

**І.В. Зімчук, к.т.н., доц.
Т.М. Шапар, ст. викладач**

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова

М.В. Ковба, заст. нач. каф.

Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

С.І. Мірошніченко, викладач

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова

Синтез алгоритмів комплексованої фільтрації вимірювань для систем супутникової навігації безпілотних літальних апаратів

Широке застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) різних класів як у військовій, так і в цивільній сферах, вимагає розробки та виробництва високоточних бортових навігаційних систем малої вартості, ваги та габаритів. Важливою характеристикою, яка визначає спроможність та якість виконання польотного завдання БпЛА, є точність його позиціонування. В основу управління існуючими БпЛА покладено використання супутникових навігаційних систем (СНС), в яких підвищення точності позиціонування досягається застосуванням різних алгоритмів обробки прийнятих навігаційних даних. Узагальнений аналіз найбільш поширених підходів до розв'язання задачі фільтрації навігаційних вимірювань показав, що, незважаючи на велику кількість існуючих рішень, задача синтезу ефективних алгоритмів фільтрації залишається актуальною. Можливим шляхом підвищення точності визначення навігаційних параметрів, які вимірюються СНС БпЛА, є сумісна обробка результатів вимірювань дальності до супутника та радіальної швидкості. У зв'язку з цим у роботі викладено методику синтезу алгоритмів комплексованої фільтрації вимірювань дальності в системах супутникової навігації БпЛА. В основу методики покладено поліноміальну модель алгоритму фільтрації та вхідних даних. Викладений підхід ґрунтується на поданні згладжувальних фільтрів як динамічних систем, які описуються дискретними передаточними функціями. Теоретичною основою визначення передаточних функцій є третя форма умов інваріантності помилки фільтра відносно моделі вхідного впливу. Запропонований підхід дозволяє: синтезувати ефективні алгоритми комплексованої фільтрації, які мають мінімальну обчислювальну складність для своєї реалізації; на етапі синтезу формувати властивості фільтрів стосовно згладжування шумів та виключення динамічних помилок; у процесі синтезу визначити умови, під час виконання яких цифровий фільтр буде стійким. У роботі наводиться приклад синтезу алгоритму комплексованої фільтрації дальності, в якому реалізується сумісна обробка результатів вимірювань як дальності, так і швидкості. Працездатність та ефективність синтезованого алгоритму досліджено шляхом комп'ютерного моделювання. Показано, що застосування синтезованого фільтра дозволяє зменшити динамічну помилку оцінювання дальності в умовах зміни математичної моделі вхідних даних без погіршення якості фільтрації помилок вимірювань.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат; фільтрація; алгоритм оцінювання; поліном; згладжування; навігаційні вимірювання; інваріантність; комплексування; навігаційна система.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями.

З кожним роком БпЛА все більше застосовуються для виконання великої кількості різноманітних завдань, серед яких моніторинг місцевості, кліматичний контроль, складання цифрових карт, здійснення розвідки, ураження повітряних та наземних цілей супротивника та ін. Це зумовлено зменшенням габаритів технічних пристроїв, підвищенням продуктивності обчислювальних засобів, удосконаленням систем супутникової навігації та технологій машинного зору. Ефективність використання БпЛА зумовлена відсутністю людського фактора та відповідно загрози життю пілота [1, с. 56]. Узагальнено будову, класифікацію та застосування БпЛА викладено в [2, с. 9].

Виконання поставлених перед БпЛА завдань, як в автоматичному, так і в напівавтоматичному режимах польоту, потребує наявності інформації про кутову орієнтацію та координати місцеперебування БпЛА. Ця задача розв'язується пілотажно-навігаційним комплексом (ПНК) БпЛА, основу якого становлять інерціальна та супутникова навігаційні системи (ІНС та СНС) [3, с. 25]. Обидві системи працюють одночасно і, як правило, комплексуються [3, с. 171; 4, с. 315].

Автономність та висока інформативність інерційної навігаційної системи (ІНС) висувають її в клас універсальних систем як із визначення траєкторних рухів БпЛА (координат та швидкості польоту), так і з визначення кутових координат (кутів крену, тангажа та курсу) та інших параметрів, наприклад, прискорень, кутових швидкостей тощо [5, с. 130]. Однак визначення координат БпЛА лише на основі

вимірювань ІНС буде призводити до накопичення похибок, тому є необхідність визначення координат додатково за допомогою СНС [6, с. 42]. Висока точність навігаційних вимірювань, особливо під час використання диференціальних підсистем СНС (10–30 м за каналом стандартної точності та одиниці сантиметрів у диференціальних режимах) передбачає застосування супутникових навігаційних систем як основних навігаційних систем літальних апаратів [6, с. 130]. СНС залишається основним джерелом навігаційної інформації для багатьох малих БПЛА [7, с. 3; 8, с. 224].

Основними навігаційними параметрами, які вимірюються СНС, є дальність до супутника та радіальна швидкість [5, с. 122; 7, с. 5], а інформаційними параметрами радіосигналу для їх визначення є затримка сигналу та доплерівський зсув частоти. Головною вимогою, яка висувається до СНС, є висока точність вимірювання навігаційних параметрів [5, с. 80, 122] і, як наслідок, висока точність визначення координат місцезнаходження БПЛА [9, с. 51; 10, с. 107]. Задача точного позиціонування набуває особливої актуальності в умовах групового застосування БПЛА через можливе їх зіткнення у повітрі [6, с. 41].

