



ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ КАЛМАНІВСЬКОГО ФІЛЬТРУВАННЯ СИГНАЛУ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Плеснецов С. Ю.*

Доктор технічних наук, доцент

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>

e-mail: serhii.pliesnetsov@khpi.edu.ua

Плеснецов Ю. О.

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-4782-263X>

e-mail: yurii.pliesnetsov@khpi.edu.ua

Колесниченко А. О.

Аспірант

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0009-0008-2298-4094>

e-mail: artem.koliesnychenko@infiz.khpi.edu.ua

Мудровський В. Я.

Студент

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

61002, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0009-0003-3967-9647>

e-mail: vladyslav.mudrovskiy@cit.khpi.edu.ua

Анотація. У статті представлено розробку програмного засобу для виконання фільтрації пакету даних за алгоритмом Калмана в режимі реального часу або наближеному до нього. Проведено аналіз існуючих наукових досліджень, присвячених адаптації фільтра Калмана до різноманітних задач обробки сигналів в інформаційно-вимірjuвальній техніці. Наведено узагальнений теоретичний опис принципу дії фільтра Калмана, включаючи рівняння спостереження та системне рівняння, що описують зв'язок між спостережуваними даними та невідомою характеристикою, а також динаміку зміни стану процесу в часі. Деталізовано послідовність основних операцій фільтра Калмана для кожного вимірювання: визначення приросту, оновлення передбачення, перерахунок збіжності похибки та формування нового передбачення. Основну частину роботи присвячено розробці програмного засобу, що реалізує спрощену версію фільтра

Запропоноване посилання: Плеснецов, С. Ю., Плеснецов, Ю. О., Колесниченко, А. О., & Мудровський, В. Я. (2025). Програмний засіб для Калманівського фільтрування сигналу в режимі реального часу. *Методи та прилади контролю якості*, 1(54), 190-198. doi: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-190-198

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Калмана. Програмний засіб розроблено з використанням об'єктно-орієнтованої парадигми програмування на основі відокремлених класів. Графічний інтерфейс користувача створено за допомогою бібліотеки QT, що забезпечує зручне візуальне представлення даних та елементи керування. Описано структуру розроблених класів, включаючи генератор типових сигналів (синусоїдального, прямокутного, трикутного), генератор шуму із заданою амплітудою та безпосередньо клас фільтра Калмана. Представлено блок-схеми алгоритму виконання фільтрації та алгоритму пошуку середньої похибки передбачення для фільтра Калмана. Детально описано інтерфейс розробленого програмного засобу з поясненням функціональності кожного елемента керування (амплітуда та частота генератора, тип сигналу, об'єм буфера даних, параметри генератора шуму, керування примусовою генерацією, панелі виведення похибок та візуалізатор). Наведено приклади роботи програмного засобу при генеруванні та фільтрації сигналів різних типів.

Ключові слова: метрологія, вимірювання, розробка програмного забезпечення, фільтрування сигналу, фільтр Калмана, обробка даних.

Вступ

Фільтрація за Калманом (лінійно-квадратична оцінка) – це алгоритм, який використовує серію вимірювань, що спостерігаються протягом певного часу для отримання оцінок невідомих змінних, які мають тенденцію бути більш точними, ніж ті, що базуються на одному вимірюванні, шляхом оцінки спільного розподілу ймовірностей за змінними для кожного часового кроку. Фільтр побудовано як мінімізатор середньоквадратичної помилки, але існує також варіант фільтра, який пов'язує результати аналізу зі статистикою максимальної правдоподібності [1, 2].

Метою роботи є розробка програмного засобу для фільтрації пакету даних у режимі реального часу чи часу, наближеному до нього.

Теоретична характеристика фільтра Калмана

Фільтр Калмана застосовується до послідовної вибірки даних (наприклад, $Y_t, Y_{t-1}, \dots, Y_1$) [3]. Ці значення вважаються пов'язаними з певною невідомою характеристикою θ . Цей зв'язок описується так званим рівнянням спостереження:

$$Y_t = F_t \theta_t + v_t, \quad (1)$$

де F_t – відома кількісна характеристика, v_t – похибка.

Тоді θ_t можна представити як системне рівняння, яке показує зміну стану процесу у часі:

$$\theta_t = G_t \theta_{t-1} + w_t, \quad (2)$$

де G_t – відома кількісна характеристика, w_t – похибка системного рівняння.

