

УДК 629.783

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771392020229068>Л. М. Рижков<sup>1</sup>, д.т.н., професор, Т. В. Іванько<sup>2</sup>, бакалавр

### СИНТЕЗ КОМПЛЕМЕНТАРНОГО ФІЛЬТРА У СКЛАДІ GPS-ПРИЙМАЧА ТА АКСЕЛЕРОМЕТРА

**En**

Complementary filters have become widely used to measure the angular position of moving objects in space due to their simplicity and high accuracy. If at first they were used mainly in navigation systems, now they are beginning to be widely used in navigation systems. In such complementary filters, the complementary filter most often includes a GPS receiver and an accelerometer. The problem of reducing the influence of high-frequency interference of the GPS receiver on the accuracy of the system is considered. Direct filtering of the output signal of the GPS receiver has a significant disadvantage, which is the delay of the filter of the measured signal. This is often the main obstacle of using filters. Complementary filters due to the combination of two meters make it possible to filter the signal without affecting the passage of the useful signal. This is the main advantage of complementary filters. It should also be noted that they are very simple to implement, which has led to the widespread use of complementary filters in systems for measuring the motion of objects. The paper proposes a second-order filter structure in which there is no integration of the accelerometer signal that significantly simplifies the implementation of the filter and eliminates the problem of the influence of the non-zero accelerometer signal. The presence of zero offset accelerometer and integration procedures is one of the main problems in solving navigation problems.

In the absence of an integrator, the question arises of taking into account the initial value of the output signal of the GPS receiver. This issue in the work is solved by the circuit method. In complementary filters built on the compensation scheme, this problem is solved quite simply. The article considers a simpler complementary filter, built on the filtration scheme. An algorithm for taking into account the initial conditions is proposed for such a filter structure. The influence of the structure of the transfer functions of the filter on the efficiency of its use is analyzed. It is shown that the complementary filter can significantly reduce the influence of high-frequency noise of the GPS receiver. The block diagram of the filter in the Matlab-Simulink environment and the simulation results that show the effectiveness of the

---

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського<sup>2</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

proposed complementary filter structure are presented.

Such systems can be used in small moving objects like UAVs, in robotics, in the educational process.

**Ru**

Рассматривается синтез комплементарного фильтра в составе *GPS*-приемника и акселерометра для решения навигационных задач. Предложена структура фильтра, в которой отсутствует интегрирование сигнала акселерометра, что существенно упрощает реализацию фильтра. Рассмотрен вопрос учета начального значения выходного сигнала *GPS*-приемника. Проанализировано влияние структуры передаточной функции фильтра на эффективность его применения. Приведены структурная схема фильтра в среде *Matlab-Simulink* и результаты моделирования, свидетельствующие об эффективности предложенной структуры комплементарного фильтра.

## Вступ

На даний час *GPS* широко використовуються у навігаційних системах [1-6]. Проблемою є їх використання, як і більшості чутливих елементів, у разі наявності великих завад. Використання фільтрації вихідного сигналу обмежено впливом фільтру на проходження основного сигналу. Одним з шляхів вирішення проблеми зменшення впливу завад є використання комплементарних фільтрів (КФ). В якості другого чутливого елемента, як правило, приймають акселерометр. Як заваду акселерометра звичайно розглядають зміщення нуля акселерометра, яке за наявності інтегрування сигналу з акселерометра найбільше впливає на точність системи.

## Постановка задачі

Метою дослідження є синтез КФ для *GPS*-приймача та акселерометра зі структурою передавальних функцій, яка виключає інтегрування завад акселерометра. А також аналіз впливу початкових значень вхідних величин і розробка структурної схеми їх компенсації.

## Синтез КФ на основі *GPS*-приймача і акселерометра

Розглянемо використання комплементарного фільтра на базі акселерометра та *GPS* для визначення переміщення об'єкта (рис. 1).

На рис.1 позначено: 1 – акселерометр; 2 – *GPS*;  $\ddot{x}$  – прискорення;  $x$  – переміщення;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – завади;  $W_1(s)$ ,  $W_2(s)$  – передавальні функції.

Щоб позбутися операції інтегрування вихідного сигналу акселерометра приймемо (1).

