

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

УДК 519.246.8:621.372

ВИОКРЕМЛЕННЯ СКЛАДНОГО ТРЕНДУ СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ РУХУ ОБ'ЄКТІВ*Бурау Н. І., Мішура К. А.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: mishura.karina@gmail.com*

Статтю присвячено дослідженням проблем інтелектуалізації систем керування рухомими об'єктами для забезпеченні їх надійної експлуатації в складних умовах у різних фізичних середовищах. Системи інтелектуальної підтримки руху розробляються на основі інтеграції вимірювальних, обчислювальних, комунікаційних та керуючих технологій та призначені для забезпечення збору, накопичення та обробки інформації, визначення навігаційних параметрів, формування керуючих впливів, візуалізації позиціонування та траєкторій руху об'єктів, моніторингу функціонального стану об'єктів та стану середовища функціонування тощо. При відновленні втраченої траєкторії рухомого об'єкта в умовах його складного руху, при апроксимації складних алгоритмів в системах адаптивного керування за різких змін траєкторії чи умов руху виникає необхідність виокремлення складного тренду з шумоподібних сигналів. Існуючі алгоритми фільтрації не забезпечують прийнятної ефективності, особливо в умовах обмеженої апріорної інформації про характер змінювання корисної складової сигналу.

У статті запропоновано та обґрунтовано використання вейвлетної фільтрації для пригнічення завад і виокремлення початкового сигналу складної форми. Проведено дослідження ефективності виокремлення складного за формою корисного сигналу на фоні гаусівського шуму та гармонічних завад. Для обробки змодельованих сигналів використано хвильові функції різних порядків з сімейств Добеші, симлетів та койфлетів. Ефективність вейвлетної фільтрації оцінювалась за значенням середньоквадратичного відхилення виділеного тренду та моделі корисного сигналу. Порівняльний аналіз отриманих результатів показав доцільність використання хвильової функції сімейства симлетів, що забезпечило мінімальне значення середньоквадратичного відхилення виділеного тренду від моделі корисного сигналу.

Ключові слова: *складний тренд сигналу; завади; вейвлетна фільтрація; хвильові функції; апроксимації; деталі.*

Вступ

Сучасна світова концепція створення малогабаритних автономних інтелектуалізованих рухомих об'єктів [1, 2], експлуатація яких характеризується автономністю та складною динамікою у різних фізичних середовищах, ґрунтується на комплексному застосуванні методів та засобів безплатформової інерціальної технології, штучного інтелекту та робототехніки, обробки сигналів, ідентифікації, прогнозування та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Для більшості автономних програмно керуваних об'єктів авіаційної техніки, ракетно-космічної техніки, безпілотних наземних та підводних апаратів характерними є складні траєкторії руху, нестаціонарність процесів їх взаємодії з середовищем експлуатації, неповнота контролю зовнішніх впливів, варіації умов і режимів функціонування, складність чи неможливість використання зовнішніх засобів для неперервного оперативного контролю позиціонування. В таких умовах є

висока ймовірність невиконання поставлених перед об'єктами завдань. Тому забезпечення надійної експлуатації об'єктів зі складною динамікою вимагає інтеграції вимірювальних, обчислювальних, комунікаційних та керуючих технологій в спеціальних системах інтелектуальної підтримки руху. І саме інтелектуалізація систем керування рухомими об'єктами для забезпечення автономної орієнтації та навігації, підвищення живучості об'єктів у разі виникнення позаштатних чи аварійних ситуацій є головними напрямками сучасних світових наукових досліджень.

В закордонних джерелах [1 - 3] для подібних систем використовується термін «кібер-фізична система», яка для рухомих об'єктів розглядається як система наступного покоління, що складається з «тісно пов'язаних компонентів пересування, обчислень і комунікацій» і призначена для досягнення заданих показників стабільності, надійності, та ефективності експлуатації. Залежно від типу рухомого об'єкта, цільового призначення, режимів та

умов експлуатації на систему інтелектуальної підтримки руху можуть бути покладені різні завдання, наприклад: збір, накопичення та обробка інформації; визначення навігаційних параметрів; формування керуючих впливів; візуалізація позиціонування та траєкторій руху об'єктів; моніторинг функціонального стану об'єктів та стану середовища функціонування тощо.

Серед зазначених вище завдань для багатьох практичних застосувань систем керування виникає необхідність виокремлення складного тренду з шумоподібних сигналів. Такі завдання можуть мати місце при відновленні втраченої траєкторії рухомого об'єкта в умовах його складного руху, при апроксимації складних алгоритмів у системах адаптивного керування при різких змінах траєкторії чи умов руху, при змінюванні вихідних сигналів датчиків чи виконавчих елементів систем керування.

