

УДК 627.7+004.62

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/35>**Трофименко І.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Іваненко В.М.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Федунов В.М.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Дорофєєва З.Я.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗГЛАДЖУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ ПРИ ОБРОБЦІ НАВІГАЦІЙНИХ ДАНИХ РУХУ СУДНА

Метою роботи є дослідження методів згладжування часових рядів при обробці навігаційних даних руху судна для підвищення рівня ефективності застосування сучасних систем навігації й управління судном. Мета роботи досягається тим, що у сучасних системах навігації й управління судном використовується розповсюджений тип інформаційних даних про протікання процесів плавання, який представляється у вигляді часових рядів різних вимірюваних параметрів. Доведено, що для аналізу часового ряду, що характеризує переміщення судна, одним з найскладніших та найважливіших етапів вважається згладжування випадкової складової часового ряду. Проведений аналіз найпоширеніших методів згладжування часових рядів: простої ковзної середньої, зваженої ковзної середньої, експонентного згладжування та суперпозиції (комбінації) оцінок. Здійснено порівняння результатів згладжування на прикладі вимірів швидкості судна з використанням відповідних методів за реальними даними руху судна. Найбільш значущим результатом роботи є доведення, що у результаті проведеного аналізу змісту методів згладжування та порівняння результатів їх практичного використання всі розглянуті методи згладжування можна застосовувати для обробки (згладжування) інформації про процеси (часові ряди), що характеризуються рівномірними інтервалами вимірів, що встановилися, або дуже повільною мінливістю. Практичне використання отриманих результатів полягає у тому, що проаналізовані методи згладжування можуть застосовуватись при постійному і рівномірному одержанні навігаційної інформації з об'єктів контролю з використанням внутрішньої групи джерел. Якщо при прийманні інформації відбувається пропуск даних, то ряд стає нерівномірним, і розглянуті вище методи не зможуть забезпечити необхідну якість згладжування, що підтверджується результатами порівняльного аналізу. Отже, для рядів з нерівномірними інтервалами вимірів і процесів з мінливими параметрами необхідно застосовувати додаткові процедури їх рівномірної дискретизації або додаткового зважування залежно від значень змінних інтервалів вимірів.

Ключові слова: судно, рух, навігація, метод, часовий ряд, згладжування, порівняльний аналіз, рівномірний інтервал, нерівномірний інтервал.

Постановка проблеми. У сучасних системах навігації й управління судном, зокрема ECDIS, AIS, VDR, використовується новий, але широко розповсюджений у техніці, тип інформаційних даних про протікання процесів плавання, який представляється у вигляді часових рядів різних вимірюваних параметрів [1, 2]. Слід зазначити, що при первинній обробці даних, як окремих навігаційних приладів, так і при комплексуванні за допомогою навігаційного фільтра на їх виходи надходять навігаційні дані, прив'язані до конкретних моментів часу. При накопиченні цієї інформації виходить певна сукуп-

ність числових величин, що характеризують зміну навігаційного параметра за якийсь часовий проміжок. Цю сукупність даних можна представити у вигляді часового ряду [3, 4].

Часовий ряд являє собою набір послідовно впорядкованих у часі числових показників про особливості, що характеризують рівень стану й закономірності протікання досліджуваних процесів або явищ, які прив'язані до послідовних моментів часу. Часовий ряд, що характеризує переміщення судна можна класифікувати як ізольований миттєвий нестационарний часовий ряд абсолютних величин.

Весь процес аналізу часового ряду, що характеризує переміщення судна, можна розбити на такі етапи (рис. 1):



Рис. 1. Структура процесу аналізу часового ряду, що характеризує переміщення судна

- 1) виділення закономірних складових часового ряду (тренду);
- 2) виділення й видалення складових процесу, що різко відрізняються від виявленої закономірності (фільтрація викидів);
- 3) дослідження випадкової складової часового ряду (її згладжування);
- 4) вибір математичної моделі для опису часового ряду й перевірка її адекватності;
- 5) прогнозування майбутнього розвитку процесу, представленого часовим рядом (екстраполяція елементів часового ряду).

При цьому одним з найбільш складних та важливих є третій етап - згладжування випадкової складової часового ряду, який виділений на рисунку. Суть різних прийомів згладжування зводять до заміни фактичних експериментальних даних часового ряду розрахунковими даними, які меншою мірою піддаються коливанням та аномальним значенням. Це сприяє більш чіткому прояву тенденції розвитку процесу.

