

УДК 629.05

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771422021268460>

Л. М. Рижков,<sup>1</sup> *д.т.н., професор*, П. О. Паламарчук<sup>2</sup>, *магістрант*

## СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА

**Ua** Розглядається вибір структури та параметрів системи позиціонування рухомого об'єкта на основі комплементарного фільтра у складі GPS-приймача та акселерометра з метою зменшення впливу значних короткочасних завад GPS-приймача за наявності зміщення нуля акселерометра. Для аналізу прийнято комплементарний фільтр, побудований за схемою фільтрації. Порівнюються фільтри другого та третього порядку. Показано високу ефективність фільтра. Показано, що вибором певної структури комплементарного фільтра третього порядку можна усунути сталу складову у вихідному сигналі фільтра.

**En** The choice of structure and parameters of the positioning system of a moving object based on a complementary filter using GPS-receiver and accelerometer is considered in order to reduce the effect of significant short-term interference of the GPS receiver when there is a zero offset accelerometer. For the analysis the complementary filter constructed according to the filtration scheme is accepted.

---

<sup>1</sup> КПП ім. Ігоря Сікорського

<sup>2</sup> КПП ім. Ігоря Сікорського

Second- and third-order filters are compared. The high efficiency of the filter is shown. It is shown that by choosing a certain structure of a complementary third-order filter, it is possible to eliminate the steady-state component in the filter output signal.

## Вступ

Одна із головних проблем, які доводиться вирішувати у разі використання *GPS* – це компенсація впливу завад у сигналі *GPS*-приймача [1 - 4]. У значній мірі ця проблема вирішується за рахунок використання фільтра Калмана. Із метою спрощення навігаційної системи за останній час все більше використовуються більш прості алгоритмічні засоби, зокрема комплементарні фільтри. У якості другого чутливого елементу, як правило, приймають акселерометр. Як заваду акселерометра звичайно розглядають зміщення нуля акселерометра, яке за наявності інтегрування сигналу із акселерометра найбільше впливає на точність системи. Тому виникає проблема синтезу системи за наявності вже двох завад.

## Постановка задачі

Метою аналізу є вибір структури та параметрів комплементарного фільтра у складі *GPS*-приймача та акселерометра з метою зниження впливу короточасних значних завад у вихідному сигналі *GPS*-приймача на точність позиціонування рухомого об'єкта із урахуванням зміщення нуля акселерометра у складі комплементарного фільтра.

## Розв'язання задачі

Схема комплементарного фільтра у складі *GPS*-приймача та акселерометра наведена на рис. 1.

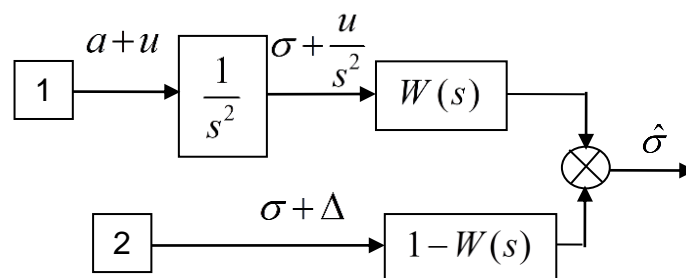


Рис. 1. Схема комплементарного фільтра

Тут 1 - акселерометр; 2 - *GPS*-приймач;  $\sigma$  - координата;  $a = \ddot{\sigma}$  - прискорення;  $\Delta$  - завада *GPS*-приймача;  $u$  - завада акселерометра;  $W(s)$  - передавальна функція.

## Системи та процеси керування

Під координатою  $\sigma$  будемо розуміти координату об'єкта вздовж однієї із осей географічної системи координат. Під прискоренням  $a$  будемо розуміти обчислену (за допомогою системи визначення орієнтації) проекцію прискорення руху об'єкта на цю вісь.

Розглянемо використання фільтра другого порядку. Прийmemo:

$$W(s) = \frac{s^2}{s^2 + r_1 s + r_2}; \quad 1 - W(s) = \frac{r_1 s + r_2}{s^2 + r_1 s + r_2}. \quad (1)$$

Схема комплементарного фільтра прийме вигляд

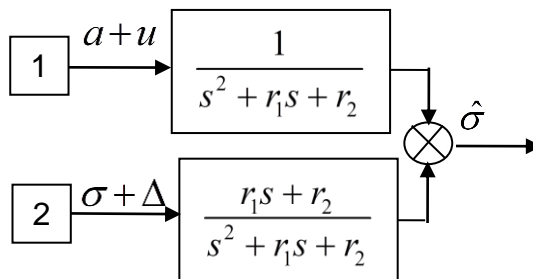


Рис. 2. Схема комплементарного фільтра

Прийmemo, що протягом короткого проміжку часу  $\tau$  (кількох секунд) має місце велика стала завада

$$\Delta(t, \tau) = \begin{cases} \Delta, & t \leq \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases} = \Delta - \Delta(t - \tau).$$