Традиційно для виокремлення корисної складової з багатокомпонентного сигналу використовуються методи цифрової фільтрації [4, 5], для усунення впливу дрейфу гіроскопа на точність визначення кутів орієнтації в системах керування в [6, 7] обґрунтовано застосування комплементарних фільтрів, у роботі [8] виокремлення простих трендів з шумоподібного сигналу виконано на основі вейвлетної фільтрації. У роботах [9, 10] для обробки складних процесів, які містять фрагменти різних елементарних сигналів (стрибокподібних, лінійних та нелінійних функцій), запропоновано та обґрунтовано використання нелінійних фільтрів на основі алгоритмів міриадної фільтрації. Але ефективність застосування таких алгоритмів значною мірою залежить від геометричної форми окремого фрагменту сигналу, тому для обробки подібних сигналів у зазначених роботах пропонується використовувати адаптацію параметрів міриадного фільтра до оброблюваного в межах вікна фрагменту сигналу, що значно ускладнює процес фільтрації, особливо в умовах обмеженої апріорної інформації про характер змінювання корисної складової сигналу. Тому розробка ефективних та швидкодіючих алгоритмів виокремлення складного тренду з шумоподібного сигналу є важливим завданням при створенні систем інтелектуальної підтримки руху.

Постановка задачі

Метою даного дослідження є аналіз ефективності використання вейвлетної фільтрації для пригнічення завад і виокремлення початкового сигналу складної форми.

Загальна характеристика методу

Вейвлет-перетворення (ВП) за останні двадцять років став одним з найважливіших та поширених у різних технічних застосуваннях математичних інструментів та засобів обробки сигналів. Це обумовлено основними властивостями ВП [11-14],

які забезпечують можливість одночасно аналізувати та оцінювати параметри як швидкоплинних, так і повільно змінюваних процесів, що є важливим для обробки локально чи суттєво нестационарних сигналів.

Декомпозиція сигналів відбувається у базисі нерегулярних та загалом несиметричних хвильових функцій (вейвлетів) з нульовим середнім значенням, які є обмеженими у часовому та частотному поданнях. Перетворення визначається як згортка сигналу $x(t)$, що аналізується, та деякої вейвлет-функції $\Psi_{a,b}$, отриманої внаслідок масштабування (розтягу-стиску) та часового зсуву базового (материнського) вейвлета. У процесі перетворення відбувається розкладання сигналу $x(t)$ в ієрархічний набір апроксимацій (отримані для великих значень параметру масштабу і характеризують повільні змінювання сигналу) та деталей (отримані для малих значень параметру масштабу і характеризують високочастотні складові сигналу) [11-14]. Для реалізації такого розкладання використовуються дзеркальні квадратурні фільтри, коефіцієнти яких пов'язані між собою такою залежністю:

$$g_k = (-1)^k h_{1-k},$$

і за якими визначаються масштабна функція $\phi(t)$ та вейвлет $\psi(t)$ у відповідності до масштабних залежностей [14, 15]:

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(2t - k)$$

та

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \phi(2t - k).$$

Масштабні функції та вейвлети відповідають умовам ортогональності. Для масштабної функції існує умова нормування $\int \phi(t) dt = 1$, а для вейвлета – умова, за якою перші M моменти вейвлета дорівнюють нулю – $\int t^m \psi(t) dt = 0$, де m, M – цілі числа, $m \in [0; M - 1]$.

Застосування описаної процедури до різних значень M для масштабних функцій породжує сімейство вейвлетів Добеші (Dobechies), які позначаються як dbM, де M відповідає кількості нульових моментів вейвлета і визначає його порядок. Вейвлет dbM та відповідна йому масштабна функція в основному локалізовані на інтервалі довжиною $(2M-1)$, для реалізації розкладання використовуються фільтри зі скінченною імпульсною характеристикою, послідовності коефіцієнтів фільтрів h_k та g_k для відповідного вейвлета складають $2M$ чисел [12-14]. Вейвлети Добеші є найбільш відомими і поширеними в різних практичних застосуваннях.

Більшість типів вейвлетів не мають аналітичного опису у вигляді однієї формули, а задаються ітераційними виразами. З вейвлетів Добеші були отримані і деякі інші типи. Ідея отримати найменш асиметричний вейвлет за умови збереження кількості нульових моментів і відповідного інтервалу ло-

калізації (2M-1) знайшла втілення в сімействі вейвлетів, які називаються сімлетами (symM), які при $M < 4$ практично збігаються з вейвлетами Добеші [13]. А забезпечення умови наявності M нульових моментів не тільки для вейвлету, а й для масштабної функції, призвело до появи сімейства вейвлетів, які називаються койфлетами (coifM) [13].