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Підвищення точності позиціонування досягається застосуванням різних алгоритмів обробки прийнятих навігаційних даних. Одним з рішень, що дозволяє підвищити достовірність, зменшити обсяг навігаційної інформації, переданої користувачеві, є фільтрація помилкових та надлишкових даних, отриманих від GPS-модуля, що входить до складу ПНК БПЛА. Фільтрація даних полягає у виключенні надлишкових даних, що не приносять ніякої корисної інформації про місцезнаходження об'єкта, а також у відсіві викидів, які призводять до спотворень даних та перешкод у визначенні місця розташування [10, с. 107].

Для фільтрації вимірювань СНС використовуються різні модифікації фільтра Калмана [5, с. 25, 123; 7, с. 4; 11, с. 2]. Відомо [13, с. 99], що класичний фільтр Калмана є оптимальним за критерієм мінімуму дисперсії помилок оцінювання лише для лінійних систем при заданих характеристиках вхідного та вимірювального шумів. У реальних системах точно оцінити характеристики фактичних випадкових впливів неможливо. Крім того, лінійна модель є лише наближеним описом реальних динамічних систем та процесів, що спостерігаються [11, с. 2]. Стосовно ПНК, то найбільш важливим джерелом невизначеності про модель руху БПЛА є передбачувані та непередбачувані маневри, інтенсивність яких, як правило, невідома [12, с. 75]. У фільтрі Калмана прискорення враховується у вигляді стаціонарного випадкового вхідного впливу, хоча така модель процесу неточно відбиває фізичну суть цього явища [13, с. 99].

Внаслідок нелінійного характеру рівнянь, які описують динаміку вектора стану та вимірювань, застосовують алгоритми нелінійної фільтрації. Одним з таких рішень є розширений фільтр Калмана (Extended Kalman filter, EKF) з різною кількістю змінних стану [7, с. 4; 8, с. 224]. Синтез таких алгоритмів фільтрації ґрунтується на лінеаризації нелінійних моделей стану шляхом розкладання їх у ряд Тейлора. В моделі фільтра враховуються лише члени ряду невисокого порядку, а старші похідні ігноруються. Збільшення кількості змінних стану призводить до зростання розмірності фільтра і, як наслідок, до обчислювальної складності алгоритму, що вимагає потужних обчислювачів. Всі параметри такого фільтра змінюються випадково внаслідок їх функціональної залежності від оцінки [13, с. 116].

Ще одна група алгоритмів калманівського типу, яка широко застосовується останнім часом, – так звані ансамбльні (unscented) або сигма-крапкові фільтри Калмана (Unscented Kalman filter, UKF) [14, с. 249; 15, с. 55]. Такі фільтри не потребують розрахунку похідних при визначенні наближеного опису нелінійних функцій за допомогою їх лінійних аналогів. Лінеаризація відбувається на підставі процедури, близької за своїм змістом до процедури стохастичної лінеаризації. Від розширеного фільтра Калмана такий підхід відрізняється лише способом лінеаризації моделей стану та спостереження. Серед алгоритмів нелінійної фільтрації також варто згадати фільтр Гауса Ерміта (GHF) [16, с. 346], квадратурний фільтр Калмана (QKF-алгоритм) та кубатурний фільтр Калмана (CKF-алгоритм) [15, с. 55].

Розглянуті алгоритми нелінійної фільтрації належать до алгоритмів калманівського типу і з точки зору їх практичного застосування є досить універсальними. Ефективність та параметри таких фільтрів залежать від оцінки, тому виникають труднощі у визначенні меж зміни показників ефективності [13, с. 113]. Крім того, згадані алгоритми характеризуються високою складністю, внаслідок чого інженери стикаються з проблемою їх практичної реалізації через абстрактну форму опису, яка не відображає деталей реалізації.

Синтез розглянутих алгоритмів фільтрації передбачає наявність точного математичного опису вектора стану та вимірювань. На практиці вказані умови не завжди виконуються внаслідок того, що БПЛА являє собою високоманевровий літальний апарат [12, с. 79], параметри руху якого постійно змінюються. Крім того, рух БПЛА відбувається під впливом діючих випадкових збурень. Вказані обставини спричиняються невідповідністю між прийнятою математичною моделлю фільтра та реальними вимірами, що приводить до динамічних помилок фільтрації. В таких умовах застосовують адаптивні алгоритми фільтрації [13, с. 99; 17, с. 49; 18, с. 919], які здатні здійснювати фільтрацію в умовах апріорної невизначеності. В алгоритмах адаптивної фільтрації відбувається ідентифікація параметрів фільтра, які відображають розбіжності в прийнятих припущеннях. Як правило, це кореляційні матриці помилок фільтрації, екстраполяції та шумів вимірювання. За результатами проведеної ідентифікації здійснюється розрахунок матриці вагових коефіцієнтів фільтра Калмана. Застосування адаптивних алгоритмів

ускладнюється їх великою обчислювальною складністю, що є досить важливим для бортових обчислювачів БПЛА. Крім того, аналітичне доведення збіжності процесу адаптації таких алгоритмів є складною задачею, в літературі не розглядається і проводиться лише шляхом математичного моделювання, що також обмежує застосування таких алгоритмів.

Альтернативним підходом до розв'язання задачі фільтрації навігаційних даних є застосування алгоритмів комплексованої фільтрації. Позитивний ефект досягається за врахування в моделі вимірювань не тільки дальностей, але і результатів доплерівських вимірювань, які використовуються для вимірювань не тільки швидкості, а й дальності. При цьому забезпечується слабка чутливість навігаційних алгоритмів до динаміки споживача і знижуються вимоги до продуктивності навігаційного обчислювача [5, с. 124]. Крім того, під час розробки ефективних алгоритмів фільтрації необхідно враховувати їх специфіку, а саме: розвиваються методи поліноміальної фільтрації [14, с. 248], в яких враховується факт того, що вимірюванням навігаційних параметрів в СНС властивий поліноміальний характер [12, с. 77].