Наявність системного рівняння робить фільтр Калмана фактично рекурсивним і таким, що включає наступну послідовність операцій для k -го вимірювання [4, 5]:

1) визначення приросту

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1};$$

2) оновлення передбачення для вимірювання

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-);$$

3) перерахунок збіжності похибки

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^-;$$

4) формулювання нового передбачення

$$\hat{x}_{k+1}^- = \theta_k \hat{x}_k;$$

$$P_{k+1}^- = \theta_k P_k \theta_k^T + w_k.$$

Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

Існує велика кількість робіт, спрямованих на адаптацію фільтра Калмана до застосування у обробці різних сигналів як у режимі реального часу, так і для статичних виборок даних.

Наприклад, у статті [6] автор «розширює проблему усунення шумів від сигналів із регулярними структурами, на які впливає шум, до сигналів з нерегулярними структурами шляхом застосування техніки графової обробки сигналів і ... стандартного фільтра Калмана». Автор пропонує «модифікований фільтр Калмана», який, порівняно зі стандартним, «працює краще в ситуаціях, коли є непевні спостереження та/або шум обробки, і показує найкращі результати». Автор проводить аналіз поведінки фільтра із різними моделями шумів, включаючи моделі шуму, відмінні від Гаусової.

Автори статті [7] пропонують застосування фільтру Калмана до задачі геолокації у роботі супутникових систем. У статті відмічається: «Було встановлено, що фільтр Калмана може з дуже високою точністю виявляти та ізолювати корисні сигнали на фоні шумів і перешкод». Автори відмічають, що при вирішенні таких завдань виникають проблеми, пов'язані зі стійкістю методу до вибору початкового стану фільтра і спотворенням частоти корисного сигналу через наявність ефекту Доплера. Автори також встановлюють зв'язок між коефіцієнтом подібності та рівнем шуму у сигналі, що досліджується.

Існують дослідження, спрямовані на поєднання фільтрації за Калманом із іншими методами обробки даних. Популярним варіантом є удосконалення процесу аналізу даних з використанням нечіткої логіки. Так, авторами статті [8] розглядається обробка зашумлених немодельованих сигналів – тобто, сигналів, для яких відсутня очікувана модель чи функція. «... у цій роботі розмірність фільтра Калмана залежить від складності оцінюваних сигналів, які апіорі невідомі. Це зазвичай вимагає процесу проб і помилок, що часто призводить до надмірно великого розміру фільтра, що ускладнює практичне застосування методу. Щоб подолати цю проблему, ... пропонується рішення ... шляхом включення нечіткої коваріаційної матриці помилок у стандартний лінійний алгоритм фільтра Калмана». Автори відмічають, що цей підхід підвищує якість фільтрування та результуючу швидкодію.

Автори роботи [9] виконали порівняльний аналіз для комплементарного та калманівського фільтрів і дійшли до висновку, що «комплементарний фільтр, як правило, створюватиме більш плавний сигнал із меншою кількістю коливань, тоді як фільтр Калмана забезпечуватиме більш точний і стабільний сигнал із меншою кількістю шумів і помилок» (рис. 1). Автори вважають, що вибір фільтра залежатиме від вимог до програми чи приладу.

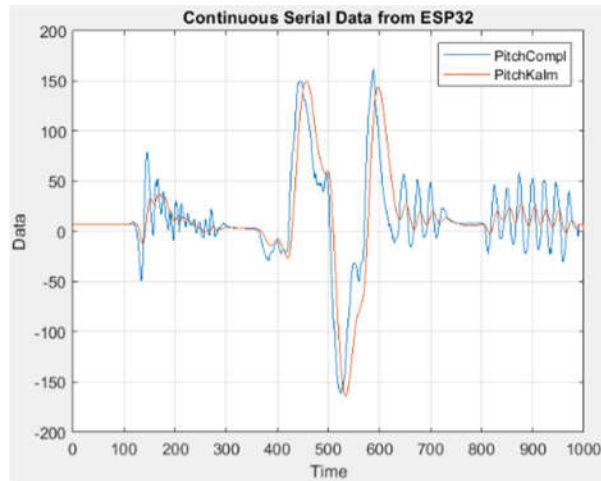


Рисунок 1 – Порівняння результатів виконання комплементарного та калманівського фільтра на датчику кута нахилу [9]