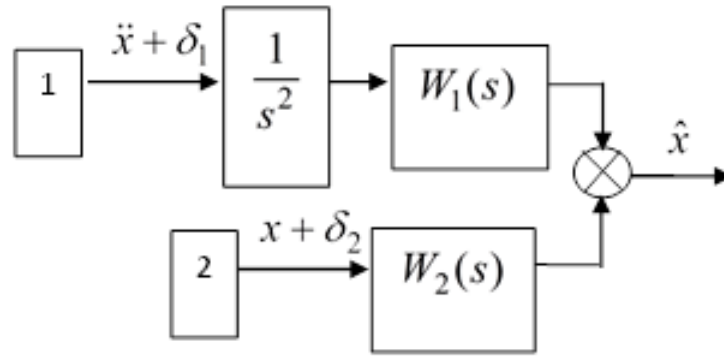


Рис. 1. Комплементарний фільтр

$$W_1(s) = \frac{s^2}{s^2 + s + 1}; W_2(s) = \frac{s + 1}{s^2 + s + 1}. \quad (1)$$

Схема набуває наступного вигляду (рис. 2).

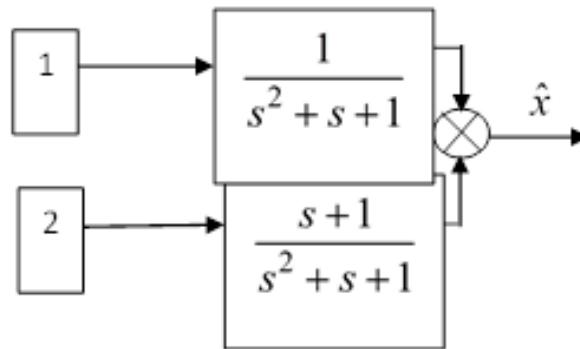


Рис. 2. Структурна схема із передавальними функціями фільтра

Звідси випливає вираз.

$$x_* = x + \frac{1}{s^2 + s + 1} \delta_1 + \frac{s + 1}{s^2 + s + 1} \delta_2. \quad (2)$$

Бачимо, що коригуючі ланки не впливають на залежність вихідного параметра від вимірюваної змінної. Суттєво, що немає операції інтегрування сталої складової завади акселерометра  $\delta_1$ . Має місце зменшення впливу високочастотних складових завад.

### Урахування початкових значень вхідних змінних

У теорії комплементарних фільтрів звичайно не враховується наявність початкових значень вхідних змінних, точніше, вони приймаються нульовими. Саме за такої умови ми маємо співвідношення  $x_* = x$  (без урахування завад). За наявності початкових значень буде мати місце похибка, аналогічна похибкам слідкуючих систем в перехідному процесі.

Розглянемо питання врахування початкових значень. За наявності інтеграторів це можна зробити введенням їх в інтеграторах (рис. 3)

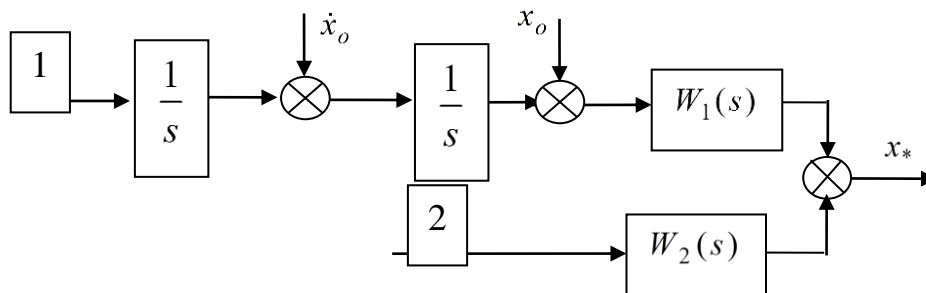


Рис. 3. Урахування початкових значень за наявності інтеграторів

Тоді вихідний сигнал можна виразити як рівність.

$$\begin{aligned}
 x_* &= \left(s^2 x + \delta_1\right) \frac{1}{s^2} W_1 + (x + \delta_2) W_2 + \dot{x}_0 \frac{1}{s} W_1 + x_0 W_1 = \\
 &= \left(s^2 x + \delta_1\right) \frac{1}{s^2} W_1 + (x + \delta_2) W_2 + \dot{x}_0 \frac{1}{s} (1 - W_2) + x_0 (1 - W_2) = \\
 &= \left(s^2 x + \delta_1\right) \frac{1}{s^2} W_1 + \left(x + \delta_2 - \dot{x}_0 \frac{1}{s} - x_0\right) W_2 + \dot{x}_0 \frac{1}{s} + x_0.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Виразу (3) відповідає схема компенсації (рис. 4).

