

УДК 629.735.051'844'847(045)

М. К. Філяшкін, канд. техн. наук, проф.,
О. М. Дем'янчук, студ.

СУБОПТИМАЛЬНІ СХЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ В ІНЕРЦІАЛЬНО-СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА НАВІГАЦІЇ

Інститут електроніки і систем управління НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

Проаналізовано аналіз застосування калманівської фільтрації та показано певні труднощі її практичної реалізації на борту літального апарата, особливо за інтеграції супутникових систем з безплатформними інерціальними системами навігації. Запропоновано для цілей інтеграції інерціально-супутникових навігаційних систем застосовувати більш привабливі швидкодіючі, некритичні до нестаціонарних випадкових процесів схеми комплексування на основі схем компенсації. Розроблений для схеми компенсації динамічний фільтр третього порядку зі змінною структурою показав під час досліджень властивості не гірші, ніж оптимальна калманівська фільтрація.

Ключові слова: калманівська фільтрація, динамічний фільтр, схема компенсації, комплексна обробка інформації, оптимальна фільтрація.

Вступ. Прогрес у галузі супутникової навігації різко прискорився у зв'язку зі створенням не тільки американської (GPS) і російської (Glonass) супутникових систем, але й розвиток у країнах Європейського Союзу спільної мережі супутникових систем (проекти EGNOS, Galileo). Це привело до появи цілої індустрії виробництва супутникових навігаційних систем (СНС) для найрізноманітніших застосувань. Водночас використання тільки цих систем для завдань навігації і керування польотом літального апарата (ЛА) явно недостатньо.

Сформована натеper практика створення і застосування навігаційних систем ґрунтується на використанні інтегрованих інерціально-супутникових систем навігації (ІССН). При цьому ІССН можуть бути у свою чергу інтегровані з барометричними або радіотехнічними висотомірами й іншими бортовими вимірниками. Інтеграція інерціальної та супутникової систем реалізується комплексуванням двох систем.

Безумовно калманівська фільтрація найбільш приваблива для комплексної обробки інформації в ІССН. Проте використання фільтра Калмана має певні труднощі щодо його практичної реалізації на борту ЛА. Під час комплексування оцінюються положення і швидкість ЛА, причому дані про них можуть надходити не тільки споживачам, але й контурам спостереження за затримкою та фазою приймачів СНС. Необхідно, щоб ці дані надходили якомога швидше, щоб період часу між вимірюваннями в підсистемі СНС був розбитий на безліч підінтервалів для коригування контурів спостереження. Тобто зв'язок блока фільтра Калмана з контурами приймача СНС дуже жорсткий, тому фільтр Калмана має бути дуже швидкодіючим, що обмежується характеристиками процесорів бортових ЦОМ.

Щодо безплатформних інерціальних навігаційних систем (БІНС), то використання фільтра Калмана нашоувхується на додаткові труднощі. Зокрема, у БІНС основні джерела похибок – дрейфи гіроскопічних датчиків і акселерометрів, унаслідок нестаціонарності матриці переходу від однієї системи координат, зв'язаної з ЛА, до іншої – навігаційної, будуть нестаціонарними випадковими процесами навіть за стаціонарності випадкових процесів, що являють собою дрейфи реальних датчиків. Цей факт створює труднощі щодо ідентифікації помилок БІНС методами оптимальної фільтрації [1]. У платформних ІНС цих труднощів немає, оскільки осі реальної гіроплатформи мало відхиляються від осей навігаційної системи координат.

Постановка завдання. У сучасних бортових комплексах, крім алгоритмів оптимального оцінювання вектора стану (алгоритмів калманівської фільтрації), існують способи опрацювання однорідної інформації, що добре себе зарекомендували на практиці.

Це способи взаємної компенсації і фільтрації похибок вимірників одного й того самого навігаційного параметра.

Доцільність використання методу компенсації для опрацювання інформації в ІССН пояснюється тим, що в цьому випадку вимір навігаційних параметрів здійснюються вимірниками, що ґрунтуються на різних фізичних принципах, і при цьому похибки цих вимірників мають різні частотні діапазони.

