

## Література

1. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович. – М., 1982. – 231 с.
2. Острейковский В. А. Теория надежности / В. А. Острейковский. – М., 2003. – 463 с.
3. Надёжность технических систем : справочник / Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.П. и др. / под ред. И.А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

Рецензія/Peer review : 18.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 6.12.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Лисий М.І.

УДК 681.325.3

І.М. ЛАЗАРОВИЧ

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ

С.І. МЕЛЬНИЧУК

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАВАДОСТІЙКОГО ПЕРЕДАВАННЯ ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ПРОЦЕДУРИ РАНДОМІЗАЦІЇ

*В роботі наведено вдосконалення методу завадостійкого передавання даних з використанням процедури рандомізації фазоманіпульованих сигналів (BPSK) із адаптивною апертурою для детектування прийнятої інформації у вузькосмугових каналах зв'язку. Наведено алгоритм та на основі розробленої програмної моделі наведено дослідження характеристик завадостійкості, проаналізовано переваги і недоліки запропонованого методу і розглянуто перспективи для подальших досліджень.*

*Ключові слова: дисперсія, кореляційна функція, математичне сподівання, оптимальне приймання, спектр, програмна модель, рандомізація, фазова маніпуляція, сигнал, цифрова обробка сигналів, шифрування, шумоподібний сигнал, хешування.*

IGOR MIKOLAYEVICH LAZAROWYCH

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

STEPAN IVANOVYCH MELNYCHUK

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine

### PERFECTION OF NOISE IMMUNITY METHOD OF BINARY PHASE-SHIFT KEYING SIGNALS TRANSMISSION BASIS ON RANDOMIZATION PROCEDURE

*The aim of work is noise immunity method of binary phase-shift keying signals transmission basis on randomization procedure. The offered algorithm of phase-shift keying signals detection with the use of randomization and adaptive estimation of cross-correlation function allows to accept signals at intensity of noises, that in 4 times exceeds the level of useful signal. Thus a binary phase-shift keying signals that does not require wide bandwidth, as in the case of noise signals. In comparison with earlier figures obtained from randomization methods with constant aperture, this method has 20-25% higher noise immunity. In general, the method allows to accurately receive signals in the signal to noise ratio up to 0.22-0.25. The effectiveness of the method tested on basis of the programming model.*

*Keywords: dispersion, correlation function, expectation, optimal receiving, spectrum, software model, randomization, phase shift keying of signals, digital signal processing, encryption, noise-signal, hashing.*

#### Вступ

Забезпечення безпомилкового передавання даних – це на сьогоднішній день одна із найважливіших задач в галузі телекомунікацій. Безперервне зростання кількості продукуваної людством інформації складає не менше 50-70% щороку. Як правило, інформація передається через різні типи каналів зв'язку, тому дедалі більш гостро стає проблема якісного і надійного приймання даних.

На сьогоднішній день одними із найбільш ефективних в сенсі максимальної завадозахищеності є методи передавання даних з використанням шумоподібних сигналів, зокрема М-последовностей, кодів Баркера, Гоулда, Касамі [1,2]. Водночас, їх застосування має ряд обмежень, одним із яких є необхідність широкопasmових каналів зв'язку, що в цілому приводить до збільшення складності і вартості системи передавання. Методи передавання даних на основі гармонічних вузькосмугових сигналів [2,3], можуть бути ефективними для сучасних застосувань, проте не здатні забезпечити належний рівень стійкості до завад.

Отже, розробка, дослідження та застосування нових ефективних методів передавання даних, які відповідають сучасним потребам і вимогам, є актуальною задачею.

#### Постановка завдання

В роботах [4] та [5] запропоновано використати рандомізацію для завадостійкого передавання сигналів. Розглянутий метод використовує двійкову фазову маніпуляцію сигналів BPSK, отже не вимагає широкопasmового каналу передавання і здатен працювати при максимальному відношенні сигнал/завада 0,3 – 0,33. Аналіз роботи методу, зокрема оцінок кореляції для прийнятого рандомізованого BPSK сигналу

показав, що завадостійкість в цілому може бути підвищено за рахунок зміни адаптивної апертури при детектуванні сигналів. Отже, метою роботи є дослідження методу рандомізації прийнятого сигналу, визначення способів формування «плаваючої» апертури та перевірка ефективності запропонованих рішень.