Постановка завдання (формулювання мети статті). Метою статті є синтез алгоритмів фільтрації поліноміального типу, в яких реалізується сумісна обробка навігаційних вимірювань СНС для підвищення точності оцінювання дальності в умовах зміни динаміки руху БПЛА. Алгоритми мають задовольняти умови збіжності процесу фільтрації та мінімальної обчислювальної складності щодо їх реалізації в бортових комп'ютерах [3, с. 212].

Викладення основного матеріалу. Припускається, що дальність $r(n)$ та радіальна швидкість $\dot{r}(n)$, які вимірюються бортовим приймачем БПЛА, описуються поліноміальною моделлю такого виду:

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

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

де $\Delta^m r(n-1)$, $\Delta^m \dot{r}(n-1)$ – кінцева різниця m -го порядку;

N – порядок моделі;

T – темп обробки інформації.

Скалярні процеси $r(n)$ та $\dot{r}(n)$ спостерігаються за наявності адитивного «білого шуму» з нульовим середнім та відомою дисперсією, тобто

$$\begin{aligned} g(n) &= r(n) + f(n), \\ \dot{g}(n) &= \dot{r}(n) + s(n), \\ M[f(n)] &= 0, \quad M[s(n)] = 0, \\ M[r(n)f(n)] &= 0, \quad M[\dot{r}(n)s(n)] = 0, \\ M[f(n)f(n-i)] &= 0, \quad M[s(n)s(n-i)] = 0, \quad M[f(n)s(n)] = 0, \quad i > 0, \\ P_f(n) &= M[f^2(n)], \quad P_s(n) = M[s^2(n)], \end{aligned} \quad (3)$$

де $g(n)$, $\dot{g}(n)$ – вимірювання дальності та радіальної швидкості;

$f(n)$, $s(n)$ – помилки вимірювань;

$P_f(n)$, $P_s(n)$ – дисперсії помилок вимірювання.

Для дискретного процесу (1) з урахуванням умов (3) необхідно синтезувати алгоритм фільтрації, який за результатами вимірювань $g(n)$ та $\dot{g}(n)$ формує оцінку $\hat{r}(n)$ оптимальну за критерієм мінімум середнього квадрата помилок оцінювання

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

де

$$\varepsilon(n) = r(n) - \hat{r}(n), \quad (5)$$

– помилка оцінювання.

Узагальнена функціональна схема такого фільтра може бути подана у вигляді, показаному на рисунку 1, де $\tilde{r}(n)$ – нев'язка, $r_e(n)$ – екстрапольоване значення дальності.

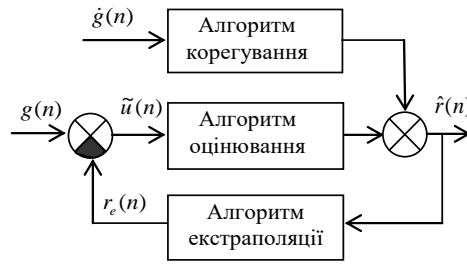


Рис. 1. Функціональна схема комплексованого фільтра

За своєю суттю наведена функціональна схема становить замкнену цифрову систему автоматичного управління, в якій реалізується корегування за похідною від вхідної дії. Це дозволяє для визначення структури фільтра застосувати операторні методи синтезу автоматичних слідкувальних систем.

Поставлена задача розв’язується поетапно: на першому етапі синтезуються алгоритми оцінювання та екстраполяції, які утворюють замкнений контур фільтрації, а на другому – алгоритм корегування.

В основу синтезу алгоритмів оцінювання та екстраполяції покладено подання їх внутрішньої структури у вигляді дискретних передаточних функцій:

$$W_o(z) = \frac{\hat{r}(z)}{\tilde{y}(z)} = \frac{B(z)}{A(z)}, \tag{6}$$

$$W_e(z) = \frac{r_e(z)}{\hat{r}(z)} = F(z), \tag{7}$$

де $W_o(z)$, $W_e(z)$ – передаточні функції алгоритмів оцінювання та екстраполяції відповідно;

$A(z)$, $B(z)$, $F(z)$ – поліноми, які підлягають визначенню.

Для розв’язування поставленої задачі в загальному вигляді визначається передаточна функція фільтра

$$W_\phi(z) = \frac{\hat{r}(z)}{g(z)} = \frac{B(z)}{C(z)}, \tag{8}$$

де

$$C(z) = A(z) + B(z)F(z), \tag{9}$$

– характеристичний поліном.

З виразу

$$W_e(z) = 1 - W_\phi(z), \tag{10}$$

розраховується передаточна функція за помилкою оцінювання

$$W_\varepsilon(z) = \frac{\varepsilon(z)}{g(z)} = \frac{A(z) - B(z)(1 - F(z))}{A(z) + B(z)F(z)},$$

звідки визначається

$$\varepsilon(z) = \frac{A(z) - B(z)(1 - F(z))}{A(z) + B(z)F(z)} g(z).$$

Для виключення динамічної помилки в сталому режимі необхідно досягти виконання умови

$$[A(z) - B(z)(1 - F(z))]r(n) = 0, \tag{11}$$

при

$$A(z) \neq 0, B(z) \neq 0, F(z) \neq 0, r(n) \neq 0, n \rightarrow \infty. \tag{12}$$

У виразі (11) z виконує функцію оператора часового зсуву.