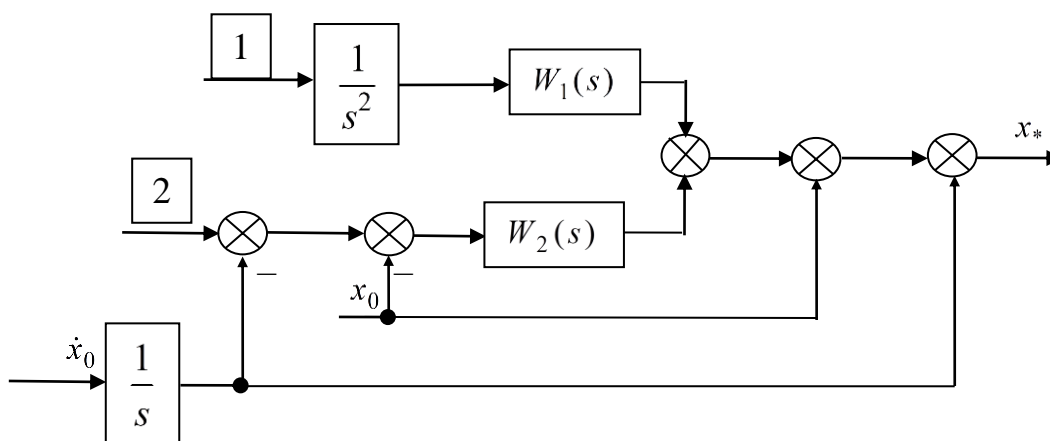


Рис. 4. Структурна схема КФ із урахуванням початкових значень

Тобто, можна використати схему без початкових значень, в якій додатково врахувати початкові значення. Суттєво, що у такій схемі інтегратори для врахування початкових значень не потрібні.

Для прийнятих передавальних функцій (3) похибка системи тільки від початкових значень дорівнює виразу (4).

$$\delta x = x_* - x = \frac{s^2}{s^2 + s + 1} \left( \frac{\dot{x}}{s} + x_0 \right). \quad (4)$$

Тобто, ця похибка прямує до нуля. Таким чином, щоб вихідна змінна була максимально наближеною до вхідної змінної за наявності її початкових значень, ці початкові значення треба врахувати додатково у відповідності до схеми, наведеної на рис. 4.

### Числове моделювання комплементарного фільтра

Розглянемо приклад:  $\ddot{x} = 1 \text{ м/с}^2$ ;  $x_0 = 100 \text{ м}$ ;  $t = 20 \text{ с}$ . Передавальні функції мають вигляд (1).

Схема моделювання в середовищі *Matlab-Simulink* наведена на рис.5. Гармонійний вхідний сигнал імітує заваду *GPS*.

