

УДК 621.395.721.5

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.034149

О. Г. ПЛЮЩ, канд. техн. наук;

В. В. ВИШНІВСЬКИЙ, доктор техн. наук, професор;

С. В. ПРОКОПОВ, канд. техн. наук;

С. М. ІЩЕРЯКОВ, канд. техн. наук,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СКРЕМБЛЮЮЧОЇ КОДОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ НА ОСНОВІ ПРИМІТИВНОГО ПОЛІНОМА ДЕВ'ЯТОГО ПОРЯДКУ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

*У попередній роботі з метою підвищення завадозахищеності та прихованості передавання інформації авторами було досліджено можливості застосування в телекомунікаційних мережах інформаційних систем скремблюючої кодової послідовності, побудованої на основі примітивного полінома восьмого порядку. Хоча зазначена послідовність певною мірою і покращувала показники якості передавання інформації, було встановлено деякі її обмеження, зумовлені кількістю чіпів, що в ній використовуються. У цій статті для подолання зазначених проблем пропонується використовувати для синтезу скремблюючої послідовності примітивний поліном дев'ятого порядку. Методами комп'ютерного моделювання було встановлено, що скремблююча кодова послідовність, синтезована на основі цього полінома, дає можливість істотно покращити показники якості передавання інформації порівняно з попереднім випадком. Так, відношення потужності суміші завадовий сигнал і внутрішній шум до потужності корисного сигналу, при якому можливо виокремлення бітової послідовності, що передається, зросло на три децибели. Було зроблено висновок щодо можливості застосування синтезованої кодової послідовності у процесі практичної побудови телекомунікаційних каналів.*

**Ключові слова:** телекомунікаційні мережі; примітивні поліноми; скремблюючі кодові послідовності; показники якості каналу; комп'ютерне моделювання; інформаційні системи.

### **ВСТУП**

**Постановка задачі.** Скремблюючі кодові послідовності набувають дедалі поширеного застосування в телекомунікаційних технологіях. При цьому досягається більша завадозахищеність та пропускна здатність безпроводових телекомунікаційних мереж через розширення спектра сигналу, що передається. Під час застосування цього методу якість передавання інформації значною мірою визначається автокореляційними характеристиками використовуваних скремблюючих кодових послідовностей. У попередній статті авторами було запропоновано застосувати кодові послідовності, синтезовані на основі примітивних поліномів. Було вибрано примітивний поліном восьмого порядку, синтезовано на його основі скремблюючу кодову послідовність та досліджено її характеристики під час застосування в телекомунікаційних каналах. Комп'ютерне моделювання дало змогу визначити, що, хоча у процесі використання цієї кодової послідовності і досягається певне покращення завадозахищеності та прихованості передавання інформації, існують деякі обмеження, зумовлені кількістю чіпів, з яких вона складається. З огляду на ці результати, важливою є проблема пошуку та оцінювання ефективності скремблюючих кодових послідовностей на основі поліномів порядку, вищого за восьмий.

**Аналіз літературних джерел.** Питанням застосування скремблюючих кодових послідовностей у телекомунікаційних мережах приділено значну увагу в науково-технічній літературі [1; 3; 4]. Загальний висновок, якого при цьому доходять, полягає в тому, що отримання потрібної завадозахищеності та прихованості передавання інформації не можливо без збільшення коефіцієнта розширення спектра сигналів і, відповідно, розміру скремблюючого коду [2; 5].

Автори сходяться в думці, що пошук необхідних скремблюючих кодів являє собою самостійну і достатньо складну задачу. При цьому в довідникових джерелах зібрано інформацію про примітивні поліноми, які дають можливість дістати скремблюючі кодові послідовності, необхідні для розширення спектра сигналів у телекомунікаційних мережах [3].

У попередніх роботах було досліджено використання скремблюючих кодових послідовностей, синтезованих на основі примітивних поліномів восьмого порядку, та розкрито їх переваги та недоліки. Але літературні джерела не містять достатньо відомостей щодо застосування тих скремблюючих кодових послідовностей, що синтезовані на базі примітивних поліномів порядку, вищого за восьмий. Такі скремблюючі кодові послідовності варті уваги для вирішення задач підвищення завадозахищеності та прихованості телекомунікаційних каналів.