Властивості вейвлетів та масштабних функцій зробили ВП ефективним методом пригнічення шумових складових у сигналах для різних технічних застосувань [8, 16]. Зазвичай інформація про шум міститься в деталях чи коефіцієнтах деталізації вейвлет-розкладання, тому до них застосовується порогова обробка, яка полягає в тому, що коефіцієнтам зі значеннями менше визначеного порогу надається нульове значення.

Процедура вейвлетної фільтрації складається з таких етапів [16]:

1. Декомпозиція сигналу: вибір вейвлету та рівня розкладання N , виконання вейвлет-розкладання сигналу, що аналізується, до рівня N .

2. Деталізація: для кожного рівня розкладання від 1 до N обирається відповідний поріг і виконується порогова обробка коефіцієнтів деталізації.

3. Реконструкція сигналу: виконується на основі початкових коефіцієнтів апроксимації рівня N та модифікованих коефіцієнтів деталізації рівнів від 1 до N .

У загальному випадку вибір вейвлету та рівнів (глибини) розкладання залежать від конкретного сигналу, для якого виконується вейвлетна фільтрація [14]. Глибина розкладання впливає на масштаб відсіяних деталей, тому важливо правильно вибрати N , щоб в результаті реконструкції не отримати згладжену версію сигналу, коли відфільтрованими будуть не тільки шумові складові, а й деякі локальні особливості сигналу. При виборі порога на етапі 2 використовують критерії, які мінімізують квадратичну функцію втрат для обраної моделі шуму [16].

Модель сигналу зі складним трендом

Для моделювання та ВП використаємо адитивну суміш корисного сигналу та завад. Формування корисного сигналу виконано на основі комплексної моделі одновимірного процесу (рис. 1), яка містить практично всі види елементарних сигналів. Подібного типу комплексна модель досліджувалась в роботі [10].

Значення корисного сигналу (в умовних одиницях) знаходяться в діапазоні від $-0,5$ до $+5$, модель сигналу створено на інтервалі часу 5 с з періодом дискретизації $0,01$ с, що відповідає кількості точок в корисному сигналі – 500.

У якості завад розглядався стаціонарний гаусівський шум з нульовим середнім значенням і середньоквадратичним відхиленням (СКВ) в умовних одиницях $\sigma=0,2; 0,4$, а також гармонічний сигнал з амплітудою $0,2$ (в умовних одиницях) та

частотою 20 Гц. Графіки реалізацій змодельованих для обробки сигналів наведено на рис. 2.

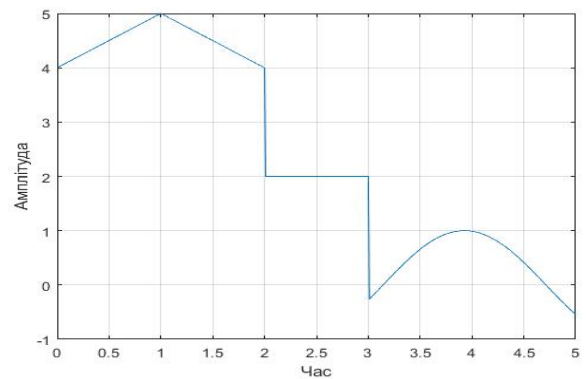


Рис. 1. Комплексна модель корисного сигналу

Для вейвлетної фільтрації використано вейвлет-сімейства Добеші, а також сімлети та койфлети. Вибір вейвлетів обумовлений їх властивостями, зокрема ортогональністю та можливістю реконструкції сигналу.

Обробка сигналів та аналіз результатів

Для обробки сигналу, реалізацію якого наведено на рис. 2, а, та виокремлення складного тренду на фоні гаусівського шуму з $\sigma=0,2$ використано вейвлети четвертого порядку db4 та sym4, а також вейвлет другого порядку coif2 з розкладанням на два рівні.

Результати обробки (виділені апроксимації сигналу a_2 , суміщені з графіком моделі корисного сигналу, та деталі d_1 і d_2) з використанням хвильових функцій db4, sym4 та coif2 наведено відповідно на рис. 3 – рис. 5. Для кожного з елементів розкладання за віссю абсцис відкладено кількість точок, а за віссю ординат – значення в умовних одиницях.

