

Ю.К. ТАРАНЕНКО

Приватне підприємство «Лікопак», Дніпро, Україна, e-mail: tatanen@ukr.net.

О.Ю. ОЛІЙНИК

Дніпровський фаховий коледж радіоелектроніки, Дніпро, Україна,
e-mail: oleinik_o@ukr.net.

ВИКОРИСТАННЯ ПОРОГОВИХ ТА БЕЗПОРОГОВИХ МЕТОДІВ ДИСКРЕТНОЇ ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРАЦІЇ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

Анотація. Досліджено ефективність порогових і безпорогових методів вейвлет-фільтрації шумів для оброблення радіолокаційних сигналів. Розглянуто три методи вейвлет-аналізу: із загальним порогом обмеження вейвлет-коефіцієнтів деталізації, з універсальним порогом для всіх вейвлет-декомпозицій, а також метод без порогу, що базується на обнуленні коефіцієнтів деталізації на певних рівнях вейвлет-декомпозиції сигналу. Оцінено ефективність вейвлет-фільтрації за відношенням сигнал/шум до і після фільтрації, ентропією сигналу та значенням середньоквадратичної похибки моделі. Встановлено, що у широкому діапазоні високих шумів від -12 дБ до -7.5 дБ метод із загальним порогом забезпечує ефективнішу фільтрацію шуму порівняно з іншими методами.

Ключові слова: дискретний вейвлет-аналіз, безпорогові методи, радіолокаційний сигнал, ентропія, порогова функція.

ВСТУП

Натепер у радіолокаційних системах традиційною і водночас актуальною задачею є оброблення сигналів для отримання корисної інформації, якість якої відповідає вимогам до сучасних радіолокаційних станцій (РЛС) і систем радіоелектронної боротьби (РЕБ). Для останніх систем характерні підвищені вимоги до якості оброблення сигналів і більша кількість завад, що впливають на сигнал [1]. Тому оброблення радіолокаційних сигналів є невід'ємною частиною процесу проектування систем РЕБ, при цьому актуальною є задача вибору оптимального способу фільтрації. Для засобів вимірювальної техніки запропоновано чимало підходів та алгоритмів вибору оптимального методу з урахуванням характеру вимірюваного сигналу [2].

Для радіолокаційної техніки використовують ехо-сигнали, що утворюються внаслідок відлуння радіохвиль від об'єкта, опроміненого РЛС (так званим зондувальним випромінюванням), та сигнали РЛС, що перевипромінюються ретранслювальним пристроєм, наявним на об'єкті [3].

Для станцій радіотехнічного спостереження потрібна дальність виявлення становить понад 180 км. Цього можна досягти тільки фільтрацією отриманих сигналів від шуму, рівень якого зростає з кожним кілометром збільшення дальності. Характер шуму можна визначити як близький до гауссівського білого шуму. В радіолокаційних пристроях вплив шуму найбільш помітний там, де корисні сигнали мають низький рівень [5].

У цій статті розглядається варіант виявлення широкосмугових сигналів на основі вейвлет-фільтрації, що дає змогу гарантовано виявляти сигнали на рівні відношення сигнал/шум до -43 дБ та нижче за методом загального обмеження деталізувальних вейвлет-коефіцієнтів.

В умовах зростання неінформативних шумів радіолокаційні сигнали являють собою нестаціонарні складні сигнали, що характеризуються наявністю складних тимчасових залежностей амплітуди, частоти і фази. Тому застосування вейвлет-аналізу для фільтрації є доцільним [6].

Існують два основні теоретичні підходи до очищення сигналу від шуму за допомогою вейвлет-аналізу [7]. Перший базується на тому, що вейвлет-перетворення дає змогу розкласти аналізований сигнал на апроксимувальні коефіцієнти, які представляють згладжений сигнал, і деталізувальні коефіцієнти, що описують високочастотні складові. Отже, шумовій компоненті відповідають деталізувальні коефіцієнти [8]. Тому для видалення шуму обробляють зазвичай лише деталізувальні коефіцієнти. Другий підхід полягає в припущенні, що шумова компонента являє собою сигнал, менший за модулем ніж основний. Тому найкращий спосіб видалення шуму полягає в тому, щоб зробити нульовими значення коефіцієнтів, тобто меншими за деяке порогове. Ця процедура називається граничним обробленням (трешолдингом) коефіцієнтів [9].

Залежно від вибраного порогового значення розрізняють такі методи: із загальним порогом обмеження коефіцієнтів вейвлетної деталізації, з універсальним порогом для всіх рівнів вейвлет-розкладання (декомпозиції) та безпороговий. Порогові методи добре вивчені і в публікаціях широко висвітлені рекомендації щодо вибору алгоритму задачі порогової функції для оброблення різних вимірюваних сигналів [9–11].

Застосування безпорогового методу вперше описано в [12]. Цей метод дискретної вейвлет-фільтрації базується на обнуленні коефіцієнтів деталізації рівня розкладання, який забезпечує мінімальну похибку. Можливість використання безпорогового методу в обробленні радіолокаційних сигналів раніше не досліджувалася. Тому немає рекомендацій та даних про вибір певного методу вейвлет-фільтрації для оброблення радіолокаційних сигналів, а також оцінювання ефективності моделей вейвлет-аналізу.

