

І. В. Зімчук, Т. М. Шапар, М. В. Ковба

АЛГОРИТМ ФІЛЬТРАЦІЇ ВИМІРЮВАНЬ АКСЕЛЕРОМЕТРИЧНИХ ДАТЧИКІВ У БЕЗПЛАТФОРМЕНИХ ІНЕРЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У безпілотних літальних апаратах малої маси набули широкого застосування безплатформені інерціальні системи навігації, які реалізуються на базі акселерометрів та гіроскопів, виготовлених за технологією мікроелектромеханічних систем. Низька точність мікроелектромеханічних систем обумовлює застосування в системах навігації додаткових етапів оброблення навігаційних вимірювань. Для підвищення точності навігаційних визначень застосовують алгоритми стохастичної фільтрації, зокрема фільтр Калмана та різні його модифікації. Сучасні алгоритми фільтрації характеризуються високою обчислювальною складністю, а інженери стикаються з проблемою їх практичної реалізації через абстрактну форму подання, яка не відображає усіх деталей. Саме тому актуальним є завдання синтезу алгоритмів фільтрації, які будуть відповідати вимогам гарантованої збіжності процесу фільтрації та мінімальної обчислювальної складності щодо своєї реалізації. Остання вимога є надзвичайно важливою для навігаційних систем малих безпілотних літальних апаратів, оскільки їх бортове обладнання має бути дешевим та малоенергоємним. У зв'язку із цим статтю присвячено синтезу та дослідженню алгоритму поліноміальної фільтрації вимірювань акселерометричних датчиків у безплатформених інерціальних системах навігації безпілотних літальних апаратів. Синтез алгоритму виконано за методикою, що ґрунтується на поданні згладжувальних фільтрів як динамічних систем, що описуються дискретними передавальними функціями, які визначаються застосуванням третьої форми умов інваріантності. Відмінною рисою синтезованого алгоритму є урахування в процесі фільтрації не лише поточних, а й попередніх результатів вимірювань, які зважуються власними коефіцієнтами згладжування. Для розробленого алгоритму визначено умови збіжності процесу фільтрації. Завдяки скалярній формі реалізації йому притаманна низька обчислювальна складність. Ефективність алгоритму підтверджено результатами комп'ютерного моделювання за результатами реальних вимірів акселерометра ADXL345, що входить до складу Arduino UNO R3.

Ключові слова: згладжувальний фільтр; оцінка; вимірювання; безпілотний літальний апарат; акселерометр; система навігації; алгоритм фільтрації.

Постановка проблеми в загальному вигляді. В останні роки сфера застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) значно розширилася, відкриваючи нові можливості для різних галузей [1]. Досвід практичного застосування БПЛА в різних країнах свідчить, що військові завдання, які вирішуються з їх застосуванням, порівняно із цивільними, є більш складними та важливими. Саме тому основні тенденції їх сучасного

та перспективного розвитку пов'язують передусім із військовим призначенням [2, 3].

Виконання поставлених перед БпЛА завдань як в автоматичному, так і в напівавтоматичному режимах польоту потребує наявності інформації про кутову орієнтацію та координати його місцеперебування. Ця задача розв'язується пілотажно-навігаційним комплексом, основу якого складають інерціальна та супутникова навігаційні системи (ІНС та СНС), які, як правило, працюють одночасно та доповнюють одна одну [4].

Висока точність навігаційних вимірювань обумовлює застосування СНС як основної, проте недостатня відповідність вимогам завадозахищеності та надійності певною мірою ускладнює це. ІНС є менш точною, однак більш досконалою щодо автономності й надійності навігаційних визначень. Висока інформативність ІНС висуває її в клас універсальних систем із визначення як траєкторних рухів БпЛА (координат та швидкості польоту), так і кутових координат (кутів крену, тангажа й курсу) та інших параметрів, наприклад, прискорень, кутових швидкостей тощо [5]. Точність вимірювання цих параметрів визначає величину відхилення БпЛА від заданого маршруту та якість виконання поставленого польотного завдання [5].

У БпЛА малої маси широкого застосування набули безплатформені ІНС (БІНС), які реалізовані на базі акселерометрів і гіроскопів, виконаних за технологією мікроелектромеханічних систем (МЕМС), основними перевагами яких є малі габарити й вага, висока завадозахищеність, надійність та автономність. Жоден із вказаних датчиків не вимірює кутового положення БпЛА безпосередньо, проте виміри цих сенсорів використовуються для його розрахунку. Однак, унаслідок дрейфу нуля, у кожного гіроскопа є постійна похибка вимірювань, інтегрування якої спричиняє похибку розрахунків. Крім того, через конструктивні особливості в сигналі цифрового гіроскопа наявний шум, інтегрування якого спричиняє зашумленість результатів розрахунків. Отже, гіроскоп дозволяє розраховувати лише відносне значення кута, яке потребує корекції дрейфу та фільтрації.

