

ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРАЦІЯ КУТОВИХ МЕТОДІВ МАНІПУЛЯЦІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ГОЛОВНИХ КОМПОНЕНТ

У роботі описано багатомірне розширення загальновідомого методу вейвлет-фільтрації (трейшхолдингу) та його адаптація до задачі фільтрації сигналів із кутовою маніпуляцією.

Дана пропозиція посідає місце серед різноманіття сучасних підходів поєднання стратегій вейвлет обробки та інструментів аналізу даних, для вирішення проблеми вичленення ознак сигналу в регресійних моделях.

Багатомірне розширення методу вейвлет-фільтрації, за рахунок комбінування прямого багатоканального узагальнення класичного аналізу для скалярних сигналів разом із методом головних компонент, дозволяє проводити обробку даних із наявним просторово-корельованим шумом.

Зважаючи, на властивість символів трансльованого сигналу та їх вейвлет-перетворення до комутації, доречно використати її для виділення корисної складової. Так, коваріаційна матриця трансльованого сигналу (та шуму) містить зв'язок між інформаційними компонентами. Інтерпретація одноканальної символної послідовності у вигляді багатоканального сигналу дозволила використати запропонований метод обробки.

У порівнянні із класичною стратегією вейвлет обробки, кроки 2-4 є нововведеними та мають на меті використати зв'язок між інформаційними компонентами трансльованих символів. Таким чином, енергія сигналу в основному сконцентрована в декількох великих вейвлет-коефіцієнтах адаптивно обраних на основі вейвлет-трейшхолдингу, оскільки коефіцієнти нижче порогового рівня можуть бути віднесені до адитивного шуму. Дійсно, вирішальною особливістю при зміні базису є об'єднання всіх базисних функцій в кожному символі, вводячи таким чином певну надлишковість, що веде до кращої оцінки основних ознак (як екстремуми або сингулярності) зашумлених символів, які у свою чергу, визначаються типом модуляції.

Метод демонструє перспективне застосування у випадку цифрових методів кутової модуляції, а їх відповідна оцінка дозволяє підвищити завадостійкість системи. Наведено приклад реалізації роботи методу застосовно до систем рухомого зв'язку.

В обраному прикладі систем широкого застосування набули різновиди кутової модуляції як FSK, QPSK, QAM. Останні дозволяють забезпечити найбільшу розрядність досягаючи на практиці кількості точок сузір'я - 64, таким чином збільшуючи кількість переданої інформації. Зважаючи на що, наведено роботу методу на прикладі QAM сигналів із згладженого фільтром припіднятого косинуса.

Подальшими напрямками досліджень є вибір параметрів фільтрації. До них можна віднести формування стратегії трейшхолдингу для фільтрації вейвлет-коефіцієнтів; максимальний рівень вейвлет-розкладу. Крім того, розширення роботи методу для роботи із бібліотекою базисних функцій, щоб обрати найкраще представлення сигналу щодо функції із заданою ентропією.

Ключові слова: вейвлет, фільтрація, трейшхолдинг, метод головних компонент, квадратурна модуляція.

Постановка проблеми. З одного боку, методики фільтрації, що базуються на вейвлет-декомпозиції, є популярним способом виділення та фільтрації одномірних статистичних сигналів. З іншого боку, метод головних компонент (МГК) є одним з найвідоміших інструментів аналізу даних, розроблений для спрощення багатоканальних даних за рахунок відстежування нових інформативних складових, тим самим захоплюючи основні ознаки сигналу.

Запропоноване у роботі [1] багатомірне розширення методу вейвлет-фільтрації, за рахунок комбінування прямого багатоканального узагальнення класичного аналізу для скалярних сигналів разом із методом головних компонент, дозволяє проводити обробку

багатоканальних даних. Відзначимо деякі типові приклади таких сигналів: дані приймачів МІМО або МІСО систем [2]; багатоканальні радіосигнали трансльовані з одного супутника [3]; сигнали із фазованої антенної решітки [2].

Дана пропозиція посідає місце серед різноманіття сучасних підходів поєднання стратегії вейвлет обробки та інструментів аналізу даних, для вирішення проблеми вичленення ознак сигналу в регресійних моделях. Так, багатомірні сигнали можна представити регресійною моделлю виду

$$R(t) = S(t) + N(t), \quad k=1, \dots, K. \quad (1)$$

де $(R(t))_{1 \leq k \leq K}$ – реалізація сигналу розмірності K ;

$(N(t))_{1 \leq k \leq K}$ – центрований білий Гаусовий шум із дисперсією σ^2 ;

$S(t)$ – корисний сигнал, що підлягає відновленню з отриманої реалізації.

