

*М.І. КОЗЛЕНКО*, канд. техн. наук, доц., ПВНЗ "Галицька академія",  
Івано-Франківськ

## **ЧАСОВА СКЛАДНІСТЬ АЛГОРИТМІВ ЦИФРОВОЇ ДЕМОДУЛЯЦІЇ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ З КЕРОВАНОЮ ЕНТРОПІЄЮ**

Проведено дослідження часової складності реалізації алгоритмів цифрової демодуляції широкосмугових сигналів з керованою ентропією у порівнянні з класичним кореляційним опрацюванням. Встановлено, що демодуляція сигналів з керованою ентропією здійснюється у щонайменше вісім разів швидше, що дозволяє покращити завадостійкість обміну даними в розподілених комп'ютерних системах та мережах загального та спеціального призначення. Лл.: 5. Бібліогр.: 14 назв.

**Ключові слова:** часова складність, алгоритм, широкосмуговий сигнал, керована ентропія, комп'ютерна система.

**Постановка проблеми.** Одним з найважливіших питань надійного функціонування розподілених комп'ютерних систем та мереж загального та спеціального призначення є стабільність обміну даними. Як правило, завадозахищеність передачі даних в сучасних умовах забезпечується використанням широкосмугових сигналів [1, 2]. Традиційні методи формування широкосмугових сигналів мають низку недоліків, зокрема, нерівномірність розподілу енергії сигналів за частотами [3], суттєва апаратна та алгоритмічна складність та ін., що не дозволяє повною мірою використати їх переваги. Отже, розроблення нових методів формування та опрацювання широкосмугових сигналів є актуальною науковою задачею.

Необхідність у якісному та швидкому обміні даними у розподілених комп'ютерних системах зумовлює практичне завдання по створенню простих, надійних та недорогих приймально-передавальних каналоутворюючих пристроїв. Результативне вирішення цього завдання можливе за умови успішного розв'язання наукових проблем створення та розвитку нових ефективних методів передавання та приймання інформації в таких системах, зокрема, методів формування та опрацювання широкосмугових сигналів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Відомості про перспективність використання широкосмугових сигналів міститься у [4, 5]. Значний розвиток способів обміну даними, в основі розширення спектру яких лежить використання негармонійних форм сигналів-носіїв, описано зокрема у [6]. Відомі способи, де широкосмугові сигнали-носії

формується та обробляються за допомогою явищ динамічного детермінованого хаосу [7]. Практичні аспекти застосування ширококутових сигналів в комп'ютерних та телекомунікаційних системах містяться у [8 – 10]. Започаткування розв'язання проблеми шляхом використання ширококутових сигналів з керованою (змінною) ентропією міститься у [11]. Запропонований метод формування та опрацювання ширококутових сигналів базується на використанні у якості носія шумоподібного випадкового сигналу з близьким до нормального розподілом амплітуд і рівномірною спектральною щільністю енергії, ентропія розподілу ймовірностей амплітуд якого поставлена у відповідність до символів інформаційного повідомлення, що передається. На даний час проаналізовано ефективність використання сигналів різних часових форм [12]. Оцінена рівномірність розподілу енергії таких сигналів за частотами [3]. Раніше невирішеною частиною загальної проблеми є порівняння часової складності реалізації методу у порівнянні з класичним кореляційним опрацюванням, саме цьому і присвячена дана робота.

**Формулювання цілей даної роботи.** Основною метою роботи є отримання кількісних показників часової складності реалізації цифрової демодуляції ширококутових сигналів з керованою ентропією і їх порівняння з класичними підходами.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Однією з основних задач при реалізації комп'ютерних систем є забезпечення високоякісного обміну даними між елементами таких систем. Широке використання бездротових технологій при побудові розподілених інтелектуальних обчислювальних систем в різних галузях промисловості, які функціонують в умовах інтенсивних завод техногенного походження, визначає необхідність застосування ширококутових сигналів. Традиційні алгоритми формування та опрацювання ширококутових сигналів мають низку недоліків, зокрема суттєву складність реалізації.