Як видно з отриманих результатів, для вейвлетної фільтрації шуму з середньоквадратичним відхиленням $\sigma=0,2$ та виокремлення складного тренду (корисного сигналу) достатньо виконати розкладання сигналу на $N=2$ рівні. В цілому, апроксимація другого рівня розкладання відображає складну форму корисного сигналу. Для оцінки ефективності пригнічення шуму використовуємо середньоквадратичне відхилення значень виділеної апроксимації та корисного сигналу, яке для наведених результатів в умовних одиницях складає $0,1136$ для обробки з хвильовими функціями db4 і sym4, та $0,1173$ для обробки з хвильовою функцією coif2.

Для обробки сигналу, реалізацію якого наведено на рис. 2, б, та виокремлення складного тренду на фоні гаусівського шуму з $\sigma=0,4$ використано вейвлети третього порядку db3, дев'ятого порядку sym9, та п'ятого порядку coif5 з розкладанням на чотири рівні.

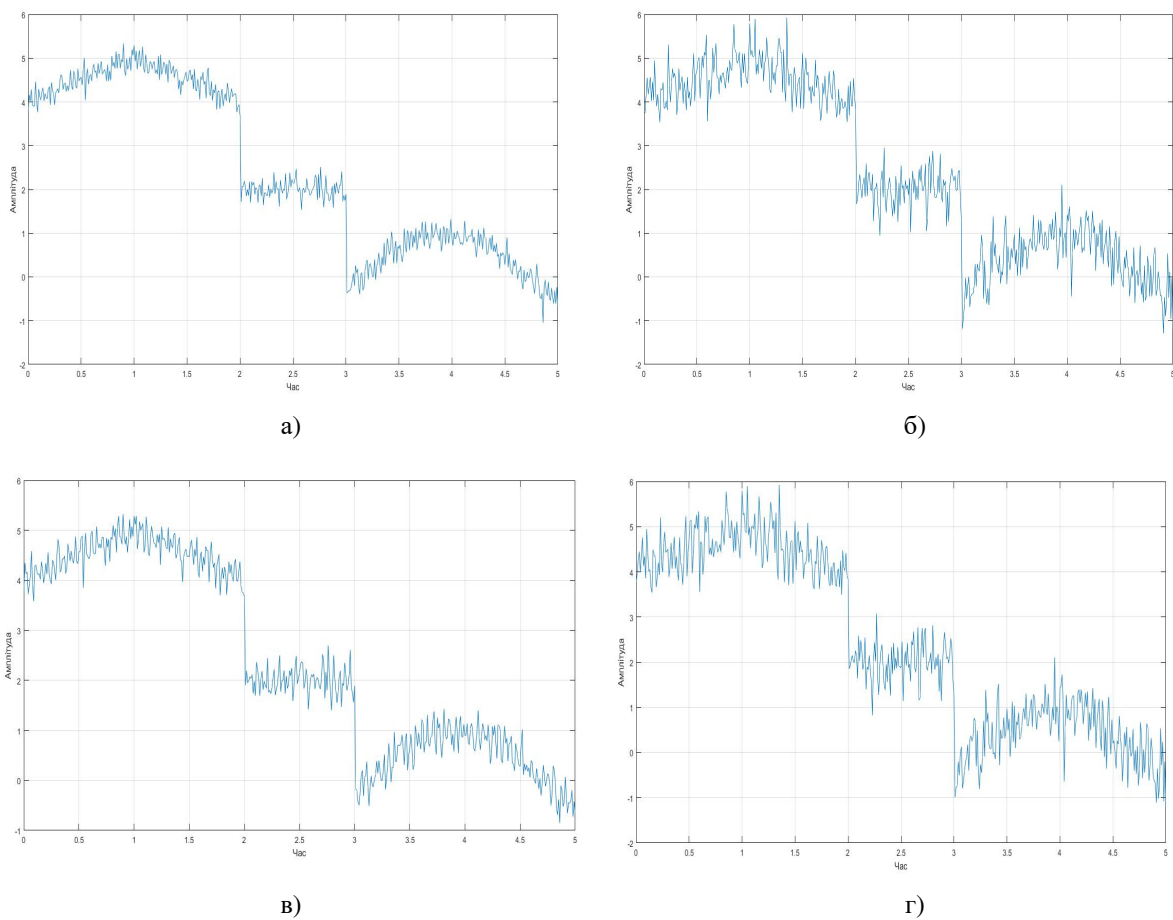


Рис. 2. Реалізації змодельованих сигналів у вигляді адитивної суміші корисного сигналу та завад:
 а) шум з $\sigma=0,2$; б) шум з $\sigma=0,4$; в) шум з $\sigma=0,2$ та гармонічний сигнал; г) шум з $\sigma=0,4$ та гармонічний сигнал