Похибка фільтра, що зображений на рис. 2, дорівнює

$$\delta = \frac{r_1 s + r_2}{s^2 + r_1 s + r_2} \Delta(t, \tau) + \frac{1}{s^2 + r_1 s + r_2} u. \quad (2)$$

Так як при  $\tau \rightarrow 0$

$$f(t, \tau) = f(t) - f(t - \tau) = \tau \frac{f(t) - f(t - \tau)}{\tau} \approx \tau \dot{f}(t) \quad (3)$$

запишемо  $\Delta(t, \tau) = \tau s \Delta$ . Тоді замість (2) можна аналізувати вирази

$$\delta = \frac{r_1 s^2 + r_2 s}{s^2 + r_1 s + r_2} \tau \Delta + \frac{1}{s^2 + r_1 s + r_2} u. \quad (4)$$

Із цього виразу отримаємо

$$\delta_{t=0} = r_1 \tau \Delta; \quad \delta_{t \rightarrow \infty} \rightarrow \frac{u}{r_2}. \quad (5)$$

Аналіз показав, що виразом  $\delta_{t=0} = r_1 \tau \Delta$  можна характеризувати максимальну похибку системи. Враховуючи це, напишемо коефіцієнт ефективності фільтра у вигляді

$$\eta = \frac{\Delta}{\delta_{t=0}} = \frac{1}{r_1 \tau} \quad (6)$$

Виконаємо аналіз виразу (4) щодо рекомендацій по вибору параметрів фільтру. Стосовно впливу зміщення нуля акселерометра  $u$  рекомендації достатньо очевидні: треба збільшувати коефіцієнти фільтру, так як вони знаходяться у знаменнику другої складової виразу (4).

Вплив же цих коефіцієнтів внаслідок наявності похибки  $\Delta$  (перша складова виразу (4)) більш складний, тому що вони знаходяться як в чисельнику, так і знаменнику першої складової виразу (4). Із виразу (5) випливає, що доцільним є зменшення коефіцієнту  $r_1$ , але при цьому зростає час перехідного процесу. Тому у разі вибору параметрів потрібен певний компроміс.

Прийmemo  $\tau = 1\text{с}$ ;  $\Delta = 50\text{м}$ ;  $u = 0,005\text{ м/с}^2$ ,  $r_1 = 0,07, \text{с}^{-1}$ ;  $r_2 = 0,005$ .  
Маємо  $\delta_{t=0} = r_1 \tau \Delta = 3,5\text{ м}$ ;  $\eta = 14,3$ .

Результати моделювання наведено рис. 3

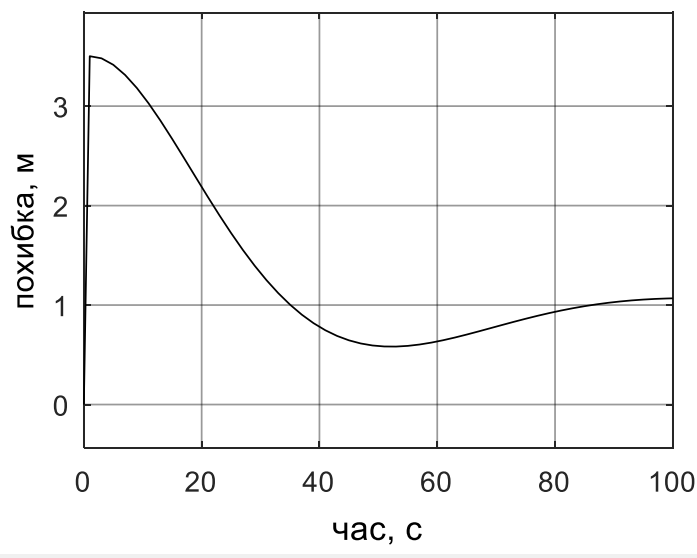


Рис. 3. Похибка фільтра другого порядку

Наведений результат підтверджу достатньо високу ефективність комплементарного фільтру.

У той же час має місце недолік у вигляді сталої складової в усталеній похибці. Для її усунення змінимо структуру фільтру і прийmemo такі передавальні функції

$$W(s) = \frac{s^3}{s^3 + k_1 s^2 + k_2 s + k_3}; \quad 1 - W(s) = \frac{k_1 s^2 + k_2 s + k_3}{s^3 + k_1 s^2 + k_2 s + k_3}. \quad (7)$$

Тоді замість (4) будемо мати

$$\delta = \frac{k_1 s^3 + k_2 s^2 + k_3 s}{s^3 + k_1 s^2 + k_2 s + k_3} \tau \Delta + \frac{s}{s^3 + k_1 s^2 + k_2 s + k_3} u. \quad (8)$$

Із цих виразів отримаємо

$$\delta_{t=0} = k_1 \tau \Delta; \quad \delta_{t \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (9)$$

Тобто, значення похибки у початковий момент часу не змінилося, але статичної похибки немає.