Наведена модель добре описує ситуації, в яких наявність просторово-корельованого шуму відповідає дійсності. Разом із тим, шумова складова N добре проявляє просторову кореляцію в рухомих системах, таких як стільникові та транкінгові. Методики часового та частотного розподілу (TDMA і FDMA), що застосовуються в даних системах, вимагають використання одноканальних сигналів, тобто $K=1$. В системах рухомого зв'язку, для боротьби із шумом вдаються до застосування еквалайзерів [3] (завади породжені впливом місцевості), високочастотних фільтрів та цифрових видів модуляції [3] (завади породжені впливом рухомих об'єктів). Давайте більш детально розглянемо приклад сигналу що поширюється в таких системах при $K=1$, для ілюстрації поведінки запропонованого методу.

Виявлення та обробка інформаційних складових. Враховуючи вплив просторово-корельованого шуму, застосуємо модель (1) інтерпретуючи одноканальний маніпульований сигнал як:

$$(S(t))_{k=1, t \in (0, \tau K]} = (S_\tau(t))_{1 \leq k \leq K, t \in (0, \tau]}, \quad (2)$$

де τ – тривалість символу.

Аналогічно для реалізації сигналу і шуму. Таким чином $R_\tau(t)$, $S_\tau(t)$, $N_\tau(t)$ мають розмірність $1 \times K$, де коваріаційна матриця шуму $E(N_\tau(t)^T N_\tau(t)) = \Sigma_N$. Перепишемо вираз (1) як

$$R_\tau^k(t) = S_\tau^k(t) + N_\tau^k(t), \quad t \in (0, \tau], \quad 1 \leq k \leq K, \quad (3)$$

де S_τ^k належить до певного функціонального простору (зазвичай L^2).

Коваріаційна матриця C_N захоплює стохастичний зв'язок між компонентами трансльованих символів $R_\tau(t)$ і моделями просторової кореляції.

Звичайно, можна фільтрувати кожен компонент $R(t)$, ігноруючи просторову кореляційну структуру шумової складової, наприклад при прямому вейвлет-перетворенні. В подальшому цей метод береться в якості зразкового. Разом із тим, існують різні ефективні стратегії [2] для проведення вейвлет-фільтрації, оскільки функція S , що приймає різні значення символів, допускає розріджене вейвлет-представлення [4]. Таким чином, енергія S в основному сконцентрована в декількох великих вейвлет-коефіцієнтах адаптивно обраних на основі вейвлет-трешхолдингу, оскільки коефіцієнти нижче порогового рівня можуть бути віднесені до адитивного шуму.

Для даного ортогонального вейвлет базису, що визначається як $((\phi_{A,b})_{b \in \mathbb{Z}}, (\psi_{a,b})_{1 \leq a \leq A, b \in \mathbb{Z}})$,

де ψ – вейвлет функція; ϕ – скейлінг функція цього вейвлету; A – певним чином обраний рівень декомпозиції, де в свою чергу $g_{a,b}(t) = 2^{-a/2} g(2^{-a}t - b)$ – функція вейвлет-фільтрації [1].

Очевидно, оскільки символи трансльованого сигналу R та їх вейвлет-перетворення комутують, доречно використати цю властивість для виділення корисної складової. Так, коваріаційна матриця трансльованого сигналу C_R , аналогічно до C_N , містить зв'язок між інформаційними компонентами сигналу.

Модифікована процедура представленої у роботі [5] багатоканальної фільтрації із використанням методу головних компонент (МГК) складається з кроків, починаючи з $L \times K$ матриці R , що містить K сигналів (стовпці R) діагичної довжини L , такої що $L \gg K$.

1. Виконати вейвлет-декомпозицію на рівні A для кожного стовпця R . Цей крок виробляє $A+1$ матрицю D_1, \dots, D_A , що містять коефіцієнти деталізації на рівнях від 1 по A від K сигналів і коефіцієнти апроксимації P_A від K сигналів. Матриці D_a і P_A , відповідно, розмірностей $L2^a \times K$ і $L2^A \times K$;

2. Визначити \hat{C} оцінку матриці коваріації, як $\hat{C} = MK(D_1)$, а потім визначити сингулярне представлення матриці (СПМ) \hat{C} визначивши ортогональну матрицю V такою що $\hat{C} = V\Lambda V^T$, де $\Lambda = \text{diag}(\lambda_k, 1 \leq k \leq K)$;