Функціонування акселерометра ґрунтується на інших фізичних принципах. Він вимірює проєкції прискорення об'єкта за трьома координатами. Це дає можливість визначати абсолютні значення кутів орієнтації в будь-який момент часу шляхом розрахунку арктангенса для пар проєкцій [6]. Однак у складі вимірів акселерометра наявний адитивний шум, спричинений особливостями конструкції та умовами функціонування, яким властиві стохастичні чинники, пов'язані із середовищем експлуатації: небажані механічні вібрації, електромагнітні перешкоди від інших електромеханічних або механічних елементів тощо. При цьому показник шуму може досягати 0,08 g, що суттєво погіршує якість вимірювань і, як наслідок, не дає можливості використати отримані дані для управління БпЛА. Під час використання акселерометрів одним з основних є питання результативності, репрезентативності та надійності виміряних величин. Тому для зменшення рівня перешкод, які приховують релевантну інформацію, використовують додаткові етапи перетворення та оброблення сигналу, який отримується [7–9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичним способом боротьби з похибками, завадами та помилками в засобах вимірювання й системах автоматизації

є використання різних алгоритмів фільтрації, які враховують відомі властивості сигналів і завад [9]. Досить часто для усунення шуму та похибок акселерометричних датчиків застосовують фільтр Калмана [9], який дозволяє отримати оптимальну в середньоквадратичному сенсі оцінку вектора стану для опису динамічних систем лінійними диференціальними або різницевиими рівняннями за лінійними вимірами за умови гаусівського характеру формуючих та вимірювальних шумів [10]. Фільтр Калмана є зручною рекурентною процедурою, що забезпечує отримання не лише самої оцінки, а й відповідної поточної характеристики точності у вигляді розрахункової матриці коваріацій помилок оцінювання. Однак такий алгоритм фільтрації вимагає значних обчислювальних потужностей для своєї реалізації. Крім того, якість роботи фільтра залежить від точності математичної моделі динамічної системи, ускладнення якої передбачає врахування нелінійних елементів, що, у свою чергу, може значно збільшити розрахункову складність.

Традиційний підхід до побудови алгоритмів калманівського типу, які враховують нелінійності, ґрунтується на лінеаризації рівнянь динаміки та вимірюваннях у визначеній точці шляхом розрахунку похідних від відповідних нелінійних функцій. Одним із таких рішень є розширений фільтр Калмана (Extended Kalman Filter – EKF) з різною кількістю змінних стану [11, 12]. Синтез таких алгоритмів фільтрації ґрунтується на лінеаризації нелінійних моделей стану шляхом розкладання їх у ряд Тейлора.

Наступна група алгоритмів калманівського типу – так звані ансцентні (unscented), або сигма-точкові фільтри Калмана (Unscented Kalman Filter – UKF) [13, 14]. У них лінеаризація нелінійних функцій відбувається без розрахунку похідних застосуванням процедури, близької за своїм змістом, до стохастичної лінеаризації. Від розширеного фільтра Калмана такий підхід відрізняється лише способом лінеаризації моделей стану та спостереження.

Розглянуті алгоритми фільтрації належать до алгоритмів калманівського типу і є досить універсальними щодо їх практичного застосування, однак характеризуються високою складністю, бо інженери часто стикаються з проблемою їх практичної реалізації через абстрактну форму опису, яка не відображає усіх деталей.

Альтернативним підходом до розв'язання задачі фільтрації параметрів орієнтації в ІНС є фільтр Маджвіка [15, 16], який обчислює єдину оцінку орієнтації на основі вимірювань акселерометра та гіроскопа. На відміну від алгоритмів калманівського типу задача мінімізації помилок оцінювання вирішується завдяки алгоритму градієнтного спуску, при цьому пошук мінімуму реалізується лише в одну його ітерацію. Для опису орієнтації об'єкта в просторі фільтр використовує кватерніони, що передбачає застосування одного надлишкового параметра і не є наочним для прямого розуміння користувачем. Крім того, алгоритм не є універсальним і був спроектований під умови конкретної задачі.