Актуальною задачею є чисельне експериментальне дослідження ефективності методів вейвлет-фільтрації радіолокаційних сигналів, яке сприятиме розвитку теорії вейвлет-аналізу та дасть змогу визначити оптимальний метод вейвлет-фільтрації для сигналів радіолокації.

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У [12] наведено порівняльний аналіз методу з порогом та без порогу на прикладі модельної функції DOPPLER. Було проведено чисельний експеримент щодо впливу зміни потужності шуму на похибку обох методів. Установлено, що збільшення потужності шуму для методу з порогом спричиняє вдвічі більшу похибку порівняно з первісною, ніж для методу без порога. Попри те, що DOPPLER ехо-сигнал і різні DOPPLER фільтри широко використовуються в радіолокаційних системах, перенесення результатів експерименту з модельною функцією DOPPLER повністю на весь спектр радіолокаційних сигналів неможливе.

Оброблення сигналів РЛС складніше, ніж датчиків доплерометрії, оскільки йдеться вже про виявлення як рухомих цілей, так і тих, які в поточний момент часу не рухаються або рухаються з невеликою швидкістю [13]. Загальною вимогою можна вважати отримання якомога кращого співвідношення між корисним сигналом і завадою або шумом.

У [14] запропоновано використовувати безперервне вейвлет-перетворення (БВП) для вивчення структури сигналів з особливостями. За допомогою аналітичних та чисельних методів виконано вейвлет-аналіз простих дійсних моделей сигналів з особливостями у часовій області. Отримані результати порівняно з результатами динамічного перетворення Фур'є. Результати порівняння подано у спеціальному форматі, рекомендованому дослідникам. За допомогою

комплексного функціонала якості вибрано оптимальний вейвлетний базис для кожної конкретної моделі сигналу для БВП. Автори не наводять даних про розширення сфери застосування описаного підходу.

У [15] розглянуто результати дослідження можливості застосування дискретного вейвлет-перетворення для очищення зондувальних сигналів від адитивних перешкод. Як відеоімпульсний досліджено відбитий зондувальний сигнал, що містить радіолокаційну інформацію. Автори наводять оцінку якості очищення, порівнюючи відновлений сигнал з вихідним за допомогою візуального спостереження тимчасових діаграм. Для чисельної оцінки використано значення коефіцієнта кореляції. При цьому чим ближче до одиниці значення коефіцієнта кореляції, тим більше сигнали подібні один одному за формою.

Привертає увагу дослідження [16], в якому порівнюють методи дискретної вейвлет-фільтрації лише на підставі порівняння співвідношень, які використовують для обчислення порога фільтрації. З інших параметрів розглянуто тільки вплив базового вейвлету. Це, безумовно, є суттєвим недоліком, оскільки під час дослідження не враховано сукупності параметрів, які впливають на ефективність методу, що не дає змоги визначити шумові пороги придатності розглянутих методів.

У [17] розглянуто проблему поліпшення якості цифрової фільтрації на основі дискретної вейвлет-фільтрації (ДВП), а також досліджено застосування різних варіантів визначення порогової функції і вибір вейвлет-базису для зменшення цифрового потоку. У висновках зазначається можливість застосування порогових методів фільтрації, але чисельних підтверджень не наведено.

Метою дослідження у запропонованій статті є оцінювання ефективності та проведення порівняльного аналізу вейвлет-фільтрації з використанням повного обнулення коефіцієнтів деталізації на визначеному рівні вейвлет-розкладання сигналу з урахуванням чисельних значень параметрів ефективності та оптимальних цілей вейвлет-фільтрації. Для дослідження шумових порогів методів дискретної вейвлет-фільтрації використано змодельований широкополосний сигнал з несівною частотою $f_{\text{нес}} = 50$ та відхиленням $f_{\text{відх}} = 25$.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИСКРЕТНОЇ ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРАЦІЇ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

Практика експлуатації радіолокаційних систем свідчить, що припущення про адитивний характер сигналів та перешкод у реальних умовах не завжди виконуються. У багатьох випадках шуми спостерігаються у мультиплікативних сигналах і класичні способи лінійної фільтрації перестають бути оптимальними [12]. Оскільки теорія оптимальної фільтрації, коли наявні корельовані, мультиплікативні, сигналоподібні перешкоди, досі не розроблена, обчислювальний експеримент будемо проводити з використанням лінійної модельної функції.

Лінійно-частотний модуляційний сигнал з імпульсним стисненням (Chirp) — одна з найбільш широко використовуваних форм сигналу в радіолокаційній техніці. У [18] було запропоновано амплітудну модуляцію такого сигналу напівсинусоїдою. У загальному вигляді модельна функція лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) сигналу з амплітудною модуляцією напівсинусоїдою має вигляд [19]:

$$x(t_i) = anp \cos(2\pi f_0 t_i + \pi \beta t_i^2) \sin(\pi t), \quad (1)$$

$$x_\eta(t_i) = anp \cos(2\pi f_0 t_i + \pi \beta t_i^2) \sin(\pi t) + \mu \eta_i, \quad (2)$$

де $x(t_i)$ — високочастотний лінійно-модульований сигнал; $x_\eta(t_i)$ — сигнал з адитивним шумом; anp — амплітуда сигналу; f_0 — початкове значення

частоти; β — коефіцієнт лінійної частотної модуляції; η — гауссівський шум з нульовим математичним сподіванням; μ — рівень шуму; $\sin(\pi \cdot t)$ — множник для амплітудної модуляції напівсинусоїдою.