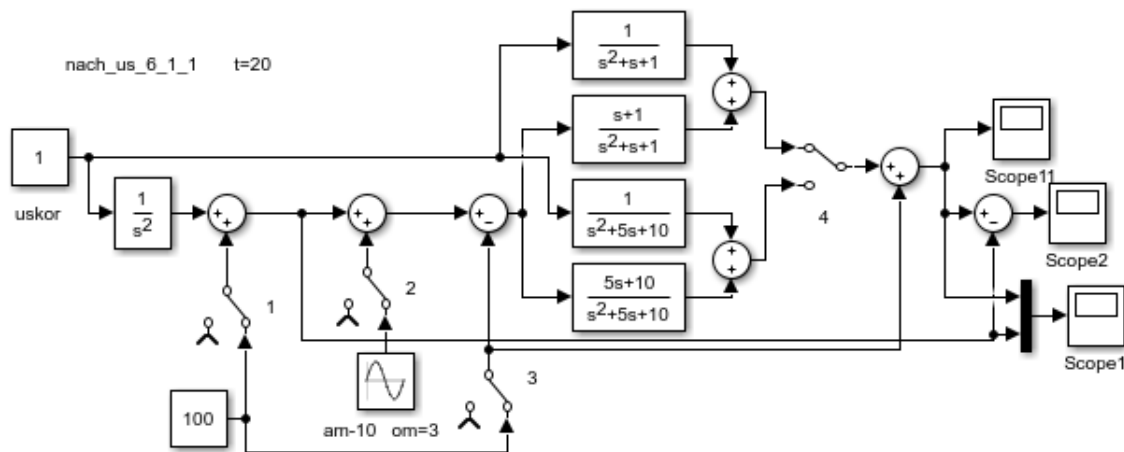


Рис. 5. Симуляція КФ із *GPS*-приймачем і акселерометром у *Simulink*

Для відключеної завади та відсутності компенсації впливу початкового значення вхідної змінної (ключ 3 на рис. 5 відключено) результати моделювання наведено на рис.6, де штрихова лінія відповідає переміщенню об'єкта, а суцільна – вихідному сигналу схеми.

Бачимо, що у перехідному процесі має місце похибка відпрацювання вхідного сигналу.

Якщо ключ 3 знаходиться в зображеному стані, що відповідає формулі (3), то суцільна крива співпадає з штриховою, тобто вихідний сигнал комплементарного фільтра постійно співпадає з сигналом *GPS*.

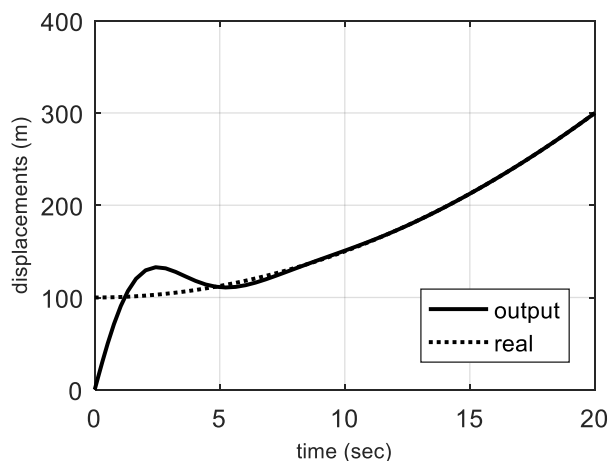


Рис. 6. Результат моделювання без урахування початкових значень

Зменшити зазначену похибку без даної схеми компенсації можна за рахунок збільшення частоти власних коливань коригуючих ланок та коефіцієнта демпфування, наприклад, якщо прийняти

$$W_1(s) = \frac{s^2}{s^2 + 5s + 5}; W_2(s) = \frac{5s + 5}{s^2 + 5s + 5}. \quad (5)$$

Результати моделювання наведено на рис. 7.

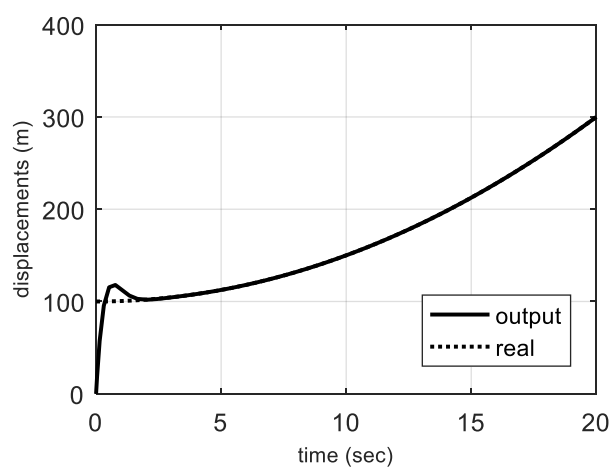


Рис. 7. Вихідний сигнал без схеми компенсації

Але при цьому зменшиться ефективність гасіння високочастотних коливань. Для перевірки цього підключимо заваду *GPS*.