Особливо цікавою є робота [10], автори якої спрямовували зусилля на покращення поведінки фільтру Калмана при обробці сигналів з гіроскопів та акселерометрів. Автори досягли результатів «шляхом застосування фільтра Калмана для відтворення артефактів руху за допомогою акселерометра та гіроскопа для створення опорних сигналів і адаптивного налаштування параметрів фільтра Калмана», що також має відношення до вирішення істотної задачі автоматизованого калібрування, розглянутої авторами даної статті у попередній публікації [11].

Програмна реалізація фільтрування за Калманом

Реалізовано програмний засіб на базі спрощеної реалізації фільтра Калмана з урахуванням напрацювань [12].

Усі основні елементи програмного засобу реалізовано на основі системи відокремлених класів згідно елементів парадигми об'єктно-орієнтованого програмування у відповідності до схеми класів, що наведена на рис. 2.

Реалізацію графічного інтерфейсу коритувача виконано засобами бібліотеки QT [13] на основі ліцензії для відкритого програмного забезпечення. Вихідний код програмного засобу доступний на GitHub [14].

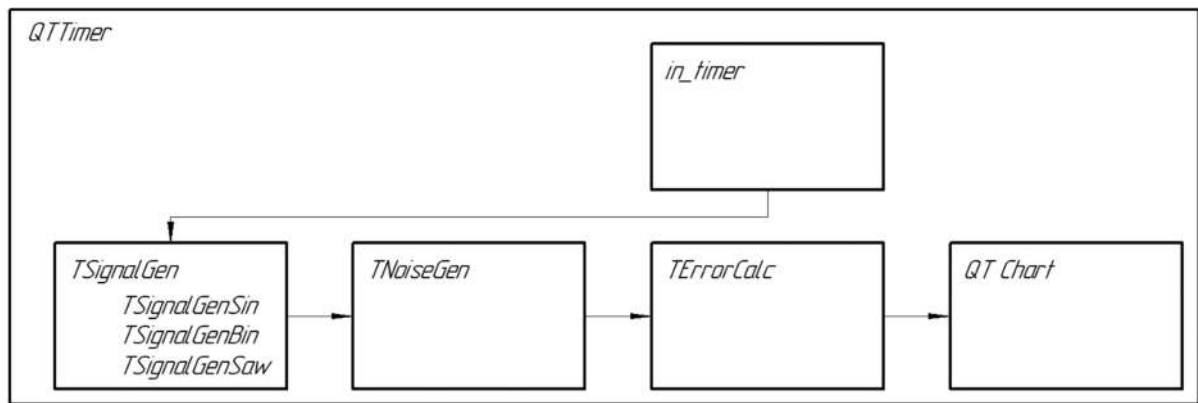


Рисунок 2 – Структура взаємодії класів при виконанні фільтрування

Відповідно до специфікації QT [15], програмний засіб на базі QT, та всі потоки мають оброблятися безпосередньо під контролем головного потоку.

Для візуалізації використано модуль QTCharts, який надає широкий інструментар побудови графічного представлення даних.

Структуру класів, що реалізовано у програмному засобі, наведено на рис. 2. Для первинної генерації сигналу розроблено програмний генератор типових сигналів TSignalGen, який на основі підкласів реалізує синусоїдальний, прямокутний та трикутний дискретні (цифрові) сигнали із заданими амплітудною та частотною величинами.

Отриманий сигнал «зашумлюється» з використанням класу TNoiseGen, який використовує стандартний генератор псевдовипадкових чисел, що постачається у складі STL, для додавання до сигналу складової шуму (завад) із заданою максимальною амплітудою.

Таким чином, ми зберігаємо інформацію про первинний інформаційний сигнал, і можемо надалі виконувати порівняння його з фільтрованим та нефільтрованим сигналом.

Спрощену послідовність операцій фільтрування наведено на блок-схемі (рис. 3).

Пошук усередненої похибки для використання у наборі даних фільтра виконується за алгоритмом, наведеним у блок-схемі (рис. 4).