Вираз (2) є модельною функцією (1) із доданим шумом.

Вейвлет-реконструкція $\bar{x}(t_i)$ відфільтрованого сигналу $x_\eta(t_i)$ має вигляд:

$$\bar{x}(t_i) = \sum_k [a_{j+j_0,k} \varphi_{j+j_0,k}(t_i)] + \sum_{j=1}^J \sum_k [F(\lambda_j) d_{j+j_0,k} \psi_{j+j_0,k}(t_i)], \quad (3)$$

де $a_{j+j_0,k}$, $d_{j+j_0,k}$ — коефіцієнти апроксимації та деталізації відфільтрованого сигналу відповідно; $\varphi_{j+j_0,k}(t)$, $\psi_{j+j_0,k}(t)$ — батьківський та материнський вейвлети відповідно; j_0 — початковий рівень вейвлет-декомпозиції; j — поточний рівень декомпозиції; λ_j — поріг обмеження коефіцієнтів деталізації; $F(\lambda_j)$ — функція порога обмеження вейвлет-коефіцієнтів деталізації.

У співвідношенні (3) перша сума апроксимувальних вейвлет-коефіцієнтів відповідає низькочастотній інформаційній частині сигналу, друга сума відображає обмеження величини коефіцієнтів деталізації, що змінюється під дією шуму [20].

Метод фільтрації із загальним порогом відповідає умові, коли поріг у співвідношенні (3) не залежить від рівня декомпозиції j :

$$\lambda_j = \lambda. \quad (4)$$

Метод фільтрації з універсальним порогом [19] відповідає умові, коли поріг залежить від рівня декомпозиції згідно з системою:

$$\begin{cases} \lambda_j = \sigma \sqrt{2 \ln N_j}, \\ \sigma = \frac{\text{median} |d_{1,k}|}{0.6742}, \end{cases} \quad (5)$$

де λ_j — універсальний поріг; N_j — кількість коефіцієнтів деталізації $d_{j,k}$ на j -му рівні декомпозиції; $\text{median} |d_{1,k}|$ — медіана масиву $|d_{1,k}|$ коефіцієнтів деталізації першого рівня.

Метод фільтрації, умовно названий «безпороговим» [13], застосовують, коли всі коефіцієнти деталізації обнуляються до рівня декомпозиції j_{opt} , для якого похибка фільтрації мінімальна:

$$\sum_{j=1}^{j_{\text{opt}}} \sum_k [\bar{d}_{j+j_0,k} \psi_{j+j_0,k}(t)] = 0. \quad (6)$$

Критерієм ефективності методів дискретної вейвлет-фільтрації є середньоквадратична похибка фільтрації та збільшення відношення сигнал/шум відповідно до виразів [21]:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(t_i) - \bar{x}(t_i)]^2, \quad (7)$$

$$U_1 = 10 \lg \frac{\sum x(t_i)^2}{\sum [x(t_i) - x_\eta(t_i)]^2}, \quad (8)$$

$$U_2 = 10 \lg \frac{\sum x(t_i)^2}{\sum [x(t_i) - \bar{x}(t_i)]^2}. \quad (9)$$

Додатковим важливим критерієм складності сигналу є ентропія Шеннона [22]:

$$H = 0.5 \ln 10^{-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{m_1} n_i \log(n_i)}, \quad (10)$$

де n — загальна кількість відліків у кожному m -му стовбці гістограми, l — довжина стовпця у розподілі зашумлених та відфільтрованих сигналів $x_\eta(t_i)$, $\bar{x}(t_i)$ відповідно.

Зменшення ентропійної похибки $H\Delta = H_2 - H_1$ визначається за різницею похибок до і після фільтрації сигналу в даних. Методику визначення ентропії наведено в [22]. Обчислення ентропійного коефіцієнта відбувається за значеннями абсолютної ентропійної похибки для початкової та половинної вибірок даних. Ідентифікація закону розподілу даних виконується за візуальним аналізом близькості гістограм [23].

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ДИСКРЕТНОЇ ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРАЦІЇ В УМОВАХ ШУМІВ ВИСОКОГО РІВНЯ

Особливістю аналізу ефективності методів дискретної вейвлет-фільтрації для радіолокаційних сигналів в умовах шумів високого рівня порівняно з алгоритмами із [16, 17], які застосовувались до вимірюваних сигналів і модельних функцій, є визначення порога некорельованого шуму, нижче якого фільтрація взагалі неможлива. Для цього застосуємо статистичний тест Шапіро–Вілка (W-тест, statistics на рис. 1) [24]. За допомогою цього тесту перевіряють нульову гіпотезу про відповідність даних нормальному розподілу. Нижній шумовий поріг визначають обчисленням за критеріями нормальності розподілу.

Порівнювати методи дискретної вейвлет-фільтрації з урахуванням визначеного порога максимально можливого рівня шуму (див. рис. 1) за допомогою співвідношень (1)–(9) з використанням критерію ефективності фільтрації будемо за методикою, яка вже застосовувалась у [25] як для методів без порога, так і для методів із загальним та універсальним порогами. Такий підхід надає змогу оцінити в чисельному значенні ефективність вибору порога фільтрації за критерієм залежно від задачі фільтрації. Це дає змогу розв’язати поставлену задачу дослідження оброблення радіолокаційних сигналів з урахуванням усіх параметрів фільтрації. У цьому випадку критерієм є зменшення шуму у відфільтрованому сигналі за співвідношеннями (8), (9):

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad (11)$$

де ΔU — потужність шуму під час фільтрації.