Найпростішим варіантом фільтра, здатним розв'язувати задачу фільтрації вимірювань в ІНС, є комплементарний фільтр [16]. Його робота ґрунтується на змішуванні вимірювань акселерометра та гіроскопа у визначеній пропорції для отримання необхідного результату. Інтегрування сигналу гіроскопа робить його менш схильним до шуму, а змішування із сигналом акселерометра дозволяє уникнути дрейфу. Незважаючи

на простоту реалізації алгоритму, точність вихідних значень фільтра нижча, ніж у розглянутих алгоритмів. Крім того, налаштування коефіцієнта згладжування комплементарного фільтра передбачено лише експериментальним шляхом.

Досить часто завдання оцінювання спрощують шляхом обмеження класу алгоритмів, у межах якого здійснюється їх вибір, наприклад, у класі лінійних алгоритмів [14]. Незважаючи на те, що на теперішній час запропоновано досить велику кількість різноманітних алгоритмів фільтрації, завдання їх розроблення залишається актуальним.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є синтез рекурентного алгоритму поліноміальної фільтрації результатів вимірювань акселерометричних датчиків орієнтації в БНС БпЛА. Він повинен задовольняти вимоги гарантованої збіжності процесу фільтрації та мінімальної обчислювальної складності щодо своєї реалізації. Остання вимога є надзвичайно актуальною в навігаційних системах малих БпЛА, оскільки їх бортове обладнання має бути дешевим, малоенергоємним та з мінімальними масою й об'ємом [4].

Виклад основного матеріалу

Математична постановка задачі. Оскільки обробка навігаційних вимірювань здійснюється цифровими пристроями, у ході розв'язання задачі розглядаються математичні моделі процесів у дискретній формі. Припустимо, що вимірювання акселерометричного датчика описуються рівнянням

$$g(n) = x(n) + f(n), \quad (1)$$

де $x(n)$ – істинне значення інформаційного параметра, подане лінійною моделлю такого виду:

$$x(n) = x(n-1) + \sum_{m=1}^N \frac{T^m}{m!} \Delta^m x(n-1), \quad (2)$$

тут $\Delta^m x(n-1)$ – кінцева різниця m -го порядку;

N – порядок моделі;

T – темп обробки інформації;

$n = 0, 1, 2, \dots$ – нормований відносно інтервалу дискретизації дискретний час;

$f(n)$ – адитивний білий шум із нульовим середнім та дисперсією $R(n) = M[f^2(n)]$,

причому

$$M[x(n)f(n)] = 0, \quad M[f(n)f(n-1)] = 0, \quad i > 0, \quad (3)$$

де M – символ математичного сподівання.

Для дискретного процесу (1) з урахуванням умов (2) та (3) необхідно синтезувати алгоритм фільтрації, який формує оцінку $\hat{x}(n)$, оптимальну за критерієм мінімум дисперсії помилок оцінювання:

$$P(n) = M[\varepsilon^2(n)] \rightarrow \min, \quad (4)$$

де $\varepsilon(n) = x(n) - \hat{x}(n)$ – помилка оцінювання.

Синтез алгоритму фільтрації. У разі розроблення ефективних алгоритмів для розв’язання прикладних задач фільтрації необхідно брати до уваги їх особливості. Зокрема, активно розвиваються методи поліноміальної фільтрації, у яких враховується той факт, що вимірювання навігаційних параметрів є одновимірним потоком даних [10]. Для таких умов у [17] викладено метод, який дозволяє синтезувати рекурентні згладжувальні фільтри для скалярних моделей вхідних дій і дає можливість формувати структуру алгоритмів фільтрації залежно від забезпечення необхідної якості фільтрації в сталому режимі (рис. 1).

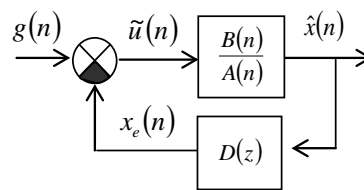


Рис. 1. Структурна схема рекурентного фільтра

На рис. 1 позначено:

$x(n)$ – екстрапольоване значення інформаційного параметра;

$\tilde{u}(n)$ – нев’язка;

$A(z)$ – поліном знаменника передавальної функції алгоритму оцінювання, загальний вигляд якого визначається виразом

$$A(z) = (1 - z^{-1})^v \left[1 + \sum_{i=1}^k a_i z^{-i} \right], \quad (5)$$

де $v = N + 1$ – порядок астатизму фільтра;

a_i – коефіцієнти полінома, фізичний зміст яких полягає в підвищенні порядку астатизму фільтра до такого значення γ , що $v \leq \gamma \leq v + 1$;