Перспективним є формування та опрацювання ширококутових сигналів основане на використанні повністю випадкових шумоподібних сигналів, ентропія розподілу яких поставлена у відповідність до символів повідомлення, що передається. В такому випадку демодуляція зводиться до статистичного оцінювання ентропії суміші сигналу і заводи протягом символного інтервалу з подальшим ухваленням рішення про дискретне значення прийнятого символу. Це забезпечує високу якість, надійність та стабільність обміну даними і є простим з погляду апаратної та програмної складності реалізації [11].

Для порівняння опрацювання сигналів за таким методом та за кореляційним розроблено алгоритмічне забезпечення, блок-схеми алгоритмів подано на рис. 1 та 2. Як можна побачити з рис. 1, при реалізації програмного забезпечення демодуляції сигналів з керованою ентропією оброблення відбувається за дещо спрощеним алгоритмом, суть якого полягає у тому, що для розрахунку оцінки ентропії поточного фрагменту широкосмугового сигналу використовується не середнє квадратичне значення відхилю від середнього, а середнє випрямлене. Основною умовою коректності функціонування запропонованого алгоритму є відсутність постійної складової, тобто вхідні значення сигналу повинні бути центровані відносно нуля, що забезпечується апаратною частиною приймального пристрою.

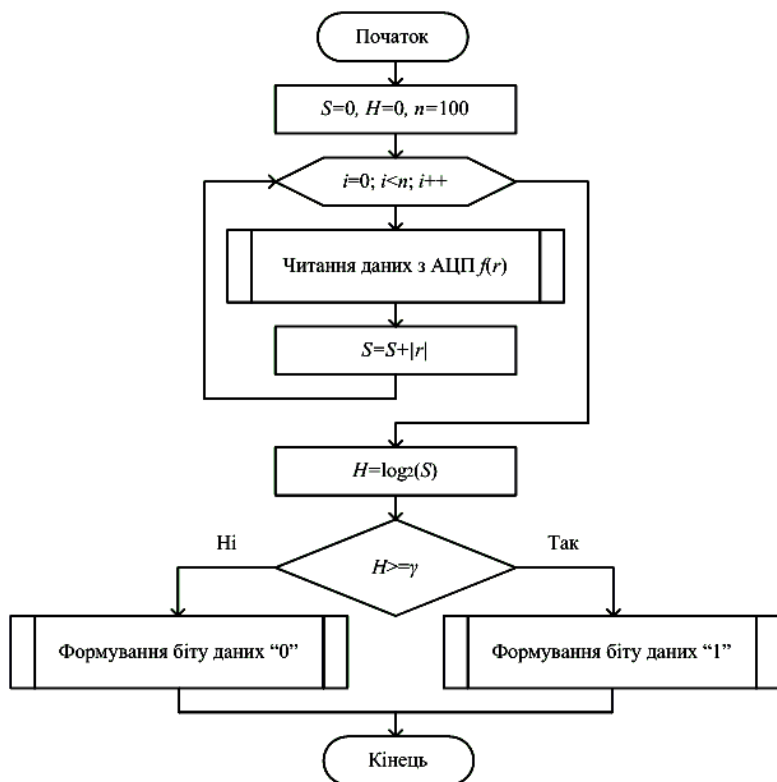


Рис. 1. Блок-схема опрацювання сигналів з керованою ентропією

Такий підхід дозволяє уникнути використання операцій піднесення у степінь та ділення, фактично, замінивши її на послідовність операцій взяття абсолютного значення і додавання. З метою перевірки впливу внесених змін на завадостійкість методу, проведено дослідження шляхом моделювання в обчислювальному експерименті в середовищі MATLAB, результати якого подано на рис. 3.