**Невирішені питання.** Дослідження джерел інформації приводять до висновку, що застосуванню примітивних поліномів порядку, вищого за восьмий, не приділяється потрібної уваги. Ці поліноми можуть

© О. Г. Плющ, В. В. Вишнівський, С. В. Прокопов, С. М. Іщеряков, 2020

бути застосовні для синтезу скремблюючих кодових послідовностей для подальшого їх використання в телекомунікаційних мережах. Таким чином, цей напрямок потребує уваги розробників та науковців і заслуговує на подальші дослідження. Загалом, проблема синтезу скремблюючих кодових послідовностей із примітивних поліномів вищого порядку та перевірка їх властивостей (як за відсутності особистих шумів каналів та завад, так і за їх наявності) потребує нагального вирішення.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є виявлення примітивного полінома дев'ятого ступеня для подальшого формування на його базі псевдовипадкової скремблюючої кодової послідовності і дослідження її характеристик у процесі застосування в телекомунікаційних каналах.

Для досягнення цієї мети розв'язуються такі наукові задачі:

- пошук примітивного полінома дев'ятого порядку для синтезу відповідного псевдовипадкового коду;
- синтез псевдовипадкової кодової послідовності на основі примітивного полінома дев'ятого порядку;
- дослідження характеристик здобутої кодової послідовності під час застосування в телекомунікаційних каналах із завадами.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

### Вибір скремблюючої кодової послідовності

Псевдовипадкові скремблюючі кодові послідовності повинні мати гарні автокореляційні характеристики. Використання примітивних поліномів дає можливість синтезувати такі послідовності певного розміру. У попередній роботі було отримано скремблюючу кодову послідовність із використанням примітивного полінома восьмого ступеня. Але для покращення характеристик телекомунікаційного каналу потрібно винайти примітивний поліном дев'ятого порядку, який дасть змогу створити скремблюючу послідовність протяжністю 511 чіпів. Примітивні поліноми можливо здобувати поліноміальним діленням [3], але в джерелах інформації вже є приклади примітивних поліномів певного порядку, які можна використовувати для синтезу послідовностей [3].

Примітивний поліном дев'ятого порядку над полем Галуа  $GF(2)$ , який можна знайти в [3], має такий вигляд:

$$x^9 + x^4 + 1. \quad (1)$$

Примітивний поліном (1) дає змогу синтезувати псевдовипадкову скремблюючу кодову послідовність, наведену на рис. 1. Кодові послідовності можуть формуватися як в логіці «0» та «1», так і в логіці «1» та «-1»; послідовність, зображену на рис. 1, побудовано в останній логіці. Розглянемо кореляційні властивості кодової послідовності, яку ілюструє рис. 1.

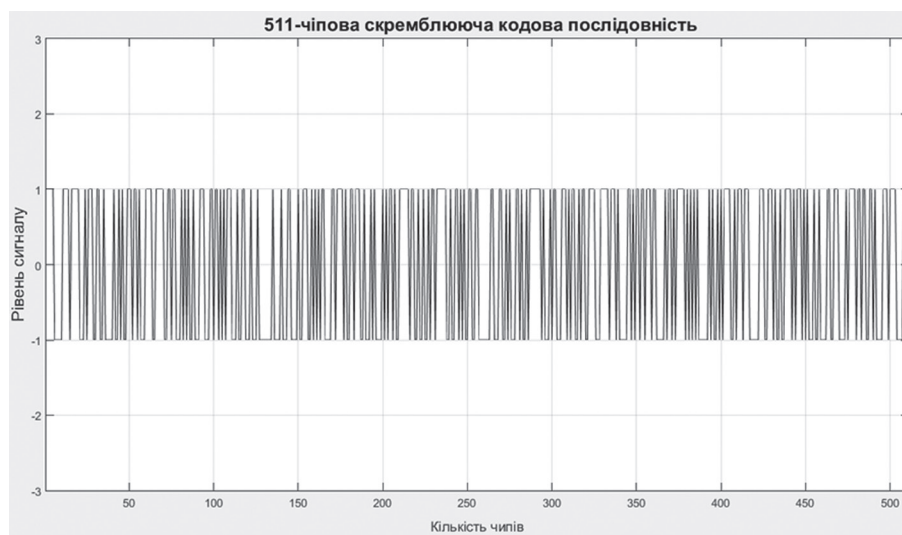


Рис. 1. Скремблююча кодова послідовність із 511 чіпів, створена з використанням (1)

Кореляційні властивості скремблюючої кодової послідовності (див. рис. 1) продемонстровано графіком, наведеним на рис. 2. На цьому рисунку зображено автокореляційну функцію послідовності з п'яти наступних бітів (1,1,-1,-1,1), кожний з яких є скрембленим кодовою послідовністю, наведеною на рис. 1.