Структурну схему реалізації методу компенсації показано на рис. 1. Алгоритм комплексного опрацювання інформації, у якому використовується метод компенсації, має порівняно з оптимальною калманівською фільтрацією досить простий вигляд:

$$\hat{X} = X_{\text{БІНС}} - F(p)(X_{\text{БІНС}} - X_{\text{СНС}}),$$

де $F(p)$ – динамічний фільтр схеми компенсації; $X_{\text{БІНС}}$, $X_{\text{СНС}}$ – навігаційні параметри (координати і складові швидкості), отримані від БІНС і СНС; $\hat{X}$ – оцінка навігаційного параметра.

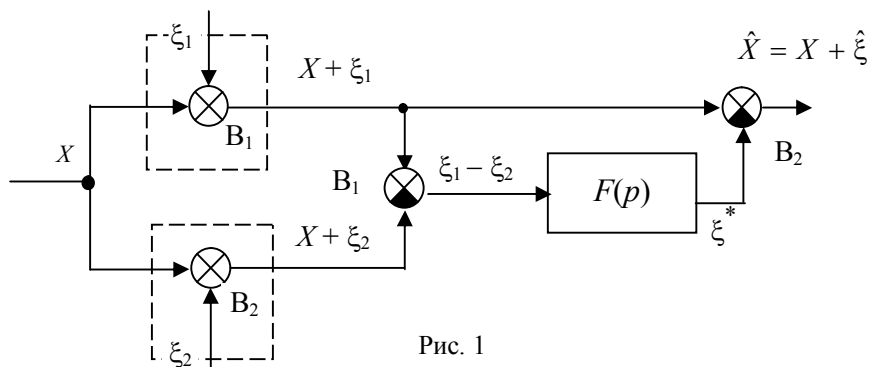


Рис. 1

Постановка завдання може бути сформульована таким чином: визначити таку структуру динамічного фільтра схеми компенсації, яка би забезпечувала сумісне опрацювання однорідної інформації від БІНС та СНС з якістю, близькою до оптимальної.

Розв'язання задачі. Рівняння схеми компенсації (рис. 1) можна записати у вигляді

$$\hat{X} = X + \xi_1 - F(p)(\xi_1 - \xi_2)$$

або

$$\hat{X} = X + [1 - F(p)]\xi_1 + F(p)\xi_2 = X + \hat{\xi},$$

де $\hat{\xi} = [1 - F(p)]\xi_1 + F(p)\xi_2$ – похибки комплексної системи.

Похибка $\hat{\xi}$ буде тим меншою, чим більша розбіжність у спектральних характеристиках похибок вимірників ξ_1 і ξ_2 [2].

Якщо вибрати фільтр $F(p)$ таким, щоб він з мінімальним спотворенням пропускав заваду ξ_1 і заглушував заваду ξ_2 , то помилка комплексної системи буде мінімальною, тобто помилка $\hat{\xi}$ зменшуватиметься залежно від різниці в спектральних характеристиках завад ξ_1 та ξ_2 . За значної різниці в частотних характеристиках завад на виході фільтра $F(p)$ (рис. 1) повністю буде відтворюватися завада ξ_1 , а на виході другого пристрою віднімання B_2 – точне значення вимірюваного параметра x , оскільки

$$\hat{x} = x + \xi_1 - \xi_1 = x.$$

Однак реальний фільтр, пропускаючи частку енергії завади ξ_1 , не повністю заглушує заваду ξ_2 , унаслідок чого вихідний сигнал схеми, окрім потрібної величини x , буде містити помилку $\hat{\xi}$ [2].

Відповідно до зазначених умов $F(p)$ має бути фільтром низьких частот, тоді фільтр з характеристикою $[1 - F(p)]$ стає фільтром високих частот. Фільтр високих частот може бути реалізований в простішому випадку за допомогою реальної аперіодичної ланки з передатною функцією

$$F(p) = \frac{1}{Tp + 1},$$

де T – стала часу фільтра.

Передатна функція фільтра низьких частот

$$[1 - F(p)] = \frac{Tp}{Tp + 1} \quad (1)$$

являє собою реальну диференціювальну ланку.

Були досліджені алгоритми комплексної обробки інформації за методом компенсації. Досліджено також класичний аперіодичний фільтр у схемі компенсації.