Будемо знаходити коефіцієнти поліному  $l_1 = s^3 + k_1 s^2 + k_2 s + k_3$  так, щоб на початку руху реакція комплементарного фільтр 3-го порядку була якомога близька до реакції комплементарного фільтр 2-го порядку. Для цього приймемо  $k_1 = r_1$ ;  $k_2 = r_2$ . Згідно методу Лобачевського-Греффе коефіцієнт  $k_3$  треба вибирати малим, тому приймемо  $k_3 = 1 \cdot 10^{-4}$ . Результати моделювання, які наведено на рис. 4, підтверджують аналітичні оцінки.

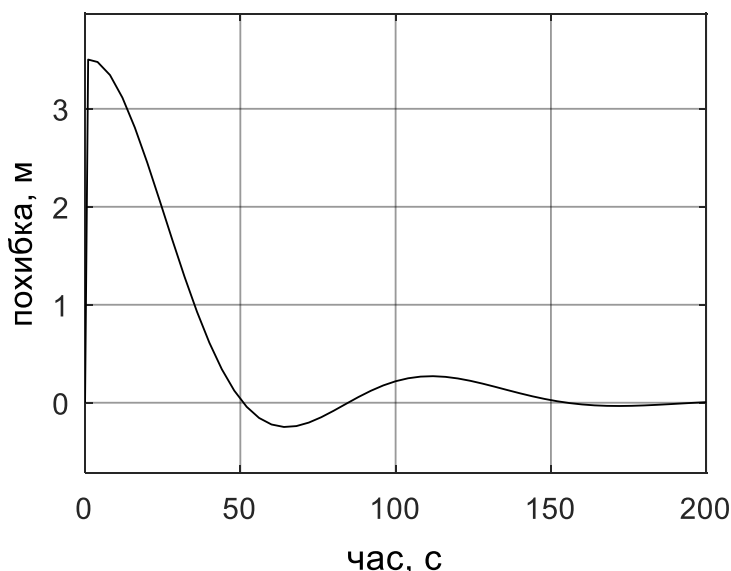


Рис. 4. Похибка фільтра третього порядку

Зображені на рис. 3 та рис. 4 криві отримано за точним моделюванням без використання спрощення (3), із використанням якого виконанні оцінки (5) та (9).

Результати моделювання із використанням цього припущення практично не відрізняються від наведених кривих. Відмінність (рис. 5) має місце лише протягом дії збурення, але ця відмінність настільки мала, що можна зробити висновок про доцільність використання у разі аналізу лише спрощених залежностей. На рис. 5 суцільна крива відповідає збуренню у вигляді прямокутного імпульсу, а штрихова – у вигляді сталого збурення (із подальшим використанням передавальних функцій (8)).

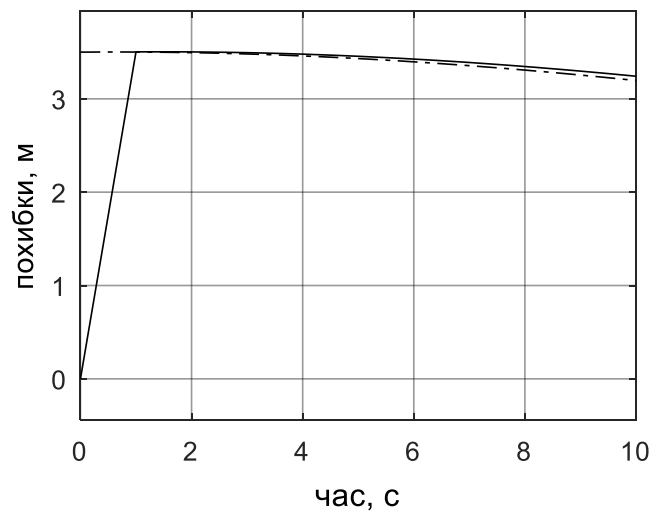


Рис. 5. Порівняння похибок

### Висновки

Комплементарний фільтр у складі *GPS*-приймача та акселерометра дозволяє значно зменшити вплив короточасних завад у вихідному сигналі *GPS*-приймача на точність системи позиціонування.

### Список використаної літератури

1. *Filiashkin M. K., Novik M.* Combined complementary filter for inertial navigation system. // М. К. Filiashkin, М. Novik / Electronics and Control Systems, № 1 (35), 2013 – р. 84–88.
2. *Mahmoud T., Trilaksono B. R.* Integrated INS/GPS Navigation System. // T. Mahmoud, B. R. Trilaksono / International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 10, Number 3, 2018. – р. 491-512.
3. *Рижков Л. М., Іванько Т. В.* Синтез комплементарного фільтра у складі *GPS*-приймача та акселерометра // Л. М. Рижков, Т. В. Іванько / Механіка гіроскопічних систем. 2020. Випуск 39, С. 24–30.
4. *Панов С. В.* Комплексование инерциальных датчиков со спутниковой радионавигационной системой на борту беспилотного летательного аппарата / С. В. Панов, Д. М. Карабаш, А. Т. Кизимов. – 2007.