Крива на рис. 2 наочно демонструє унікальні властивості псевдовипадкових кодових послідовностей, отриманих із примітивних поліномів. Ці властивості полягають у тому, що під час нульового зсуву значення автокореляційної функції дорівнює кількості чіпів у послідовності, тобто 511, тоді як у разі будь-якого зсуву значення автокореляційної функції дорівнює -1.

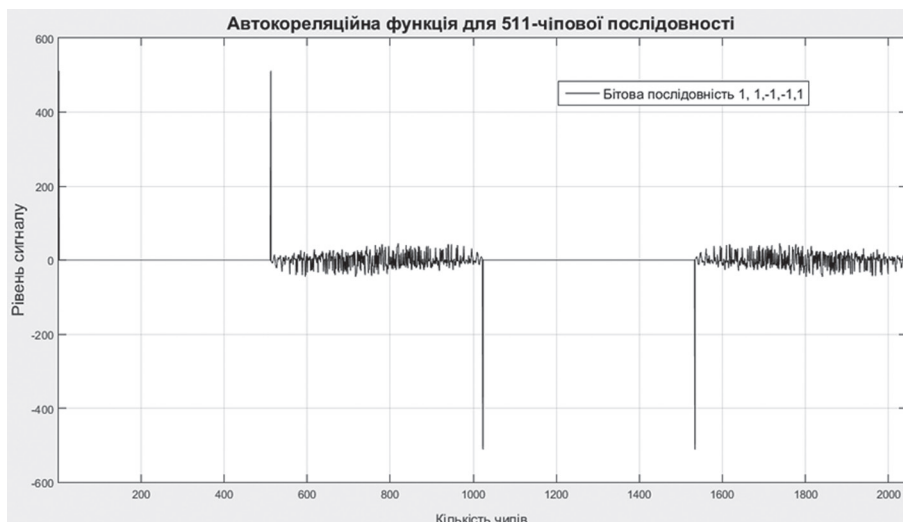


Рис. 2. Автокореляційна функція послідовності з п'яти різних бітів, скремблєваних кодовою послідовністю, зображеною на рис. 1.

Але у випадку, коли біти змінюють свій знак, ця унікальна кореляційна властивість втрачається і виникають бічні пелюстки автокореляційної функції, як це видно з рис. 2. Можна зробити припущення, що ці бічні пелюстки знижуватимуть характеристики телекомунікаційного каналу, який використовує таку кодову послідовність.

**Дослідження характеристик телекомунікаційного каналу з внутрішніми шумами та зовнішньою завадою, що використовує синтезовану кодову послідовність**

Для вивчення характеристик телекомунікаційного каналу, в якому використовується бітова послідовність, скремблєвана синтезованою кодовою послідовністю, застосовувалося комп'ютерне імітаційне моделювання. Моделювання проводилося для умов, схожих на ті, що було використано в попередній роботі для спрощення порівняння характеристик:

- створювалася комплексна адитивна суміш із п'яти бітів корисного сигналу зі змінною потужністю, внутрішнього шуму каналу та завадового сигналу;
- корисний сигнал подано як комплексні відліки скремблюючої послідовності з урахуванням знаку певного біта інформації з фазами або 0, або  $\pi$ ;
- внутрішні шуми подано як комплексні відліки з нормальним розподіленням імовірності;
- завадовий сигнал також подано як комплексні відліки з нормальним розподіленням імовірності;
- потужність внутрішнього шуму встановлено як одиниця;
- потужність завадового сигналу встановлено як три одиниці відносно рівня внутрішніх шумів;
- потужність корисного сигналу набуває відповідно відносних значень 0,125, 0,25 та 0,5;
- бітова послідовність складається з п'яти наступних бітів 1,1,-1,-1,1;
- створена сигнальна суміш пропускається через фільтр, узгоджений зі скремблюючою кодовою послідовністю, і, таким чином, виконує стиснення бітової послідовності.