За своєю суттю умови (11) та (12) являють собою третю форму умов інваріантності помилки $\varepsilon(z)$ відносно $r(z)$ [19, с. 32] і дозволяють визначити поліноми $A(z)$ та $F(z)$. Рівняння (11) буде справедливим, якщо

$$A(z)r(n) = 0, \tag{13}$$

$$(1 - F(z))r(n) = 0. \tag{14}$$

Рівність (13) буде виконуватись, якщо структура полінома $A(z)$ буде відповідати розрахунку кінцевої лівої різниці від $r(n)$. Тому загальний вираз для визначення полінома $A(z)$ буде таким:

$$A(z) = (1 - z^{-1})^v \left[1 + \sum_{i=1}^k a_i z^{-i} \right], \tag{15}$$

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

a_i – коефіцієнти полінома.

Для того, щоб виконувалася рівність (14), отримаємо загальне рівняння

$$1 - F(z) = (1 - z^{-1})^v \left[1 + \sum_{i=1}^q f_i z^{-i} \right],$$

з якого вираз для визначення полінома $F(z)$ буде таким:

$$F(z) = 1 - (1 - z^{-1})^v \left[1 + \sum_{i=1}^q f_i z^{-i} \right], \quad (16)$$

де f_i – коефіцієнти полінома $F(z)$.

Через те, що праві частини рівнянь (15) та (16), однакового змісту, поліном $F(z)$ може визначатися з виразу

$$F(z) = 1 - A(z). \quad (17)$$

Із викладеного видно, що виконання умов (13) та (14) не накладає обмежень на структуру полінома $B(z)$ і тому його загальний вигляд може бути подано таким чином:

$$B(z) = \sum_{j=0}^l b_j z^{-j}, \quad (18)$$

де b_j – коефіцієнти згладжування.

Синтез алгоритму корегування відбувається за умови, що поліноми $A(z)$, $B(z)$ та $F(z)$ розраховані, і структура алгоритмів фільтрації та екстраполяції визначена. Виходячи з цього, структурна схема фільтра подається у вигляді, показаному на рисунку 2, де $D(z)$ – оператор, який підлягає визначенню.

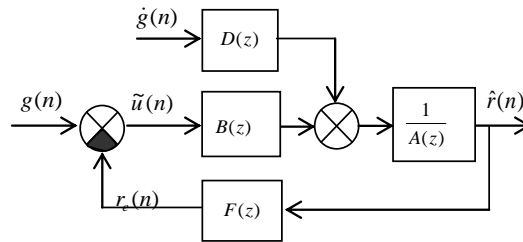


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі комплексованого фільтра

Відповідно до структурної схеми визначаються рівняння для оцінки

$$\hat{r}(z) = \frac{\dot{g}(z)D(z) + g(z)B(z)}{A(z) + B(z)F(z)}, \quad (19)$$

та для помилки

$$\varepsilon(z) = \frac{g(z)A(z)(1 - B(z)) - \dot{g}(z)D(z)}{A(z) + B(z)F(z)}. \quad (20)$$

Для виключення динамічної помилки необхідно досягти виконання умови

$$r(z)A(z)(1 - B(z)) - \dot{r}(z)D(z) = 0,$$

яка подається у вигляді таких рівнянь

$$A(z)(1 - B(z))r(n) = 0, \quad (21)$$

$$D(z)\dot{r}(n) = 0, \quad (22)$$

$$A(z) \neq 0, B(z) \neq 0, D(z) \neq 0, r(n) \neq 0, n \rightarrow \infty. \quad (23)$$

Вирази (21) – (23) являють собою третю форму умов інваріантності [19, с. 32] помилки $\varepsilon(z)$ відносно $r(n)$ та $\dot{r}(n)$. Рівняння (21) виконується внаслідок виконання умови (13) та отриманого рішення (15). Рівність (22) буде справедливою, якщо структура полінома $D(z)$ буде відповідати розрахунку кінцевої лівої різниці від $\dot{r}(n)$. Тому загальний вираз для визначення полінома $D(z)$ буде таким:

$$D(z) = (1 - z^{-1})^{v-1} \left[\sum_{i=0}^k d_i z^{-i} \right], \quad (24)$$

де d_i – коефіцієнти полінома.

Таким чином, взявши до уваги отримані визначення поліномів, узагальнені рівняння алгоритму комплексованої фільтрації вимірювань дальності набувають такого вигляду

$$\begin{aligned} r_e(n) &= F(z)\hat{r}(n), \\ \tilde{u}(n) &= g(n) - r_e(n), \\ \hat{r}(n) &= [B(z)\tilde{u}(n) + D(z)\dot{g}(n)] \frac{1}{A(z)}. \end{aligned} \quad (25)$$

Узагальнюючи викладене, спостерігається зазначене далі.

1. Поліном $A(z)$ є знаменником передаточної функції (6) та у вигляді (15) визначає порядок астатизму фільтра без ланки корегування. Фізичний зміст коефіцієнтів a_i полягає у підвищенні порядку астатизму фільтра до значення γ , такого, що $v \leq \gamma \leq v+1$.

2. Поліном $B(z)$ є чисельником передаточної функції комплексованого фільтра $W_{ir}(z) = \frac{\hat{r}(z)}{r(z)} = \frac{B(z)}{A(z) + B(z)F(z)}$, та у вигляді (18) містить коефіцієнти згладжування фільтра b_j , значення яких визначають якість фільтрації і для виконання критерію (4) можуть розраховуватись з виразу $\frac{\partial P_f}{\partial b_j} = 0$.

3. $C(z)$ є характеристичним поліномом замкненої системи (вираз (9)). З аналізу $C(z)$ визначаються значення a_i та b_j , за яких згладжувальний фільтр буде стійким.

4. Поліноми $A(z)$ та $D(z)$ входять до складу чисельника передаточної функції комплексованого фільтра за помилкою $W_\varepsilon(z) = \frac{\varepsilon(z)}{r(z)} = \frac{A(z)(1-B(z)) - D(z)(1-z^{-1})}{A(z) + B(z)F(z)}$, і визначають динамічну помилку в сталому режимі. Коефіцієнти поліномів розраховуються з умови зменшення динамічної помилки фільтра.

