

Дослідження ефективності сигнальної рандомізації при передаванні цифрових даних

Лазарович І.М.

Інститут менеджменту та економіки "Галицька Академія"
igla@tvnet.if.ua

Abstract

Lazarowych I.M. Research of signal randomizations efficiency at digital data communication. In work the method of signal randomization of harmonious signals with using different types of pseudo-noise sequences is considered. It enables to take advantages of correlation method of adopting pseudo-noise signals at the use of harmonious signals and phase modulation. The flow diagram of the digital system of transmission and its program model is developed, that allowed the conducted research of the offered method and his efficiency.

Вступ

Проблема підвищення якості систем передавання і приймання цифрових даних в умовах невинно зростаючих об'ємів інформаційних потоків в сучасному суспільстві є дуже важливою. Комплексне використання фундаментальних теоретичних основ цифрової обробки інформації, а також сучасні потужні обчислювальні засоби та засоби моделювання дають можливість пошуку нових методів та підходів до вирішення задач в галузі телекомунікацій.

Як показує аналіз напрацьованих вітчизняних та зарубіжних вчених по даному напрямку, лінійні методи, які часто застосовуються для цифрової обробки даних (ЦОД), досягли значного насичення в своєму розвитку, а нелінійні методи є малодослідженими. Водночас перспективними і малодослідженими є нелінійні методи цифрової обробки даних на основі теоретико-числових перетворень в базисах Галуа, Крестенсона, Крестенсона-Галуа.

Особливе місце в ЦОД займають нелінійні методи рандомізації та так звані хаос-сигнали. Зокрема в [1] наводиться алгоритм завадостійкого передавання цифрової інформації з використанням рандомізації, що використовується для розширення спектру сигналу. В роботі [2] наведено методологію завадостійкого приймання інформації з використанням фазової модуляції вузькосмугового сигналу [3] та сигнальної рандомізації для перетворення прийнятого сигналу у псевдовипадковий. В якості псевдовипадкових послідовностей в роботі [2] використовувались послідовності максимальної довжини (М-послідовності) з основою 2 [4]. Проте, окрім М-послідовностей при

оптимальному прийманні часто використовуються інші псевдовипадкові послідовності, зокрема коди Баркера, Гоулда, Касамі [5]. Тому доцільно провести дослідження застосування різних видів псевдовипадкових послідовностей для сигнальної рандомізації при оптимальному прийманні фазомодульованих гармонічних сигналів.

Мета дослідження

Покращення існуючих методів завадостійкого передавання інформації в зашумлених вузькосмугових каналах зв'язку шляхом використання нелінійних методів обробки прийнятих даних. Знаходження оптимальних методів рандомізації з метою підвищення завадостійкості приймання сигналів. Експериментальне дослідження цифрового приймача з використанням сигнальної рандомізації.

Постановка задачі

1. Визначення процедури рандомізації, сигнальної рандомізації.
2. Розробка структурної схеми системи передавання даних з використанням фазомодульованого вузькосмугового сигналу та методів рандомізації для перетворення прийнятого сигналу у псевдовипадковий різних типів.
3. Розробка програмної моделі системи передавання інформації на основі запропонованого методу та її дослідження для різних режимів роботи, порівняння ефективності використання псевдовипадкових сигналів різних типів.
4. Дослідження ефективності методу в залежності від довжини ключа рандомізації

Метод передавання даних на основі рандомізації

Однією із основних проблем застосування псевдовипадкових сигналів для передавання цифрових даних є необхідність широкопasmового каналу зв'язку. Проте їх застосування при кореляційному прийманні характеризується значною завадозахищеністю, що дозволяє вести передавання/приймання при відношенні сигнал/шум менше 1. З іншого боку, застосування фазомодульованих гармонічних сигналів, що є вузькосmувовими, не вимагає широкопasmових каналів, але є менш завадостійким. Використавши метод рандомізації, можна передавати фазо-модульовані гармонічні сигнали, а в приймачі застосовувати процедуру рандомізації для перетворення отриманого зашумленого сигналу до форми псевдовипадкової послідовності.

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.

Оператором рандомізації

$\mathcal{R}an$ послідовності $X = \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n\}$ називатимемо дію, яка полягає в переміщенні i -го елемента на місце j -го елемента послідовності X , а відповідність між i та j будемо називати законом рандомізації:

$$X = \{x_i\} \dots \mathcal{R}an(X) = \mathcal{R}an(\{x_i\}) = X^{\mathcal{R}an}, \quad (1)$$

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

де $K = \{k_i\}$ – масив-ключ (закон) процедури рандомізації $\mathcal{R}an$.