Імітаційне моделювання здійснювалося за допомогою середовища Matlab.

Результати моделювання для наведених умов та відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5, наведено на рис. 3 – 8.

Дійсну, уявну та модульну складові адитивної суміші сигналів на вході фільтра стиснення зображено відповідно на рис. 3, рис. 4 та рис. 5. При цьому сумарна потужність внутрішніх шумів каналу та завадового сигналу перевищує потужність корисного сигналу у вісім разів або на 9 дБ.

Аналіз даних, поданих на цих рисунках, дає змогу стверджувати, що корисний сигнал є повністю прихований у внутрішніх шумах каналу та завади і не проглядається.

Дійсну, уявну та модульну складові сигналу на виході фільтра стиснення унаочнюють відповідно рис. 6, рис. 7 та рис. 8. Аналіз показує, що корисний сигнал впевнено виокремлюється на фоні шумових сигналів і може бути відновлено початкову скремблєвану бітову послідовність.

Стрілками на рис. 6 та рис. 8 позначено біти корисного сигналу, виокремлені під час стиснення з суміші внутрішнього шуму та шумової завади.

Результати моделювання для наведених раніше умов та відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,25, зображено на рис. 9, рис. 10 та рис. 11.

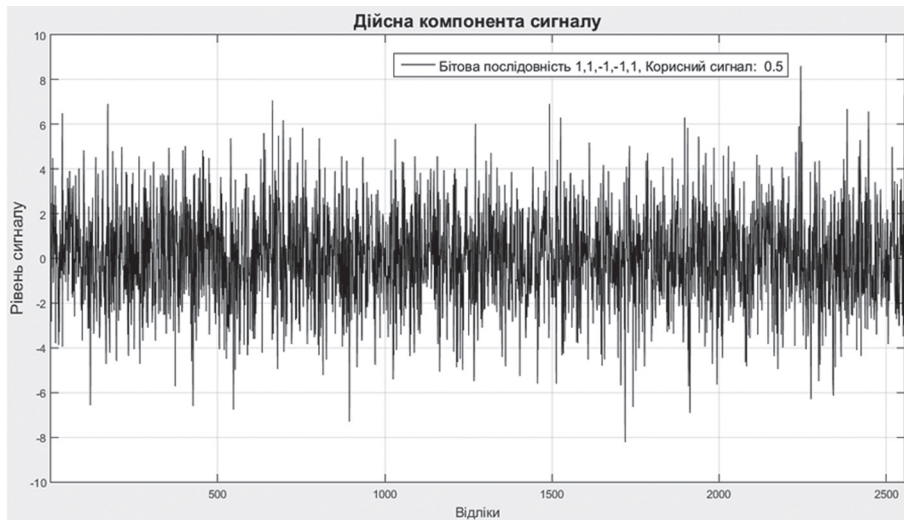


Рис. 3. Дійсна компонента адитивної суміші корисного сигналу, внутрішнього шуму та завадового сигналу для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5

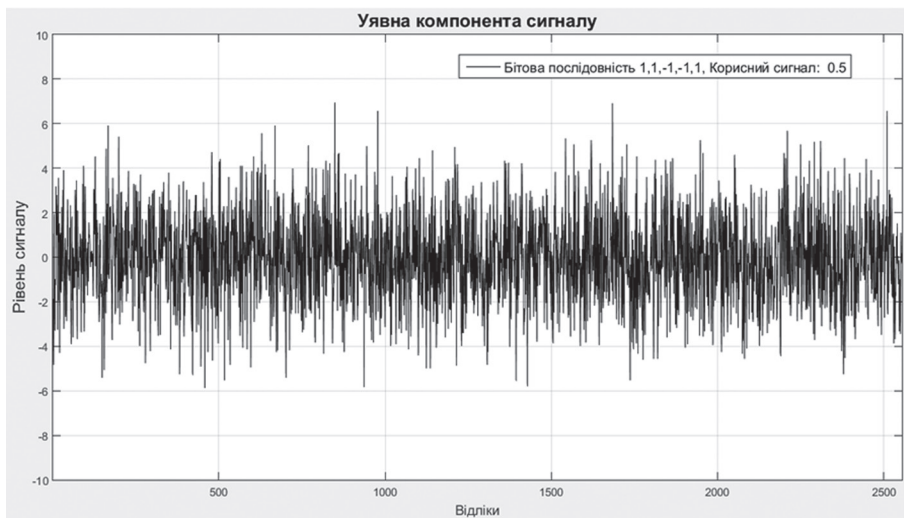


Рис. 4. Уявна компонента адитивної суміші корисного сигналу, внутрішнього шуму та завадового сигналу для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5