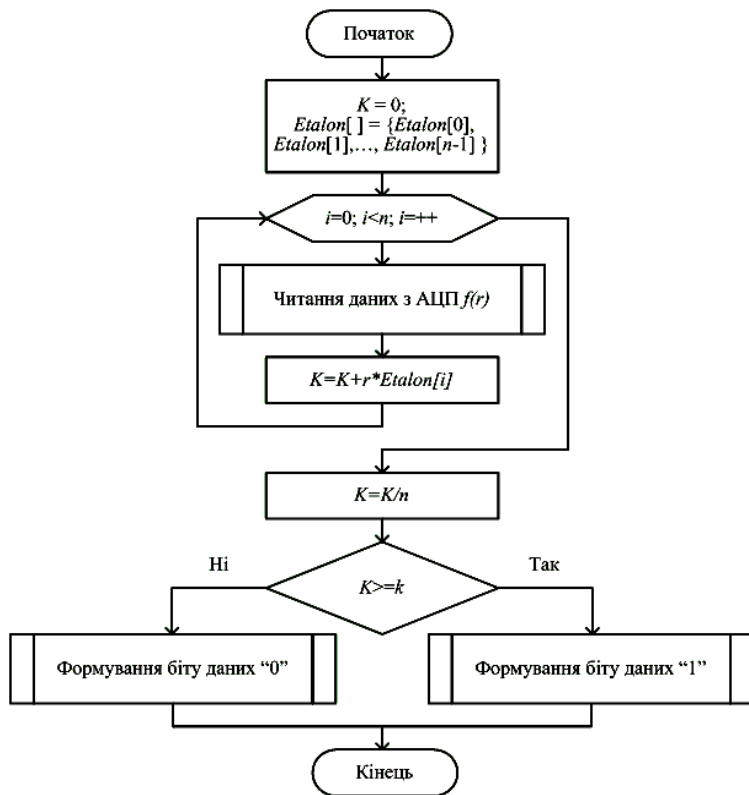


Рис. 2. Блок-схема кореляційного опрацювання сигналів

У якості критерію завадостійкості використовується частка різниці оцінок бажаних сигнальних компонент на виході демодулятора і подвоєної оцінки стандартного відхилення завади у цій точці [1]. Як можна побачити з рис. 3, для розмірів вибірок оброблюваних реалізацій широкопasmового сигналу в межах до 1000 відліків, погіршення завадостійкості практично не спостерігається. При збільшенні розмірів

вибірки завадостійкість знижується, проте несуттєво, що дозволяє вважати запропоноване спрощення процедури оброблення доцільним. Подальше практичне збільшення швидкості оброблення при реалізації алгоритмічного та програмного забезпечення можна отримати шляхом застосування апаратної функції виділення абсолютного значення, що несуттєво ускладнює апаратну частину розробленого засобу.

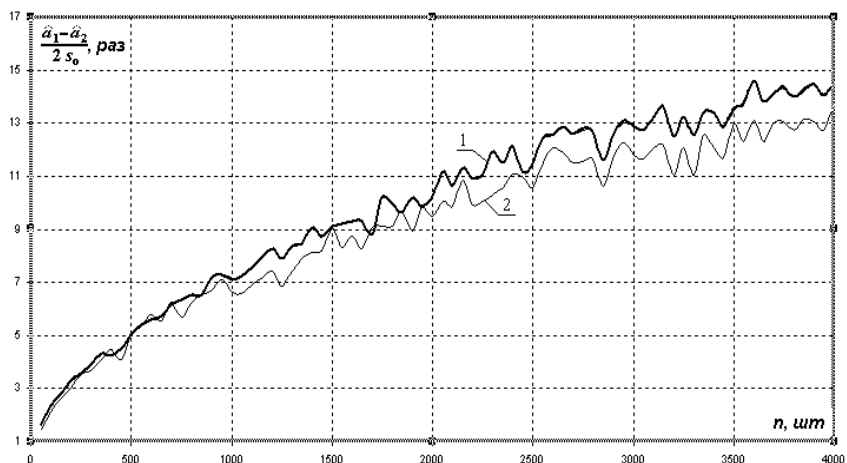


Рис. 3. Значення критерію завадостійкості в залежності від розміру вибірки  $n$ : 1 – оцінка ентропії розраховується через середнє квадратичне, 2 – через середнє випрямлене;  $(a_1 - a_2)$  – різниця бажаних сигнальних компонент на виході демодулятора,  $s_0$  – оцінка стандартного відхилення завади у цій точці