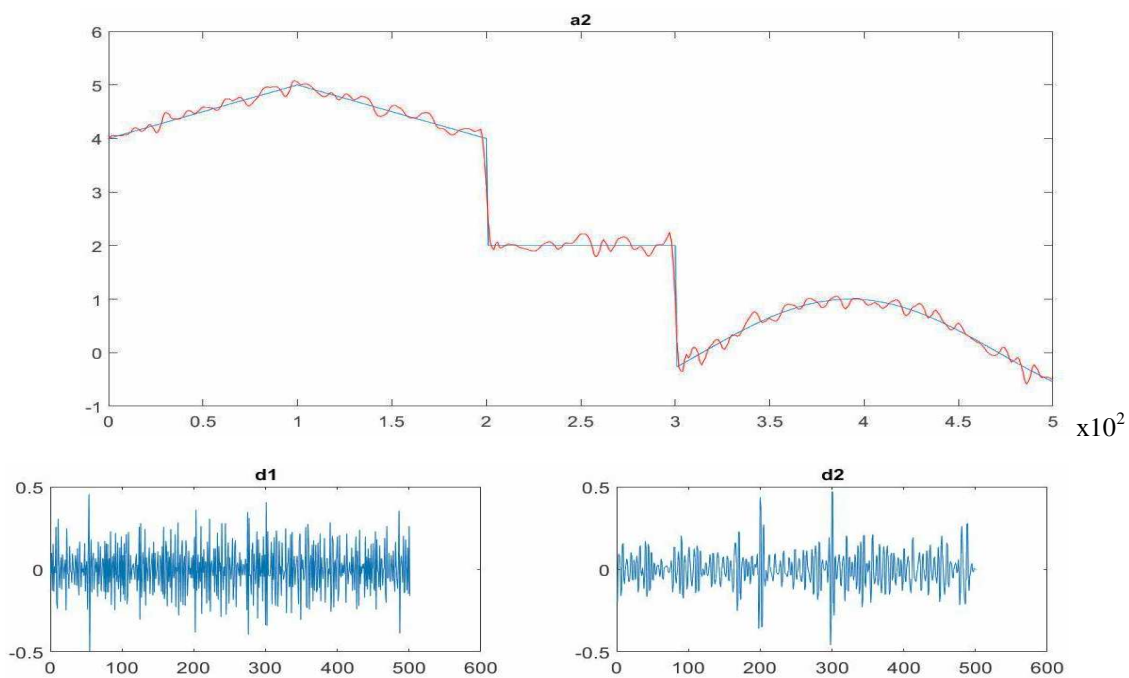


Рис. 3. Результати обробки та виокремлення складного тренду з використанням хвильової функції db4