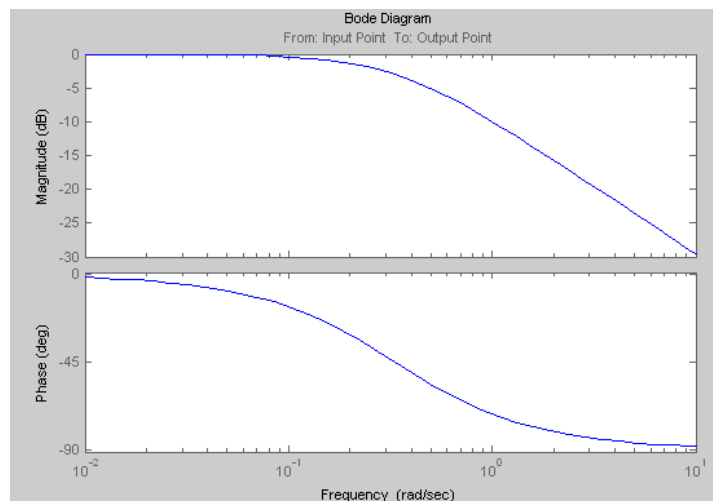
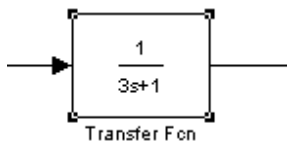


Рис. 2

Як видно з рис. 2 на частоті $\frac{1}{T}$, а також на більш низьких частотах цей фільтр спотворює низькочастотну складову за фазою до 20° .

Надалі, збільшуючи сталу часу фільтра, бачимо, що це позитивно впливає на його фільтрувальні властивості, але спотворення за фазою залишається суттєвим (рис. 3).

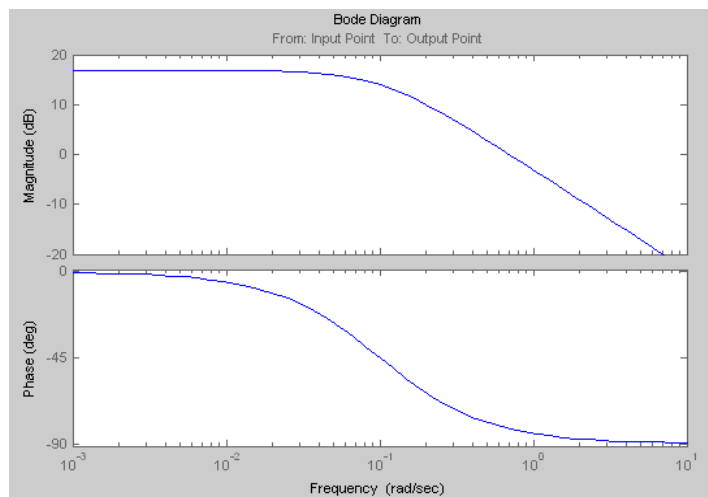
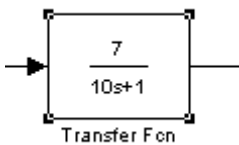


Рис. 3

Аналогічний результат дають фільтри другого та третього порядків, більше того, фільтр третього порядку, що кардинально змінює властивості фільтра, вносить спотворення за фазою до 40° .

Для компенсації спотворення за фазою було запропоновано і досліджено фільтр третього порядку з форсуванням, структурну схему якого показано на рис. 4.

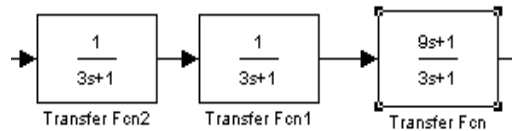


Рис. 4

Цей фільтр комплексно видаляє відзначені недоліки класичної схеми і його логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) найбільш наближена до ідеальної (рис. 5).