При реалізації програмного забезпечення кореляційного опрацювання сигналів алгоритм оптимізовано для роботи з цілими числами. Як можна побачити з рис. 3, еталон форми псевдовипадкового сигналу потребує додаткових комірок пам'яті для його збереження, крім того використовуються операції множення, що збільшує час процедури демодуляції.

Порівняння ефективності алгоритмічного забезпечення проведено за параметром часової складності [13] на однакових апаратних ресурсах – програмована система на кристалі CY8C29466 сімейства PSoC-1 фірми CYPRESS [14]. Тактова частота 24 МГц. Часова складність оцінена за часом опрацювання сигналів. Програмне забезпечення реалізовано мовою асемблер. Для порівняння продуктивності поданих алгоритмів проведено порівняння кількості опрацьованих відліків за однаковий проміжок часу.

**Основні результати досліджень.** В процесі проведення досліджень встановлено, що 100 16-ти бітових знакових відліків сигналу за кореляційним методом опрацьовуються протягом  $1,3125 \cdot 10^{-4}$  с. За такий інтервал часу програмне забезпечення опрацювання сигналів з керованою ентропією дозволяє опрацювати в середньому 810 відліків. Тобто, за цим методом обробляється приблизно у 8,1 разів більше відліків сигналу ніж при кореляційному обробленні за однаковий проміжок часу.

Отже, вивільняється додатковий обчислювальний ресурс, який можна використати для покращення завадостійкості шляхом використання сигналів з більшою базою. Тобто, при однакових обчислювальних затратах, програмне забезпечення опрацювання сигналів з керованою ентропією дозволяє опрацьовувати сигнали з більшою у 8,1 разів базою, у порівнянні з кореляційним методом, що, відповідно, покращує завадостійкість. Автором отримано загальноприйнятті [1] характеристики завадостійкості у вигляді залежності ймовірності спотворення одного двійкового символу від нормованого відношення сигнал/завада (представлено на рис. 4 для бази сигналів  $W/R = 17$  дБ) та відношень сигнал/завада на вході та виході демодулятора приймального пристрою (див. рис. 5).

Максимальне покращення завадостійкості складає величину близько 5 дБ, а при зафіксованій на рівні  $10^{-6}$  ймовірності помилок (одна із стандартних величин в сучасних комп'ютерних мережах) – не менше 2 дБ. Метод є більш ефективним в діапазоні значень відношення сигнал/завада  $S/N$  від мінус 7,5 до +15,2 дБ, і значень нормованого відношення  $E_b/N_0$  від 9 дБ, порівняно з кореляційним опрацюванням, в умовах однакової часової складності.

Крім того, вивільнений обчислювальний ресурс можна спрямувати на реалізацію завадостійкового кодування, зокрема турбо-кодами, що також приводить до покращення завадостійкості.

**Висновки.** Завадостійкість методу обміну даними широкосмуговими сигналами з керованою ентропією є нижчою від теоретичної завадостійкості оптимального кореляційного оброблення ортогональних сигналів, проте реалізація апаратної частини приймально-передавального обладнання є значно простішою, а часова складність демодуляції є значно (до 8 разів при 16-ти розрядній оцифровці) меншою, що дозволяє за однаковий проміжок часу обробляти сигнали з більшою базою, і тим самим суттєво покращити завадостійкість.