Інші параметри фільтрації: ентропія сигналу (H), базовий вейвлет (Wavelets), функція порога (Fun), поріг (threshold), похибка моделі (E), а для методу без порога максимальний ($j_{\max}$) та оптимальний (j_{opt}) рівні декомпозиції чисельно розраховуються за максимумом критерію (11).

Безумовно, чисельні діапазони вказаних параметрів обмежені, тому доцільно використовувати як критерій похибку моделі $E_{\min}$, тобто її мінімальне значення.

Розглянуті методи є одними з небагатьох методів фільтрації нестационарних сигналів в умовах квазігауссівського шуму [26], тому показники методів, де як поріг використано значення -2.97 дБ (рис. 2), наочно демонструють приблизно однаковий нахил за винятком методу з універсальним порогом, який на окремих ділянках кращий за інших. Графік демонструє також різний характер непридатності методів у діапазоні високих шумів. З графіка видно, що мають

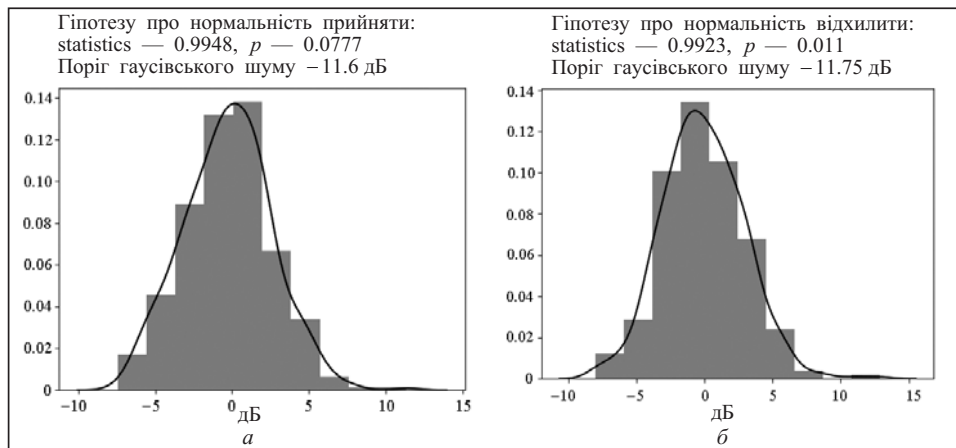


Рис. 1. Шумовий поріг для лінійно-частотно-модульованого сигналу за співвідношенням (2): розподіл сигналу з адитивно доданим шумом (а); розподіл сигналу з адитивно доданим шумом у разі зменшення шуму на $\sigma = 0.1$ (б)

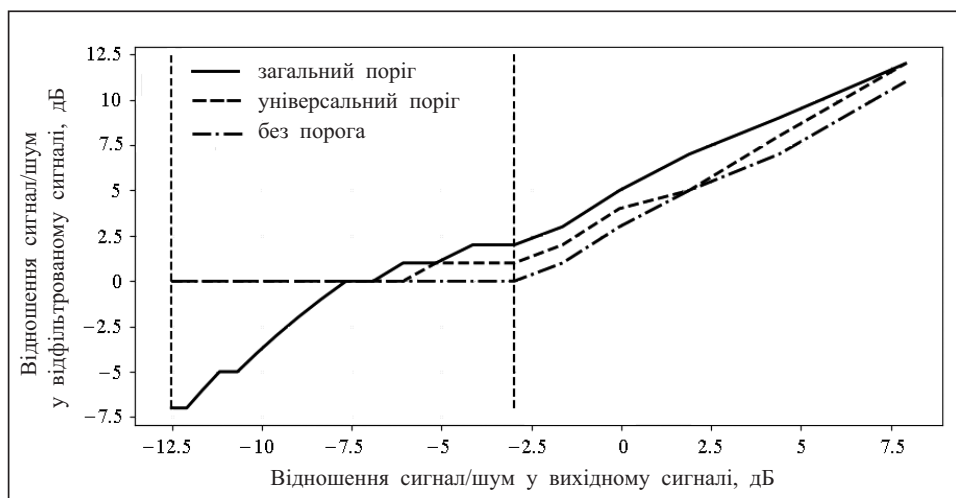


Рис. 2. Графіки залежності відношення сигнал/шум у відфільтрованому сигналі, отримані трьома методами дискретної вейвлет-фільтрації (шумовий поріг ефективності фільтрації -2.97)

місце однакові результати для методу з загальним порогом та без порога, що потребує додаткових досліджень.

Ентропія Шеннона також є показником інформації, яку несе радіолокаційний сигнал. Оцінку ефективності методів вейвлет-фільтрації за ентропією сигналу наведено на рис. 3. Тут показано, що шумовий поріг змістився у бік більших за амплітуду шумів і найкращі результати демонструє метод із загальним порогом, а саме стрімке зменшення ентропії, а далі її повільне зростання порівняно з падінням. На ділянці від 0 дБ у бік зниження шуму для усіх методів значення ентропії становить 1. Таким чином, можна дійти висновку, що інформаційний ресурс методів залишається не вичерпаним, що спонукає розглянути пакетну вейвлет-фільтрацію [21] разом з уже наведеними методами.

