

УДК 621.396.662.072.078

Сайко В.Г., д.т.н.; Дакова Л.В., асп.

(Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій)

АДАПТИВНЕ ШУМОПРИДУШЕННЯ ПРИ ОБРОБЦІ СИГНАЛІВ В ГЕТЕРОГЕННИХ РАДІОМЕРЕЖАХ З ЕНЕРГЕТИЧНОЮ СКРИТНІСТЮ

Сайко В.Г., Дакова Л.В. Адаптивне шумопридушення при обробці сигналів в гетерогенних радіомережах з енергетичною скритністю. Пропонується удосконалений метод шумопридушення сигналу з використанням вейвлет-перетворення. Цей підхід застосовується для розв'язання задачі шумопридушення в гетерогенних радіомережах систем рухомого радіозв'язку нового покоління.

Ключові слова: РАДІОМЕРЕЖА, ШУМОПРИДУШЕННЯ, ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

Сайко В.Г., Дакова Л.В. Адаптивное шумоподавление при обработке сигналов в гетерогенных радиосетях с энергетической скрытностью. Предлагается усовершенствованный метод шумоподавление сигнала с использованием вейвлет-преобразования. Этот подход применяется для решения задачи шумоподавление в гетерогенных радиосетях систем подвижной радиосвязи нового поколения.

Ключевые слова: РАДИОСЕТЬ, ШУМОПОДАВЛЕНИЕ, ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Saiko V.G., Dakova L.V. Adaptive Noise Reduction in signal processing in heterogeneous radio networks with energy secrecy. An improved method of noise reduction signal using wavelet transform. This approach is applied to solve the problem noise reduction in heterogeneous radio networks of mobile radio communication of the new generation.

Keywords: RADIO NETWORK, NOISE REDUCTION, WAVELET TRANSFORM

Вступ і постановка задачі. Нині мобільний зв'язок є швидкозростаючим сегментом ринку телекомунікацій. Особливого поширення набувають гетерогенні мережі систем зв'язку 4-го покоління LTE або мобільні системи зв'язку малого радіусу дії (Short Range Devices – SRD), оскільки вони дозволяють швидко без великих трудовитрат організувати локальні мережі і в цілому підвищити пропускну спроможність територіальних систем бездротового зв'язку. Одним з можливих способів підвищення енергетичної скритності радіоканалів в таких мережах є використання прикриваючих сигналів, спектри яких частково або повністю перекриваються із спектрами інформаційних сигналів. Як правило, в таких системах зв'язку сигнал, що поступає в приймальну антену, є композицією сигналів, що пройшли різні шляхи і мають різну затримку і амплітуду. Такий композитний сигнал може дуже швидко і в широких межах змінюватися по амплітуді і фазі. В результаті погіршуються характеристики модуляційних схем у порівнянні з каналом з постійними параметрами і адитивним білим гауссівським шумом. Проведений аналіз впливу багатопроменевого поширення сигналу в гетерогенних системах зв'язку показав, що такі канали відносяться до каналів з рівномірною, частотною та з лінійною фазовою характеристикою [1]. Відбиття радіохвиль при розповсюдженні здійснюється в основному від бетонних або цегляних стін, стель і дерев'яних підлог, які не мають залежності коефіцієнта відбиття від частоти несучої, тому такий канал не є селективним по частоті. Так як параметри відбиття не змінюються, то канал не схильний повільним завмиранням. Тому основною причиною загасання в розглянутому каналі є складання багатьох променів з різною фазою, в результаті чого може зменшитися амплітуда сигналу і станеться фазовий зсув. Як показали розрахунки, зсув несучої різних променів при обмежених розмірах простору, не перевищує довжини хвилі [2]. Однак, чим ближче абоненти перебувають один від одного і чим вище розташовані їх антени, тим більше може бути розбіжність фази і вище вірогідність глибоких завмирань. У силу обмеженості простору і малій швидкості пересування абонентів системи, вплив доплерівського зсуву частоти на завадостійкість несуттєвий. Наведені оцінки завадостійкості показали, що багатопроменевість і відповідно завмирання, істотно зменшують ефективність передачі інформації по таких каналах [2, 3]. Для вирішення завдань щодо підвищення ефективності функціонування таких мереж в даний час використовуються різні алгоритми адаптивної і неадаптивної фільтрації, однак більшість методів оптимізовано для обробки сигналів, спотворених шумом, модель якого відома заздалегідь. Між іншим, у залежності від фізичних характеристик траси розповсюдження сигналу в гетерогенних мережах, можливе

формування адитивних шумів з іншими статистичними розподілами (наприклад, логарифмічно нормальним або експоненціальним розподілами). Серед численних методів останнім часом особливу увагу привертають вейвлет-технології обробки цифрових сигналів [4, 5]. Однак методи вейвлет-фільтрації шумів розвинені лише стосовно до моделі шуму у вигляді адитивної білого гауссівського шуму, інформація про завади міститься в високочастотній області спектра сигналу, а корисна інформація – в низькочастотній.