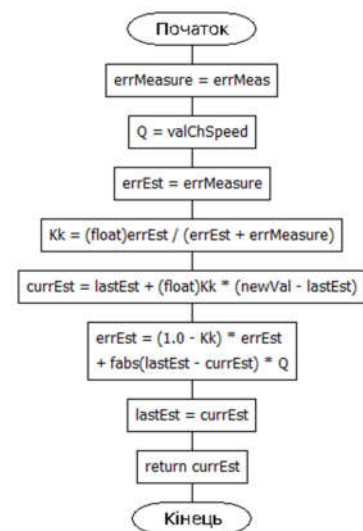


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму фільтрування за Калманом

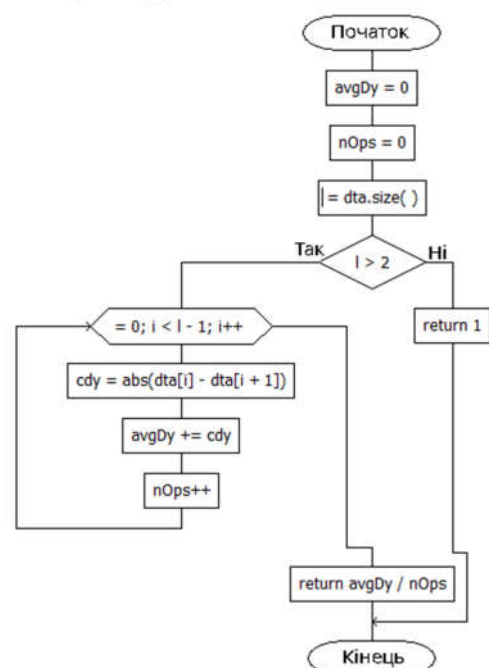


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритму пошуку середньої похибки передбачення для фільтра Калмана