Застосовуючи різні методи фільтрації, дослідимо зміну значення середньоквадратичної похибки. Використання як критерію якості фільтрації величини середньоквадратичної похибки моделі (MSE) детально описано в [12]. Застосуємо отриманні в [12] співвідношення для порогового та безпорогового методу.

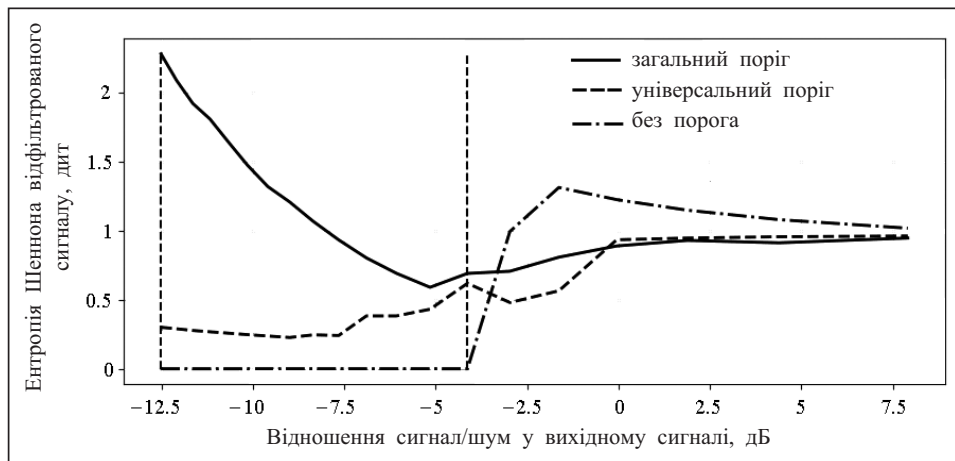


Рис. 3. Графіки ентropії Шеннона відфільтрованого сигналу, отримані трьома методами вейвлет-фільтрації

Результата чисельного оцінювання фільтрації підтверджують висновок про ефективність порогових і безпорогових методів дискретної вейвлет-фільтрації радіолокаційних сигналів (табл. 1–3).

На рис. 4 показано, що поріг шуму збігається з порогом для ентropії дискретної вейвлет-фільтрації. У цьому випадку перевагу має метод загального порога, що не очевидно, тому звужимо діапазон похибки (рис. 5).

Таблиця 1. Похибки і параметри вейвлет-фільтрації із загальним порогом для радіолокаційних сигналів з лінійною частотною модуляцією

Зменшення потужності шуму ΔU , дБ	Зменшення ентropійної похибки ΔH , дит	Вейвлет	Функція порога обмеження вейвлету коефіцієнтів деталізації $F(\lambda_i)$	Поріг обмеження коефіцієнтів деталізації λ_i	Середньо-квадратична похибка фільтрації $E_{\min}$
-7	2.2826	bior1.1	soft	1.5	1.3499
-7	2.091	bior1.1	soft	1.5	1.1624
-6	1.9232	bior1.1	soft	1.5	0.9933
-5	1.8103	db7	soft	1.5	0.8407
-5	1.6461	db7	soft	1.5	0.7056
-4	1.4765	db7	soft	1.5	0.5879
-3	1.3204	db7	soft	1.5	0.4872
-2	1.2085	db16	soft	1.5	0.4027
-1	1.0681	db16	soft	1.5	0.3332
0	0.9341	db16	soft	1.5	0.2782
0	0.8039	db16	soft	1.5	0.2368
1	0.6913	db16	soft	1.5	0.2076
1	0.5906	db16	soft	1.5	0.1883
2	0.6912	db28	soft	1.2	0.1689
2	0.7069	db31	soft	1.0	0.1434
3	0.8088	db31	garotte	1.1	0.1165
5	0.8902	db32	garotte	0.8	0.0863
7	0.9305	db32	garotte	0.6	0.0559
9	0.913	db32	garotte	0.5	0.0312
12	0.9475	db32	garotte	0.3	0.0148

Таблиця 2. Похибки і параметри вейвлет-фільтрації з універсальним порогом для радіолокаційних сигналів з лінійною частотною модуляцією

Зменшення потужності шуму ΔU , дБ	Зменшення ентропійної похибки ΔH , дит	Вейвлет	Функція порога обмеження вейвлету коефіцієнтів деталізації $F(\lambda_i)$	Середньоквадратична похибка фільтрації $E_{\min}$
0	0.3007	sym4	soft	0.2785
0	2898	sym4	soft	0.2743
0	0.2776	sym4	soft	0.2701
0	0.268	sym4	soft	0.266
0	0.2582	sym4	soft	0.2621
0	0.2474	sym4	soft	0.2583
0	0.2376	sym4	soft	0.2545
0	0.2267	sym4	soft	0.2508
0	0.2459	db3	soft	0.2457
0	0.2459	db3	soft	0.2457
0	0.2413	db3	soft	0.2404
0	0.383	bior2.4	soft	0.2334
0	0.3832	bior2.6	soft	0.2238
1	0.4316	bior2.2	soft	0.2129
1	0.6193	bior3.7	soft	0.1981
1	0.4801	rbio5.5	garotte	0.1781
2	0.5653	bior2.6	garotte	0.1528
4	0.9352	db31	hard	0.1114
5	0.9476	db32	hard	0.0719
8	0.9571	db32	hard	0.0369
12	0.9627	db32	hard	0.0161