### Результати дослідження

Основна ідея методу підвищення завадостійкості при використанні фазової маніпуляції поляє в рандомізації отриманого в приймачі сигналу. Рандомізація (англ. *random* – випадковий, нерегулярний, безпорядковий) – це нелінійна процедура навмисного внесення “випадковості” або шумоподібності в обробку вибіркового даних для перетворення деяких систематичних помилок у випадкові. Рандомізація полягає в перемішуванні інформаційної вибірки відповідно до певного закону [4].

Оператор рандомізації  $\mathfrak{Ran}$  послідовності  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  позначає дію, яка полягає в переміщенні  $i$ -го елемента на місце  $j$ -го елемента послідовності  $X$ , а відповідність між  $i$  та  $j$  називають законом рандомізації [4]:

$$X = \{x_i\}, \quad \mathfrak{Ran}(X) = \mathfrak{Ran}(\{x_i\}) = X^{\mathfrak{Ran}}, \quad (1)$$

$$X^{\mathfrak{Ran}} = \{x_j\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = k_i. \quad (2)$$

де  $K = \{k_i\}$  – масив-ключ рандомізації  $\mathfrak{Ran}$ .

При рандомізації послідовності  $X$  утворюється послідовність  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n\}$ , причому  $x_i = y_j, i = \overline{1, n}$ ,

Рандомізація дозволяє виконати перетворення форми сигналу, зокрема за її допомогою можна сформувати сигнал, який по своїй формі і властивостях кореляційної функції наближений до псевдовипадкового.

Згідно з попередніми дослідженнями рандомізації для перетворення форми сигналу, найкращих показників завадостійкості можна досягнути при застосуванні  $M$ -послідовностей та гаусівського розподілу [4].

Узагальнена структурна схема, яка відображає функціонування методу наведена на рис. 1.

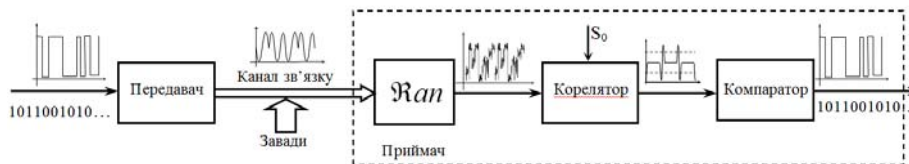


Рис.1 Структура системи передавання з рандомізацією

Нехай від джерела інформації надходить бітова послідовність. Передатчик формує фазоманіпульований вихідний сигнал, який в загальному описується виразом [1]:

$$s_m(t) = g(t) \sin[2\pi f_c t + \varphi_m(t)] \quad (6)$$

де  $g(t)$  – визначає форму сигналу,  $\varphi_m(t)$  – модулюючий сигнал, який у випадку BPSK може приймати 2 значення,  $f_c$  – частота несучої,  $t$  – час.

Двійкові дані логічного «нуля» та «одиниці» передаються наступними сигналами відповідно:

$$s_0(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \quad s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi) \quad (7)$$

де  $E_b$  – енергія інформаційної одиниці,  $T_b$  – тривалість передавання символу.

Канал зв'язку піддається впливу адитивної завади. Імовірність помилкового приймання біту інформації при впливі гаусового білого шуму AWGN визначається виразом:

$$R_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad \text{де } Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (8)$$

Після оцифрування прийнятого зашумленого сигналу в приймачі виконується перший етап обробки – рандомізація відповідно до заданого ключа  $K_i$ . Ключ рандомізації формується таким чином, щоб результуючий сигнал по формі був наближений до псевдовипадкового або шумоподібного. Методика формування ключів наведена в роботі [5].

Далі для вибірки рандомізованого сигналу  $X_k^R$  визначається кореляція із взірцевим сигналом нуля чи одиниці шляхом обчислення одного із видів функцій взаємкореляції [6]:  
взаємоструктурної функції:

$$C_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_{i+j})^2 \quad (9)$$

взаємоструктурної функції:

$$R_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_{i+j} \quad (10)$$

взаємомодульної функції:

$$R_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_{i+j} \quad (11)$$

функції взаємоеквівалентності:

$$F_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{xy} \quad (12)$$

де  $x_i, y_i$  - центровані значення відліків сигналу,  $Z_{xy}$  - це функція менше з двох, що визначається як:

$$Z_{ij} = \begin{cases} S_i, & S_i < S_j \\ S_j, & S_i \geq S_j \end{cases} \quad (13)$$

Вихідний сигнал корелятора, на вхід якого подано фазоманіпульований спотворений AWGN-шумом сигнал, який представляє бітову послідовність 01010 з відношенням сигнал/шум що складає 0,25, при використанні взаємоструктурної функції, наведено на рисунку 2, а. Як видно з рисунка, функція кореляції має чіткі пікові значення, проте детектування сигналу при встановленні фіксованої апертури та вказаному відношенні сигнал/шум є неможливим внаслідок сильного спотворення кореляції.

