

УДК 621.391

П.Ю. Костенко, В.В. Слободянюк, О.О. Акімов, Н.Д. Потапова

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗМНОЖЕННЯ ДАНИХ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ФІЛЬТРАЦІЇ ШУМУ В СПОСТЕРЕЖЕННІ СИГНАЛУ

У статті розглядається новий підхід до формування псевдовибірок спостереження з попереднім використанням лінійних перетворень різноманітних пар його елементів. Даний підхід застосовано при вирішенні задачі фільтрації сигналу, який спотворений адитивним білим шумом, за допомогою технології сурогатних даних. Дана оцінка середньоквадратичної помилки фільтрації.

Ключові слова: бутстреп, ATS- алгоритм, напівсума, псевдовибірка, сигнал, шум, похибка фільтрації.

Вступ

Відомо, що ефективність використання класичних методів зростає в міру збільшення апріорної інформації про отримані дані (вимірюваному процесі або часовому ряду) і їх обсягу. У практичних додатках не рідкі випадки, коли одержати великий обсяг вимірювань (спостережень) не представляється можливим. Особливо це проявляється при обробці результатів вимірювань, які представлені єдиною реалізацією вимірюваного процесу або часового ряду.

Тому, увагу фахівців з обробки сигналів в умовах дефіциту вимірювальної інформації привертають нетрадиційні методи математичної статистики, які засновані на методах розмноження даних [1–4]. Ідея цих методів полягає в тому, щоб з однієї вибірки спостережень зробити багато псевдовибірок і їх використовувати для підвищення ефективності статистичної обробки сигналів в умовах не тільки дефіциту вимірювальної, але й апріорної інформації про сигнально-завадову обстановку. Можливість реалізації ідеї розмноження вибірки, яка була відома досить давно, з'явилася у зв'язку зі стрімко зростаючою продуктивністю обчислювальних засобів і припускає інтенсивне використання комп'ютерів.

До важливих інструментів розмноження вибірок можна віднести бутстреп (bootstrap) методи, добре описані в роботах [3; 5] і ATS-алгоритм, що реалізує технологію сурогатних даних, який можна інтерпретувати, як реалізацію ковзаючого блочного бутстрепа в псевдофазовому просторі.

Ці методи, у випадку малих вибірок, приводять до зсувів статистик, обчислених від розмножених вибірок, і до їхньої кореляції через неминучі збіги елементів у розмножених вибірках.

Істотною умовою використання bootstrap-методу і його модифікацій є стаціонарність випадкової вибірки (часового ряду) тобто її статистичні характеристики (дисперсія й математичне очікування) є постійними. При вирішенні прикладних завдань обробки спостереження сигналу в присутності

адитивного стаціонарного шуму ця умова не виконується.

У той же час відомі застосування технології сурогатних даних, реалізовані з використанням ATS-алгоритму, для обробки нестационарних по математичному очікуванню випадкових спостережень [6–7]. У неформальному викладі ATS-алгоритм зводиться до наступних дій. Виконується занурення часової послідовності в псевдофазовий простір. Для цього блоки послідовних векторів представляються точками в псевдофазовому просторі (образами часової послідовності), розмірність якого дорівнює довжині блоку. У результаті виходить безліч упорядкованих точок з номерами відповідними до номерів блоків векторів. Потім послідовно кожену точку, відповідно до її порядку, оточують околицею радіуса ε й випадковим чином вибирають із цієї околиці іншу точку, що потрапила в неї, якої привласнюють номер точки розташованої в центрі околиці. Ці дії повторюються для кожної наступної точки псевдофазового простору. Таким чином, одержуємо переупорядковану безліч точок у псевдофазовому просторі, який можна вважати сурогатною безліччю ковзаючих блоків. Зберігаючи, наприклад, тільки першу компоненту у кожному із цих блоків одержуємо сурогатну реалізацію вихідної часової послідовності. Для одержання N_c сурогатних реалізацій необхідно повторити всі кроки починаючи з випадкового вибору точок з околиць точок вихідної безлічі.

Розмножена вибірка вихідного спостереження дозволяє одержати ансамбль сурогатних часових рядів, який використовується для розрахунків математичного очікування безлічі його елементів (сурогатних часових рядів). У цьому випадку можна говорити про оцінку сигналу (математичного очікування спостереження), з методичною помилкою, яку називають сурогатним шумом. Використовувати методи розмноження даних для виділення сигналу на фоні шуму доцільно, коли внесок у помилку оцінки сигналу від шуму спостереження більше чому від сурогатного шуму.