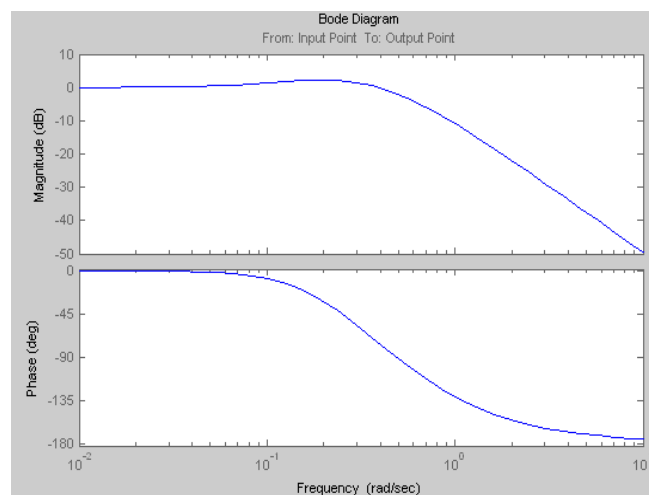


Рис. 5

Такий фільтр третього порядку з форсуванням вигляду

$$F(p) = \frac{3Tp + 1}{(Tp + 1)(Tp + 1)(Tp + 1)}$$

за результатами випробувань показав результати не гірші, ніж схема оптимальної фільтрації.

Для такого динамічного фільтра передатна функція фільтра низьких частот має вигляд

$$[1 - F(p)] = \frac{T^2 p^2 (Tp + 3)}{T^3 p^3 + 3T^2 p^2 + 3Tp + 1}.$$

За досить великих сталих часу T трійкою в чисельнику можна знехтувати і тоді фільтр низьких частот набуває вигляду

$$[1 - F(p)] = \frac{T^3 p^3}{T^3 p^3 + 3T^2 p^2 + 3Tp + 1}.$$

Такий фільтр уже не пропускає не тільки сталу складову похибки БІНС, але й похибки, що змінюється за законами першого і другого порядків.

Фільтр високих частот

$$F(p) = \frac{3Tp + 1}{(Tp + 1)(Tp + 1)(Tp + 1)}$$

за рахунок наявності форсувальної ланки ($3T_p + 1$) трохи підсилює високочастотну складову похибки СНС, але це з успіхом компенсується потрібним збільшенням його фільтрувальних властивостей.

Алгоритм комплексного опрацювання інформації, що реалізують метод компенсації з різними конфігураціями динамічного фільтра досліджували за допомогою повних моделей БІНС і СНС.

Сигнали від супутникової навігаційної системи моделювалися як сигнали еталонної навігаційної системи з накладенням на ці сигнали випадкових високочастотних похибок. Високочастотні похибки СНС моделювалися білим шумом (час вибірки – 1 с), рівень якого відповідає реальним похибкам СНС, зокрема середньоквадратична похибка вимірювання координат становить ± 20 м, а складових швидкості – $\pm 0,2$ м/с.

Крім білого шуму, на вихідні сигнали еталонної навігаційної може бути накладена випадкова низькочастотна складова, що змінюється з періодом приблизно в два три рази більшим від періоду маятника Шулера. Ця складова зумовлена похибками рішень приймача СНС, які залежать від геометричного фактора. Реалізації моделі похибок супутникової системи, тобто білий шум і випадкову низькочастотну складову похибки СНС показано на рис. 6, а реальний запис спостережень вихідних сигналів приймача СНС – на рис. 7. Загальний характер двох сигналів ідентичний, що підтверджує правильність підходів до моделювання похибок супутникової системи.