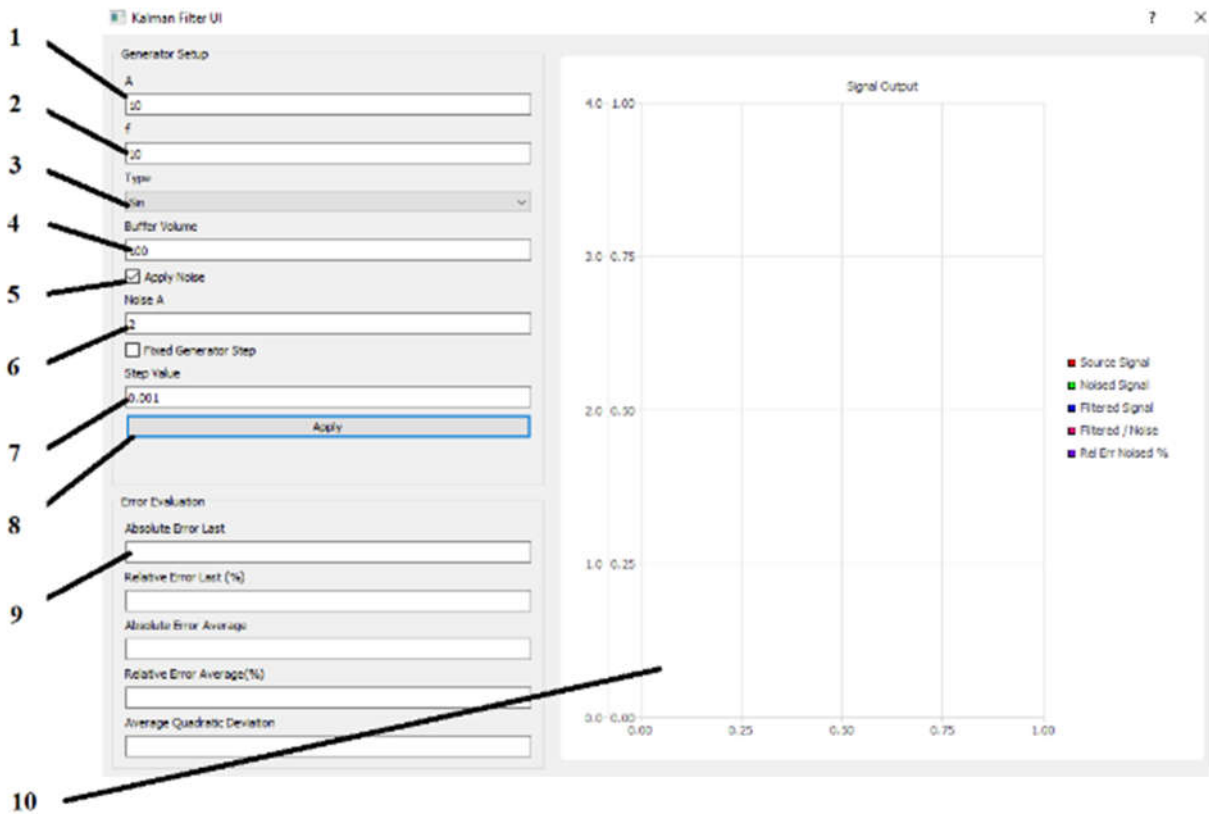


Рисунок 5 – Графічний інтерфейс розробленого програмного засобу

Розроблений програмний засіб має інтерфейс, наведений на рис. 5., де відмічені наступні елементи управління:

- 1 – амплітуда генератора;
- 2 – частота генератора;
- 3 – тип генератора (синусоїдальний, ступінчастий, трикутний сигнал);
- 4 – об'єм буферу даних;
- 5 – перемикач генератору шуму;
- 6 – амплітуда шуму;
- 7 – перемикач та крок примусової генерації з фіксованим кроком;
- 8 – пуск генератору;
- 9 – панель виведення поточних похибок;
- 10 – панель візуалізатора.

На рис. 6, 7 та 8 наведено відповідно програмний засіб у режимі виконання при генеруванні сигналів кожного з вищевказаних типів.

Якщо «розкрити» метод, що використовується у класі TKalmanFilter для безпосередньо виконання операції фільтрування у формат відокремленої функції, її вихідний код матиме такий вигляд:

```
double simpleKalman(double newVal,
double errMeas, double valChSpeed)
{
    double errMeasure = errMeas;
    double Q = valChSpeed;
    float Kk, currEst;
    static float errEst = errMeasure;
    static float lastEst;
    Kk = (float)errEst / (errEst +
errMeasure);
    currEst = lastEst + (float)Kk *
(newVal - lastEst);
    errEst = (1.0 - Kk) * errEst +
fabs(lastEst - currEst) * Q;
    lastEst = currEst;
    return currEst;
}
```

Фактично, розрахунок поточного значення фільтрованого сигналу набуває вигляду (фактично, за виразом (1)):