Рандомізація виконується над кожним елементом послідовності X . Для того, щоб показати, що i -й елемент послідовності X переміщено на місце $\mathcal{R}an(x_i)$, використаємо наступну форму запису:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}an(X) = \\ = (\mathcal{R}an(x_0), \mathcal{R}an(x_1), \dots, \mathcal{R}an(x_i), \dots, \mathcal{R}an(x_n)) \end{aligned} \quad (3)$$

В результаті рандомізації послідовності X утворюється послідовність $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n\}$, причому $x_i = y_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$. У більшості випадків рандомізації $m=n$, тобто рандомізована послідовність має ту саму довжину, що і початкова. Проте, скажімо при зсуві фази сигналу на основі рандомізації, відбувається розширення розміру рандомізованої послідовності, тобто $m = n + r$, де r – величина зсуву.

Існує очевидна процедура $\mathcal{R}an^{-1}$ обернена до $\mathcal{R}an$, тобто така, що дозволяє отримати початкову послідовність з

рандомізованої, тобто можливе відновлення початкового сигналу:

$$\mathcal{R}an^{-1}(Y) = X. \quad (4)$$

Сигнальна рандомізація – це нелінійна процедура перетворення форми огинаючої дискретизованого сигналу з метою отримання потрібних характеристик останнього. Для сигнальної рандомізації ефективно можна використовувати перетворення огинаючої початкового сигналу до форми псевдовипадкової послідовності. Зокрема, в роботі [2] дослідження рандомізації зосереджено на M -послідовностях з основою $p=2$ [6]. M -послідовність – це періодична послідовність з періодом $N = 2^n - 1$, де n – це порядок породжуючого полінома, яка складається з 0 та 1, та має виражений пік автокореляційної функції та постійний рівень бічних пелюсток $-1/N$.

Таким чином, маючи гармонічний дискретизований сигнал, скажімо, один період синусоїди, застосувавши сигнальну рандомізацію і перевпорядкувавши відліки сигналу за певним законом, можна отримати сигнал, наближений до M -послідовності. Автокореляційна функція отриманої послідовності наближається до ідеальної автокореляційної функції M -послідовності (див. рис. 1). Окрім цього, при використанні рандомізації сигналу, на який накладається адитивна завада, виконується декореляція сигналу і завади, що дозволяє додатково збільшити потенційну завадостійкість методу.

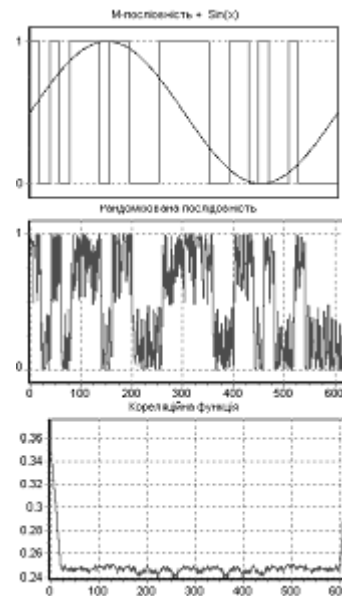


Рисунок 1 – Сигнальна рандомізація синусоїди з використанням M -послідовностей

Отже, якщо канал зв'язку є вузькосmувовий, то передавання інформації можна забезпечити фазомодульованими гармонічними сигналами, які після спотворення при передачі приймаються, рандомізуються, після чого корелятор порівнює рандомізований сигнал із еталонним. Перевищення мінімальної або

максимальної аперттури свідчить про приймання 0 або 1.

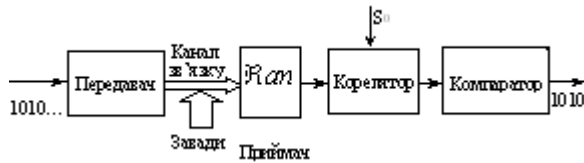


Рисунок 2 – Структура системи передавання даних з використанням рандомізації

На основі запропонованих теоретичних засад з метою подальшого дослідження та моделювання методу було розроблено структурну схему (рис. 2) системи передавання цифрових даних з використанням рандомізації для перетворення прийнятого сигналу до шумоподібного.