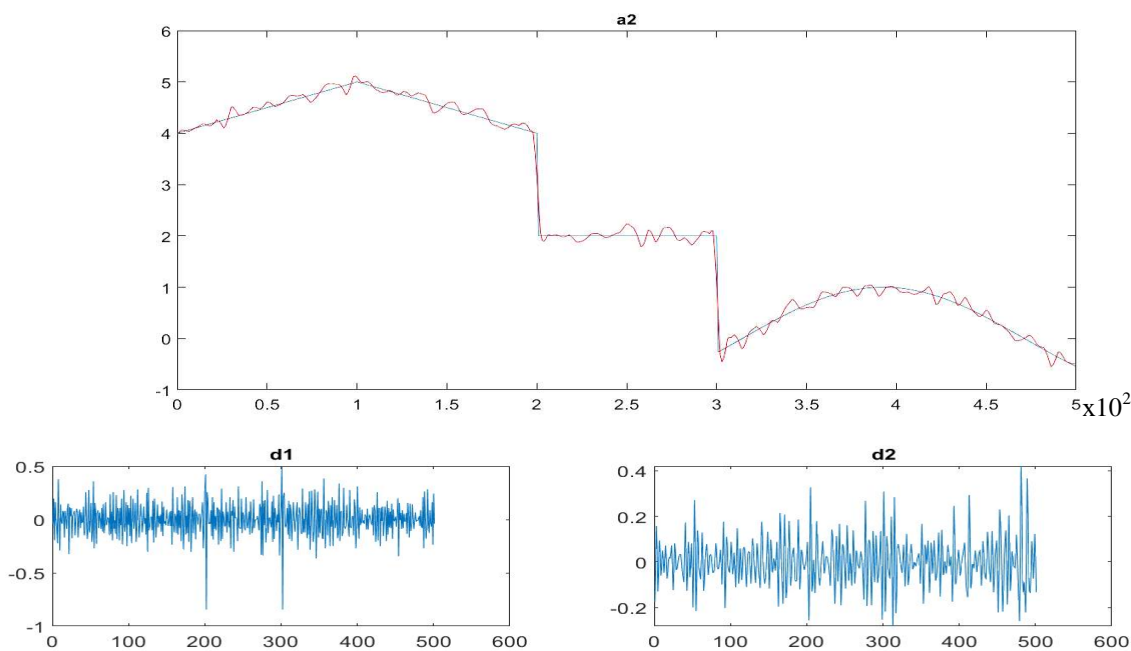


Рис. 4. Результати обробки та виокремлення складного тренду з використанням хвильової функції sum4

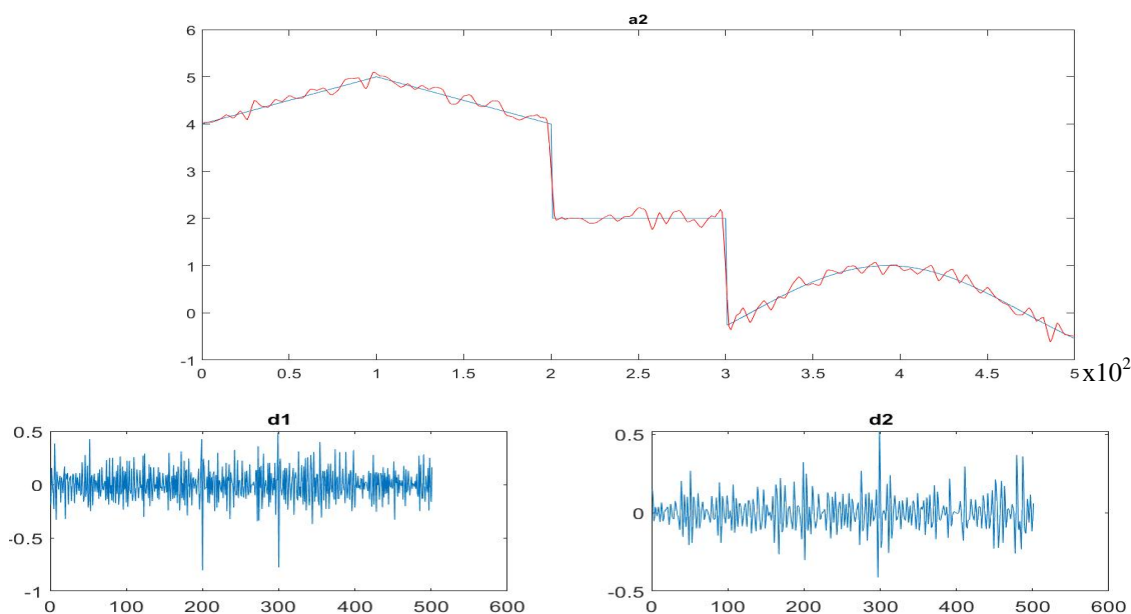


Рис. 5. Результати обробки та виокремлення складного тренду з використанням хвильової функції coif2

Середньоквадратичне відхилення значень виділеної апроксимації четвертого рівня a_4 та корисного сигналу для отриманих результатів в умовних одиницях складає 0,1836 для обробки з db3 , 0,1798 для обробки з sum9 , та 0,1809 для обробки з coif5 .

Результати показують, що при збільшенні інтенсивності шумової завади доцільно використовувати хвильові функції більш високого порядку. Приклад виділеної в результаті обробки з використанням вейвлету sum9 апроксимації четвертого

рівня a_4 , суміщеної з графіком моделі корисного сигналу, наведено на рис. 6.

Для обробки сигналу, реалізацію якого наведено на рис. 2, в, та виокремлення складного тренду на фоні гаусівського шуму з $\sigma=0,2$ і гармонічної завади з амплітудою 0,2 (в умовних одиницях) та частотою 20 Гц використано вейвлети четвертого порядку db4 і sum4 , та другого порядку coif2 з розкладанням на два рівні. Результати обробки є подібними до наведених на рис. 3 – рис. 5. Середньо-

квадратичне відхилення значень виділеної апроксимації другого рівня a_2 та корисного сигналу для отриманих результатів в умовних одиницях складає 0,1141 для обробки з db_4 , 0,1137 для обробки з sum_4 , та 0,1171 для обробки з $soif_2$. Як видно, наявність додаткової гармонічної завади малої амплітуди практично не вплинула на ефективність виокремлення корисного сигналу, відмінності в значеннях середньоквадратичного відхилення апроксимації a_2 та корисного сигналу не перевищують 1 %.