$$Y_{f_i} = Y_{f_{i-1}} + K_k (Y_i - Y_{f_{i-1}})$$

Оцінка похибки

$$w_i = (1 - K_k) \bar{w} + |Y_i - Y_{f_{i-1}}| \delta_i,$$

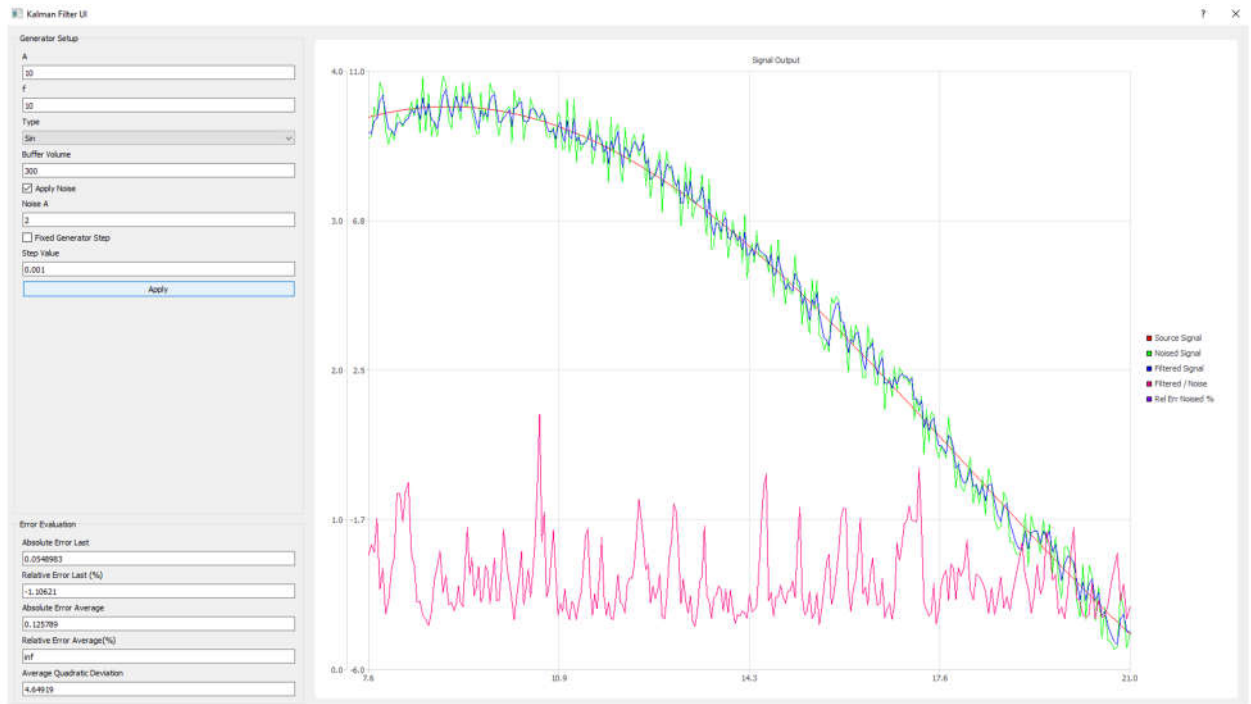


Рисунок 6 – Генерування та фільтрування синусоїдального сигналу

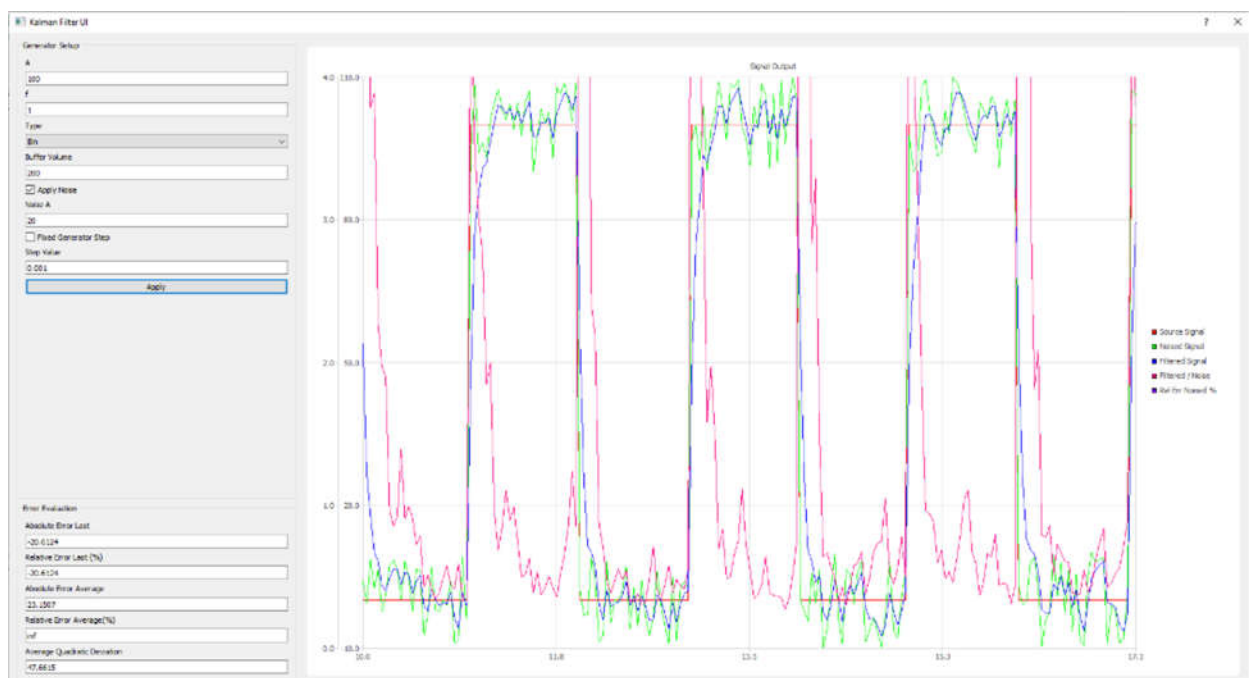


Рисунок 7 – Генерування та фільтрування прямокутного сигналу

де

$$K_k = \frac{w_{t-1}}{w_{t-1} + w_{t_m}} \cdot$$

Даний розрахунок виконується псевдорекурсивно (бо реальна рекурсія, за якої функція чи метод викликається зсередини самого себе, у даній реалізації не виникає) для усього набору вихідних даних, формуючи результуючі представ-

лення відфільтрованого сигналу, яке за об'ємом співпадає із нефільтрованим сигналом, і може бути легко співставлене як із ним, так і з (за наявності) істинним чи модельним сигналом для оцінки похибок чи відношення сигналу до завад.

