_k + \omega_{dp}) & p & K_1 \\ 0 & 0 & p \end{vmatrix};$$

$$\Delta_2(p) = \begin{vmatrix} (p + K_3) & b_v & K_2 \\ 0 & b_\beta & K_1 \\ -1 & b_s & p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (p + K_3) & (K_3 \Delta V_k + K_2 \Delta S_k + \Delta a) & K_2 \\ 0 & (K_1 \Delta S_k + \omega_{dp}) & K_1 \\ -1 & 0 & p \end{vmatrix};$$

$$\Delta_3(p) = \begin{vmatrix} (p + K_3) & g & b_v \\ 0 & p & b_\beta \\ -1 & 0 & b_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (p + K_3) & g & (K_3 \Delta V_k + K_2 \Delta S_k + \Delta a) \\ 0 & p & (K_1 \Delta S_k + \omega_{dp}) \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

У результаті відповідно до (11) отримаємо рівняння похибок ІНС в операторній формі:

$$\Delta V_m(p) = \frac{p^2 (K_3 \Delta V_k + K_2 \Delta S_k + \Delta a) - pg (K_1 \Delta S_k + \omega_{op})}{p^3 + p^2 K_3 + p K_2 - g K_1}; \quad (12)$$

$$\beta(p) = \frac{p^2 (K_1 \Delta S_k + \omega_{op}) + p (K_1 K_3 \Delta S_k + K_3 \omega_{op}) - K_1 K_3 \Delta V_k + K_2 \omega_{op} - K_1 \Delta a}{p^3 + p^2 K_3 + p K_2 - g K_1}; \quad (13)$$

$$\Delta S(p) = \frac{p (K_3 \Delta V_k + K_2 \Delta S_k + \Delta a) - g K_1 \Delta S_k - g \omega_{op}}{p^3 + p^2 K_3 + p K_2 - g K_1}. \quad (14)$$

Одержуємо усталені значення похибок (12)–(14) комплексної системи з використанням граничних переходів, тобто при $p \rightarrow 0$. Тоді

$$\Delta V_m^{ycm} = \lim_{p \rightarrow 0} \Delta V_m(p); \quad \beta^{ycm} = \lim_{p \rightarrow 0} \beta(p); \quad \Delta S^{ycm} = \lim_{p \rightarrow 0} \Delta S(p).$$

У результаті отримаємо

$$\Delta V_m^{ycm} \approx 0; \quad (15)$$

$$\beta^{ycm} = \frac{-K_1 K_3 \Delta V_k + K_2 \omega_{op} - K_1 \Delta a}{-g K_1}; \quad (16)$$

$$\Delta S^{ycm} = \frac{-g K_1 \Delta S_k - g \omega_{op}}{-g K_1} = \Delta S_k + \frac{\omega_{op}}{K_1}. \quad (17)$$

Підставляючи в отримані вирази (15)–(16) числові значення відповідних похибок конкретних ІНС і СНС:

$$\omega_{op} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ ' / c}; \quad \Delta a = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м / c}^2;$$

$$\Delta S_k = 20 \text{ м}; \quad \Delta V_k = 0,2 \text{ м / c}; \quad \beta_0 = 3',$$

– отримаємо такі усталені значення похибок комплексної інерціально-супутникової навігаційної системи:

$$\Delta V_m^{ycm} \approx 0; \quad \beta^{ycm} = 2,4'; \quad \Delta S^{ycm} = 18,6 \text{ м}.$$

Висновки. У даній роботі запропоновано схему комплексування інерціальної і супутникової навігаційних систем з включенням додаткових коректувальних елементів у коло зворотного зв'язку схеми. Проведено дослідження характеристик комплексної інерціально-супутникової навігаційної системи та аналіз її точності у статичному режимі роботи.

Отримані результати показують, що в усталеному режимі роботи характеристики комплексної навігаційної системи дозволяють з достатньою точністю забезпечувати вирішення навігаційних завдань при використанні більш дешевого обладнання. Проведене моделювання роботи комплексної системи показало досить великий час виходу на усталений режим, який становить кілька сотень секунд, що може позначитися на точності навігації за необхідності оперативного початку виконання польоту.

Подальше дослідження має бути спрямоване на оцінювання та аналіз точності комплексної інерціально-супутникової навігаційної системи у динамічному режимі її роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Иванов Ю. П. Комплексование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов : учеб. пособ. для вузов / Ю. П. Иванов, А. Н. Синяков, И. В. Филатов ; под. ред. В. А. Боднера. – К. : Машиностроение, 1984. – 207 с.
2. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации / М. С. Ярлыков. – М. : Радио и связь, 1985. – 344 с.
3. Бабак В. П. Супутникова радіонавігація / В. П. Бабак, В. В. Конін, В. П. Харченко. – К. : Техніка, 2004. – 328 с.
4. Інерціально-супутникові навігаційні системи / М. К. Філяшкін В. О. Рогожин, А. В. Скрипець, Т. І. Лукінова. – К. : НАУ, 2009. – 296 с.
5. Корекція інерціальної системи навігації швидкісними та позиційними коректорами / Н. О. Депутат, Ю. І. Смилова, М. К. Філяшкін, В. О. Рогожин // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2004». – К. : НАУ, 2004. – Т. 2. – С. 67–70.
6. Долінце Б. І. Методи зменшення похибок інтегрованої інерціально-супутникової навігаційної системи / Б. І. Долінце // Проблеми навігації і управління рухом : тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 28–29 листопада 2012 р. – К. : НАУ, 2012. – С. 45.

Подано 23.05.13

В. Н. Васильев, В. А. Рогожин, Б. И. Долинце

СХЕМА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ И СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Предложена схема комплексирования инерциальной и спутниковой навигационных систем с использованием схемы коррекции. Проведено исследование характеристик комплексной инерционно-спутниковой навигационной системы (ИСНС) и анализ ее точности в статическом режиме работы.

V. M. Vasyliiev, V. O. Rogozhyn, B. I. Dolintse

THE SCHEME OF INTEGRATION OF INERTIAL AND SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS AND ITS INVESTIGATION

The scheme of integration of inertial and satellite navigation systems with scheme correction is proposed. A study of the characteristics of the integrated inertial-satellite navigation system (ISNS) and the analysis of its accuracy in static mode have been done.