Автором пропонується застосувати адаптивну апертуру, яка враховує зміну середнього значення функції кореляції на заданому проміжку. Для реалізації даного методу пропонується наступний алгоритм:

1. Визначити ковзне математичне сподівання [6] кореляційної функції згідно виразу:

$$M_{R_{xy}(j)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1+j}^{n+j} R_{xy}(i+j) \quad (14)$$

де  $R_{xy}(i+j)$  - значення взаємкореляційної функції,  $n$  – розмір вибірки для обчислення ковзного математичного сподівання.

2. Визначити середньо-квадратичне відхилення кореляційної функції:

$$\sigma_{R_{xy}} = \sqrt{D_{R_{xy}}} \quad (15)$$

де  $D_{R_{xy}}$  - дисперсія функції кореляції на вибраному проміжку  $n$ , що обчислюється згідно виразу:

$$D_{R_{xy}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{xy}(i) - M_{R_{xy}})^2 \quad (16)$$

де  $M_{R_{xy}}$  - математичне сподівання кореляційної функції на вибраному проміжку  $n$ .

3. Встановити значення адаптивної апертури кореляційної функції згідно виразу:

$$a_i = M_{R_{xy}(j)} \pm \Delta \sigma_{R_{xy}} \quad (17)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який враховує тип функції кореляції

4. Перевірити вихід значення кореляційної функції за межі апертури, що відповідатиме детектування інформаційного біту. На рисунку 2,б наведено приклад кореляційної функції спотвореного AWGN-шумом сигналу, для якої встановлена адаптивна апертура.

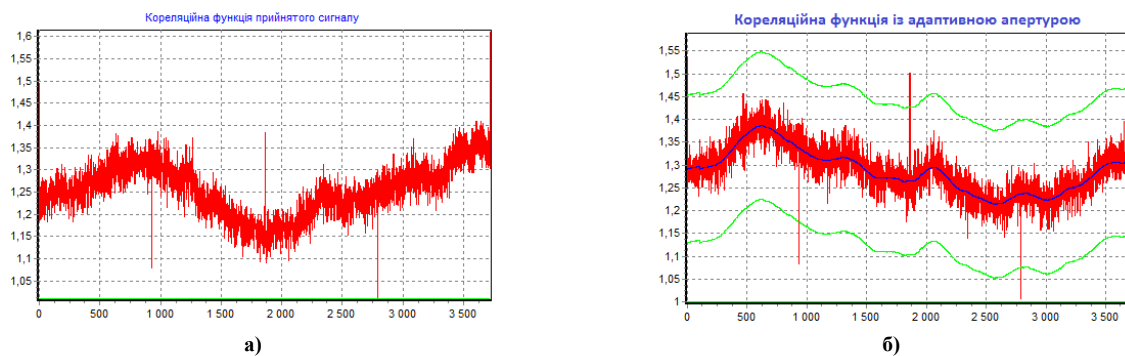


Рис.2 Кореляційні функції рандомізованого BPSK-сигналу

Для перевірки ефективності запропонованого алгоритму було розроблено програмну модель, яка реалізує приймання BPSK-сигналів і реалізує вищенаведений алгоритм. За її допомогою проведено ряд експериментів, які підтвердили ефективність методу. На рисунку 3 наведено функції імовірності

правильного приймання сигналів  $P_i$ , спотворених адитивним AWGN-шумом із змінним відношенням сигнал/шум  $S/N$ . Рисунок 3,а відображає ймовірність для рандомізації з використанням М-последовностей, а рисунок 3,б – рандомізації з рівномірним розподілом. Проведені експерименти дозволили встановити оптимальне значення коефіцієнта  $k$  із виразу 17.