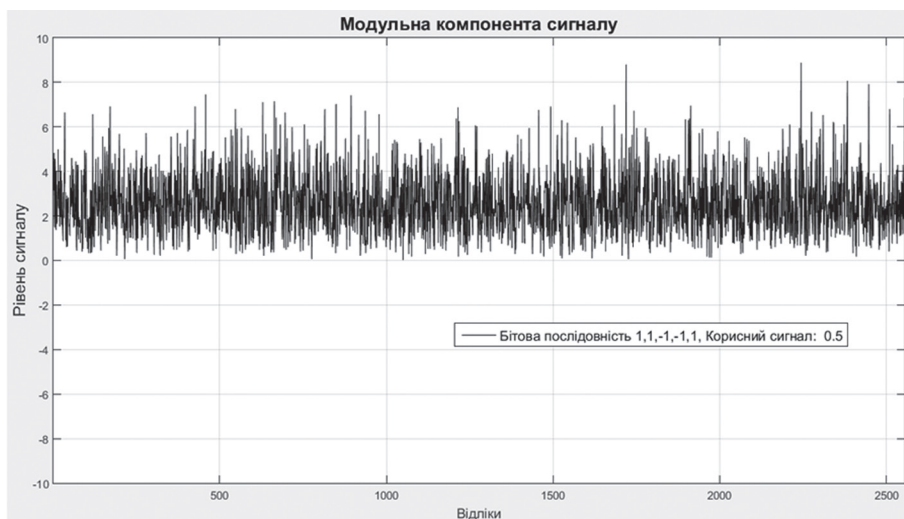


Рис. 5. Модульна компонента адитивної суміші корисного сигналу, внутрішнього шуму та завадового сигналу для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5