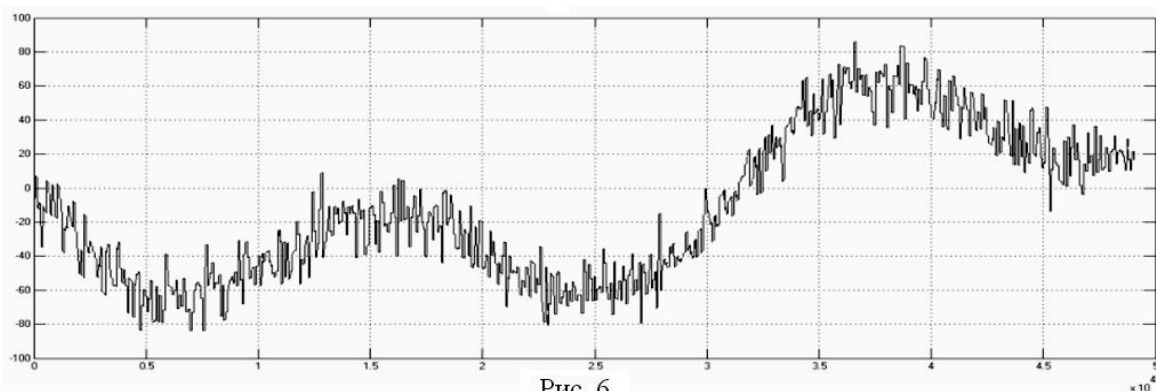


Рис. 6

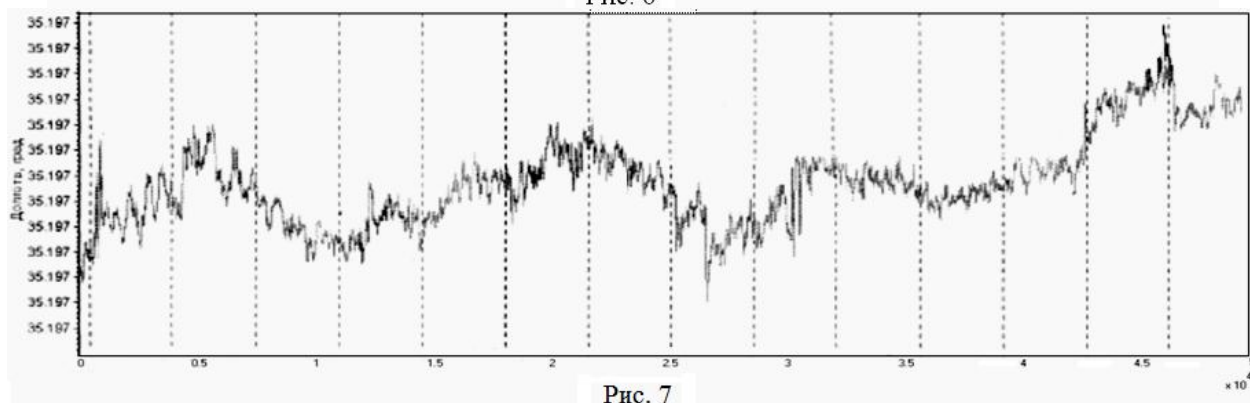


Рис. 7

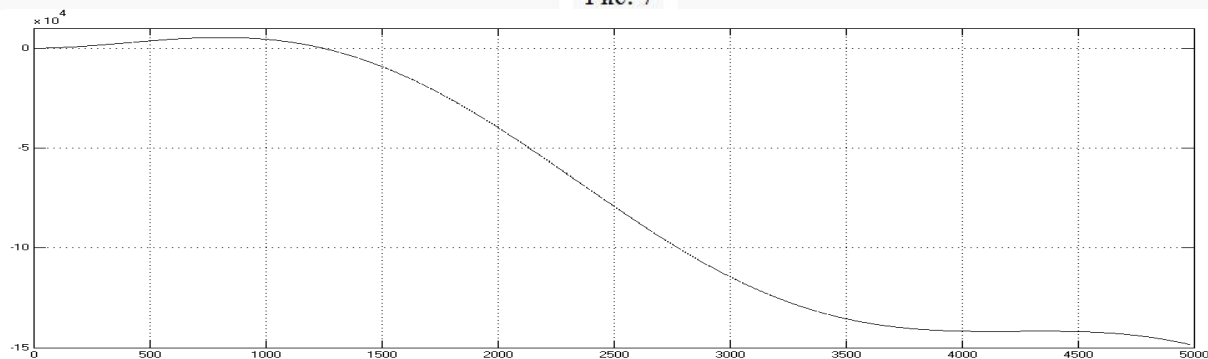


Рис. 8

У роботі досліджувалися сталі режими роботи класичної схеми комплексного опрацювання інформації на основі схеми компенсації, що застосовується, наприклад, в існуючих інерціально-доплерівських системах, і схеми на основі розробленого фільтра третього порядку.