$B(z)$ – поліном чисельника передавальної функції алгоритму оцінювання, загальний вигляд якого визначається за таким виразом:

$$B(z) = \sum_{j=0}^l b_j z^{-j}, \quad (6)$$

тут b_j – коефіцієнти згладжування, оптимальні значення яких можуть розраховуватися з виразу

$$\frac{\partial P}{\partial b_j} = 0, \quad (7)$$

де $D(z)$ – екстраполуючий поліном, який розраховується в такий спосіб:

$$D(z) = 1 - A(z). \quad (8)$$

Згідно з методом [17] алгоритм фільтрації синтезується за виразами:

$$\begin{aligned} x_e(n) &= D(z)\hat{x}(n), \\ \tilde{u}(n) &= g(n) - x_e(n), \\ \hat{x}(n) &= \frac{B(z)}{A(z)}\tilde{u}(n). \end{aligned} \quad (9)$$

Для розв'язання поставленої задачі з метою усунення динамічної помилки за $N = 1$ згладжувальний фільтр синтезується другого порядку астатизму, тому поліном $A(z)$ достатньо визначити [17] як

$$A(z) = (1 - z^{-1})^2.$$

Тоді згідно з (8) екстраполуючий поліном матиме такий вигляд:

$$D(z) = 2z^{-1} - z^{-2}.$$

Відповідно до (6) для забезпечення якісної фільтрації збурень поліном $B(z)$ визначається в такий спосіб:

$$B(z) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}.$$

Для визначених поліномів $A(z)$, $B(z)$ та $D(z)$ за виразами (9) синтезується алгоритм фільтрації:

$$\begin{aligned} x_e(n) &= 2\hat{x}(n-1) - \hat{x}(n-2), \\ \tilde{u}(n) &= g(n) - x_e(n), \\ \hat{x}(n) &= b_0\tilde{u}(n) + b_1\tilde{u}(n-1) + b_2\tilde{u}(n-2) + x_e(n). \end{aligned} \quad (10)$$

Для визначення умов збіжності процесу фільтрації [17] з виразу

$$C(z) = A(z) + B(z)D(z)$$

розраховується характеристичний поліном

$$C(z) = 1 - 2(1 - b_0)z^{-1} + (1 - b_0 + 2b_1)z^{-2} - (b_1 - 2b_2)z^{-3} - b_2z^{-4},$$

а за алгебричним критерієм стійкості визначаються умови стійкості фільтра:

$$0 < b_0 \leq 1, b_1 < 0, b_2 < 0, |b_2| < |b_1| < |b_0|.$$

Результати моделювання. Ефективність синтезованого алгоритму оцінювали з використанням комп'ютерного моделювання. Розроблено імітаційну модель, яка дозволяє шляхом виконання послідовності обчислень із подальшим графічним відображенням результатів імітувати процес фільтрації вхідних сигналів у реальному часі. Досліджували також процес фільтрації кута крену БпЛА (рис. 2), який визначали за результатами вимірювань триосового акселерометра ADXL345, що входить до складу Arduino UNO R3. У сталому режимі вихідним значенням кута властива дисперсія $D_g = 0,96$ кв. град.

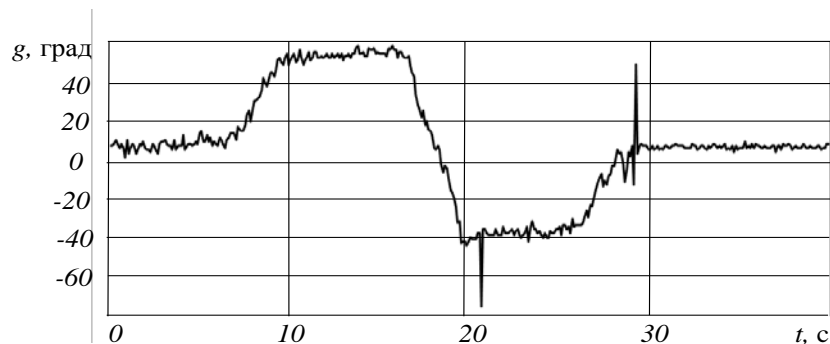


Рис. 2. Зміна кута крену БпЛА, який визначено за результатами вимірювань акселерометра

Вимірювання оброблялися з періодом $T = 0,1$ с. Значення коефіцієнтів згладжування обирали з нижньої межі області стійкості: $b_0 = 0,15$; $b_1 = -0,07$; $b_2 = -0,05$. На рис. 3 показано результат фільтрації вимірювань із застосуванням синтезованого алгоритму.