Ефективність роботи фільтра оцінювалась за співвідношенням абсолютних похибок для зашумленого та фільтрованого сигналу:



Рисунок 8 – Генерування та фільтрування трикутного сигналу

$$\delta_f = Y_f - Y_s \quad (3)$$

$$\delta_n = Y_n - Y_s$$

$$\delta = \frac{\delta_f}{\delta_n}$$

де δ_f – абсолютна похибка фільтрованого сигналу; Y_f – поточне значення фільтрованого сигналу; Y_s – поточне значення номінального («істинного») сигналу; δ_n – абсолютна похибка зашумленого сигналу; Y_n – поточне значення зашумленого сигналу; δ – відношення похибки фільтрованого до похибки зашумленого сигналу.

Значення δ відображено на рис. 5 – 7 нижнім графіком. Як можна побачити, за виключенням окремих випадків, коли або шум, або безпосереднє значення сигналу відчуває різку зміну, фільтрований сигнал наближує значення до номінального до 50%, чим значно підвищує достовірність фільтрованого сигналу.

Висновки

1. Виконано аналіз існуючих досліджень, спрямованих на адаптацію фільтра Калмана до використання у сучасних задачах обробки даних у інформаційно-вимірjuвальній техніці та технологіях. Встановлено, що фільтрація за Калманом широко використовується і

активно поєднується з іншими методиками для підвищення ефективності.

2. Наведено узагальнений теоретичний опис функціонування фільтра Калмана. На основі даного опису наведено програмну реалізацію фільтра у спрощеній формі у вигляді відокремленого класу.

3. Розроблено програмний засіб для фільтрування потоку даних у режимі реального часу на основі взаємодії з програмним генератором сигналу на базі графічного інтерфейсу QT для візуалізації та організації вводу-виводу даних.