На теперішній час існують декілька методів згладжування часових рядів. Кожен з них має свої позитивні та негативні властивості. Але питання пріоритетності застосування того або іншого методу при вирішенні конкретного практичного завдання, як правило, залишаються прерогативою особи, яка розробляє конкретний доданок. Тому дослідження та проведення порівняльного аналізу методів згладжування часових рядів за експериментальними траєкторними даними руху судна з метою визначення найбільш ефективного є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідженням проблем застосування часових рядів у різноманітних предметних галузях присвячена велика кількість досліджень, які стосуються як загальнотеоретичних досліджень [1–6], так і прикладних питань [7–9].

Так, у статті [7] запропоновані процедури, які дозволяють визначити коригувальні коефіцієнти для апроксимації кривої зміни виявлених дефектів програмних засобів. Визначено, що при оцінюванні надійності програмних засобів не враховуються вторинні дефекти, які додатково вносяться у процесі тестування та відлагодження. Показаний вплив вторинних дефектів на характеристику надійності програмного забезпечення та якість програмних засобів в цілому. Наголошено на необхідності врахування вторинних дефектів при дослідженні часових рядів, в яких прояв таких дефектів виділяється з усього потоку подій.

В роботі [8] розглянуті підходи до обробки та аналізу даних, отриманих з різноманітних джерел інформації, спрямовані на виявлення відхилень на основі прогностичних моделей. Досліджено алгоритми кореляції. В результаті доведено, що існуючі методи встановлення взаємозв'язків між подіями та даними практично не вирішують проблеми нечіткості та пропуску даних. Для обміну інформацією між джерелами запропоновано модель інформаційного поля, яка враховує, що кожен із об'єктів на морі має певний притаманний йому набір фіксованих атрибутів. Алгоритм перетворення даних реалізований шляхом об'єднання записів у загальні характеристики активності об'єкта. Отримана форма придатна для аналізу відомими методами аналізу інтелектуальних даних. Запропонований метод комплексування інформації на основі класифікації нечітких часових тенденцій дозволяє інтегрувати різні записи однієї активності в єдиний запис.

В статті [9] розглянуто питання суб'єктивності оцінки безпеки та оптимальності спланованого

маршруту при традиційних методах його планування, що не дозволяє повною мірою виконати якісну обробку всієї необхідної інформації. До такої інформації відноситься повноцінне урахування правил плавання, маневрені особливості судна, оцінка швидкісного режиму та його зміна, оцінка впливу гідрометеорологічних умов плавання, планування складних маневрів та забезпечення безпеки плавання суден, особливо крупнотоннажних, у стиснутих водах. Рішення проблеми знаходиться в залежності від функціональних можливостей системи управління та умінь судноводіїв обирати ефективну стратегію організації процесів планування, оптимального маршруту, безпечного маневрування та управління судном, що вимагає побудови автоматизованих систем управління судноводінням та формалізації навігаційної обстановки для побудови відповідних алгоритмів.

Мета статті (постановка завдання). Дослідження методів згладжування часових рядів при обробці навігаційних даних руху судна для підвищення рівня ефективності застосування сучасних систем навігації й управління судном.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для згладжування часових рядів часто використовують такі найпоширеніші методи [1–4] (рис. 2):

- метод простої ковзної середньої (КС);
- метод зваженої ковзної середньої (ЗКС);
- метод експонентного згладжування (ЕЗ);
- методи суперпозиції або комбінації оцінок.

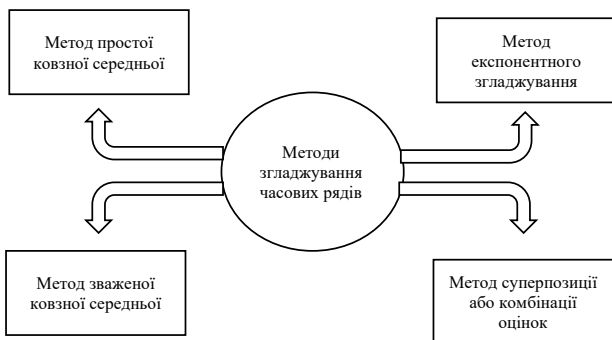


Рис. 2. Найпоширеніші методи згладжування часових рядів

Метод згладжування КС базується на тривіальному припущенні про взаємну компенсацію випадкових відхилень у середніх значеннях вимірів. Він дозволяє виявити наявну тенденцію у розвитку процесу, і тому служить важливим інструментом при фільтрації компонентів часового ряду. При згладжуванні цим методом фактичні значення ряду замінюються середніми значеннями, які характеризують серединну крапку ковзного інтервалу згладжування:

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{j=i-n}^{j=i+n} y_j}{2n+1}, \quad (1)$$

де i – порядковий номер ковзного середнього в часовому ряді;

y_i – значення ковзного середнього даних часового ряду в момент для порядкового номера i ;

y_j – фактичне j -те значення виміру в часовому ряді в інтервалі згладжування;

$2n+1$ – довжина інтервалу згладжування.