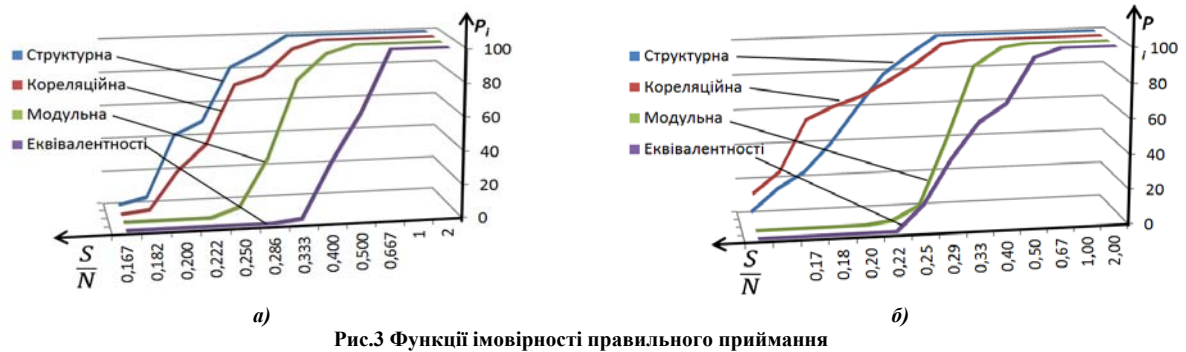


Рис.3 Функції ймовірності правильного приймання

На основі отриманих табличних значень залежності  $P_i$  від інтенсивності шуму та коефіцієнта  $\Delta$  було побудовано поверхню (рисунок 4), що дозволило обрати його оптимальне значення, що визначає адаптивну апертуру, яке знаходиться в межах 3...3,5, що відповідає відомому [7-8] правилу  $3\sigma_x$ .

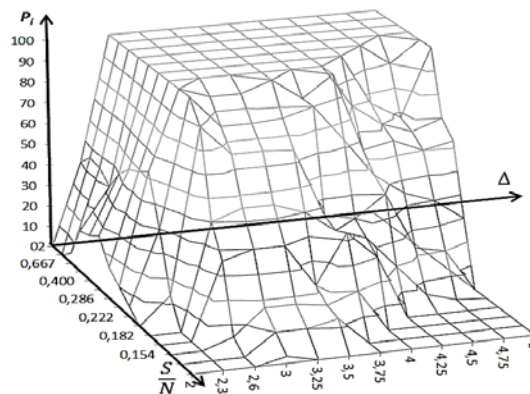


Рис.4 Функція залежності  $P_i$  від інтенсивності шуму та коефіцієнта апертури  $k$

Наведені рішення дозволили досягнути ймовірності правильного приймання сигналів  $P_i$ , що прямує до 100% при відношенні сигнал/шум до 0,22-0,25, що складає 7-8дБ.

### Висновки

Таким чином, запропонований алгоритм детектування фазоманіпульованих сигналів з використанням рандомізації та адаптивної оцінки кореляційної функції дозволяє приймати сигнали при інтенсивності шумів, що до 4-х разів перевищує рівень корисного сигналу. При цьому в канал зв'язку подається фазоманіпульований сигнал, який не вимагає широкої смуги пропускання, як у випадку застосування шумоподібних сигналів. В порівнянні із отриманими раніше показниками методів на основі рандомізації із постійною апертурою, даний метод має на 20-25% вищу завадозахищеність. Недоліком методу є необхідність додаткових обчислень для визначення адаптивної апертури, що в цілому приводить до ускладнення технічної реалізації.

### Література

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Проakis Джон. Цифровая связь. Пер. с англ./Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800с.: ил.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Лазарович І.М. Перспективи застосування методів рандомізації для формування сигналів в оптимальному приймачі / І.М. Лазарович // Наукові вісті Інституту менеджменту та економіки "Галицька академія" (технічні науки). – 2011. – № 2(19).– С. 44 – 47.
5. Лазарович І. М. Реалізація методів сигнальної рандомізації для завадостійкого передавання даних / І.М. Лазарович // Вісник Хмельницького національного університету (технічні науки). – 2014. – № 6. – Хмельницький: ХНУ, 2014. с.165-168.
6. Николайчук Я.М. Проектирование специализированных компьютерных систем. Навчальний посібник /

Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, І.Р. Пітух. – Тернопіль: ТзОВ «Техно-граф», 2010.-392с., іл.

7. Феер К. Беспроводная цифровая связь: методы модуляции. — Пер. с англ. // Под. ред. В. И. Журавлёва. — М.: Радио и связь, 2000. — 520 с.

8. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит. - М.: Техносфера, 2011. - 904 с.