В наведеній на рисунку 2 схемі на вхід передавача поступають цифрові інформаційні біти в базисі Радемахера. Передавач перетворює їх у фазомодульований гармонічний сигнал, який поступає в канал зв'язку, де на корисний сигнал накладається завада. Зашумлений фазомодульований сигнал із входу приймача подається на рандомізатор, який оцифровує сигнал, та виконує рандомізацію по заданому ключу. В результаті цього на виході рандомізатора отримуємо сигнал, що по формі наближається до шумоподібного, скажімо, М-последовності. Далі цей сигнал подається на корелятор, який порівнює вхідний сигнал з еталонним сигналом логічного "нуля" або "одиниці". Результати кореляції порівнюються компаратором, який і робить висновок про приймання бітів інформації.

Окрім М-последовностей як таких, в системах зв'язку знайшли застосування складені кодові последовності, що є комбінаціями М-последовностей, та володіють деякими специфічними властивостями. Найбільш відомими і вживаними з них є последовності Гоулда [5]. Последовності Гоулда можуть генеруватись шляхом додавання по модулю 2 двох М-последовностей однакової довжини. Результируючі коди Гоулда мають таку ж довжину, як і початкові М-последовності, і володіють по відношенню до М-последовностей двома перевагами. По-перше, генератор кодових последовностей, побудований на основі двох регістрів зсуву довжиною N кожен, може генерувати, окрім двох початкових М-последовностей, ще N последовностей довжиною 2^N-1 , тобто значно розширюється число кодових последовностей, що генеруються. По-друге, коди Гоулда можуть бути вибрані так, що взаємкореляційна функція для всіх отримуваних від одного генератора кодових последовностей буде однаковою, а величина її бічних піків обмежена. Для дослідження виберемо последовність Гоулда довжиною 31, наприклад

таку:

$$0110011100110000110110001000000. \quad (5)$$

Коди Гоулда використовуються в системах зв'язку WCDMA, в якій поряд з вказаними кодами використовуються псевдовипадкові последовності Касамі [5]. Сімейство кодів Касамі містить 2^k последовностей з періодом 2^N-1 . Вони вважаються оптимальними в тому сенсі, що для будь-якої «найкращої» пари забезпечується максимальне значення автокореляційної функції, рівне $(1+2^k)$.

Кодові последовності Касамі реалізуються за допомогою трьох последовно з'єднаних регістрів зсуву (u, v і w) з різними зворотними зв'язками, кожний з яких формує свою М-последовність. Щоб отримати кодові последовності Касамі із заданими властивостями, последовності v і w повинні мати різні зсуви. Для дослідження виберемо последовність Касамі довжиною 31, наприклад таку:

$$1001100010110010000000011111000. \quad (6)$$

Окрім розглянутих последовностей, у світовій практиці успішно використовуються й інші псевдовипадкові последовності, зокрема коди Баркера, що знайшли місце в безпроводних мережах Wi-Fi згідно стандарту IEEE 802.11g [4]. Последовність Баркера – це ряд, що складається з N елементів a_j для $0 \leq j \leq N$, які мають значення +1 та -1 і чергуються так, що виконується:

$$\left| \sum_{j=0}^{N-v} a_j a_{j+v} \right| \leq 1 \quad \text{для всіх } 1 \leq v \leq N. \quad (7)$$

Последовності Баркера мають мінімальний рівень бокових пелюсток автокореляційної функції [4], а тому добре підходять для оптимального приймання. Відомі последовності Баркера мають довжину $2 \leq N \leq 13$, зокрема, для $N=13$ код Баркера має вид:

$$+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1.$$

Також для рандомізації можна використати генератор випадкових чисел, який описується гаусівським розподілом величин. В цьому випадку необхідно генерувати випадковий набір чисел, які не повторюються в межах від 0 до N , де N – це кількість дискретних значень синусоїди. Згенерований масив буде ключем рандомізації в приймачі. На рисунку 3 наведено графіки автокореляційних функцій рандомізованої синусоїди з використанням вищенаведених М-последовностей, коду Баркера, коду Гоулда, последовності Касамі та гаусівського розподілу. На перший погляд найбільш ефективними для оптимального приймання є сигнальна рандомізація з М-последовностями, кодами Баркера та гаусівським нормальним розподілом. Проте для глибшого дослідження сигнальної рандомізації необхідно більш детально перевірити даний метод.