Таблиця 3. Похибки і параметри вейвлет-фільтрації без порога для радіолокаційних сигналів з лінійною частотною модуляцією

Зменшення потужності шуму ΔU , дБ	Зменшення ентропійної похибки ΔH , дит	Вейвлет	Оптимальний рівень розкладання J_{opt}	Максимальний рівень розкладання J_{max}	Середньоквадратична похибка фільтрації $E_{\min}$
0	0	bior1.1	11	11	0.2537
0	0	bior1.1	11	11	0.2534
0	0	bior1.1	11	11	0.253
0	0	bior1.1	11	11	0.2527
0	0	bior1.1	11	11	0.2524
0	0	bior1.1	11	11	0.2521
0	0	bior1.1	11	11	0.2519
0	0	bior1.1	11	11	0.2516
0	0	bior1.1	11	11	0.2514
0	0	bior1.1	11	11	0.2512
0	0	bior1.1	11	11	0.251
0	0	bior1.1	11	11	0.2508
0	0	bior1.1	11	11	0.2506
0	0	bior1.1	11	11	0.2505
0	0	db15	3	6	0.2262
1	1.314	db35	2	4	0.1798
3	0.126	db35	2	4	0.125
5	1.149	db35	2	4	0.0801
7	1.081	db35	2	4	0.0452
11	1.019	db35	2	4	0.0203

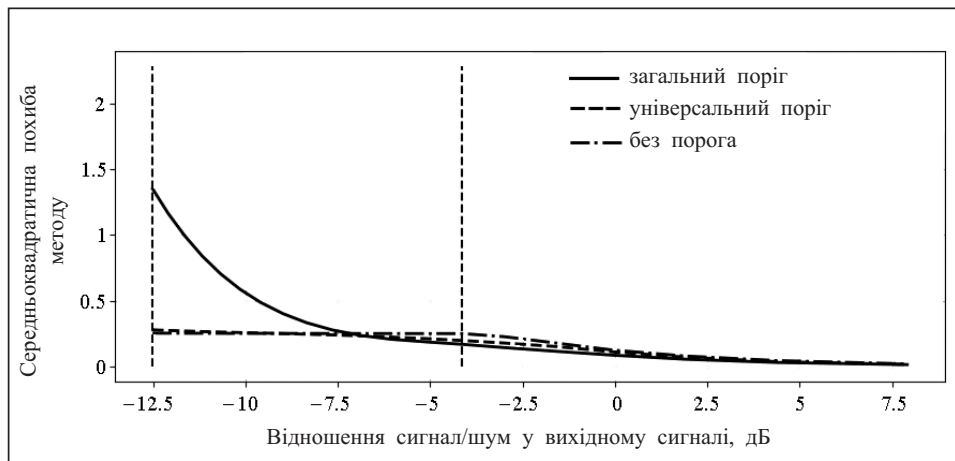


Рис. 4. Залежність середньоквадратичної похибки моделі дискретної вейвлет-фільтрації від методів її реалізації для радіолокаційного сигналу (шумовий поріг ентропії -4.13)

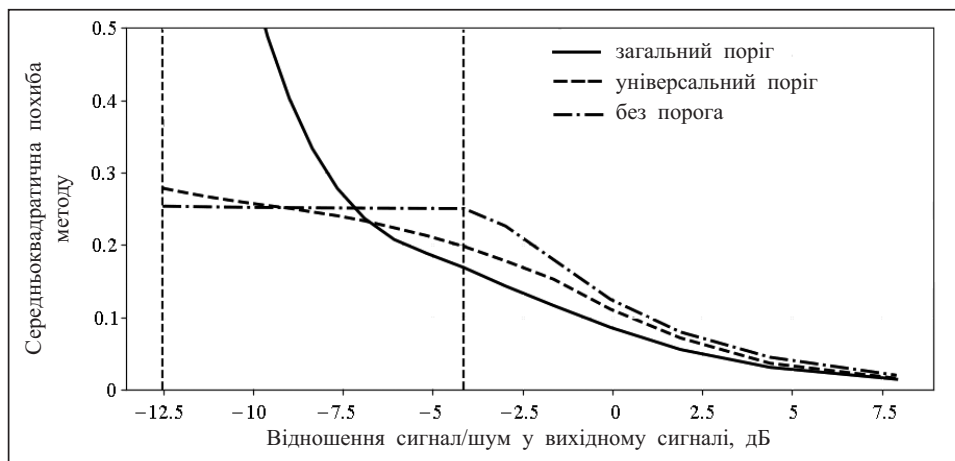


Рис. 5. Залежність середньоквадратичної похибки моделі дискретної вейвлет-фільтрації, отримана різними методами, для радіолокаційного сигналу з похибкою методу у діапазоні до 0.5 дБ

Дослідження показало наочну перевагу методу із загальним порогом у діапазоні шумів від -4.13 дБ до 5 дБ, але і для більш високих шумів, де можливе порівняння тільки з методом універсального порога.