5. Поліном $D(z)$ є чисельником передаточної функції за швидкістю $W_{ir'}(z) = \frac{\hat{r}'(z)}{r'(z)} = \frac{D(z)}{A(z)}$, та у вигляді (24) містить коефіцієнти d_i , які визначають якість фільтрації помилок вимірювання швидкості і можуть розраховуватись з виразу $\frac{\partial P_s}{\partial d_i} = 0$.

Поліном $D(z)$ не входить до складу характеристичного полінома і, як наслідок, не впливає на стійкість згладжувального фільтра.

Синтез алгоритму фільтрації розглядається на прикладі. Припускається, що вхідний сигнал описується лінійною моделлю ($m=1$), а в непередбачувані для спостерігача моменти часу – поліномом другого порядку ($m=2$). Умови спостереження – рівняння (3).

Синтез відбувається в такій послідовності. На підставі (15) визначається поліном $A(z)$ у вигляді $A(z) = (1-z^{-1})^2$. Екстраполюючий поліном розраховується за виразом (17) $F(z) = 1 - (1-z^{-1})^2$. З рівняння (18) визначається коефіцієнт згладжування $B(z) = b_0$. Поліном $D(z)$ розраховується з виразу (24) $D(z) = d_0(1-z^{-1})$.

За виразами (25) синтезуються рівняння алгоритму комплексованої фільтрації:

$$\begin{aligned} r_e(n) &= 2\hat{r}(n-1) - \hat{r}(n-2), \\ \tilde{u}(n) &= g(n) - r_e(n), \\ \hat{r}(n) &= b_0\tilde{u}(n) + d_0(\dot{g}(n) - \dot{g}(n-1)) + r_e(n). \end{aligned}$$

З рівняння (9) розраховується характеристичний поліном $C(z) = 1 - 2(1-b_0)z^{-1} + (1-b_0)z^{-2}$, а за алгебраїчним критерієм стійкості визначаються умови стійкості фільтра $0 < b_0 \leq 1$.

Дослідження ефективності синтезованого алгоритму проводилося шляхом комп'ютерного моделювання. Розроблено імітаційну модель, яка дозволяє шляхом виконання послідовності обчислень з подальшим графічним відображенням результатів імітувати процес фільтрації вхідних сигналів у «реальному» часі.

Моделювався процес фільтрації вимірювань дальності, зміна якої описувалася поліномом змінної структури. На інтервалах часу $t=0-200$ с та $t=400-600$ с модель вхідного сигналу (1) відповідала поліному першого порядку ($m=1$), а на інтервалі часу $t=200-400$ с – поліному другого порядку за прискорення 5 м/с^2 . Помилки вимірювання моделювалися з нормальним законом розподілу, нульовим

середнім та середньоквадратичним відхиленням $\sigma_r = 20$ м та $\sigma_{\dot{r}} = 0,2$ м/с [5, с. 318]. Вимірювання моделювались як адитивна суміш істинних значень $r(n)$ та $\dot{r}(n)$ та помилок вимірювань (рівняння (3)). Фільтрація вимірювань здійснювалася з періодом $T=1$ с [5, с. 318]. Значення коефіцієнтів згладжування обиралися з нижньої межі області стійкості: $b_0 = 0,1$ та $d_0 = 0,5$. Результат моделювання синтезованого алгоритму у вигляді помилки оцінювання (5) показано на рисунку 3. Ефективність алгоритму оцінювалася за середньоквадратичним відхиленням (СКВ) помилки оцінювання σ_ε за лінійної моделі вхідного сигналу ($m=1$) та за середнім значенням динамічної помилки ε_δ при $m=2$. При обраних умовах моделювання синтезований алгоритм забезпечив такі значення показників ефективності: $\sigma_\varepsilon = 31,6$ м та $\varepsilon_\delta = 30$ м.

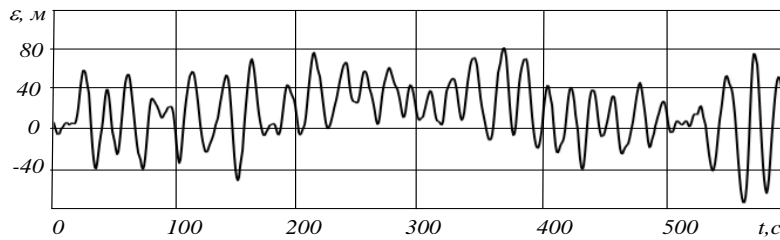


Рис. 3. Помилка оцінювання синтезованого фільтра

Отримані результати порівнювалися з результатами роботи фільтра Калмана другого (налаштованого на модель при $m=1$) (рис. 4) та третього (налаштованого на модель при $m=2$) (рис. 5) порядків.