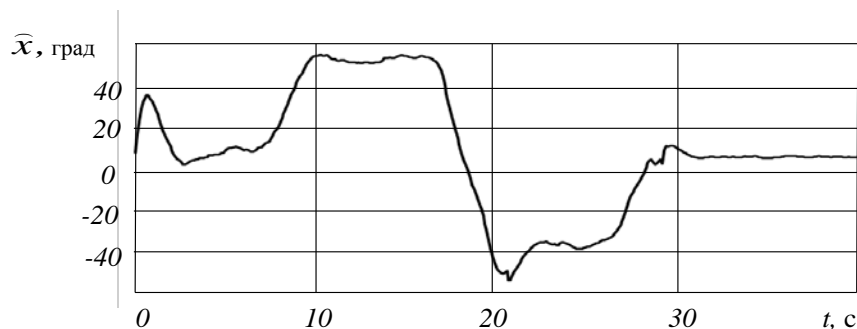


Рис. 3. Результат фільтрації кута крену БпЛА в разі застосування синтезованого алгоритму

Ефективність алгоритму оцінювали за дисперсією D_x оцінки кута крену. Для обраних умов моделювання синтезований алгоритм забезпечив значення дисперсії $D_x = 0,12$ кв. град. У процесі моделювання також визначено, що для $b_2 = 0$ дисперсія оцінки набуває значення $D_x = 0,41$ кв. град., що свідчить про вплив коефіцієнтів полінома $B(z)$ на якість фільтрації.

Отримані результати порівнювали з результатами роботи фільтра Калмана (рис. 3), налаштованого на модель для $N = 1$ [18].

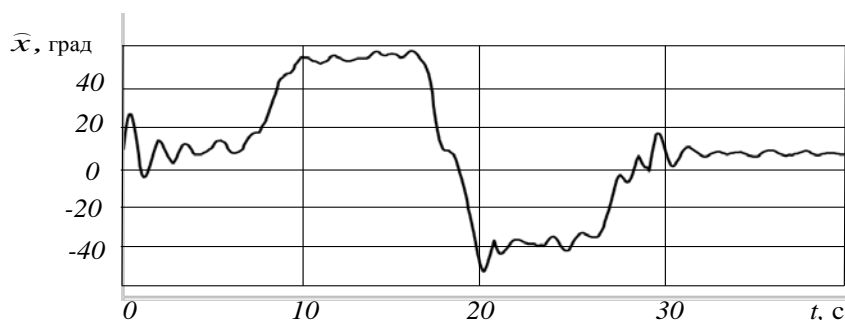


Рис. 4. Результат фільтрації кута крену БпЛА в разі застосування фільтра Калмана

Для фільтра Калмана показник ефективності набув значення $D_x = 0,59$ кВ. град. Отже, порівняно з ним у синтезованому алгоритмі з коефіцієнтами згладжування b_0 , b_1 та b_2 дисперсія оцінки в 4,9 рази менше.

Слід зазначити, що коефіцієнти згладжування синтезованого фільтра обиралися виключно з нижньої межі умов стійкості. Розрахунок оптимальних значень коефіцієнтів у роботі не розглядався.

Висновки. Застосування алгоритмів фільтрації вимірювань у системах навігації БпЛА є невід’ємним етапом процесу визначення параметрів руху. Саме тому для підвищення точності визначення кутового положення БпЛА у статті синтезовано та досліджено алгоритм фільтрації результатів вимірювань акселерометричних датчиків, які входять до складу БНС. Синтез алгоритму виконано за методикою, яка ґрунтується на поданні згладжувальних фільтрів як динамічних систем, описаних дискретними передавальними функціями, які визначають за третьою формою умов інваріантності. Відмінною рисою синтезованого алгоритму є застосування для оцінювання як поточних, так і попередніх значень нев’язок, кожна з яких зважується власним коефіцієнтом згладжування. Як показали результати комп’ютерного моделювання, такий підхід дозволив значно покращити якість фільтрації випадкового шуму, який наявний у вимірах акселерометричних датчиків орієнтації.

За напрямком подальших досліджень слід вважати удосконалення синтезованого алгоритму шляхом оптимізації перехідного процесу та розрахунку оптимальних значень коефіцієнтів згладжування.