Для такої моделі видалення шуму за допомогою вейвлет-перетворення виконується в чотири етапи [6]: *розкладання* сигналу за базисом вейвлетів; *вибір* порогового значення шуму для кожного рівня розкладання; *порогова* фільтрація коефіцієнтів деталізації; *реконструкція* сигналу.

Зі статистичної точки зору така методика дозволяє отримати непараметричну оцінку регресійної моделі сигналу з використанням ортогонального базису. Методика найкращим чином працює на досить гладких сигналах, тобто на сигналах, в розкладанні яких лише невелика кількість коефіцієнтів деталізації значно відрізняється від нуля.

У розвитку робіт такого напрямку по виділенню в радіосигналах особливостей, повторюваних процесів, прихованих закономірностей із застосуванням нових методів математичного апарату, оснований на застосуванні нелінійних процедур (вейвлет-перетворення, фрактальний аналіз, самоподібність і самоорганізація), є актуальною науково-технічною задачею теорії широкосмугових безпроводових радіосистем.

Розробка алгоритмів шумопридушення. У статті наведені результати роботи над створенням високоефективних алгоритмів шумопридушення в задачі обробки радіосигналів в рухомих системах цифрового радіозв'язку на основі вейвлет-технологій.

В роботі приймальний радіосигнал розглядається як послідовність нрзташованих одна за одною ділянок, що мають на деякому часовому інтервалі постійні властивості. Виходячи з такого припущення, завдання обробки сигналу розглядається як виділення окремих ділянок з подальшою їх кластеризацією [7]. Слід зазначити, що однозначно ці ділянки виділені бути не можуть внаслідок апріорної невизначеності у виборі моделі сигналу мобільних систем радіозв'язку, і одному сигналу може бути поставлено у відповідність безліч послідовностей ділянок, що залежать від вибору моделі. Така послідовність може розглядатись як стиснення інформації, що описує сигнал з позиції обмеженого кола властивостей, визначених моделлю. Побудова такої моделі сигналу може формулюватися з одного боку, як узагальнення задачі виділення його особливостей, а з іншого боку, окремим випадком вирішення задачі регресії. В умовах поставленого завдання пропонується застосувати алгоритми шумопридушення (сегментації) з використанням двох моделей: *адаптація* авторегресійної моделі; *моделі* сигналів з постійною гладкістю.

Ідея першого методу полягає в послідовному виконанні наступних кроків алгоритму:

- ідентифікація опорної моделі, з цією метою за наявними спостереженнями вибирається «типова» стаціонарна ділянка сигналу і будується модель M ;
- після отримання поточного значення спостережуваного сигналу знаходиться його прогнозне значення з використанням моделі M ;
- визначається ступінь відмінності реального і модельного значень сигналів (помилка прогнозу і критерій сегментації).

Однак, аналіз моделі авторегресивного ковзаючого середнього, має обмеження по стаціонарності досліджуваного процесу і припускає, що статистичні характеристики сигналу не змінюються з часом. Реальні сигнали в гетерогенних мережах рухомого радіозв'язку рідко відповідають цій вимозі на великому часовому інтервалі. У зв'язку з цим, в роботі для вирішення поставленого завдання ця модель не розглядається.

Друга модель базується на ідеї регулярності сигналу, а математичною характеристикою регулярності є показник Гьольдера, який є критерієм сегментації сигналу. Видалення з сигналу шумової складової з невідомими або мінливими характеристиками логічніше всього

проводити локально, тобто в залежності від інтервальних властивостей просторової та частотної форм сигналу.