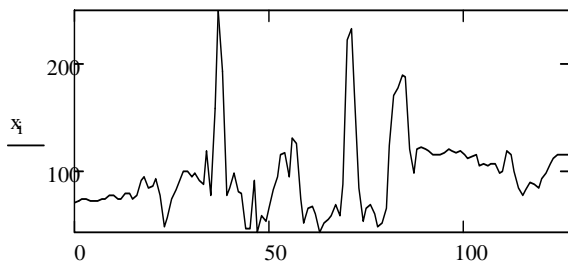
Недоліком розглянутих методів розмноження вибірки можна вважати, відсутність у псевдовибірках нових значень генеральної сукупності з якої отримано вихідне спостереження. Якщо в псевдовибірках багато повторюваних значень, то використання для оцінки сигналу розглянутих методів розмноження спостережень може виявитися мало ефективним, тому що в околиці покриття ϵ може виявитися мало точок із псевдофазового простору, що збіднює ансамбль сурогатних спостережень (псевдовибірок) і погіршує оцінку їх математичного очікування (сигналу).

Метою роботи є збільшення ансамблю псевдовибірок для вирішення задачі фільтрації сигналу та усунення недоліків відомих методів розмноження даних.

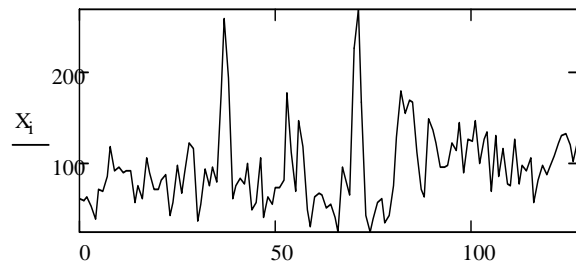
Виклад основного матеріалу

Розглянемо можливість збільшення ансамблю псевдовибірок за рахунок формування з вихідного спостереження $\{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$ напівсум

$$\left\{ y_k = \frac{x_i + x_j}{2} \right\}_{k=1}^{\frac{N(N-1)}{2}} \text{ його значень.}$$



а



б

Рис. 1. Реалізації сигналу
а – спостереження без шуму; б – спостереження з шумом

Кореляційна функція R_j послідовності $\{y_k\}_{k=1}^K$ ($K=8128$), отриманої зі спостережень $\{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$ ($N=128$) та попереднім її розмноженням показана на рис. 2. Ефективна довжина вибірки $\{y_k\}_{k=1}^K$,

яка отримана перемноженням середнього значення автокореляційної функції R_j вибірки $\{y_k\}_{k=1}^K$ на її довжину $K=8128$ дорівнює $\tilde{N} = 249$, які можна вважати додатковими спостереженнями.

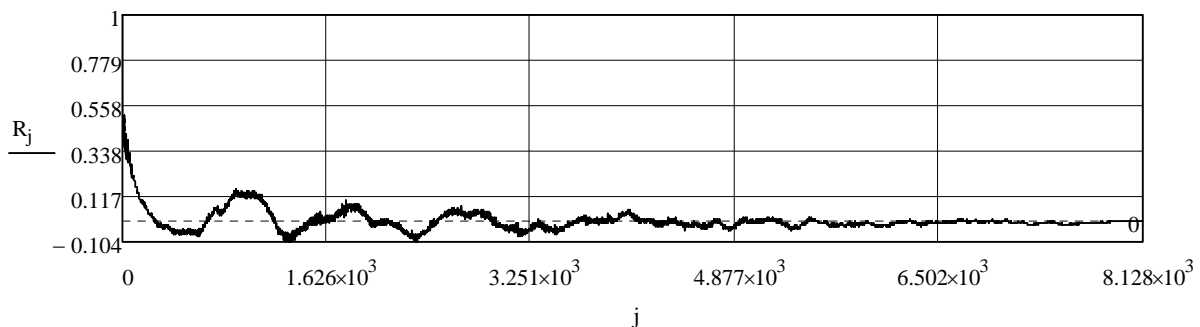


Рис. 2. Кореляційна функція послідовності отриманої зі спостереження та попереднім її розмноженням

Результати фільтрації сигналу із застосуванням алгоритму ATS і алгоритму ATS+, який використовує попереднє розмноження даних спостереження,

для покриттів ε , що забезпечують мінімум середньоквадратичної похибки (СКП) фільтрації показані на рис. 3.