СПИСОК БІБЛОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Апаратно-програмне забезпечення та застосування безпілотних літальних апаратів / Я. Савченко, С. Ягодзінський, Л. Литвиненко, О. Сушинський // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. 2024. № 3, Т. 2. С. 273–277. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-41>
2. Розвиток безпіотної авіації у світі та Україні: аналіз особливостей та технічних характеристик / Ю. О. Бабій, В. В. Поліщук, М. О. Мацишин та ін. // Зб. наук. праць Військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. 2022. № 75. С. 5–14. <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2022/75-01>

3. Серватюк В., Лисий М., Мостовий А. Аналіз наукових підходів щодо розвитку і застосування безпілотних літальних апаратів у сучасних воєнних конфліктах // Зб. наук. праць Нац. академії Держ. прикордонної служби України. Серія: Військові та технічні науки. 2024. № 1 (94). С. 97–105.
4. Авіоніка безпілотних літальних апаратів / В. П. Харченко, В. І. Чепіженко, А. А. Тунік, С. В. Павлова. Київ : ТОВ «Абрис-принт», 2012. 464 с. ISBN: 978-966-1653-05-3
5. Захарін Ф. М., Синеглазов В. М., Філяшкін М. К. Алгоритмічне забезпечення інерціально-супутникових систем навігації : монографія. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2011. 320 с. ISBN 978-966-598-675-1
6. Удосконалення навігаційної системи пристрою дефектоскопії підземних труб / М. Мельник, Р. Винарович, Ю. Гасюк, М. Шварц // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2024. Вип. 6, № 1. С. 117–126. <https://doi.org/10.23939/cds2024.01.117>
7. Рудик А. В. Акселерометричні інерціальні мікросистеми орієнтації // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : Матеріали XVII Міжнар. наук.-техн. конф. (8–13 червня 2017 р., м. Одеса). Одеса : Одес. нац. акад. зв'язку ім. О. С. Попова; Хмельницький : ХНУ, 2017. С. 103–105.
8. Шуляк М. Л. Аналіз існуючих систем фільтрації даних при експериментальному дослідженні транспортного засобу // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2020. № 21. С. 175–184. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.175-184>
9. Розроблення та дослідження сучасних систем електроенергетики та автоматизації : Монографія / В. В. Древецький, С. В. Василець, А. В. Рудик та ін. Рівне : Овід, 2020. 380 с.
10. Stepanov O. A. Optimal and Sub-Optimal Filtering in Integrated Navigation Systems // Aerospace Navigation Systems. Chichester, UK : John Wiley & Sons Ltd, 2016. P. 244–298. <https://doi.org/10.1002/9781119163060.ch8>
11. Afshari H. H., Gadsden S. A., Habibi S. Gaussian Filters for Parameter and State Estimation: A General Review of Theory and Recent Trends // Signal Processing. 2017. Vol. 135. P. 218–238. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.01.001>
12. Guoqiang Mao, Sam Drake, Brian D. O. Anderson. Design of an Extended Kalman Filter for UAV Localization // Conference: Information, Decision and Control. IEEE. 2007. P. 224–229. <https://doi.org/10.1109/IDC.2007.374554>
13. Covariance Matching Based Adaptive Unscented Kalman Filter for Direct Filtering in INS/GNSS Integration / Yang Meng, Shesheng Gao, Yongmin Zhong et al. // Acta Astronautica. 2016. Vol. 120. P. 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.014>
14. Crassidis J. L. Sigma-Point Kalman Filtering for Integrated GPS and Inertial Navigation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2006. Vol. 42, No. 2. P. 750–756. <https://doi.org/10.1109/taes.2006.1642588>
15. Фесенко О. Д. Вдосконалений метод орієнтації безпілотного літального апарата в тривимірному просторі за допомогою мікроелектромеханічних систем інерціальної системи навігації на основі фільтра Маджвіка // Авіаційна та ракетно-космічна техніка. 2018. Т. 29 (68), Ч. 1, № 3. С. 35–42. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29_3%281%29_9 (дата звернення: 10.09.2024).
16. Бугайов Д. В., Аврутов В. В., Нестеренко О. І. Експериментальне порівняння алгоритмів визначення орієнтації на базі компліментарного фільтра та фільтра Маджвіка //

Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2020. Vol. 12, Iss. 3. P. 9–18.

<https://doi.org/10.15673/atbp.v12i3.1855>

17. Зімчук І. В., Шапар Т. М., Ковба М. В. Синтез алгоритмів фільтрації результатів вимірювань у системах навігації безпілотних літальних апаратів // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. 2024. Вип. 96. С. 21–27.

<https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.96.21-27>

18. Кожешкурт В. І., Юзефович В. В. Дослідження схем фільтрації алгоритмів трасової обробки // Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2010. Т. 12, № 4. С. 3–12. URL:

<http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/50481/01-Kozheshkurt.pdf?sequence=1>

(дата звернення: 21.10.2024).

Стаття надійшла до редакції 12.11.2024.