Метод є суб'єктивним, і результати згладжування дуже піддані впливу довжини періоду згладжування. Процедура згладжування приводить також до усунення періодичних коливань у часовому ряді при виборі довжини інтервалу згладжування рівною або кратною періоду коливань. Якщо необхідно згладити дрібні коливання, то інтервал згладжування беруть за можливості більшої довжини. При цьому відбуваються значні втрати даних на кінцях інтервалу, який аналізується. Якщо потрібно зберегти більш дрібні коливання значень, то інтервал згладжування зменшують.

Для часових рядів з нелінійною тенденцією розвитку застосовуються інші методи згладжування, зокрема, метод ЗКС. Цей метод відрізняється від методу КС тим, що значення ряду в інтервалі згладжування, входять у суму з різними ваговими коефіцієнтами [1–6]:

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{j=i-n}^{j=i+n} w_j y_j}{\sum_{j=i-n}^{j=i+n} w_j}, \quad (2)$$

де w_j – вагові коефіцієнти значень у ковзному інтервалі згладжування.

В основі методу зваженої ковзної середньої згладжування часового ряду лежить ідея локального наближення тренду поліномом не дуже високого ступеня, параметри якого оцінюються методом найменших квадратів.

Метод ЕЗ застосовується для прогнозування нестационарних часових рядів, що мають випадкові зміни рівня й кута нахилу, і відомий за назвою методу Брауна [6].

Суть методу полягає в тому, що у процедурі знаходження значення згладженого рівня використовуються значення тільки попередніх рівнів ряду, взяті з певною вагою, причому ваговий коефіцієнт сумарного рівня зменшується в міру видалення його від рівня, для якого визначається згладжене значення. Згладжене значення спостереження ряду на теперішній момент часу визначається з рекурентного співвідношення:

$$\hat{y}_i = \alpha y_i + (1-\alpha) \hat{y}_{i-1}, \quad (3)$$

де α – параметр згладжування ($0 < \alpha < 1$);

$(1-\alpha)$ – коефіцієнт дисконтування.

Початкове значення, як правило, приймається рівним першому виміру або середньому з перших трьох значень ряду. Параметр згладжування підбирається, як правило, інтуїтивно, емпіричним шляхом.

Поряд з методами середніх арифметичних і середніх вагових широке використання мають інші оцінки вимірів, як лінійні, так і нелінійні. Вони будуються на методології оцінок даних за трьома вимірами, які також можна використовувати при згладжуванні (методи згладжування на суперпозиції або комбінації оцінок часових рядів навігаційних даних). Методологія оцінок даних за трьома вимірами може мати важливе значення при обмеженому числі вимірів і швидкій зміні параметра.

Так, квазілінійна квадратична оцінка зміщена від середнього арифметичного (1) у бік максимального виміру має такий формальний вигляд:

$$\hat{y}_i = \frac{(y_{i-1}^2 + y_i^2 + y_{i+1}^2)}{(y_{i-1} + y_i + y_{i+1})}. \quad (4)$$

Відповідна оцінка ефективна при грубих похибках, що зменшують одне зі значень виміру (наприклад, коли зникає сигнал).

Інша квазілінійна оцінка при необмеженому зростанні y_{i+1} , на відміну від попередньої, залишається кінцевою, ніколи не перевищуючи рівня $y_{i-1} + y_i$:

$$\hat{y}_i = \frac{(y_{i-1}y_i + y_iy_{i+1} + y_{i-1}y_{i+1})}{(y_{i-1} + y_i + y_{i+1})}. \quad (5)$$

Відповідна оцінка ефективна при зростанні одного зі значень вимірів (похибки високого рівня).