Під сегментацією будемо розуміти процес розділення сигналу на ділянки (сегменти), відповідні деяким структурним одиницям. У свою чергу, сегмент – це ділянка сигналу, задані властивості якого можуть бути прийняті постійними. Для сегмента можна визначити його межі, тобто момент часу зміни властивостей сигналу. Завдання сегментації може бути сформульоване як задача пошуку меж сегментів або задача пошуку моментів зміни властивостей сигналу [8, 9]. Тому далі пропонується в якості попереднього етапу шумопридушення здійснити сегментацію сигналу за принципом регулярності або локальної мінливості. В якості характеристики локальної регулярності сигналу обираємо показник Гьольдера [5]. Відомо, що функція $f(t)$ задовольняє умові Гьольдера-Ліпшиця з показником (порядком) $\alpha : 0 \leq \alpha \leq 1$ в деякій точці t_0 , якщо існує деяка постійна величина A , така, що для всіх t з області t_0 справедлива умова $|f(t) - f(t_0)| \leq A|t - t_0|^\alpha$.

Якщо в даній точці функція має похідну, яку можна визначити як межу $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}$, то функція $f(t)$ задовольняє в точці t_0 умові Гьольдера-Ліпшиця будь-якого порядку $\alpha < 1$. Параметр α показує, наскільки регулярна функція $f(t)$ в деякій точці t_0 . Збільшення цього показника означає збільшення регулярності функції, відповідно, зменшення порядку α визначає зниження регулярності функції $f(t)$.

Виходячи з досліджень [10] для реалізації вейвлет-методу для оцінки досліджуваного сигналу мобільного радіозв'язку з різноманіття існуючих вейвлетів були обрані вейвлети Хаара. У його базисі вихідний сигнал представляється у вигляді узагальненої форми:

$$Hf(s, x) = \frac{1}{s} \int_{x-s \sup \psi}^{x+s \sup \psi} f(t) \psi\left(\frac{t-x}{s}\right) dt,$$

де $\psi(s, x)$ – базисна функція Хаара, а $f(t) = \begin{cases} f(t) + \eta, & t \in (a, b) \\ f(t), & t \notin (a, b) \end{cases}$ – досліджувана модель

чистого сигналу і сигналу з зашумленими ділянками на певному інтервалі аналізу.

Як відомо, система функцій $\{\psi_n | \psi_n \in L^2(R), k \in Z\}$ утворює ортонормований базис, якщо функція $f(t)$ може бути розкладена в ряд по функціях цієї системи, тобто

$$f(t) = \sum_k c_k \psi_k(t).$$

У такому випадку, для отримання коефіцієнтів перетворення будемо використовувати попередньо узагальнені проміжні суми Хаара, що розраховуються за формулами розкладання (1) і синтезу (2) сигналу:

$$a_i = \sum_s g_s f_{2i+s}, \quad d_i = \sum_s h_s f_{2i+s}, \quad (1)$$

$$f_i = \sum_s \tilde{h}_s d_{i-s} + \tilde{g}_s a_{i-s} \quad (2)$$

Ідея нелінійного (порогового) видалення шуму полягає в тому, що базис Хаара є ортогональним і H -перетворення "стискає" сигнал до невеликого числа щодо великих коефіцієнтів. З іншого боку, "білий" шум при будь-якому ортогональному перетворенні зберігає свою структуру і амплітуду. Тому порогове обрізання коефіцієнтів H -перетворення не впливає на структуру сигналу, сильно знижуючи шум. H -перетворення близьке до "ідеального" проектору, в ньому зберігаються ті і тільки ті коефіцієнти, для яких сигнал перевищує шум.

Функції Хаара мають компактний носій, а значення коефіцієнтів H -перетворення, залежать від значення досліджуваного сигналу в області деякої точки і пропорційні масштабу локальних змін сигналу. Якщо можливо оцінити показник Гьольдера-Ліпшиця в

кожній точці, то існує можливість виділити ділянки його зниження, а, отже, сегментувати сигнал. Даний алгоритм сегментації сигналів в більшій мірі орієнтований на дослідження низькочастотних сигналів або їх згладжених компонент. Критерієм сегментації в даному випадку є зміна гладкості сигналу, математичною характеристикою якого служить показник Гьольдера. Одним з блоків алгоритму являється обчислення неперервного вейвлет-перетворення (НВП). Даний метод оснований на припущенні, що сигнал описується віннеровським процесом з мінливим показником Херста. Критерієм сегментації в цьому алгоритмі являється показний Гьольдера, оцінюваний методом вейвлет-аналізу, значення якого співпадає зі значенням показника Херста.