Результати моделювання показано на рис. 8, 9. Зміну похибки числення координати $\Delta\lambda$ у БІНС ілюструє рис. 8, а зміну похибок оцінювання координати в разі використання класичної і розробленої схем – на рис. 9.

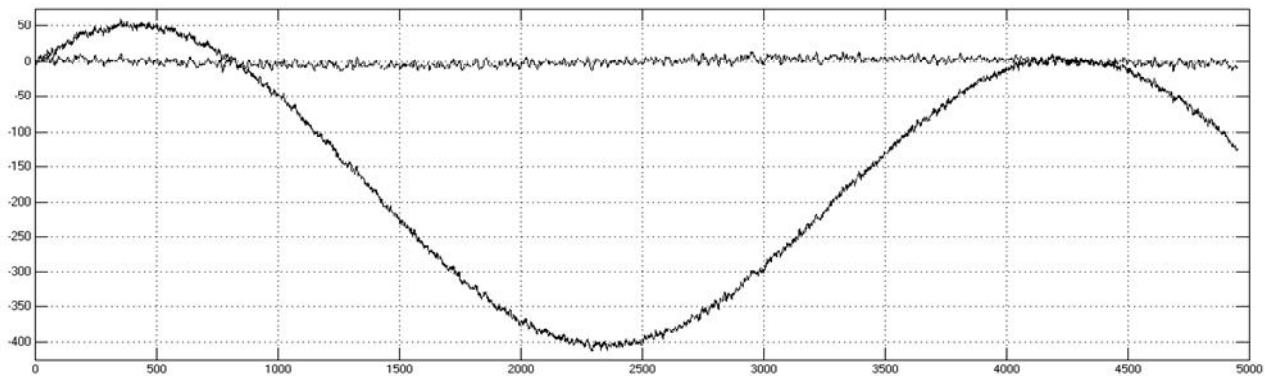


Рис. 9

Результати досліджень показують, що використання навіть класичної схеми комплексного опрацювання інформації на основі схеми компенсації зводить похибку оцінювання по координатах з 140 км до 400 м. Використання ж розробленого фільтра зводить похибку оцінювання координати до 5 – 10 м. На осцилограмах (рис. 10) показано в збільшеному масштабі найбільш характерні відрізки часу для перегляду змін похибки оцінювання координати на фоні похибок супутникової навігаційної системи. Графіки ілюструють добрі фільтрувальні властивості схеми комплексування і досить високі точнісні характеристики оцінювання поточних координат місцеперебування літака.