Різницеві квазілінійні оцінки класифікуються за такими принципами:

1) недовіри двом найближчим значенням вимірів:

$$\hat{y}_i = \frac{\frac{y_{i-1}}{|y_{i+1} - y_i|} + \frac{y_i}{|y_{i+1} - y_{i-1}|} + \frac{y_{i+1}}{|y_i - y_{i-1}|}}{\frac{1}{|y_{i+1} - y_i|} + \frac{1}{|y_{i+1} - y_{i-1}|} + \frac{1}{|y_i - y_{i-1}|}}; \quad (6)$$

2) збіг з вибірковою медіаною:

$$\hat{y}_i = \frac{y_{i-1}|y_i - y_{i+1}| + y_i|y_{i-1} - y_{i+1}| + y_{i+1}|y_{i-1} - y_i|}{|y_i - y_{i+1}| + |y_{i-1} - y_{i+1}| + |y_{i-1} - y_i|}, \quad (7)$$

3) довіри двом найближчим значенням вимірів:

$$\hat{y}_i = \frac{y_{i-1}(y_i - y_{i+1})^2 + y_i(y_{i-1} - y_{i+1})^2 + y_{i+1}(y_{i-1} - y_i)^2}{(y_i - y_{i+1})^2 + (y_{i-1} - y_{i+1})^2 + (y_{i-1} - y_i)^2}. \quad (8)$$

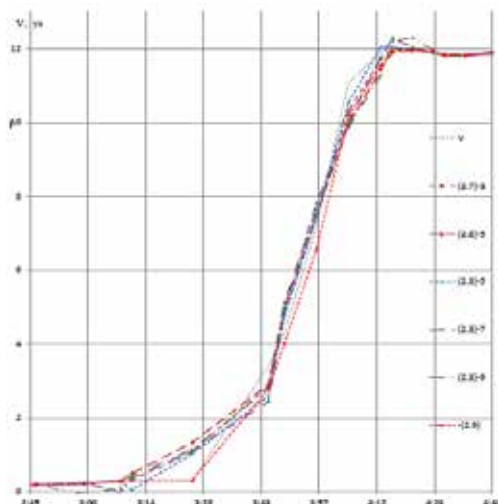
Згладжування за виразом (6) пов'язане з обчислювальними труднощами, тому що при рівних сусідніх значеннях вимірів має місце ділення на нуль:

$$\hat{x}_i = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{3}(x_{i-1} + x_i + x_{i+1}) + \sqrt[3]{(x_{i-1}x_ix_{i+1})} + 3 \left(\frac{1}{x_{i-1}} + \frac{1}{x_i} + \frac{1}{x_{i+1}} \right)^{-1} + \sqrt[3]{(x_{i-1}^2 + x_i^2 + x_{i+1}^2)} \right]$$

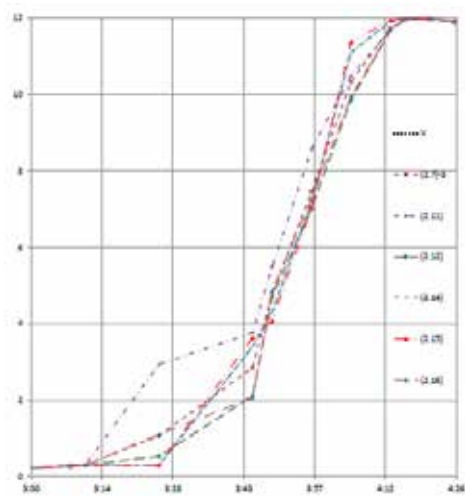
Порівняння результатів згладжування на прикладі вимірів швидкості судна з використанням методів КС, ЗКС та ЕЗ за реальними даними руху судна [10], відповідно до виразів (1-5), наведено на рис. 3, а (у дужках зазначені номери формул, а через тире інтервал згладжування в кількості вимірів).

Порівняльні результати згладжування вимірів швидкості судна квазілінійними методами відповідно до виразів (6-9), що представляють комбінації лінійних оцінок, наведено на рис. 3, б. Для порівняння на рис. 3, б наведені дані згладжування найкращим ваговим ковзним середнім (див. рисунок 3, а).

На лінійних ділянках змін швидкості дані її згладжування всіма методами дають гарні результати й практично збігаються.



а) з використанням методів КС, ЗКС та ЕЗ



б) з використанням методів суперпозиції або комбінації оцінок

Рис. 3. Результати згладжування вимірів швидкості судна з використанням різних методів

На нелінійних ділянках змін швидкості дані згладжування виходять кращими при малих інтервалах згладжування.

Наведені результати згладжування вимірів швидкості судна квазілінійними методами в цілому підтверджують зазначене призначення квазілінійних методів щодо компенсації похибок наведених формул. Серед них найкращі результати згладжування дають різниці квазілінійні методи із середніми квадратичними відхиленнями 0,1.