Для нестационарного радіосигналу вейвлет-коефіцієнти $d_{j,k}$ можуть бути знайдені з рівняння [5]:

$$M[d_{j,k}^2] = \int f(\lambda) 2^j |\psi(2^j \lambda)|^2 d\lambda, \quad (3)$$

де $f(\lambda)$ і $\psi(\lambda)$ – спектр потужності для вибірки V та перетворення Фурє для вейвлет-функції $\psi_0(\cdot)$, відповідно.

На основі (3) отримуємо:

$$M[d_{j,k}^2] \sim 2^{j(2H-1)} c_f C(H, \psi_0), \text{ де } C(H, \psi) \text{ – постійна, яка залежить від } H \text{ та } \psi_0. \quad (4)$$

Якщо довжина вибірки V рівна n , тоді доступне число вейвлет-коефіцієнтів в октаві j дорівнює $n_j = 2^{-j}n$. В результаті одержуємо наступний вираз:

$$\mu_j = M[d_{j,k}^2] \approx \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_{j,k}|^2.$$

Величина μ_j являється незміщеною і заможна оцінка для $M[d_{(j,\cdot)}^2]$.

Формула (4) описує можливий спосіб оцінки показника Херста у вигляді залежності:

$$\log_2 \mu_j \sim (2H - 1)j + c = \alpha j + c, \text{ де } c = \text{const}.$$

При Хаар вейвлет-перетворенні скейлінг- і вейвлет-коефіцієнти Хаара можуть бути рекурсивно обчислені [11]:

$$u_{j-1,k} = 2^{-\frac{1}{2}}(u_{j,2k} + u_{j,2k+1}); \quad w_{j-1,k} = 2^{-\frac{1}{2}}(u_{j,2k} - u_{j,2k+1}).$$

Враховуючи, що $\sigma^2[\text{detail}_j] \sim 2^{j(2H-2)}$, можна оцінити показник Херста H , підбираючи пряму лінію на log-log графіку, $\log_2 \left(\frac{2^j}{n_0} \sum_k |w_{j,k}|^2 \right) = (2\hat{H} - 1)j + c$, де \hat{H} – оцінка H ; n_0 – об'єм даних; c – кінцева константа.

Доведено [11], що отримана оцінка є незміщеною при достатньо довільних умовах і ефективною при припущенні гауссівської структури даних.

В якості прикладу проведемо аналіз змін в сигналі, отриманому при радіомоніторингу [12], методом вейвлет-аналізу, заснованого на дослідженні динаміки показника Херста.

На рис.1 наведено вид сигналу (а), динаміка змін його показників Херста (б), кореляційна розмірність (в) і ентропія (г).

Кореляційна розмірність D показує мінімальну кількість розмірностей простору (n – розмірність вміщення), в якому розміщуються траєкторії. У нашому випадку вона дорівнює 1,382. Як видно з рисунка, кореляційна розмірність починає зменшуватися – це говорить про те, що дана динамічна система є не випадковою, а її поведінка визначається певним обмеженим набором параметрів.

Кореляційна ентропія показує ступінь віддалення близьких фазових траєкторій і дозволяє оцінити кількість інформації необхідної для прогнозу поведінки зміни рівня сигналу в майбутньому. Кореляційна ентропія дорівнює 0,295. Тобто цей коефіцієнт показує час, на який можна спрогнозувати поведінку динамічної системи.

Показник Херста показує трендовість або персистентність ряду часових змін сигналу. Він розраховується за допомогою алгоритму R/S аналізу. Якщо показник Херста знаходиться в інтервалі (0,5...1], то це говорить про те, що даний ряд змін сигналу трендовий, тобто майбутня зміна рівня сигналу буде мати той же знак, що і попередній. Якщо показник Херста знаходиться на інтервалі дорівнює 0,5, то це говорить про те, що рівень сигналу змінюється

за нормальним законом розподілу. Якщо показник Херста знаходиться на інтервалі $[0; 0,5)$, це говорить про те що ряд змін рівня сигналу персистентен, тобто для майбутнього члена ряду більш імовірна зміна знака, ніж збереження його. На рис. 1 показник Херста $(H) = 0,4204$. Це означає, що даний ряд має трендові властивості.