Моделювання сигнальної рандомізації

Для поглибленого дослідження ефективності запропонованих теоретичних положень доцільно розробити програмну модель системи передавання, зображеної на рис.2, та оцінити ймовірність вірного приймання даних в залежності від відношення сигнал/шум та виду сигнальної рандомізації. Було сформовано основні вимоги до програмної моделі методу. Така система повинна забезпечувати:

- можливість генерації шумоподібних сигналів різних типів,
- можливість задання кількості точок для рандомізації;

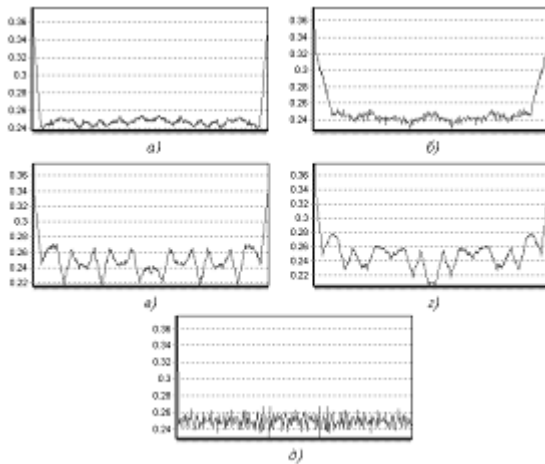


Рисунок 3 - Автокореляційні функції рандомізованої синусоїди з використанням:

- а) М-последности, б) кодів Баркера, в) кодів Гоулда, г) последностей Касамі, д) гаусівського розподілу.

- можливість генерування гармонійних сигналів різної фази для представлення сигналів типу логічна "1" та логічний "0" в цифровому передавачі;

- можливість реалізації сигнальної рандомізації;

- можливість накладання на корисний гармонійний сигнал випадкового гаусівського шуму змінної амплітуди;

- можливість моделювання цифрового приймача шляхом вибору ключа рандомізації, задання цифрової послідовності для передавання, вибору і обчислення кореляційної функції для розпізнавання прийнятого сигналу, вибору аперттури кореляції для розпізнавання прийнятих даних, рандомізації отриманого сигналу, циклічного повторення вищенаведених процедур, визначення ймовірності правильного розпізнавання сигналу при впливі випадкових шумів заданої амплітуди,

- можливість графічного відображення результатів моделювання, та їх збереження.

На основі вищенаведених вимог, автором роботи було розроблено програму "Дослідження

рандомізації", робоче вікно якої наведено на рис. 4.

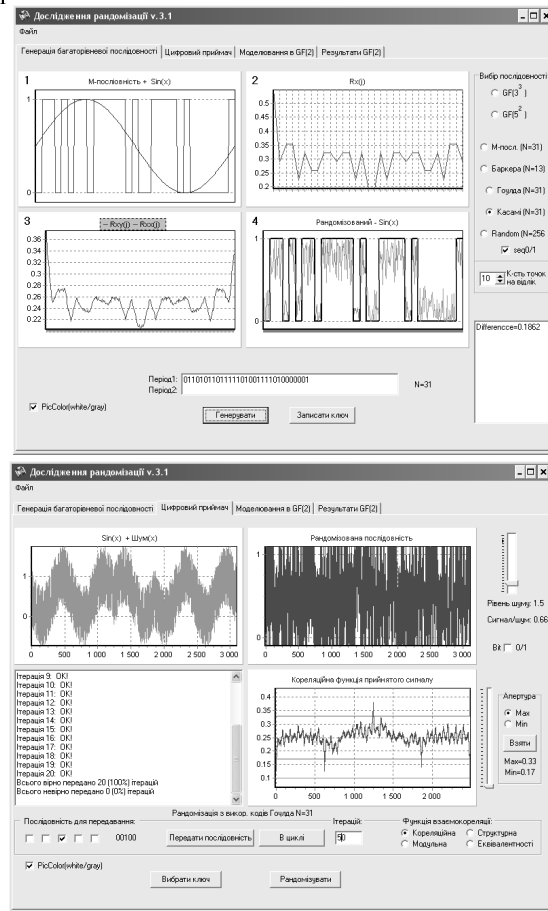


Рисунок 4 - Робоче вікно програми дослідження сигнальної рандомізації та цифрового приймача

В розробленій програмі кінцевим результатом моделювання є оцінка ймовірності правильного приймання переданих даних при впливі гаусівського білого шуму, амплітуду якого можна змінювати. Ймовірність правильного приймання визначається відношенням кількості правильно прийнятих даних, до загальної кількості переданих даних, при заданій кількості циклів передавання. Програма дозволяє перевірити ефективність методу при зміні фаз гармонічного сигналу, що характерно для фазової модуляції.