На рис. 8, *а* показана похибка від завади *GPS*  $u = 10\sin 3t$ , м, якщо передавальна функція  $W_1(s)$  має вигляд (1). На рис. 8, *б* показана похибка від завади *GPS*, якщо передавальна функція  $W_1(s)$  має вигляд (5).

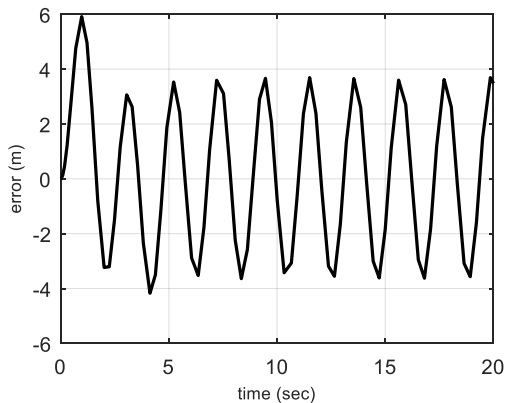


Рис. 8, а

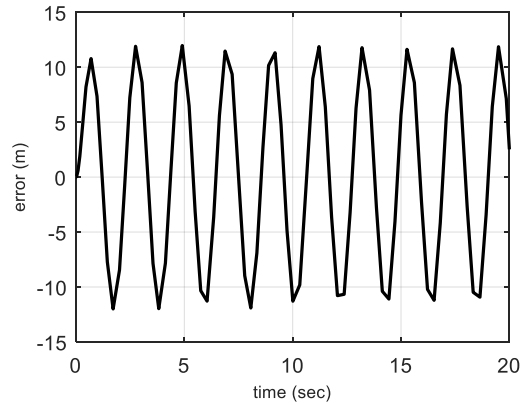


Рис. 8, б

Таким чином, доцільним є використання схеми, зображеної на рис. 4.

### Висновки

Використання комплементарного фільтра є ефективним засобом підвищення точності навігаційної системи на основі *GPS*. Для компенсації впливу ненульових поєднаних значень вхідних параметрів на точність функціонування схеми доцільним є запропонований шлях вирішення цієї задачі на основі введення початкових значень вхідних змінних.

### Список використаної літератури

1. *M. K. Filiashkin, M. Novik* (2013), “Combined complementary filter for inertial navigation system”, *Electronics and Control Systems*, №1(35), pp. 84-88.
2. *T. Mahmoud, B. R. Trilaksono* (2018), “Integrated INS/GPS Navigation System”, *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, Volume 10, Number 3, pp. 491-512.
3. *M. Euston, P. Coote, R. Mahony, J. Kim, T. Hamel* (2008), “A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, 22-26 Sept. 2008, pp. 340-345.
4. *R. Mahony, T. Hamel, and Jean-Michel Pflimlin* (2005), “Complementary filter design on the special orthogonal group  $SO(3)$ ,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, CDC05*, Seville, Spain, December 2005. Institute of Electrical and Electronic Engineers.
5. *Fakhri Alam, Zhou ZhaiHe, and Hu JiaJia* (2014), “A Comparative Analysis of Orientation Estimation Filters using MEMS based IMU,” *2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014)*, Dubai, UAE, March 21-22, 2014, pp. 86–91.

---

**Spysok vykorystanoi literatury**

1. *M. K. Filiashkin*, M. Novik (2013), “Combined complementary filter for inertial navigation system”, *Electronics and Control Systems*, №1(35), pp. 84-88.
2. *T. Mahmoud*, B. R. Trilaksono (2018), “Integrated INS/GPS Navigation System”, *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, Volume 10, Number 3, pp. 491-512.
3. *M. Euston*, P. Coote, R. Mahony, J. Kim, T. Hamel (2008), “A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, 22-26 Sept. 2008, pp. 340-345.
5. *R. Mahony*, T. Hamel, and Jean-Michel Pflimlin (2005), “Complementary filter design on the special orthogonal group  $SO(3)$ ,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, CDC05, Seville, Spain, December 2005. Institute of Electrical and Electronic Engineers.
6. *Fakhri Alam*, Zhou ZhaiHe, and Hu JiaJia (2014), “A Comparative Analysis of Orientation Estimation Filters using MEMS based IMU,” *2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET’2014)*, Dubai, UAE, March 21-22, 2014, pp. 86–91.