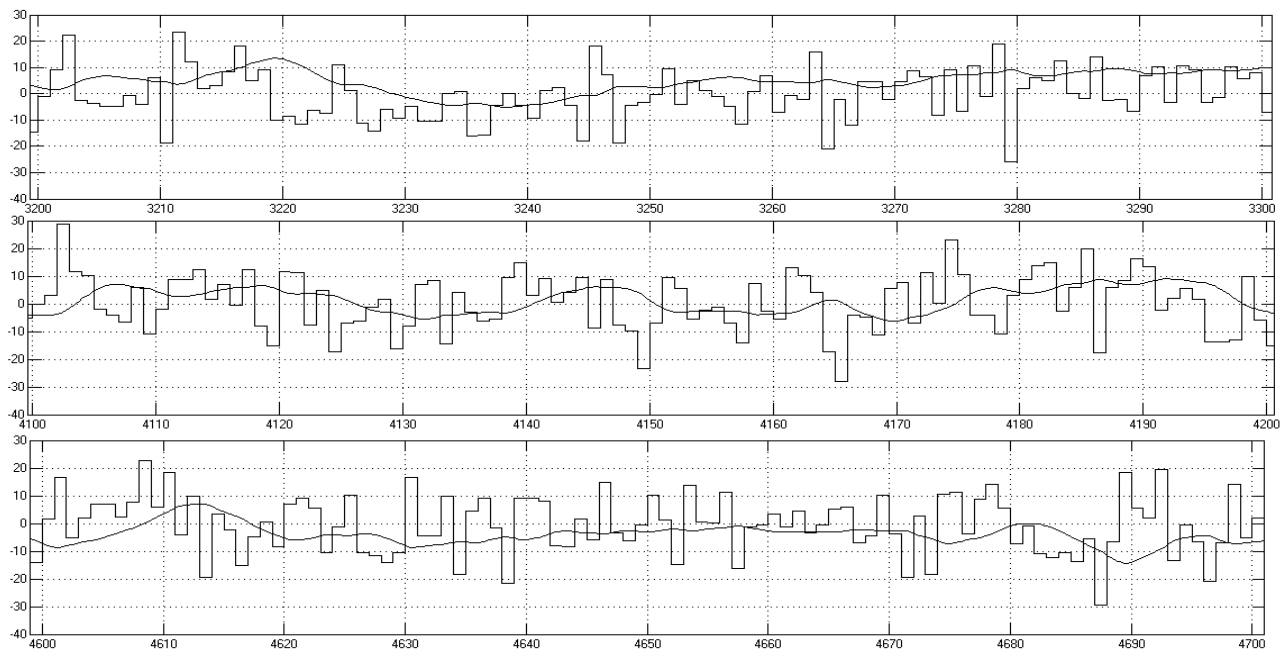


Рис. 10

Однією з найважливіших характеристик будь-якої схеми комплексування є її збіжність і час збіжності. У разі використання схеми компенсації на основі стаціонарного фільтра час збіжності, природно, залежить від сталої часу фільтра. При цьому має бути розумний

компроміс між фільтрувальними властивостями фільтра і часом установлення. На осцилограмах рис. 11 показано процеси відпрацювання початкових помилок БІНС у разі використання класичної схеми компенсації «Класика» і схеми із застосуванням пропонованого фільтра третього порядку «Нова». Такий самий перехідний процес, але за більший період часу, ілюструє рис. 11 б. Для класичної схеми час перехідного процесу складає три сталі часу фільтра $t_{п.п} = 3T_{\phi} \approx 15$ с, для схеми «Нова» час перехідного процесу збільшується вдвічі $t_{п.п} \approx 30$ с, до того ж відбувається перерегулювання.

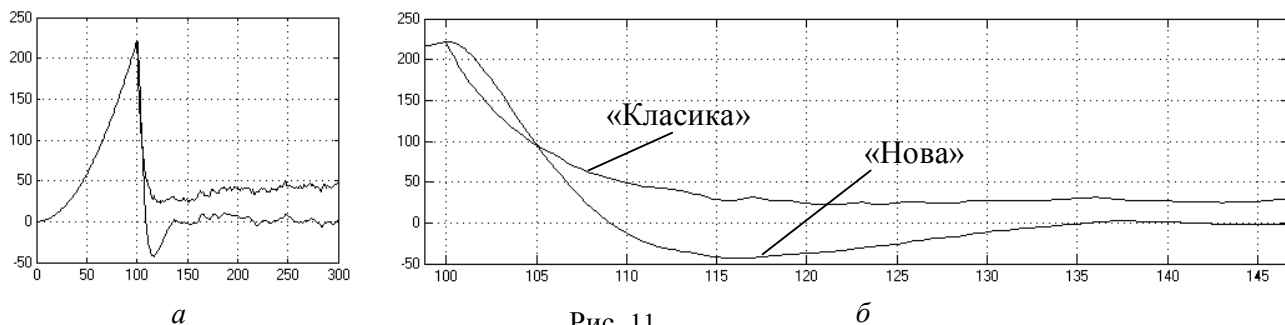


Рис. 11

У цьому зв'язку в роботі запропоновано використовувати в схемі комплексування фільтр із змінною структурою. Перехідні процеси ліквідації початкових помилок числення координат схемою компенсації, що використовує фільтр із змінною структурою, ілюструються осцилограмами на рис. 12.