Таким чином, провівши дослідження ймовірності правильного приймання переданої послідовності з використанням вищенаведених можливостей, і взявши найнижчу оцінку задовідності, можна оцінити потенційну задовідність запропонованого методу приймання за найгірших умов. Внаслідок проведених експериментів було побудовано сімейство графіків, які відображають ймовірність (P) правильного приймання цифрової послідовності в залежності від відношення сигнал/шум ($U_c/U_{ш}$) та від виду псевдовипадкової послідовності, яка використовувалась при сигнальній рандомізації. Для розпізнавання

рандомізованого сигналу використовувались дискретні представлення кореляційних функцій, а саме автокореляційна та автоструктурна функції, що задаються відповідно:

$$R_{xx}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cdot x_{i+j}, \quad (8)$$

$$C_{xx}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - x_{i+j})^2,$$

В ході досліджень з'ясовано, що автокореляційна функція краще працює при відношенні сигнал/шум до 0.6-0.5, тобто при впливі завад з амплітудою у 2 рази більшою за амплітуду корисного сигналу. При ще менших значеннях сигнал/шум краще працює автоструктурна функція.

На рисунку 5 наведено залежність ймовірностей передавання послідовності 10101 при застосуванні сигнальної рандомізації та псевдовипадкових послідовностей різних типів. В ході досліджень з'ясовано, що ймовірність правильного передавання залежить від кількості дискретних значень синусоїди N , що припадають на один відлік шумоподібного сигналу. На рис. 5, а наведено сімейство графіків при $N=15$, а на рис. 5,б при $N=30$.

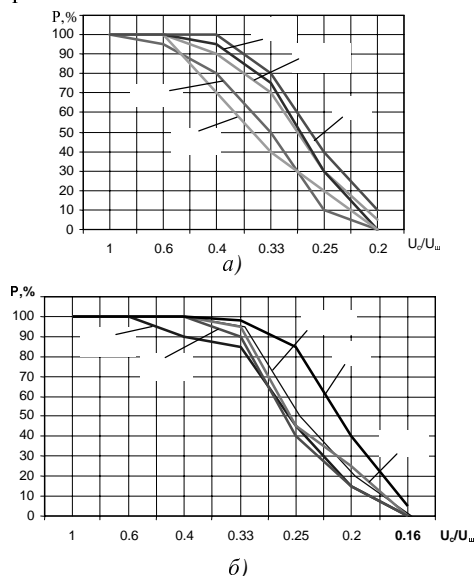


Рисунок 5 - Залежність ймовірності передавання послідовності 10101 від псевдовипадкової послідовності а) при $N=15$ та б) при $N=30$.

Вищенаведені графіки доводять ефективність методу кореляційного приймання з використанням сигнальної рандомізації, а їх аналіз дозволяє зробити наступні висновки.

Висновки

Таким чином, при використанні сигнальної рандомізації найбільш завадостійкою виявилася рандомізація з використанням гаусівського розподілу, що дозволяє приймати інформацію при відношенні сигнал/шум близько 0.3, а при допустимій ймовірності приймання від

80 до 100% відношення може досягати 0.25. Також дослідження показали, що ефективність методу залежить від кількості дискретних значень синусоїди, що припадають на один відлік шумоподібного сигналу. Так, при дослідженому значенні $N=15$ завадостійкість на 10-15% нижча, ніж при $N=30$, проте таке збільшення N призводить до подвоєння обчислювальної складності алгоритму. Принципової переваги застосування певного типу псевдовипадкових послідовностей в ході дослідження не виявлено.

Запропонована структура цифрової системи передавання може бути основою для створення спецпроцесора на основі ПЛІС. Основними перевагами методу є висока завадостійкість, можливість використання вузько смугових каналів зв'язку. Основним недоліком є залежність коректності роботи методу від вибору апертури кореляційної функції при розпізнаванні сигналів. Метод може бути застосований при передаванні даних із цифрових сенсорів на низових рівнях комп'ютерних систем керування на виробництві, в цифрових системах зв'язку та на низових рівнях комп'ютерних систем.

Література

1. Галсман К., Прокопцева М. Методы передачи данных в цифровом телевидении. Часть 3. Концепция DVB-T // 625-net., №9, 1999 <http://www.625-net.ru/archive/0999/glasman.htm>
2. Лазарович І.М. Метод рандомізації цифрових даних та його застосування в інформаційно-комп'ютерних системах // Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький. 2003. - Т.1, №3. - С.135-138.
3. Окунев Ю.Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами. – М.: Радио и связь. – 1991. – 296с.
4. Б. Скляр Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. :Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104с.
5. Ziemer, R. & Peterson, R., Digital Communication, 2nd ed., Prentice Hall, 2000.
6. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384с.