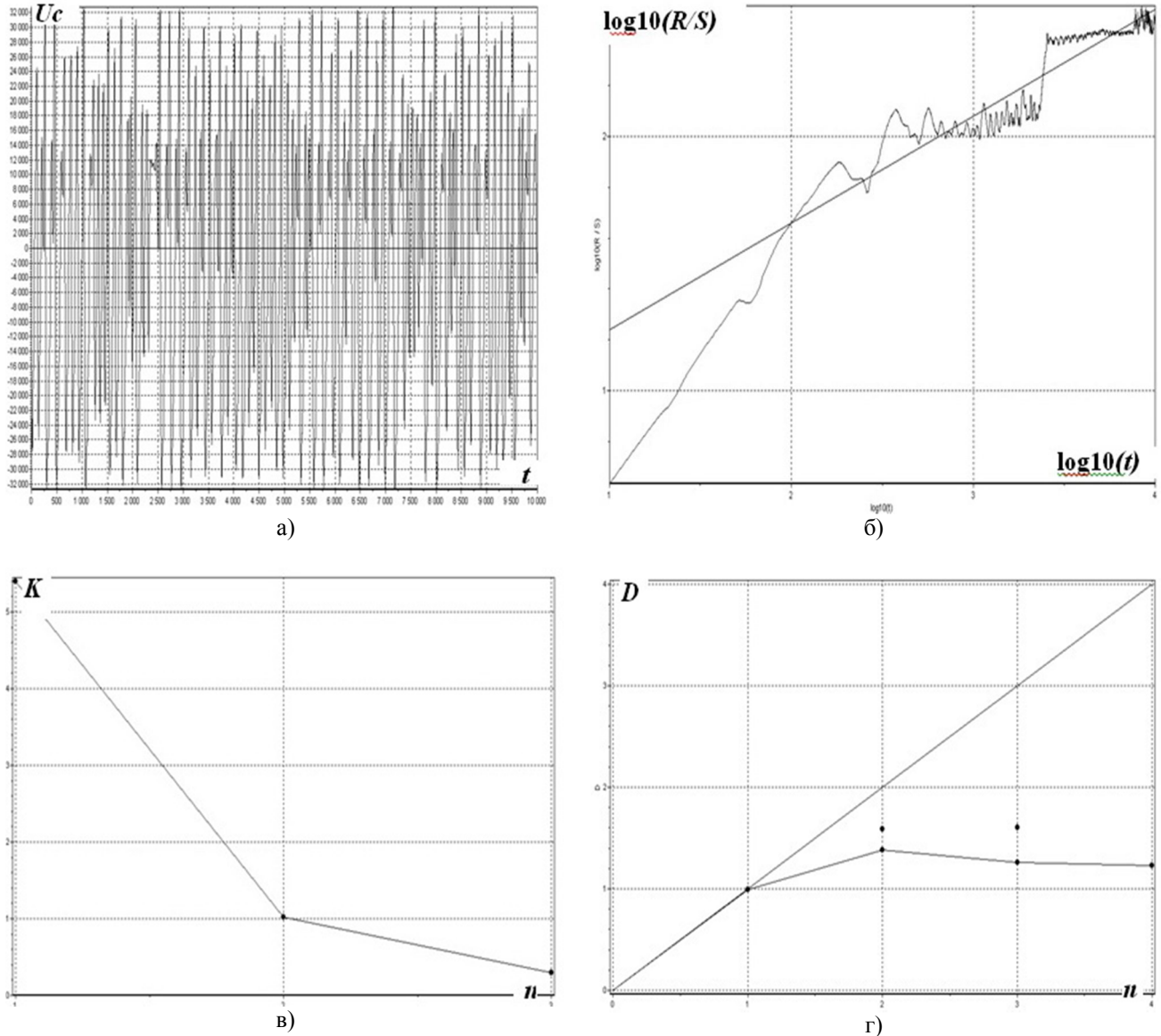


Рис. 1. Аналіз змін сигналу радіомоніторингу

При вирішенні задачі сегментації сигналу в якості границь сегментів можна вибрати моменти зміни властивостей нестационарного часового ряду, використовуючи вейвлет-методи виявлення змін [13], що дозволяють аналізувати нестационарні процеси із стаціонарними приростами. Пропонується метод розв'язання задачі виявлення зміни властивостей нестационарного часового ряду зі стаціонарними і масштабно незалежними приростами шляхом застосування R/S -аналізу до кожного рівня вейвлет-коефіцієнтів неперервного вейвлет-перетворення (НВП) [4, 5], що дозволяє відстежувати зміну типу кореляційної структури такого ряду.