3. Застосувати оцінку \hat{C} до коефіцієнтів деталізації після зміни базису за допомогою V (а саме $D_a V, 1 \leq a \leq A$), використовуючи K одномірних трешхолдинг стратегій із заданим пороговим значенням, наприклад $h_k = \sqrt{2\lambda_k \log(L)}$, для k -го стовпця матриці $D_a V$;

4. Розкласти матрицю P_A за МГК і обрати відповідну кількість $a+1$ інформативних основних компонент;

5. Перебудувати відфільтровану матрицю R_2 (або, що еквівалентно оцінці S_2 від S), зі спрощених матриць деталізації та апроксимації, шляхом зміни базису за рахунок використання V^T із подальшим зворотним вейвлет-перетворенням.

Виявляється, приведене узагальнення одноканальної фільтрації еквівалентно зміні базису для декореляції K компонент шуму; рівно як вейвлет-фільтрації кожного рівня декомпозиції. Використовуючи ортогональну матрицю V , визначену в 2-му кроці, виконаємо заміну базису у моделі (1) визначаючи $R_2(t) = R(t)V$, аналогічно $S_2(t)$ і $N_2(t)$. Реалізація сигналу включає в себе шум з k слабкокорельованими компонентами, коли оцінка \hat{C}_N приймає відповідне значення C_N . Тому достатньо фільтрації кожного компонента і зміни базису за допомогою V^T , щоб повернутися до початкового базису.

Як відзначається в [1], додаткове використання МГК фільтрації дозволяє підвищити завадостійкість, ніж при прямому розкладі, де виконується вейвлет-фільтрація кожного компонента ігноруючи кореляційну структуру. Дійсно, вирішальною особливістю при зміні базису є об'єднання всіх базисних функції в кожному S_2^k вводячи таким чином свого роду надлишковість, що веде до кращої оцінки основних ознак (як екстремуми або сингулярності) переданих символів S_k , який у свою чергу, визначається типом модуляції.

Фільтрація одноканальних QAM сигналів. В обраному прикладі систем рухомого зв'язку широкого застосування набули різновиди кутової модуляції [3], як FSK, QPSK, QAM. Останні дозволяють забезпечити найбільшу розрядність досягаючи на практиці кількості точок сузір'я - 64, таким чином збільшуючи кількість переданої інформації. Розглянемо роботу методу на прикладі 4-QAM сигналів із згладженого фільтром припіднятого косинуса. Приклад QAM сигналів $R(t)$ і $S(t)$ та його вейвлет-декомпозиція, для трьох випадкових символів, приведені на рисунку 1 а-в. Декомпозиція проведена з використанням біортогонального вейвлету 2.4, а також біортогонального 3.1 на рис. 1 г-е.

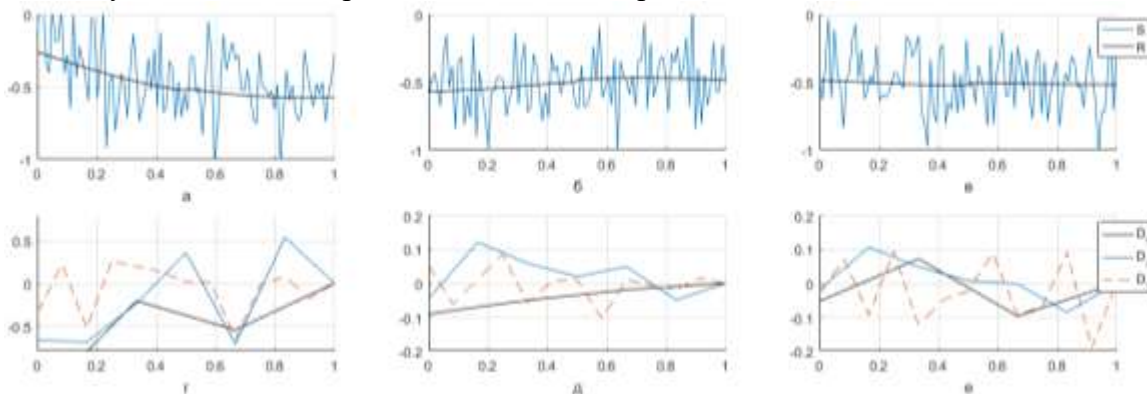


Рис. 1. 4QAM сигнал та його вейвлет-декомпозиція вейвлетом біор 2.4 для SNR=1

Оскільки проведення фільтрації коефіцієнтів вейвлет декомпозиції методом головних компонент потребує формування багатоканального базису, слід визначити його зі змінної $R(t)$, враховуючи просторову кореляцію шуму. На рис. 2 представлено графіки головних компонент, з першої по третю (а-в відповідно), для базису на основі 100 символів, на рівнях декомпозиції 4-5.