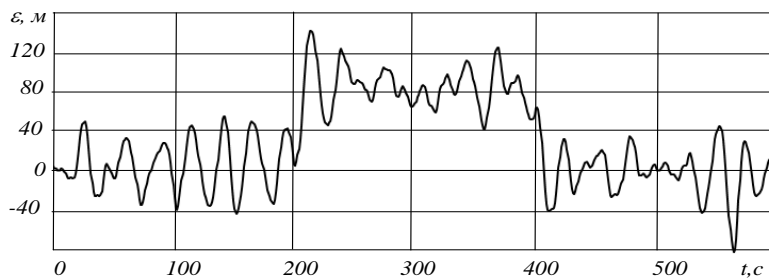


Рис. 4. Помилка оцінювання фільтра Калмана другого порядку

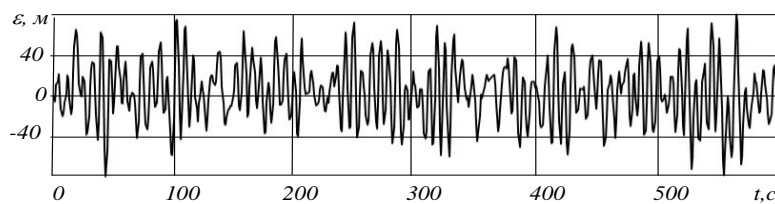


Рис. 5. Помилка оцінювання фільтра Калмана третього порядку

Значення показників ефективності такі: для фільтра Калмана другого порядку – $\sigma_\varepsilon = 30,8$ м та $\varepsilon_\delta = 60$ м, а для фільтра Калмана третього порядку – $\sigma_\varepsilon = 33,2$ м та $\varepsilon_\delta = 0$ м.

Порівняно з фільтром Калмана другого порядку на інтервалах часу, де модель вхідного сигналу містить прискорення, в синтезованому алгоритмі динамічна помилка в 2 рази менше. За лінійної моделі вхідного сигналу СКВ помилок оцінювання збільшилося в 1,03 раза.

Порівняно з фільтром Калмана третього порядку на інтервалах часу, де модель вхідного сигналу змінюється лінійно, в синтезованому алгоритмі СКВ помилок оцінювання менше в 1,05 раза. Наявність у складі моделі вхідної дії прискорення спричиняє наявність динамічної помилки.

Таким чином, в умовах зміни математичної моделі вхідного сигналу застосування синтезованого алгоритму дозволило досягти зменшення динамічної помилки оцінювання без суттєвого погіршення якості фільтрації помилок вимірювань в умовах, коли модель фільтра відповідає моделі вхідного сигналу.

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

Висновки та перспективи подальших досліджень. Одним зі шляхів підвищення точності позиціонування БпЛА є застосування у складі ПНК алгоритмів комплексованої обробки прийнятих навігаційних даних. Саме тому в роботі викладено методику синтезу алгоритмів фільтрації результатів вимірювань дальності до супутника, в яких підвищення точності оцінювання досягається за рахунок сумісної обробки вимірювань дальності та радіальної швидкості.

В основу методики покладено опис згладжувальних фільтрів за допомогою дискретних передаточних функцій, які визначаються із застосуванням третьої форми умов інваріантності. Запропонований підхід дає можливість синтезувати поліноміальні алгоритми фільтрації, виходячи із заданих умов якості, та проводити їх аналіз із застосуванням відомих операторних методів теорії автоматичного управління. Ефективність методики показано на прикладі синтезу алгоритму комплексованої фільтрації навігаційних вимірювань. За результатами комп'ютерного моделювання синтезований фільтр показав досить високу якість згладжування помилок вимірювань при лінійній моделі вхідного сигналу та дозволив зменшити динамічну помилку в 2 рази в умовах невідповідності між моделями фільтра та вхідного сигналу.

За напрямком подальших досліджень варто вважати поширення викладеного підходу для синтезу багатовимірних та комплементарних алгоритмів фільтрації для систем навігації БпЛА.

Список використаної літератури:

1. Голембо В.А. Організація роботи групи безпілотних літальних апаратів / В.А. Голембо, Р.Г. Мельніков // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні системи та мережі. – 2018. – № 905. – С. 56–63.
2. Alghamdi Y. Classification, and Applications of Contemporary Unmanned Aerial Vehicles / Y.Alghamdi, A.Munir, H.Manh La // IEEE Consumer Electronics Magazine. – 2021. – Vol. 10, Issue 6. – P. 9–20. DOI: 10.1109/MCE.2021.3063945.
3. Авіоніка безпілотних літальних апаратів / В.П. Харченко, В.І. Чепіженко, А.А. Тунік, С.В. Павлова. – Київ : ТОВ «Абрис-принт», 2012. – 464 с.
4. Factor graph optimization for GNSS/INS integration: A comparison with the extended Kalman filter / W.Wen, T.Pfeifer, X.Bai, L.-T. Hsu // Navigation: Journal of the Institute of Navigation. – 2021. – Vol. 68, Issue 2. – P. 315–331. DOI: 10.1002/navi.421.
5. Захарін Ф.М. Алгоритмічне забезпечення інерціально-супутникових систем навігації : монографія / Ф.М. Захарін, В.М. Синеглазов, М.К. Філяшкін. – Київ : Вид-во Нац. авіа. ун-ту «НАУ-друк», 2011. – 320 с.
6. Кількісна оцінка мінімальної можливої відстані між безпілотними літальними апаратами в групі / В.С. Фустій, С.В. Смеляков, Д.О. Пархоменко, М.Г. Гладішев // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2022. – № 4 (74). – С. 40–45. DOI: 10.30748/zhups.2022.74.05.
7. Bhattacharyya S. Kalman Filter-Based Reliable GNSS Positioning for Aircraft Navigation / S.Bhattacharyya, D.L. Mute, D.Gebre-Egziabher. – 2019. – P. 1–27. DOI: 10.2514/6.2019-0363.
8. Mao G. Design of an Extended Kalman Filter for UAV Localization / G.Mao, S.Drake, B.D.O. Anderson // Information, Decision and Control : conference. – IEEE, 2007. – P. 224–229. DOI: 10.1109/IDC.2007.374554.
9. Ghahremani N.A. Generalized Incremental Predictive Filter for Integrated Navigation System INS/GPS in Tangent Frame / N.A. Ghahremani, H.M. Alhassan // Journal of Control (English Edition). – 2022. – Vol. 1, No. 1. – P. 49–59.
10. Соколенко О.С. Обробка GPS координат з використанням калманівської фільтрації / О.С. Соколенко, А.Ю. Дорошенко // Проблеми програмування. – 2018. – № 1. – С. 105–112. DOI: 10.15407/pp2018.01.105.
11. Takayama Y. Novel Process Noise Model for GNSS Kalman Filter Based on Sensitivity Analysis of Covariance with Poor Satellite Geometry / Y.Takayama, T.Urakubo, H.Tamaki // Sensors. – 2021. – № 21 (18). – P. 2–15. DOI: 10.3390/s21186056.
12. Цуканов О.Ф. Методи оцінки параметрів руху маневруючих безпілотних літальних апаратів в інфокомунікаційних сенсорних мережах / О.Ф. Цуканов, Є.А. Якорнов // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. – 2022. – № 2 (04). – С. 74–84. DOI: 10.36994/2788-5518-2022-02-04-08.
13. Farina F. Radar Data Processing: Introduction and tracking. Vol. 1 / F.Farina, A.Studer. – Research Studies Press Ltd, 1985. – 325 p.
14. Efficiency analysis of polynomial filtering algorithms in navigation data processing for a class of nonlinear discrete dynamical systems / O.A. Stepanov, V.A. Vasiliev, M.V. Basin and other // IET Control Theory Appl. – 2021. – Vol. 15. – P. 248–259. DOI: 10.1049/cth2.12036.
15. Вимірювання на тлі шумів та при флуктуаціях поглинання енергії корисного сигналу / В.У. Ігнаткін, В.С. Дудніков, С.В. Алексєєнко, О.П. Юшкевич // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – 2023. – Т. XXXII. – С. 41–60. DOI: 10.15421/472304.
16. Gozhyj A.P. Systematic use of nonlinear data filtering methods in forecasting tasks / A.P. Gozhyj, I.A. Kalinina, P.I. Bidyuk // Applied Aspects of Information Technology. – 2023. – Vol. 6, No. 4. – P. 345–361. DOI: 10.15276/aa.06.2023.23.
17. Tominaga T. Performance Assessment of Adaptive Kalman Filter-Based GNSS PVT and Integrity in Dense Urban Environment / T.Tominaga, N.Kubo // Transactions of Navigation. – 2019. – Vol. 4, No. 2. – P. 49–58. DOI: 10.18949/jintrnavi.4.2_49.