Результати чисельної оцінки фільтрації підтверджують висновок про ефективність використання порогових і безпорогових методів дискретної вейвлет-фільтрації радіолокаційних сигналів. Запропонований підхід до вибору методу вейвлет-фільтрації не є простішим, ніж у [16, 17]. У відомих алгоритмах вибору методу вейвлет-фільтрації передбачено значно менше параметрів і критеріїв ефективності (табл. 4), безпороговий метод автори взагалі не розглядали. Остання стадія перевірки ефективності вибору методу за [16] являє собою візуальний контроль спектрограм, що унеможливує використання його в дослідженнях і практиці. Переконливою перевагою запропонованого в роботі методу оцінювання ефективності перед методом дискретної вейвлет-фільтрації є збільшений перелік критеріїв ефективності, що позитивно впливає на достовірність вибору методу фільтрації для певного радіолокаційного сигналу. Порівняльний аналіз обчислювальної складності запропонованого алгоритму оцінювання ефективності методу вейвлет-фільтрації і методів [16, 17] наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Результати порівняльного аналізу обчислювальних операцій для програмної реалізації запропонованого алгоритму оцінювання ефективності вейвлет-фільтрації та відомих методів

Критерій ефективності	Алгоритми вейвлет-фільтрації				
	Запропонований метод			Метод у [15]	Метод у [16]
	із загальним порогом	з універсальним порогом	без порога	із загальним порогом	із загальним порогом
1. Виявлення шумового порога (W-тест)	+	+	+	—	—
2. Зменшення потужності шуму ΔU , дБ	+	+	+	—	—
3. Відносний рівень шуму	—	—	—	+	—
4. Зменшення ентропійної похибки ΔH , дит	+	+	+	—	—
5. Вейвлет	+	+	+	+	+
6. Оптимальний рівень розкладання J_{opt}	—	—	+	+	—
7. Максимальний рівень розкладання J_{max}	—	—	+	—	—
8. Функція порога обмеження вейвлету коефіцієнтів деталізації $F(\lambda_i)$	+	+	—	+	+
9. Поріг обмеження коефіцієнтів деталізації λ_i	+	—	—	—	—
10. Середньоквадратична похибка фільтрації E_{min} ; візуальний контроль спектрограм сигналу після фільтрації	+	+	+	+	+

ВИСНОВКИ

1. У роботі вперше методом обчислювального експерименту досліджено ефективність порогових та безпорогових методів вейвлет-фільтрації шумів для оброблення радіолокаційних сигналів. Досліджено три методи вейвлет-аналізу: із загальним порогом обмеження вейвлет-коефіцієнтів деталізації; з універсальним порогом для всіх вейвлет-декомпозицій, а також метод без порога, що базується на обнуленні коефіцієнтів деталізації на певних рівнях вейвлет-декомпозиції сигналу. Дослідження проведені на модельній функції змодельованого широкосмугового сигналу з несівною частотою $f_{\text{нес}} = 50$ і відхиленням $f_{\text{відх}} = 25$.

2. Особливістю аналізу ефективності методів дискретної вейвлет-фільтрації для радіолокаційних сигналів в умовах шумів високого рівня є визначення порога некорельованого шуму, нижче за який фільтрація сильно ускладнена або взагалі не можлива (статистичний тест Шапіро–Вілка). Ефективність вейвлет-фільтрації оцінювали за відношенням сигнал/шум, ентропією сигналу, значенням середньоквадратичної похибка та іншими критеріями.