літуди практично не вплинула на ефективність виокремлення корисного сигналу, відмінності в значеннях середньоквадратичного відхилення апроксимації a_2 та корисного сигналу не перевищують 1 %.

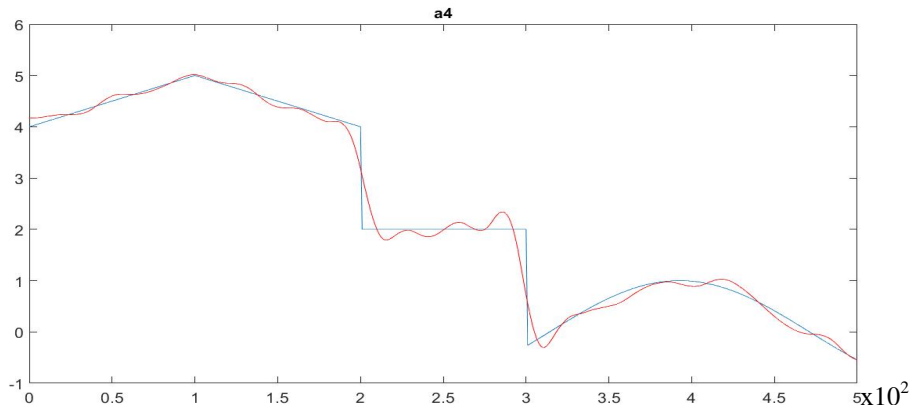


Рис. 6. Результати обробки та виокремлення складного тренду з використанням хвильової функції sum_9

Для обробки сигналу, реалізацію якого наведено на рис. 2, г, та виокремлення складного тренду на фоні гаусівського шуму з $\sigma=0,4$ і гармонічної завади з амплітудою 0,2 (в умовних одиницях) та частотою 20 Гц використано вейвлети дев'ятого порядку db_9 з розкладанням на три рівні, дев'ятого порядку sum_9 з розкладанням на чотири рівні, та п'ятого порядку $soif_5$ з розкладанням на чотири рівні. В результаті проведеної обробки сигналу середньоквадратичне відхилення значень виділеної апроксимації останнього рівня розкладання (a_3 чи a_4) та корисного сигналу для отриманих результатів в умовних одиницях складає 0,1841 для обробки з db_9 , 0,1802 для обробки з sum_9 , та 0,1812 для обробки з $soif_5$. Як і в попередньому випадку, наявність додаткової гармонічної завади малої амплітуди практично не вплинула на ефективність виокремлення корисного сигналу.

Висновки

В статті запропоновано та обґрунтовано використання вейвлетної фільтрації для виокремлення складного тренду з шумоподібного сигналу, що є важливим завданням при створенні систем інтелектуальної підтримки руху об'єктів.

Проведено моделювання та обробку сигналів зі складним трендом (корисним сигналом) та завадами у вигляді гаусівського шуму та високочастотного періодичного сигналу з використанням хвильових функцій Добеші, симлетів та койфлетів різних порядків. У результаті проведених досліджень встановлено, що залежно від характеристик завад, для виокремлення на їх фоні складного тренду достатньо виконати розкладання сигналу на два чи чотири рівні. Всі розглянуті хвильові функції забезпечують прийнятні значення середньоквадратичного відхилення апроксимації останнього рівня розкладання від моделі корисного сигналу, мінімальне значення середньоквадратичного відхилення на всій множині проведених модельних експериментів забезпечує застосування хвильових функцій сімейства симлетів. Встановлено, що наявність додаткової гармонічної завади малої амплітуди практично не впливає на ефективність виокремлення корисного сигналу.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування вейвлет-перетворення для обробки складних локально чи суттєво нестационарних сигналів для різних технічних застосувань, і, зокрема, демонструють можливість створення у подальшому ефективних та швидкодіючих алгоритмів виокремлення складного тренду з шумоподібного сигналу для систем інтелектуальної підтримки руху багатоцільових рухомих об'єктів.