18. Lotfy A. Improving the performance of GNSS precise point positioning by developed robust adaptive Kalman filter / A.Lotfy, M.Abdelfatah, G.El-Fiky // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. – 2022. – Vol. 25. – P. 919–928. DOI: 10.1016/j.ejrs.2022.09.005.
19. Зімчук І.В. Синтез алгоритмів цифрового управління для автоматичних слідувальних систем / Зімчук І.В., Іценко В.І., Канкін І.О. // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 1. – С. 30–38. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/86128>.

References:

1. Holembo, V.A. and Melnikov, R.H. (2018), «Orhanizatsiia roboty hrupy bezpilotnykh litalnykh aparativ», *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika». Kompiuterni systemy ta merezhi*, No. 905, pp. 56–63.
2. Alghamdi, Y., Munir, A. and Manh La, H. (2021), «Architecture, Classification, and Applications of Contemporary Unmanned Aerial Vehicles», *IEEE Consumer Electronics Magazine*, Vol. 10, Issue 6, pp. 9–20, doi: 10.1109/MCE.2021.3063945.
3. Kharchenko, V.P., Shepizhenko, V.I., Tunik, A.A. and Pavlova, S.V. (2012), *Avionika bezpilotnykh litalnykh aparativ*, TOV «Abrys-prynt», Kyiv, 464 p.
4. Wen, W., Pfeifer, T., Bai, X. and Hsu, L.-T. (2021), «Factor graph optimization for GNSS/INS integration: A comparison with the extended Kalman filter», *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 68, Issue 2, pp. 315–331, doi: 10.1002/navi.421.
5. Zakharin, F.M., Syniehlazov, V.M. and Filiashkin, M.K. (2011), *Alhorytmichne zabezpechennia inertsiialno-suputnykovykh system navihatsii: monohrafiia*, Vyd-vo Nats. avia. un-tu «NAU-druk», Kyiv, 320 p.
6. Fustii, V.S., Smeliakov, S.V., Parkhomenko, D.O. and Hladyshch, M.H. (2022), «Kilkisna otsinka minimalnoi mozhyvoi vidstani mizh bezpilotnyimi litalnymi aparatamy v hrupi», *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*, No. 4 (74), pp. 40–45, doi: 10.30748/zhups.2022.74.05.
7. Bhattacharyya, S., Mute, D.L. and Gebre-Egziabher, D. (2019), «Kalman Filter-Based Reliable GNSS Positioning for Aircraft Navigation», pp. 1–27, doi: 10.2514/6.2019-0363.
8. Mao, G., Drake, S., Anderson, B.D.O. (2007), «Design of an Extended Kalman Filter for UAV Localization», *Information, Decision and Control*, conference, IEEE, pp. 224–229, doi: 10.1109/IDC.2007.374554.
9. Ghahremani, N.A. and Alhassan, H.M. (2022), «Generalized Incremental Predictive Filter for Integrated Navigation System INS/GPS in Tangent Frame», *Journal of Control (English Edition)*, Vol. 1, No. 1, pp. 49–59.
10. Sokolenko, O.S. and Doroshenko, A.Iu. (2018), «Obrobka GPS koordynat z vykorystanniam kalmanivskoi filtratsii», *Problemy prohramuvannia*, No. 1, pp. 105–112, doi: 10.15407/pp2018.01.105.
11. Takayama, Y., Urakubo, T. and Tamaki, H. (2021), «Novel Process Noise Model for GNSS Kalman Filter Based on Sensitivity Analysis of Covariance with Poor Satellite Geometry», *Sensors*, No. 21 (18), pp. 2–15, doi: 10.3390/s21186056.
12. Tsukanov, O.F. and Yakornov, Ye.A. (2022), «Metody otsinky parametriv rukhu manevruuiuchykh bezpilotnykh litalnykh aparativ v infokomunikatsiinykh sensorykh merezhakh», *Infokomunikatsiini ta kompiuterni tekhnolohii*, No. 2 (04), pp. 74–84, doi: 1036994/2788-5518-2022-02-04-08.
13. Farina, F.A. (1985), *Radar Data Processing: Introduction and tracking*, Vol. 1, Research Studies Press Ltd, 325 p.
14. Stepanov, O.A., Vasiliev, V.A., Basin, M.V. et al. (2021), «Efficiency analysis of polynomial filtering algorithms in navigation data processing for a class of nonlinear discrete dynamical systems», *IET Control Theory Appl*, Vol. 15, pp. 248–259, doi: 10.1049/cth2.12036.
15. Ihnatkin, V.U., Dudnikov, V.S., Aleksieienko, S.V. and Yushkevych, O.P. (2023), «Vymiriuvannia na tli shumiv ta pry fluktuatsiakh pohlynannia enerhii korysnoho syhnalu», *Systemne proektuvannia ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoi tekhniki*, Vol. XXXII, pp. 41–60, doi: 10.15421/472304.
16. Gozhyj, A.P., Kalinina, I.A. and Bidyuk, P.I. (2023), «Systematic use of nonlinear data filtering methods in forecasting tasks», *Applied Aspects of Information Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 345–361, doi: 10.15276/aait.06.2023.23.
17. Tominaga, T. and Kubo, N. (2019), «Performance Assessment of Adaptive Kalman Filter-Based GNSS PVT and Integrity in Dense Urban Environment», *Transactions of Navigation*, Vol. 4, No. 2, pp. 49–58, doi: 10.18949/jintransnavi.4.2_49.
18. Lotfy, A., Abdelfatah, M. and El-Fiky, G. (2022), «Improving the performance of GNSS precise point positioning by developed robust adaptive Kalman filter», *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Vol. 25, pp. 919–928, doi: 10.1016/j.ejrs.2022.09.005.
19. Zimchuk, I.V., Ishchenko, V.I. and Kankin, I.O. (2015), «Syntez alhorytmiv tsyfrovoho upravlinnia dlia avtomatychnykh slidkuvalnykh system», *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii*, No. 1, pp. 30–38, [Online], available at: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/86128>