Рецензія/Peer review : 25.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.

Рецензент: д.ф-м.н. проф. Філевич П.В.

УДК 621.396.12

І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ

Національна академія Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького

Л.В. КАРПОВА, Д.О. ЛЕВЧУНЕЦЬ

Хмельницький національний університет

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ УЗГОДЖЕНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ВУЗЬКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ПІДХОДІВ ЛОКАЛЬНО-БАЗИСНОГО АНАЛІЗУ

*В даній статті висвітлено питання вагової обробки вузькосмугових частотно-модульованих сигналів під час розв'язання задач синтезу алгоритмів їх узгодженої фільтрації. Наведено результати оцінки потенційної ефективності застосування вагової обробки спектру вузькосмугового сигналу, який містить декілька часових інтервалів локалізації спектральної щільності. Для визначення центрів інтервалів локалізації та їх тривалості застосовано метод стаціонарної фази, який, як показано в результатах, за сучасних можливостей елементної бази набуває іншого значення в задачах обробки сигналів.*

*Ключові слова: стаціонарна фаза, сигнал, частотна модуляція, виявлення, узгоджений фільтр.*

I.I. CHESANOVSKYY

National Academy of State Border guard service of Ukraine named after B. Khmelnytskyi

L.V. KARPOVA, D.O. LEVCHUNETS

Khmelnytsky National University

### IMPROVEMENT OF METHODS OF MATCHED FILTERING NARROWBAND SIGNALS BASED ON APPROACHES LOCALLY-A BASIC ANALYSIS

*This article is devoted to the question of weight treatment narrow band frequency-modulated signals when solving problems of synthesis algorithms matched filtering. The results of the evaluation of the potential effectiveness of using a weighting spectrum processing a narrowband signal that contains several time intervals of localization of the spectral density. To determine the centers of the intervals of localization and their duration was applied the method of stationary phase, as shown in the results, with today's facilities, element base, acquires a different value in the tasks of signal processing.*

*Keywords: stationary phase, signal, frequency modulation, detection, matched filter.*

Перехід радіосистем на широкосмугові технології передачі дискретних повідомлень обумовили значний прогрес в питаннях підвищення енергетичної і частотної ефективності використання радіо ресурсу [1]. Проте, високі показники ефективності таких систем досягаються лише в умовах високої «завантаженості» радіоканалу, що притаманно тільки окремому класу телекомунікаційних і радіолокаційних систем, в інших випадках доцільність розширення смуги частот радіоканалу, є як правило, невиправданою і більш оптимальним варіантом є «вузькосмугові» варіанти побудови радіоканалу [1, 2]. Іншим випадком, при якому канал не може бути реалізований із застосуванням широкосмугових сигналів, є системи добування інформації, в яких корисна інформація представляє собою вузько смуговий модулюючий процес зондуючого сигналу. В багатьох випадках, цей процес є детермінованим в обмеженій множині реалізацій і задача зводиться лише до правильного розрізнення наявної реалізації. Це типовий випадок локації (радіо, акусто, сейсмо), коли основна проблема на етапі обробки сигналів полягає в необхідності розрізнення сигналів, що слабо рознесені як в часі так і по частоті. Особливість цього випадку полягає в тому, що достеменно відомо про різну частотно-часову динаміку сигналів, яка обумовлена різними просторовими формами об'єктів зондування. Проте, в наслідок вузькосмуговості зондуючих сигналів і самих модулюючих фізичних ефектів, реалізувати цю особливість у вигляді узгодженого алгоритму практично неможливо. Розглянемо задачу виявлення фінітного сигналу, що модульований по частоті вузько смуговим полігармонійним процесом. Модель такого сигналу може бути представлена у вигляді

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \psi(t)), \quad (1)$$

$$U(t) = \begin{cases} const, & 0 \leq t \leq \tau_i \\ 0, & t < 0, t > \tau_i \end{cases}, \quad \psi(t) = \Delta\omega \int_0^t \sum_i \sin(\Omega_i x + \varphi_i) dx,$$

де  $\tau_i$  – тривалість сигналу (імпульсу);  $\Delta\omega$  – девіація частоти.

Одна із можливих форм (випадкова комбінація близьких частот і початкових фаз) модулюючого сигналу (1), що містить чотири складові амплітудний спектр модульованого сигналу приведено на рис. 1. Враховуючи відносно коротку тривалість сигналу, отриманий спектр містить достатньо велику кількість