4. Оцінено роботу програмного засобу на основі порівняння похибок, отриманих для зашумленого та фільтрованого сигналу відносно модельного «істинного» сигналу. Отримано підвищення відповідності сигналу до еталонного, що досягає 50%.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Kalman, Rudolph Emil. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82. Series D. Pp. 35 – 45. doi: [10.1115/1.3662552](https://doi.org/10.1115/1.3662552)
2. Paul Zarchan; Howard Musoff Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Incorporated. 2000. 883 p. doi: [10.2514/4.102776](https://doi.org/10.2514/4.102776)
3. Richard J. Meinhold, Nozer D. Singpurwalla. Understanding the Kalman Filter. *The American Statistician*. 1983. Vol. 31. No. 2. Pp. 123 – 127. doi: [10.1080/00031305.1983.10482723](https://doi.org/10.1080/00031305.1983.10482723)
4. The Kalman Filter. URL: <https://kalmanfilter.org/cpp/index.html>
5. Robert Grover Brown, Patrick Y. C. Hwang. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering with Matlab Exercises, 4th Edition. Wiley. 2012. 400 p. ISBN: 978-0-470-60969-9.
6. Al-Attabi Ali, Al Ali. Spectral Graph Filtering for Noisy Signals Using the Kalman filter. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. 2023. 21. 249818. doi: [10.37936/ecti-eeec.2023212.249818](https://doi.org/10.37936/ecti-eeec.2023212.249818)
7. Medetov Bekbolat, Kulakayeva Aigul, Zhetpisbayeva Ainur, Albanbay Nurtay, Kabduali Tair. Identifying the regularities of the signal detection method using the Kalman filter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5. P. 26-34. doi: [10.15587/1729-4061.2023.289472](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289472)
8. Meda Campaña Jesus, Hernandez Juan, Velazquez Sanchez Rodolfo Daniel, Paramo Carranza Luis, Hernández-Cortés Tonatiuh, Tapia-Herrera Ricardo. Estimating Complex Signals With a Fuzzy-Enhanced Kalman Filter: A Note on “the Output Regulation and the Kalman Filter as the Signal Generator”. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 24041 – 24052. doi: [10.1109/access.2025.3537497](https://doi.org/10.1109/access.2025.3537497)
9. Bratić Sara, Prosenica Đorđe, Gajić Ljubomir, Terzić Stojan, Kasapović Sara, Urekar Marjan. Comparing Filter Efficiency: Complementary vs. Kalman Filters on Accelerometer and Gyroscope Signals. 2024. P. 111-116. doi: [10.69994/11Ic24019](https://doi.org/10.69994/11Ic24019)
10. Ao Weixian. Enhancing Kalman Filter Performance for PPG Signal Denoising: Adaptive Integration of Accelerometer and Gyroscope Data. *Applied and Computational Engineering*. 2025.133. Pp. 143-149. [10.54254/2755-2721/2025.20638](https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20638)
11. Koliesnychenko, A. O., Pliesnetsov, S. Yu., Pliesnetsov, Yu. O. Ohliad suchasnykh zasobiv ta system dlia avtomatychnoho kalibruvannia obladnannia (Overview of moder systems for automatic calibration of hardware). *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2024. 1(52). P. 15–25. doi: [10.31471/1993-9981-2024-1\(52\)-15-25](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-1(52)-15-25) [in Ukrainian]
12. Pliesnetsov S. Yu., Kolesnichenko A. O., Yashchenko K. A. Rozrobka prohramnoho zasobu dlia statystychnoho analizu syhnalu v rezhymy realnoho chasu (Software development for realtime signal analysis). *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Ser. : Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii : zb. nauk. pr.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. № 31 (1307). P. 67-71. URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/41205> [in Ukrainian]
13. Qt. URL: <https://www.qt.io/>
14. Git repository cppQTFilterApp. URL: <https://github.com/Rastrelly/cppQTFilterApp>
15. QT Documentation. URL: <https://doc.qt.io/>

SOFTWARE FOR REAL-TIME KALMAN SIGNAL FILTERING

Pliesnetsov S. Yu.

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, 2 Kyrpychova St., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>
e-mail: serhii.pliesnetsov@khpi.edu.ua

Pliesnetsov Yu. O.

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, 2 Kyrpychova St., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4782-263X>
e-mail: yurii.pliesnetsov@khpi.edu.ua

Kolesnichenko A. O.

Postgraduate Student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, 2 Kyrpychova St., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0008-2298-4094>
e-mail: artem.koliesnychenko@infiz.khpi.edu.ua

Mudrovsky V. Ya.

Student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
61002, Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-3967-9647>
e-mail: vladyslav.mudrovskiy@cit.khpi.edu.ua

Abstract The article presents the development of a software tool for filtering a data packet using the Kalman algorithm in real time or close to it. An analysis of existing scientific research devoted to adapting the Kalman filter to various signal processing tasks in information and measuring technology is conducted. A generalized theoretical description of the principle of operation of the Kalman filter is given, including the observation equation and the system equation that describe the relationship between the observed data and the unknown characteristic, as well as the dynamics of the process state change over time. The sequence of the main operations of the Kalman filter for each measurement is detailed: determining the increment, updating the prediction, recalculating the convergence of the error, and forming a new prediction. The main part of the work is devoted to the development of a software tool that implements a simplified version of the Kalman filter. The software tool is developed using an object-oriented programming paradigm based on separate classes. The graphical user interface is created using the QT library, which provides a convenient visual representation of data and control elements. The structure of the developed classes is described, including a generator of typical signals (sinusoidal, rectangular, triangular), a noise generator with a given amplitude and the Kalman filter class itself. The block diagrams of the filtering algorithm and the algorithm for finding the average prediction error for the Kalman filter are presented. The interface of the developed software is described in detail with an explanation of the functionality of each control element (amplitude and frequency of the generator, signal type, data buffer volume, noise generator parameters, forced generation control, error output panels and visualizer). Examples of the software operation when generating and filtering signals of various types are given.

Keywords: metrology, measurement, software development, signal filtering, Kalman filter, data processing.