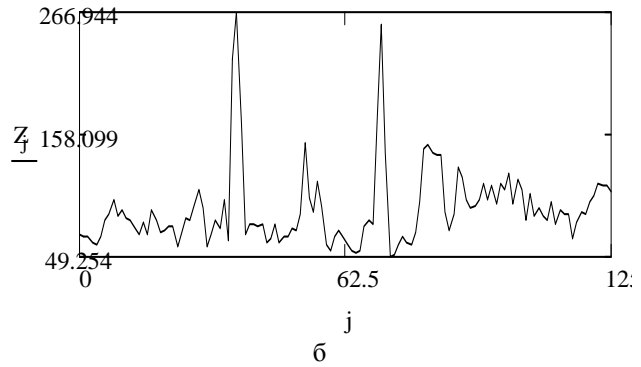
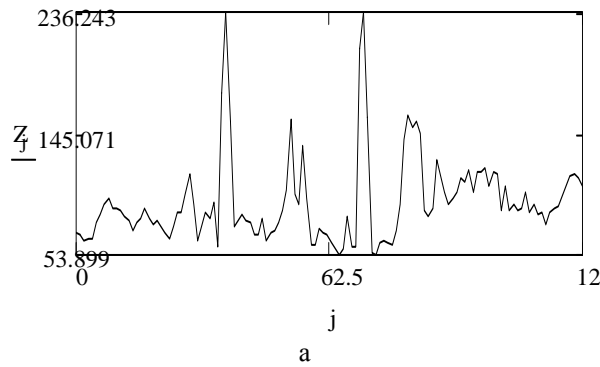


Рис. 3. Результати фільтрації сигналу із застосуванням алгоритму ATS і алгоритму ATS+
 а – Результат фільтрації спостереження алгоритмом ATS+;
 б – Результат фільтрації спостереження алгоритмом ATS

При моделюванні алгоритму були задані наступні значення параметрів: розмірність вкладення $m=3$; радіус покриття ε змінювався в інтервалі від 2,5 до 70 із кроком 2,5 при рівні гаусівського шуму

$\sigma=20$. Залежність СКП фільтрованого сигналу та його похідної від параметра ε показана на рис. 4. та рис. 5.

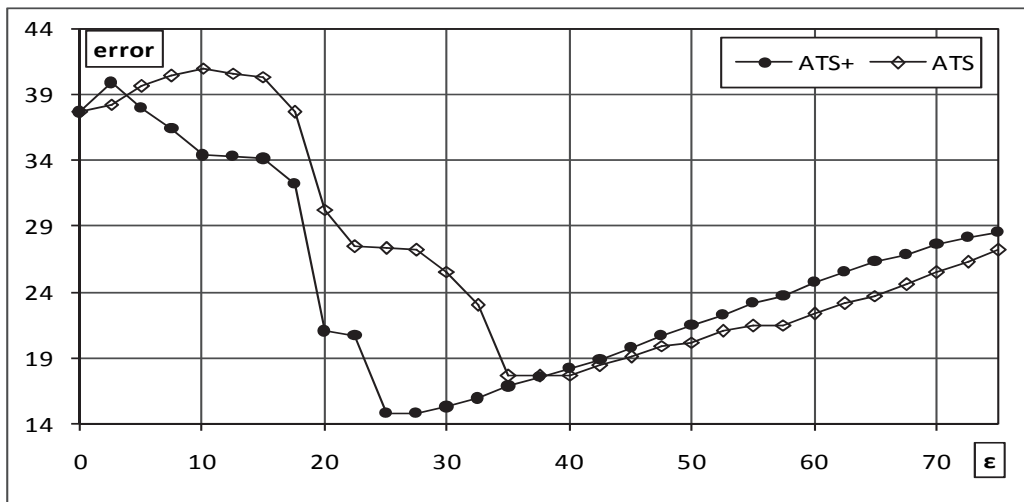


Рис. 4. Залежність СКП фільтрації сигналу від параметра ε

Легко помітити, що мінімальне значення СКП фільтрації сигналу для алгоритму ATS досягається при значенні параметра ε , рівного значенню оцінки середньоквадратичного відхилення $\sigma_d = 32,2$ розподілу відстаней між усіма парами точок у псевдофазовому просторі, для алгоритму ATS+ при $\sigma_d = 28,2$.