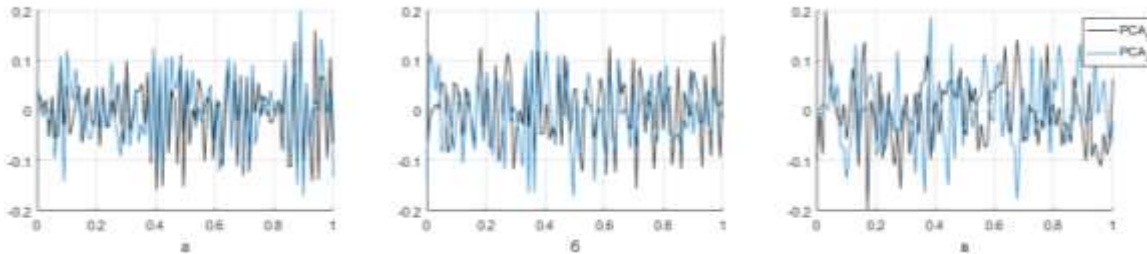


Рис. 2. Головні компоненти сформованого багатоканального базису

Як видно з рисунків, рівні декомпозиції та головні компоненти мають добре виділену кореляційну структуру. Запропонований метод дозволяє краще проводити виявляти та відсікати складові шуму, а отже підвищити завадостійкість системи. Розрахункові криві на рисунку 3, для 4-QAM сигналу, підтверджують висунуте твердження.



Рис. 3. Завадостійкість 4-QAM сигналу для вейвлетів bior2.4 і bior3.1

Завадостійкість методу, з використанням вейвлету bior3.1 дозволяє отримати значення 10^{-4} на $5 E_b/N_0$ раніше. Разом із тим, для вейвлету bior2.4, отримано менше значення. Так очевидним є вплив материнського вейвлету на результат фільтрації.

Висновки. Було запропоновано адаптацію методу багатоканальної фільтрації, що поєднує вейвлет аналіз і метод головних компонент. Метод бере до уваги кореляційну структуру шуму, таким чином дозволяє збільшити завадостійкість систем із цифровими методами модуляції сигналів, про що свідчать отримані результати моделювання.

Подальшими напрямками досліджень є вибір параметрів фільтрації. До них можна віднести формування стратегії трешхолдингу для фільтрації вейвлет-коефіцієнтів; максимальний рівень вейвлет-розкладу. Крім того розширення роботи методу для роботи із бібліотекою базисних функцій, щоб обрати найкраще представлення сигналу щодо функції із заданою ентропією.

REFERENCES:

1. Aminghafari, M.; Cheze, N.; Poggi, J-M. (2006), "Multivariate de-noising using wavelets and principal component analysis," Computational Statistics & Data Analysis, 50, pp. 2381–2398.
2. Li J., Stoica P.; "MIMO Radar Signal Processing", John Wiley & Sons, Inc., 2009
3. Penttinen J. The telecommunications handbook. Engineering guidelines for fixed, mobile and

satellite systems // John Wiley & Sons, Ltd., 2015. – 956 p.

4. Kerkyacharian, G., Picard, D., 2000. Thresholding algorithms, maxisets and well-concentrated bases. Test 9 (2), 183–244

5. Bakshi, B., 1998. Multiscale PCA with application to MSPC monitoring. AIChE J. 44, 1596–1610.

Рецензент: д.т.н., проф. Шинкарук О.М., ректор Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, академік Академії наук прикладної радіоелектроніки, заслужений працівник освіти України

к.т.н., доц. Чесановский И.И., Волюнец Д.О., Левчунец Д.О.
**ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИЯ УГЛОВЫХ МЕТОДОВ МАНИПУЛЯЦИИ С
ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ**

В работе описано многомерное расширение общеизвестного метода вейвлет-фильтрации (трейшолдинга) и его адаптация к задаче фильтрации сигналов с угловой манипуляцией.

Данное предложение занимает место среди многообразия современных подходов сочетание стратегии вейвлет обработки и инструментов анализа данных, для решения проблемы вычленения признаков сигнала в регрессионных моделях.