REFERENCES

1. Savchenko, Ya., Yahodzynski, S., Lytvynenko, L., & Sushynski, O. (2024). Aparatno-programne zabezpechennia ta zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Hardware and Software Support and Application of Unmanned Aerial Vehicles]. *Visnyk Khmelnytskoho nats.un-tu [Bulletin of Khmelnytsky National University]*, № 3, Iss. 2, 273–277. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-41> [in Ukrainian].
2. Babii, Yu. O., Polishchuk, V. V., & Matsyshyn, M. O. et al. (2022). Rozvytok bezpilotnoi aviatsii u sviti ta Ukraini: analiz osoblyvosti ta tekhnichnykh kharakterystyk [Development of Unmanned Aviation in the World and Ukraine: Analysis of Features and Technical Characteristics]. *Zb. nauk. prats Viisk. in-tu Kyivskoho nats. un-tu im. Tarasa Shevchenka [Collection of Scientific Works of the Military Institute of the Taras Shevchenko National University of Kyiv]*, 75, 5–14. <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2022/75-01> [in Ukrainian].
3. Servatiuk, V., Lysyi, M., & Mostovyi, A. (2024). Analiz naukovykh pidkhodiv shchodo rozvytku i zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ u suchasnykh voiennykh konfliktakh [Analysis of scientific approaches to the development and use of unmanned aerial vehicles in modern military conflicts]. *Zb. nauk. prats Nats. akademii Derzh. prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Serii: Viiskovi ta tekhnichni nauky [Collection of Scientific Works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Military and Technical Sciences]*, 1 (94), 97–105. [in Ukrainian].
4. Kharchenko, V. P., Chepizhenko, V. I., Tunik, A. A., & Pavlova, S. V. (2012). *Avionika bezpilotnykh litalnykh aparativ [Avionics of unmanned aerial vehicles]*. Kyiv. ISBN: 978-966-1653-05-3 [in Ukrainian].
5. Zakharin, F. M., Syniehlazov, V. M., & Filiashkin, M. K. (2011). *Alhorytmichne zabezpechennia inertsiialno-suputnykovykh system navihatsii: monohrafiia [Algorithmic Support of Inertial-Satellite Navigation Systems: Monograph]*. Kyiv. ISBN 978-966-598-675-1 [in Ukrainian].
6. Melnyk, M., Vynarovych, R., Hasiuk, Yu., & Shvarts, M. (2024). Udoskonalennia navihatsiinoi systemy prystroiu defektoskopii pidzemnykh trub [Improvement of the Navigation System of the Underground Pipe Flaw Detection Device]. *Komp'uterni systemy proiektuvannia. Teoriia i praktyka [Computer Design Systems. Theory and Practice]*, Iss. 6, № 1, 117–126. <https://doi.org/10.23939/cds2024.01.117> [in Ukrainian].

7. Rudyk, A. V. (2017). Akselerometrychni inertsiialni mikrosystemy oriientsatsii [Accelerometric Inertial Orientation Microsystems]. In *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh : Materialy XVII Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. [Measuring and Computing Equipment in Technological Processes: Proceedings of the XVII International Scientific-Technical Conference]*. Odesa, June 8–13, 2017. (pp. 103–105). Odesa; Khmelnytskyi [in Ukrainian].
8. Shuliak, M. L. (2020). Analiz isnuuichykh system filtratsii danykh pry eksperymentalnomu doslidzhenni transportnoho zasobu [Analysis of Existing Data Filtering Systems During Experimental Research of a Vehicle]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv [Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes]*, 21, 175–184. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.175-184> [in Ukrainian].
9. Drevetskyi, V. V., Vasylets, S. V., & Rudyk, A. V. et al. (2020). *Rozroblennia ta doslidzhennia suchasnykh system elektroenerhetyky ta avtomatyzatsii: Monohrafiia [Development and Research of Modern Power and Automation Systems: Monograph]*. Rivne [in Ukrainian].
10. Stepanov, O. A. (2016). Optimal and Sub-Optimal Filtering in Integrated Navigation Systems. *Aerospace Navigation Systems*, 244–298. Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9781119163060.ch8>
11. Afshari, H. H., Gadsden, S. A., & Habibi, S. (2017). Gaussian Filters for Parameter and State Estimation: A General Review of Theory and Recent Trends. *Signal Processing*, 135, 218–238. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.01.001>
12. Guoqiang Mao, Sam Drake, Brian D. O. Anderson. (2007). Design of an Extended Kalman Filter for UAV Localization. In *Conference: Information, Decision and Control. IEEE*. (pp. 224–229). <https://doi.org/10.1109/IDC.2007.374554>
13. Yang Meng, Shesheng Gao, & Yongmin Zhong et al. (2016). Covariance Matching Based Adaptive Unscented Kalman Filter for Direct Filtering in INS/GNSS Integration. *Acta Astronautica*, 120, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.014>
14. Crassidis, J. L. (2006). Sigma-Point Kalman Filtering for Integrated GPS and Inertial Navigation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 42, Iss. 2, 750–756. <https://doi.org/10.1109/taes.2006.1642588>
15. Fesenko, O. D. (2018). Vdoskonalenyi metod oriientsatsii bezpilotnoho litalnoho aparata v tryvymirnomu prostori za dopomohoiu mikroelektromekhanichnykh system inertsiialnoi systemy navihatsii na osnovi filtra Madzhvika [Improved Method of Orientation of Unmanned Aerial Vehicle in Three-Dimensional Space Using Microelectromechanical Systems and Inertial Navigation System Based on the Madzhwick Filter]. *Aviatsiina ta raketno-kosmichna tekhnika [Aviation, Rocket and Space Engineering]*, 29 (68), Iss. 1, № 3, 35–42. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29_3%281%29_9 [in Ukrainian].
16. Buhaiiov, D. V., Avrutov, V. V., & Nesterenko, O. I. (2020). Eksperymentalne porivniannia alhorytmiv vyznachennia oriientsatsii na bazi komplimentarnoho filtra ta filtra Madzhvika [Experimental Comparison of Orientation Determination Algorithms Based on a Complementary Filter and a Madzhwick Filter]. *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protseviv [Automation of Technological and Business Processes]*, Vol. 12, Iss. 3, 9–18. <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i3.1855> [in Ukrainian].