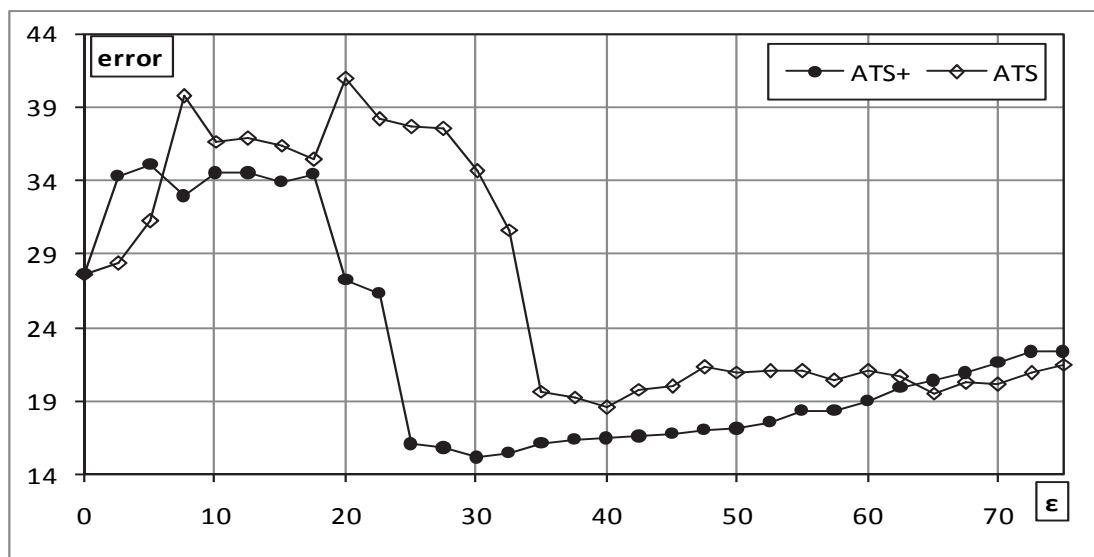
СКП похідної результату фільтрації сигналу дозволяє визначити якість алгоритмів зберігати ознаки сигналу, які пов'язані з наявністю розладки по математичному очікуванні нестационарного сигналу що фільтрується. Якісно залежність цієї похибки повторює тенденції СКП фільтрації сигналу, що дозволяє вважати доцільним використовувати алгоритм ATS+.

Висновки

Таким чином алгоритм ATS+ має меншу похибку фільтрації, ніж алгоритм ATS, яка досягається для меншого значення покриття ε . Є підстави вважати, що в цьому випадку, у покриття попадає максимально можливе число точок у розумінні ефективної довжини \tilde{N} послідовності $\{y_k\}_{k=1}^K$.

Список літератури

1. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа / Б. Эфрон: пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 263 с.
2. Good P.I. Resampling methods: a practical guide to data analysis / P.I. Good. – Boston: Birkhauser. – 1999. – 269 p.

Рис. 5. Залежність СКП фільтрації сигналу від параметра ϵ

3. Politis D.N. and Romano, J.P. (1994). The stationary bootstrap. *Journal of American Statistical Association*, 89, 1303-1313.

4. Theiler J. Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data / J.S. Theiler, S. Eubank, A. Longtin, B. Galdrikian, J.D. Farmer // *Physica D* 58.

5. Small M. *Applied Nonlinear Time Series Analysis Applications in Physics, Physiology and Finance* / M. Small. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005.

6. Костенко П.Ю. Метод фільтрації зображень з використанням сингулярного розкладання і технології суррогатних даних / П.Ю. Костенко, В.В. Слободянюк, А.В. Плахотенко // *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. – К., 2016. – Т. 59, № 9. – С. 36-45.

7. Костенко П.Ю. Коррекция обработки сигналов при их спектральном анализе с использованием суррогатных автоковариационных функций наблюдения, полученных ATS-алгоритмом / П.Ю. Костенко, В.И. Васишин // *Известия вузов. Радиоэлектроника*. – 2014. – Т. 57, № 6. – С. 3-12.

Надійшла до редколегії 4.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук доц. В.І. Васишин, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАЗМНОЖЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМА В НАБЛЮДЕНИИ СИГНАЛА

П.Ю. Костенко, В.В. Слободянюк, О.О. Акимов, Н.Д. Потапова

В статье рассматривается новый подход к формированию псевдовыборок наблюдения с предыдущим использованием линейных преобразований различных пар его элементов. Данный подход применен при решении задачи фильтрации сигнала, искаженный аддитивным белым шумом, с помощью технологии суррогатных данных. Дана оценка среднеквадратичной ошибки фильтрации.

Ключевые слова: бутстрап ATS- алгоритм, полусумма, псевдовыборка, сигнал, шум, ошибка фильтрации.

DEVELOPMENT OF METHODS REPRODUCTION OF DATA FOR SOLVING THE PROBLEM OF NOISE FILTRATION IN OBSERVED SIGNAL

P. Kostenko, V. Slobodyanuk, O. Akimov, N. Potapova

The article considers a new approach to the formation of pseudosample of the observation with the previous use of linear transformations of various pairs of its elements. This approach is applied in solving the problem of filtering the signal, distorted by additive white noise, using the technology of surrogate data. The estimation of the root-mean-square filtering error is given.

Keywords: bootstrap, ATS algorithm, half-sum, pseudosample, signal, noise, filtering error.