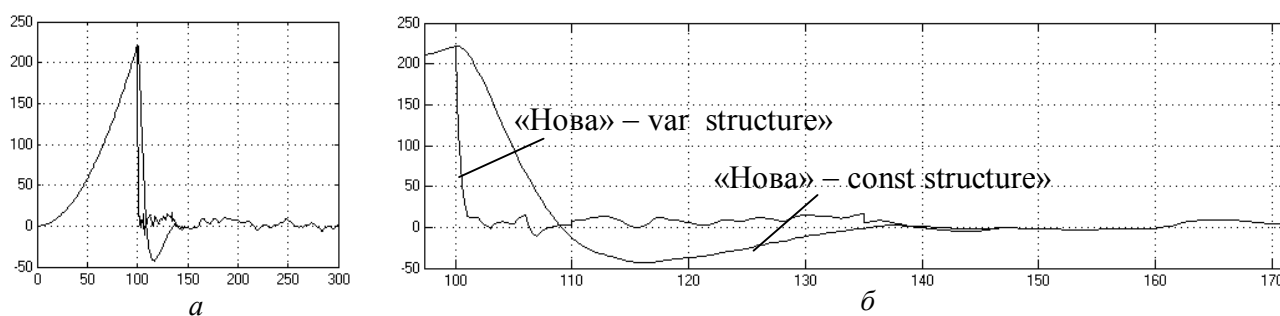


Рис. 12

Структура фільтра схеми компенсації змінюється в часі і має вигляд:

$$F(p) = \begin{cases} \frac{1}{0,5p+1}, & \text{якщо } t < 1,5 \text{ с;} \\ \frac{3p+1}{(p+1)(p+1)(p+1)}, & \text{якщо } 1,5 \text{ с} < t < 9 \text{ с;} \\ \frac{9p+1}{(3p+1)(3p+1)(3p+1)}, & \text{якщо } 9 \text{ с} < t < 45 \text{ с;} \\ \frac{15p+1}{(5p+1)(5p+1)(5p+1)}, & \text{якщо } t > 45 \text{ с.} \end{cases}$$

У момент відновлення роботи супутникової навігаційної системи (початок роботи схеми комплексування) використовується класична схема з аперіодичним фільтром, що за мінімальний час доводить помилку схеми компенсації до рівня шумів супутникової навігаційної системи. Природно, що фільтрувальні властивості такої схеми дуже низькі, тому згодом аперіодичний фільтр замінюється фільтром третього порядку, стала часу якого послідовно збільшується до рівня сталої часу стаціонарного фільтра.

Висновки. На відміну від калманівської фільтрації запропоновано підхід до комплексування ІССН на основі схеми компенсації більш швидкодієний, некритичний до нестационарних випадкових процесів, що являють собою дрейфи реальних датчиків первинної інформації БІНС, а також легко реалізований в бортових процесорах ЦОМ. Розроблений для схеми компенсації динамічний фільтр третього порядку зі змінною структурою, як показали дослідження, забезпечує задовільні фільтрувальні властивості схеми комплексування і досить високі точнісні характеристики оцінювання поточних координат.

Список літератури

1. Кузовков Н. Т. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация / Н. Т. Кузовков, О. С. Салычев. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
2. Рогожин В. О. Пілотажно-навігаційні комплекси повітряних суден / В. О. Рогожин, В. М. Синеглазов, М. К. Філяшкін. – К.: Вид-во НАУ, 2005. – 316 с.

Н. К. Філяшкін, А. Н. Дем'янчук

Субоптимальные схемы фильтрации в инерциально-спутниковых системах управления и навигации

Проведен анализ применения калмановской фильтрации и показаны определенные трудности ее практической реализации на борту летательного аппарата, особенно при интеграции спутниковых систем с безплатформенными интеграционными системами навигации. Предложено для целей интеграции инерциально-спутниковых навигационных систем применить более привлекательные быстродействующие, некритические к нестационарным случайным процессам схемы комплексирования на основе схемы компенсации. Разработанный для схемы компенсации динамический фильтр третьего порядка с изменяемой структурой показал при исследованиях свойства не худшие, чем оптимальная калмановская фильтрация.

N. K. Filyashkin, A. N. Demyanchuk

Suboptimal filtration schemes at inertial satellite control and navigation systems.

It was performed analysis of Kalman's filtration usage and also it was shown definite difficulties of its practical realization on a board of aircraft, especially during the integration of satellite systems with unplatformed inertial navigation systems. It was suggested to use schemes of completing on the base of the compensation ones, which are uncritical to unstationary random processes and which have better speed of response. The dynamic filter of the third degree with removable structure was developed for compensation scheme and during this researching this filter showed the properties, which are not worse as optimal Kalman's filtration.