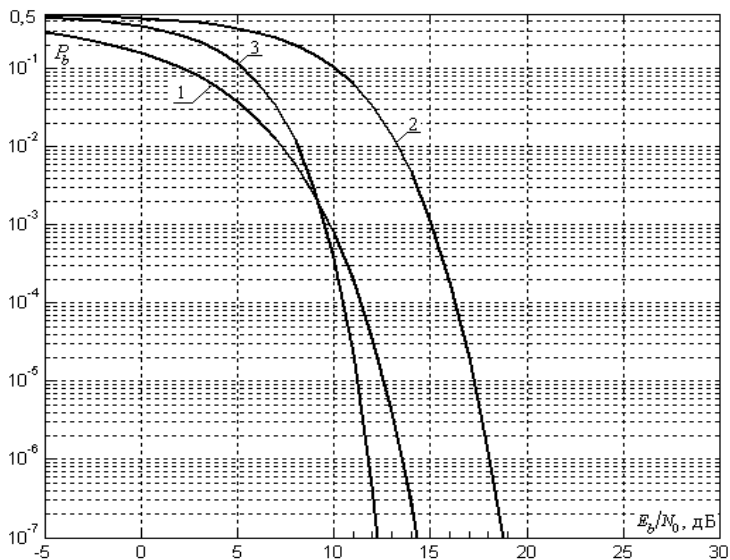


Рис. 4. Завадостійкість обміну даними (залежність ймовірності бітової помилки від нормованого відношення сигнал/завада): 1 – оптимальне оброблення ортогональних сигналів, 2 – завадостійкість обміну сигналами з керованою ентропією, 3 – в умовах однакової часової складності

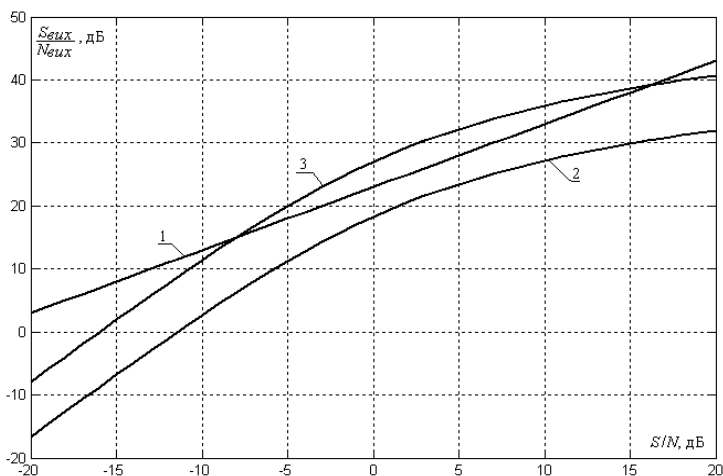


Рис. 5. Завадостійкість обміну даними (залежність відношення сигнал/завада на виході демодулятора від відношення на вході)

**Перспективи подальших досліджень.** Основними напрямками подальшого дослідження є вдосконалення процедури оцінювання ентропії з метою мінімізації помилки і збільшення швидкості, аналіз завадостійкості при застосуванні інших ймовірнісних характеристик, пошук типів сигналів, які забезпечують вищу ефективність демодуляції, розроблення ефективних способів демодуляції, дослідження застосування відновлення проміжних відліків сигналу, зокрема за допомогою інтерполяції, реалізація способів ефективної бітової синхронізації тощо.