3. Встановлено, що у широкому діапазоні високих шумів від -12 дБ до -7.5 дБ метод із загальним порогом забезпечує ефективну фільтрацію шуму. У діапазоні шумів від -4.13 дБ до 5 дБ він працює з найбільшою ефективністю. Реалізація методу з загальним порогом не потребує значних обчислювальних ресурсів. Це відкриває перспективи використання методу в мобільних пристроях радіолокації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Худов Г.В., Ліщенко В.М., Гниря В.В. Обробка сигналів у мультирадарній системі на базі двокоординатних оглядових радіолокаційних станцій. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. № 4(69). С. 4–15.
2. Ваврук Є.Я., Лашко О., Попович Р. Алгоритми та засоби обробки сигналів. Львів: СПОЛОМ. 2021. 240 с.
3. Левчунець Д.О. Виявлення радіолокаційних сигналів на основі аналізу згортки сигналу з вейвлетом. *Зб. наук. пр. Національної академії Державної прикордонної служби України. Сер.: Військові та технічні науки*. 2015. № 1. С. 237–243.
4. Свид І.В., Старокожев С.В. Розподілена обробка радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору. *Радіотехніка*. 2023. Вип. 212. С. 155–165.
5. Серков О.А., Трубочанінова К.А., Лазуренко Б.О. Завадостійкість мобільних телекомунікаційних систем. *Системи управління, навігації та зв'язку: Зб. наук. пр.* 2020. № 2(60). С. 169–172. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.169>.
6. Walenczykowska M., Kawalec A., Krenc K. An application of analytic wavelet transform and convolutional neural network for radar intrapulse modulation recognition. *Sensors*. 2023. Vol. 23, N 4. 1986. <https://doi.org/10.3390/s23041986>.
7. Жиров, Г.Б., Хлапонін Ю.І., Жиров Б.Г. Методи аналізу тонкої структури нестационарних сигналів. *Зб. наук. пр. Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2016. № 53. С. 21–30.
8. Prashar N., Sood M., Jain S. Design and implementation of a robust noise removal system in ECG signals using dual-tree complex wavelet transform. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2021. Vol. 63. 102212. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102212>.
9. Osadchiy A., Kamenev A., Saharov V., Chernyi S. Signal processing algorithm based on discrete wavelet transform. *Designs*. 2021. Vol. 5, N 3. 41. <https://doi.org/10.3390/designs5030041>.
10. Nasri M., Nezamabadi-pour H. Image denoising in the wavelet domain using a new adaptive thresholding function. *Neurocomputing*. 2009. Vol. 72, Iss. 4–6. P. 1012–1025. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2008.04.016>.
11. Wang B., Zhang G., Li Z., Whang Z. Wavelet threshold denoising algorithm based on new threshold function. *Journal of Computer Applications*. 2014. Vol. 34(5). P. 1499–1502. <https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2014.05.1499>.
12. Taranenko Yu.K., Lopatin V.V., Oliynyk O.Yu. Wavelet filtering by using nonthreshold method and example of model Doppler function. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2021. Vol. 64, N 7. P. 380–389. <https://doi.org/10.3103/S0735272721070049>.
13. Банделюк О.В., Колобродов В.Г. Проблемы выбора материнского вейвлета для улучшения показателей информативности в задачах ДЗЗ. *Зб. тез доповідей IX науково-практичної конференції студентів та аспірантів «Погляд в майбутнє приладобудування»* (17–18 квітня 2016 р., Київ). ПБФ, НТУУ КПІ, 2016. С. 29.
14. Лазоренко О.В., Лазоренко С.В., Черногор Л.Ф. Вейвлет-аналіз модельних сигналів з особливостями. 1. Безперервне вейвлет-перетворення. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2007. Т. 12, № 2. С. 182–204.
15. Матвеев Б.В., Крюков Д.Ю., Курьян Ю.С., Левенков К.О. Применение дискретного вейвлет-преобразования для фильтрации зондирующих радиолокационных сигналов от аддитивных помех. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2014. Т. 10, № 2. С. 43–46.
16. Браун В.О., Долгушин В.П., Лоза В.Н., Пампуха И.В. Исследование возможностей и характеристик методов снижения уровня шума при обработке сигналов, основанных на применении вейвлет-технологии. *Журнал радиоэлектроники*. 2014. № 7.

17. Солодка В.І., Ошаровська О.В., Патлаєнко М., Подольська А. Формування сигналів вейвлет-перетворення з урахуванням порогових функцій в задачі стиснення цифрового потоку. *Вісник Університету «Україна». Сер.: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика*. 2020. № 1(28). С.186–197.
18. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. Москва: Рипол Классик, 1981. 416 с.
19. Воскобойников Ю.Е. Вейвлет-фильтрация с двухпараметрическими пороговыми функциями: выбор функции и оценивание оптимальных параметров. *Автоматика и программная инженерия*. 2016. № 1(15). С. 69–78.
20. Hindi A., Dwairi M.O., Alqadi Z. Analysis of digital signals using wavelet packet tree. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2020. Vol. 9, Iss. 2. P. 96–103.
21. Тараненко Ю.К., Олійник О.Ю. Оптимізація алгоритму пакетної вейвлет-фільтрації. *Кібернетика та системний аналіз*. 2024. Т. 60, № 1. С. 163–174. <https://doi.org/10.34229/KCA2522-9664.24.1.14>.
22. Oliynyk O., Taranenko Yu. Automated system for identification of data distribution laws by analysis of histogram proximity with sample reduction. *Ukrainian Metrological Journal*. 2021. N 3. P. 31–37.
23. Oliynyk O. Taranenko Y., Losikhin D., Shvachka A. Investigation of the Kalman filter in the noise field with an excellent Gaussian distribution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4, N 4(94). P. 36–42.
24. González-Estrada E., Cosmes W. Shapiro–Wilk test for skew normal distributions based on data transformations. *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 2019. Vol. 89, N 17. P. 3258–3272. <https://doi.org/10.1080/00949655.2019.1658763>.
25. Taranenko Yu.K. Methods of discrete wavelet filtering of measurement signals: An algorithm for choosing a method. *Measurement Techniques*. 2022. Vol. 64(10). P. 801–808.
26. Кременецька Я.А., Мельник Ю.В., Марков С.Ю., Градобоева Н.В. Моделювання радіоканалу зв'язку міліметрового діапазону хвиль з використанням технології RoF. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2018. № 1. С. 41–50.

Yu.K. Taranenko, O.Yu. Oliynyk

USING THRESHOLD AND NO-THRESHOLD METHODS OF DISCRETE WAVELET FILTERING OF RADIO LOCATION SIGNALS

Abstract. The paper examines the effectiveness of threshold and non-threshold wavelet noise filtering methods in processing radar signals. Three methods of wavelet analysis are analyzed: a method with a general threshold for limiting wavelet coefficients of detail; a method with a universal threshold for all wavelet decompositions; and a method without a threshold, based on zeroing the coefficients of detail at certain levels of the wavelet decomposition of the signal. The effectiveness of wavelet filtering is evaluated by the signal-to-noise ratio before and after filtering, signal entropy, and the model's mean square error (MSE) value. It is found that over a wide range of high noise from –12 dB to –7.5 dB, the common threshold method provides more effective noise filtering than other methods.

Keywords: discrete wavelet analysis, threshold method, radar signal, entropy, threshold function.

Надійшла до редакції 08.11.2023