17. Zimchuk, I. V., Shapar, T. M., & Kovba, M. V. (2024). Syntez alhorytmiv filtratsii rezultativ vymiriuvan u systemakh navihatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ [Synthesis of Algorithms for Filtering Measurement Results in Navigation Systems of Unmanned Aerial Vehicles]. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia [Bulletin of NTUU "KPI". Series Radio Engineering, Radio Equipment Manufacturing]*, 96, 21–27. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.96.21-27> [in Ukrainian].
18. Kozheshkurt, V. I., & Yuzefovych, V. V. (2010). Doslidzhennia skhem filtratsii alhorytmiv trasovoi obrobky [Research of Filtering Schemes of Route Processing Algorithms]. *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh [Registration, Storage and Processing of Data]*, Vol. 12, № 4, 3–12. Retrieved from <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/50481/01-Kozheshkurt.pdf?sequence=1> [in Ukrainian].

I. V. Zimchuk, T. M. Shapar, M. V. Kovba

FILTERING ALGORITHM OF ACCELEROMETRICAL SENSORS MEASUREMENTS IN PLATFORMLESS INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS UNMANNED AIRCRAFT

In unmanned aerial vehicles of low mass, platformless inertial navigation systems are widely used. They are implemented on the basis of accelerometers and gyroscopes, which are made according to the technology of microelectromechanical systems. The low accuracy of microelectromechanical systems determines the use of additional stages of navigation measurement processing in navigation systems.

To increase the accuracy of navigation determinations, stochastic filtering algorithms are used, namely the Kalman filter and its various modifications. Existing filtering algorithms are characterized by high computational complexity due to the abstract form of presentation, which does not reflect the details of implementation. That is why the task of synthesizing filtering algorithms that will meet the requirements of guaranteed convergence of the filtering process and minimal computational complexity regarding its implementation is relevant. This requirement is extremely important for navigation systems of small unmanned aerial vehicles, as their on-board equipment must be cheap and low-energy. The work is devoted to the synthesis and research of the algorithm of polynomial filtering of measurements of accelerometric sensors in platformless inertial navigation systems of unmanned aerial vehicles. The synthesis of the algorithm is performed according to the method based on the presentation of smoothing filters as dynamic systems described by discrete transfer functions, which are determined by the application of the third form of invariance conditions. A distinctive feature of the synthesized algorithm is the consideration in the filtering process of not only current, but also previous measurement results, which are weighted by their own smoothing coefficients. The conditions for the convergence of the filtering process are defined for the synthesized algorithm. Due to the scalar form of the algorithm implementation, low computational complexity is inherent. The effectiveness of the algorithm was confirmed by the results of computer simulation based on the results of real measurements of the ADXL345 accelerometer, which is part of the Arduino UNO R3.

Keywords: *smoothing filter; evaluation; measurement; unmanned aerial vehicle; accelerometer; navigation system; filtering algorithm.*