**Список літератури:** 1. *Bernard Sklar*. Digital communications: fundamentals and applications / *Bernard Sklar*. – 2-ed. – Prentice-Hall PTR, 2001. – 1079 p. 2. *John G. Proakis*. Digital Communications / *John G. Proakis, Masoud Salehi*. – McGraw-Hill higher education, 2008. – 1050 p. 3. *Козленко М.І.* Дослідження ефективності використання частотного ресурсу при формуванні широкосмугових сигналів / *М.І. Козленко* // Наукові вісті. Приватний вищий навчальний заклад "Галицька академія". – 2010. – № 1 (17). – Івано-Франківськ: Приватний вищий навчальний заклад "Галицька академія", 2010. – С. 32 – 37. 4. *Stark W.E.* Coding for Frequency-Hopped Spread-Spectrum Communication with Partial-Band Interference: Part I. Capacity and Cutoff Rate / *Stark W.E.* // IEEE Trans. Commun., vol. COM33. – №. 10, October, 1985. – P. 1036 – 1044. 5. *Geraniotis E.* Error Probabilities for Direct – Sequence Spread – Spectrum Multiple- Access Communications: Part I. Upper and Lower Bounds. / *Geraniotis E., Pursley M.B.* // IEEE Trans. Commun., vol. COM30, n. 5, May, 1982. – P. 985-995. 6. *Terrence W. Barrett*. History of Ultra-WideBand (UWB) Radar & Communications: Pioneers and Innovators. Progress in Electromagnetics Symposium (PIERS 2000). – Cambridge, Massachusetts, 2000, July. 7. *Бельский Ю.Л.* Передача информации с помощью детерминированного хаоса / *Ю.Л. Бельский, А.С. Дмитриев* // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 38. – № 7. – С. 1310 – 1315. 8. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. IEEE Standard 802.11. – IEEE Press, 1997. 9. Wireless LAN medium access control (MAC) specifications: Higher-speed physical layer extension 2,4GHz band. Part 11. ANSI / IEEE Std 802.11. – IEEE, 1999. 10. *Hanzo L.* The Pan-European Digital Cellular Mobile Radio Systems – Know as GSM / *L. Hanzo, J. Stefanov* // Mobile Radio Communications, edited by R. Steele, Chapter 8, Pentech Press, London, 1992. 11. Пат. 81017 Україна, МПК(2006) H04B 1/69. Спосіб передавання та приймання інформації / *Мельничук С.І., Козленко М.І.* (Україна). – заявка № а 2005 08893; заявл. 19.09.2005; опубл. 26.11.2007, Бюл. № 19. 12. *Козленко М.І.* Вплив часової форми випадкових сигналів з керованою ентропією на якість обміну даними в автоматизованих системах керування та розподілених комп'ютерних системах / *М.І. Козленко* // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 8(179). – Луганськ: Видавництво Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2012. – С. 56 – 62. 13. *Черкаський М.* SH-модель алгоритму / *М. Черкаський* // Комп'ютерні системи та мережі. Вісник ДУ "Львівська політехніка". – Львів, 2004. – № 485. – С. 131 – 133. 14. Cypress Perform [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cypress.com>

*Статтю представил д.т.н., проф. ПВНЗ "Галицька академія" Адасовський Б.І.*



УДК 681.325

**Временная сложность алгоритмов цифровой демодуляции широкополосных сигналов с управляемой энтропией / Козленко М.И.** // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 38. – С. 93 – 101.

Проведено исследование временной сложности алгоритмов цифровой демодуляции широкополосных сигналов с управляемой энтропией в сравнении с классической корреляционной обработкой. Установлено, что демодуляция сигналов с управляемой энтропией осуществляется в восемь раз быстрее, что позволяет улучшить помехоустойчивость обмена данными в распределенных компьютерных системах и сетях общего и специального назначения. Ил.: 5. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** временная сложность, алгоритм, широкополосный сигнал, управляемая энтропия, компьютерная система.

UDC 681.325

**Time complexity of the variable entropy spread spectrum signals digital demodulation / Kozlenko M.I.** // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 38. – P. 93 – 101.

The time complexity of the variable entropy spread spectrum signals digital demodulation algorithms has been obtained. It has been proved that the time needed for signal processing according to the variable entropy method is eight times less than that time in traditional correlative signal processing. This fact may be used for noise proof feature index improvement of the data communications in the distributed computer systems. Figs.: 5. Ref.: 14 titles.

**Keywords:** time complexity, algorithm, spread spectrum signal, variable entropy, computer system.

*Надійшла до редакції 27.06.2012*