Многомерное расширение метода вейвлет-фильтрации, за счет комбинирования прямого многоканального обобщения классического анализа для скалярных сигналов вместе с методом главных компонент, позволяет проводить обработку данных с присутствующим пространственно-коррелированным шумом.

Учитывая, свойство символов транслируемого сигнала и их вейвлет-преобразования к коммутации, уместно использовать ее для выделения полезной составляющей. Так, ковариационная матрица транслируемого сигнала (и шума) содержит связь между информационными компонентами. Интерпретация одноканальной символьной последовательности в виде многоканального сигнала позволила использовать предложенный метод обработки.

По сравнению с классической стратегией вейвлет обработки, шаги 2-4 являются нововведенными и имеют целью использовать связь между информационными компонентами транслируемых символов. Таким образом, энергия сигнала в основном сконцентрирована в нескольких крупных вейвлет-коэффициентах адаптивно избранных на основе вейвлет-трейшолдинга, поскольку коэффициенты ниже порогового уровня могут быть отнесены к аддитивному шуму. Действительно, решающей особенностью при изменении базиса является объединение всех базисных функции в каждом символе, вводя таким образом избыточность, что ведет к лучшей оценке основных признаков (как экстремумы или сингулярности) зашумленных символов, которые в свою очередь, определяются типом модуляции.

Метод демонстрирует перспективное применение в случае цифровых методов угловой модуляции, а их соответствующая оценка позволяет повысить помехоустойчивость системы. Приведен пример реализации работы метода применимо к системам подвижной связи.

В выбранном примере систем широкое применение получили разновидности угловой модуляции как FSK, QPSK, QAM. Последние позволяют обеспечить наибольшую разрядность достигая на практике количества точек созвездия - 64, таким образом увеличивая количество передаваемой информации. Учитывая это, приведена работа метода на примере QAM сигналов сглаженных фильтром приподнять косинуса.

Дальнейшими направлениями исследований являются выбор параметров фильтрации. К ним можно отнести формирование стратегии трейшолдинга для фильтрации вейвлет-коэффициентов; максимальный уровень вейвлет-разложения. Кроме того, расширение работы метода для работы с библиотекой базовых функций, чтобы выбрать лучшее представление сигнала относительно функции по заданной энтропией.

Ключевые слова: вейвлет, фильтрация, трейшолдинг, метод главных компонент, квадратурная модуляция.

Ph.D. Chesanovskyi I.I., Volynets D.O., Levchunets D.O.
ANGLE-MANIPULATION METHODS WAVELET FILTERING USING PRINCIPAL
COMPONENTS ANALYSIS

A multi-dimensional expansion of wavelet filtering well-known method and its adaptation to the signals with angular manipulation filtering tasks are given in the paper.

Proposal takes place among the variety of modern approaches combining wavelet processing strategy and analysis tools for selecting signal features in regression models.

Multivariate extension wavelet filtering method by combining classical analysis direct multi-channel generalization for scalar signals with principal components analysis, allows data processing in presence of spatially correlated noise.

Broadcast signal characters and its wavelet transforms are commutative. Thus, it is appropriate to use this property to select useful component. Covariance matrix of broadcast signal (and noise) contains a information components relations. Single-channel character sequences interpretation as a multi-channel signal allowed to use the proposed processing method.

Compared to the classic wavelet thresholding strategy, steps 2-4 are new and serve to take advantage of broadcast symbols information components relations. Thus, the signal energy is mainly concentrated in several large adaptively selected wavelet coefficients based on wavelet thresholding. Since ratios below a threshold level can be attributed to additive noise. Indeed, a crucial feature in basis changing is to unite all basic functions of each character. Accordingly, introducing some kind of redundancy that leads to better basic features accounting (like extremes or singularity) of noisy symbols. In its turn, they determined by the type of modulation.

The method shows promising application in the case of digital angular modulation methods, and their respective assessment can improve system noise immunity. An example of method implementation shown on mobile communication systems example.

In the chosen system example, angular modulation types acquired widespread use. Particularity FSK, QPSK, QAM varieties. The last of them, allows to achieve the highest bit per symbol ratio. Practically the number of constellation points reached 64. Thus, increasing the amount of transmitted information. Considering that, the example of the QAM signals with a raised cosine filter smoothed are given.

Further researches should focus on filtering parameters. These include formation thresholding strategy for wavelet coefficients filtering, such as maximum wavelet decomposition level. Moreover, extension of the method to work with basic functions library are in interest, in order to achieve the best signal representation to a given entropy function.

Keywords: wavelet filtering, threshold, PCA, quadrature modulation.