В основі R/S -аналізу лежить співвідношення $(R/S)_n = Cn^H$ [10], де n – розмір вибірки; H – показник, що визначає довгу або коротку пам'ять (експонента Херста); R – розмах вибірки; S – емпірична дисперсія; C – константа.

При визначенні моменту зміни властивостей випадкового процесу по єдиній реалізації процесу. В основі R/S -аналізу лежить припущення про залежність поточного відліку даних від попередніх, тобто про наявність короткострокових або довгострокових трендів. Цей

принцип відбивається в параметрі n , який є індексом часу – масштабу для періодів довжини n . Тому при обчисленні $\log(R/S)_n$ для кожного рівня НВП n вибирається з наступних міркувань. Індекс n виражає властивості даних, які мають місце на протязі характеристичного періоду довжини, отже, його можна використовувати при характеристиці пам'яті системи по періоду довжини. Так як НВП на кожному рівні представляє певну частотну смугу і характеризує компоненти з певним періодом, для кожного рівня НВП n можна вибрати пропорційно масштабу s .

Висновки. На основі проведеного дослідження можна запропонувати наступний алгоритм сегментації сигналу для гетерогенних мереж цифрового радіозв'язку:

- вибір параметрів алгоритму: число рівнів вейвлет-перетворення, величина вікна, обчислення довірчих меж;
- виконання НВП;
- перегляд кожного рівня НВП ковзним вікном, обчислення $\log(R/S)_n$ -статистики, порівняння її з довірчими межами;
- вибір в якості точок сегментації сигналу точок, в яких $\log(R/S)_n$ -статистика виходить за межі довірчого інтервалу;
- оцінка характеристик сегментів за допомогою $(R/S)_n$ – статистики та класифікація цих сегментів за допомогою алгоритму кластерного аналізу [7].

Для реалізації запропонованого підходу була розроблена імітаційна модель MatLab. Результати моделювання показали, що при обробці сигналу описаного вище методом сегментації сигналу з локальною жорсткою пороговою обробкою, дозволяє підвищити максимальне відношення сигнал / шум більше ніж у п'ять разів в порівнянні з методом м'якого глобального трешолдінгу. Таким чином, отримані дані показали, що ортогональне вейвлет-перетворення дозволяє здійснювати якісний аналіз сигналу з отриманням характеристик локальних інтервальних особливостей з використанням показника Гьольдера і суттєво підвищити ефективність обробки сигналу.

Література

1. Сайко В.Г. Исследование статистических характеристик частотно-селективного канала систем беспроводной широкополосной радиосвязи / В.Г. Сайко, С.В. Толюпа, А.В. Жданенко // Зв'язок. – 2011. – № 4. – С. 5-8.
2. Системи та мережі цифрового радіозв'язку: інженерно-технічний довідник / [Олійник В.Ф., Кривуца В.Г., Сайко В.Г., Булгач С.В.]. – Ніжин: Аспект-Поліграф, 2011. – 612 с.
3. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: монографія. / В.Г. Сайко. – К.: Золоті ворота, 2011. – 300 с.
4. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории / К. Блаттер М.: Техносфера, 2004. – 273 с.
5. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: пер. с англ. /С. Мала. –М.:Мир, 2005. – 671с.
6. Штарк Г.Г. Применение вейвлетов для ЦОС /Г.Г. Штарк. М.:Техносфера, 2007. –192 с.
7. Барсегян А.А. и др.. Методы и модели анализа данных: OLAP Data и Mining / А.А. Барсегян. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 336 с.
8. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов / И.В. Никифоров. – М.: Наука, 1983. – 200 с.
9. Обнаружение изменений свойств сигналов и динамических систем / Бассиль М. и др. – М.: Мир, 1989. – 278 с.
10. Шелухин О.Н. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О.Н. Шелухин, А.В. Осин, С.М. Смольский. – М.: Физмат, 2008. – 368с.
11. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. New York: SIAM. - 1992.
12. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу: навч. посібник. / Слободянюк П.В. та інш.; за ред. В.Г. Кривуци – К.: ДУІКТ, 2012. – 596 с.
13. Тристанов А.Б. Обнаружение изменений в сигнале методом вейвлет-анализа / А.Б. Тристанов // Труды 2-ой Всеросс. науч. конф. «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MatLab». М.: ИПУ РАН. – 2004. – С. 1798-1821.