Література

- [1] J. M. Bradley, E. M. Atkins, "Optimization and Control of Cyber-Physical Vehicle Systems", *Sensors* 15, vol. 15, no. 9, pp. 23020-23049, 2015. Doi: 10.3390/s150923020
- [2] K. D. Kim, P. R. Kumar, "Cyber-Physical Systems: A Perspective at the Centennial", *Proc. IEEE*, vol. 100, pp. 1287-1308, 2012. DOI:10.1109/JPROC.2012.2189792
- [3] V. Hahanov, et al., "Cyber Physical System-Smart Cloud Traffic Control", in *East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2014): Proceedings of IEEE Symposium*, Kyiv, Ukraine, pp. 1-18. DOI: 10.1109/EWDTs.2014.7027107

- [4] А. Антонью, *Цифровые фильтры: Анализ и проектирование*. Москва: Радио и связь, 1983.
- [5] А. И. Солонина, *Цифровая обработка сигналов в зеркале Matlab*. СПб: BHV, 2018.
- [6] Л. М. Рижков та А. М. Примушко, "Дослідження комплементарного фільтра на МЕМС-вимірювачах", *Інформаційні системи, механіка та керування*, № 20, с. 47–53, 2019.
- [7] Jin Wu, Zebo Zhou, Hassen Fourati, Rui Li, Ming Liu, "Generalized Linear Quaternion Complementary Filter for Attitude Estimation from Multi-Sensor Observations: An Optimization Approach", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, pp. 1-14, 2019. DOI: 10.1109/TASE.2018.2888908
- [8] Н. И. Бурау, Л. Яцко, Ю. Сопилка та Р. А. Трофименко, "Вейвлетная фильтрация сигналов при измерении частоты вращения", *Авиационно-космическая техника и технология*, № 7/64, с. 191–194, 2009.
- [9] Н. Тулякова, А. Трофимчук та А. Стрижак, "Алгоритмы мириадной фильтрации", *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*, № 4(68), с. 76–83, 2014.
- [10] Н. Тулякова, Р. Лопаткин, А. Трофимчук та А. Стрижак, "Применение локально-адаптивной мириадной фильтрации для комплексной модели одномерного сигнала", *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*, № 3(83), с. 14–25, 2017.
- [11] S. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 11, no. 7, pp. 674-693, 1989. DOI: 10.1109/34.192463
- [12] К. Чуи, *Введение в вейвлеты*. Москва: Мир, 2001.
- [13] Н. К. Смоленцев, *Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB*. Москва: ДМК Пресс, 2009.
- [14] Н. Бурау, Л. Яцко, О. Павловський та Ю. Сопилка, *Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів*. Київ: НАУ, 2012.
- [15] А. Переберин, "О систематизации Вейвлет-преобразований", *Вычислительные методы и программирование*, т. 2, с. 13–40, 2001.
- [16] С. Московский, А. Сергеев та Н. Лалина, "Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет-преобразования", *Universum: Технические науки*, № 2(15), 2015. [Онлайн]. Доступно: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/1958>

UDK 519.246.8:621.372

N. Bouraou, K. Mishura

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
EXTRACTION OF A COMPLEX TREND OF SIGNALS IN SYSTEMS OF INTELLIGENT SUPPORT OF THE MOVEMENT OF OBJECTS

The article is devoted to the study of problems of intellectualization of control systems of moving objects to ensure their reliable operation in difficult conditions in various physical environments. Intelligent traffic support systems are developed based on the integration of measurement, computing, communication and control technologies and are designed to ensure the collection, accumulation and processing of information, determination of navigation parameters, formation of control influences, visualization of the positioning and movement trajectories of objects, monitoring of the functional state of objects and the state of the operating environment, etc. When restoring the lost trajectory of a moving object in the conditions of its complex movement, when approximating complex algorithms in adaptive control systems, with sudden changes in the trajectory or conditions of movement, there is a need to extract a complex trend from noise-like signals. The existing filtering algorithms do not provide acceptable efficiency, especially in conditions of limited a priori information about the nature of changes in the useful signal component.

The article proposes and substantiates the use of wavelet filtering to suppress interference and extract the initial signal of a complex shape. A study of the effectiveness of extracting a complex useful signal against the background of Gaussian noise and harmonic disturbances was conducted. To process the simulated signals, wave functions of various orders from the families of Dobechev, symlets, and coiflets were used. The effectiveness of wavelet filtering was evaluated by the mean square deviation value of the selected trend and the model of the useful signal. The comparative analysis of the obtained results showed the feasibility of using the wave function of the family of symlets, which ensured the minimum value of the root mean square deviation of the selected trend from the model of the useful signal.

Keywords: complex signal trend; interference; wavelet filtering; wavelets; approximations; details

*Надійшла до редакції
20 жовтня 2022 року*

*Рецензовано
25 листопада 2022 року*



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).