Висновки. Усі розглянуті в статті методи згладжування призначені для рядів з рівномірними інтервалами вимірів, їх можна застосовувати для згладжування, що встановилися, або для повільно

мінливих процесів. Проаналізовані методи згладжування можуть застосовуватись при постійному і рівномірному одержанні навігаційної інформації з об'єктів контролю з використанням внутрішньої групи джерел. Якщо при прийманні інформації відбувається пропуск даних, то ряд стає нерівномірним, і розглянуті вище методи не забезпечують необхідної якості згладжування, що підтверджується результатами порівняльного аналізу.

Отже, для рядів з нерівномірними інтервалами вимірів і процесів з мінливими параметрами необхідно застосовувати додаткові процедури їх рівномірної дискретизації або додаткового зважування залежно від значень змінних інтервалів вимірів.

Список літератури:

1. Hamilton, J. D. (1994). Time series analysis (Vol. 2, pp. 690-696). Princeton, NJ: Princeton university press.
2. Wei, W. W. (2006). Time series analysis. In The Oxford Handbook of Quantitative Methods in Psychology: Vol. 2.
3. Cryer, J. D., & Chan, K. S. (2008). Time series analysis. With applications in R. Springer.
4. Fuller, W. A. (2009). Introduction to statistical time series (Vol. 428). John Wiley & Sons.
5. Chatfield, C. (2000). Time-series forecasting. Chapman and Hall/CRC. URL: <https://doi.org/10.1201/9781420036206>
6. Taylor, S.J. (2008). Modelling Financial Time Series, 2nd edn. World Scientific Publishing Company. Vilder, de R.G. and Visser, M.P.
7. Rudenko O., Shefer O., Ponochovniy Y. Алгоритм визначення кількості вторинних дефектів програмних засобів шляхом коригування коефіцієнтів апроксимуючого полінома другого ступеня. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2021. Т. 1 (63). С. 107-110. URL: [doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.107](https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.107).
8. Левченко О. В. Метод формалізації комплексування інформації при моніторингу навігаційної обстановки у системі е-Навігації. URL: https://www.researchgate.net/publication/362528551_Metod_formalizacii_kompleksuvanna_informacii_pri_monitoringu_navigacijnoi_obstanovki_u_sistemi_e-Navigacii. (дата звернення: 11.01.2023)
9. Горалік С.Т., Шапіро Г.В. Моделі та метод формалізації навігаційної обстановки для автоматизації процесів судноводіння. URL: https://www.researchgate.net/publication/361361752_MODELI_TA_METOD_FORMALIZACII_NAVIGACIJOI_OBSTANOVKI_DLA_AVTOMATIZACII_PROCESIV_SUDNOVODINNA (дата звернення: 17.01.2023)
10. Система відстеження переміщення суден онлайн. URL: <https://www.marinetraffic.com/> (дата звернення: 10.01.2023)

Trofymenko I.V., Ivanenko V.M., Fedunov V.M., Dorofieieva Z.Ia. STUDY OF TIME SERIES SMOOTHING METHODS FOR PROCESSING SHIP NAVIGATION DATA

The aim of the work is to study the methods of smoothing time series when processing navigation data of ship motion to increase the efficiency of modern navigation and ship control systems. The aim of the work is achieved by the fact that modern navigation and ship control systems use a common type of information data on the course of navigation processes, which is represented in the form of time series of various measured parameters. It is proved that for the analysis of a time series characterizing the movement of a ship, one of the most difficult and important stages is the smoothing of the random component of the time series. The most common methods for smoothing time series are analysed: simple moving average, weighted moving average, exponential smoothing, and superposition (combination) of estimates. The results of smoothing are compared on the example of ship speed measurements using the corresponding methods based on real ship motion data. The most significant result of the work is the proof that, as a result of the analysis of the content of smoothing methods and comparison of the results of their practical use, all the considered smoothing methods can be used to process (smooth) information about processes (time series) characterized by uniform measurement intervals that have been established or very slow variability. The practical application of the results obtained

is that the analysed smoothing methods can be used in the case of constant and uniform receipt of navigation information from the objects of control using an internal group of sources. If there is a data gap when receiving information, the series becomes uneven, and the methods discussed above will not be able to provide the required quality of smoothing, which is confirmed by the results of the comparative analysis. Therefore, for series with uneven measurement intervals and processes with changing parameters, it is necessary to apply additional procedures for their uniform sampling or additional weighting depending on the values of the variable measurement intervals.

Key words: *ship, movement, navigation, method, time series, smoothing, comparative analysis, uniform interval, uneven interval.*