Зімчук Ігор Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

<https://orcid.org/0009-0003-9372-5720>.

Наукові інтереси:

– синтез алгоритмів оцінювання та управління для автоматизованих технічних систем.

E-mail: adaptorziv@gmail.com.

Шапар Тетяна Миколаївна – старший викладач Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

<https://orcid.org/0009-0008-0497-7675>.

Наукові інтереси:

– синтез алгоритмів оцінювання та управління для автоматизованих технічних систем.

E-mail: tanushok76@gmail.com.

Ковба Микола Вікторович – заступник начальника кафедри водіння бойових машин та автомобілів факультету бойового застосування військ Національної академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного.

<https://orcid.org/0000-0003-1816-1016>.

Наукові інтереси:

– проектування та виготовлення мобільних робототехнічних систем.

E-mail: mykola.Kovba@gmail.com.

Мірошніченко Сергій Іванович – викладач Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

<https://orcid.org/0009-0007-2076-041X>.

Наукові інтереси:

– алгоритми обробки інформації в технічних системах.

E-mail: ser641@meta.com.

Zimchuk I., Shapar T., Kovba M., Miroshnichenko S.

Synthesis of algorithms for complex filtering of measurements for satellite navigation systems of unmanned aerial vehicles

The widespread use of unmanned aerial vehicles (UAVs) of various classes in both the military and civilian spheres requires the development and production of high-precision on-board navigation systems of low cost, weight and dimensions. An important characteristic that determines the ability and quality of the UAV's flight task performance is the accuracy of its positioning. The basis of management of existing UAVs is the use of satellite navigation systems (SNS). In SNS of UAVs, increasing the accuracy of positioning is achieved by using various algorithms for processing received navigation data. A generalized analysis of the most common approaches to solving the problem of filtering navigation measurements showed that the task of synthesizing effective filtering algorithms remains relevant. A possible way to increase the accuracy of determining the navigation parameters is the joint processing of the results of measurements of the distance to the satellite and the radial velocity. The work describes the methodology of synthesis of complex filtering algorithms for range measurements in UAV satellite navigation systems. The methodology is based on a polynomial model of the filtering algorithm and input data. The described approach is based on the presentation of smoothing filters as dynamic systems described by discrete transfer functions. The theoretical basis for determining the transfer functions is the third form of the invariance conditions of the filter error with respect to the input influence model. The proposed approach allows: synthesizing effective complex filtering algorithms that have minimal computational complexity for their implementation; at the stage of synthesis, forming the properties of filters in relation to noise smoothing and exclusion of dynamic errors; in the synthesis process, determining the conditions under which the digital filter will be stable. The workability and efficiency of the synthesized algorithm was investigated by means of computer simulation. It is shown that the application of the synthesized filter allows reducing the dynamic range estimation error in the conditions of changing the mathematical model of the input data without deteriorating the quality of filtering of measurement errors.

Keywords: unmanned aerial vehicle; filtration; evaluation algorithm; polynomial; smoothing; navigation measurements; invariance; complexation; navigation system.

Стаття надійшла до редакції 07.03.2024.