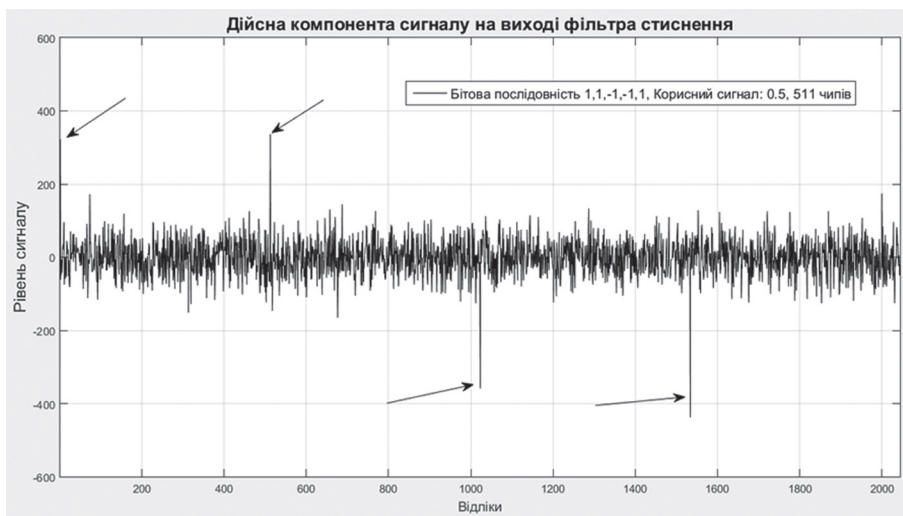


Рис. 6. Дійсна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5

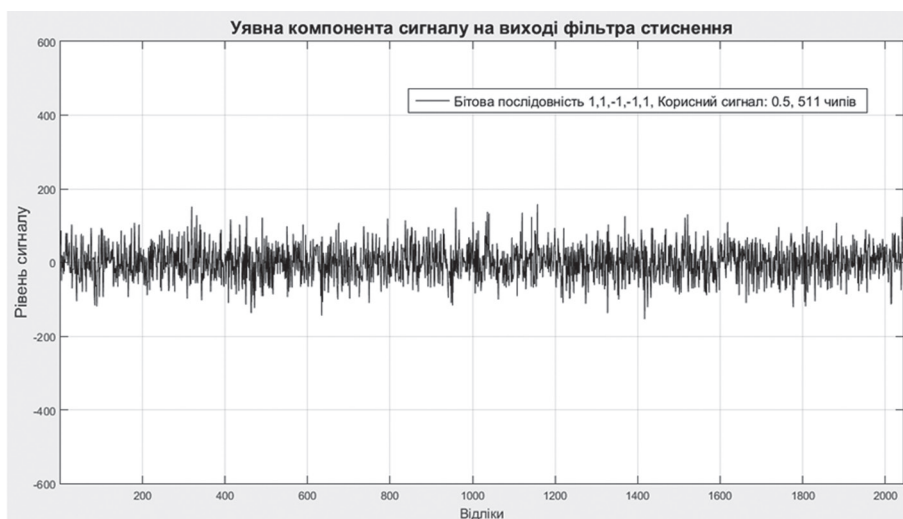


Рис. 7. Уявна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5

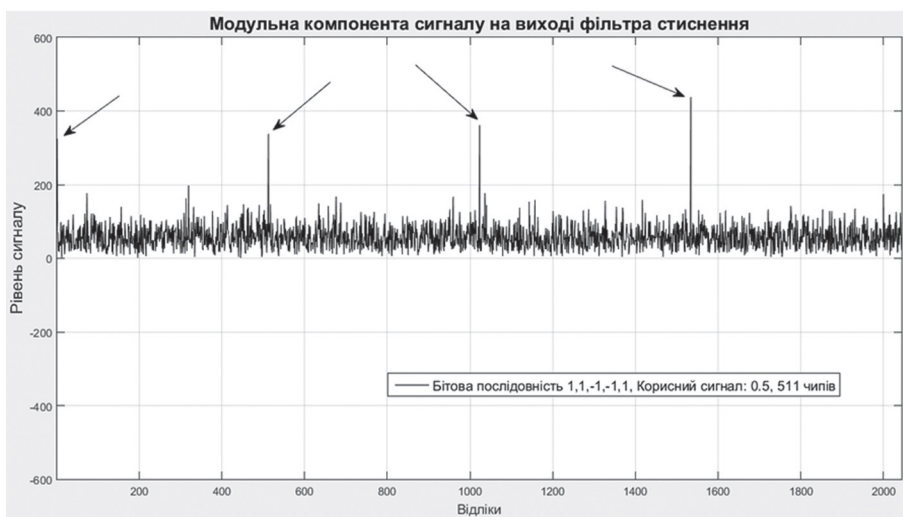


Рис. 8. Модульна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5

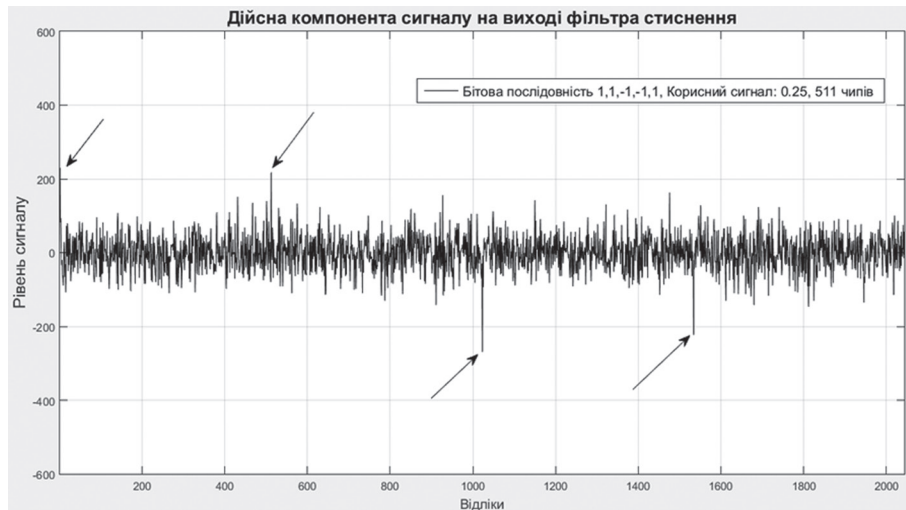


Рис. 9. Дійсна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,25

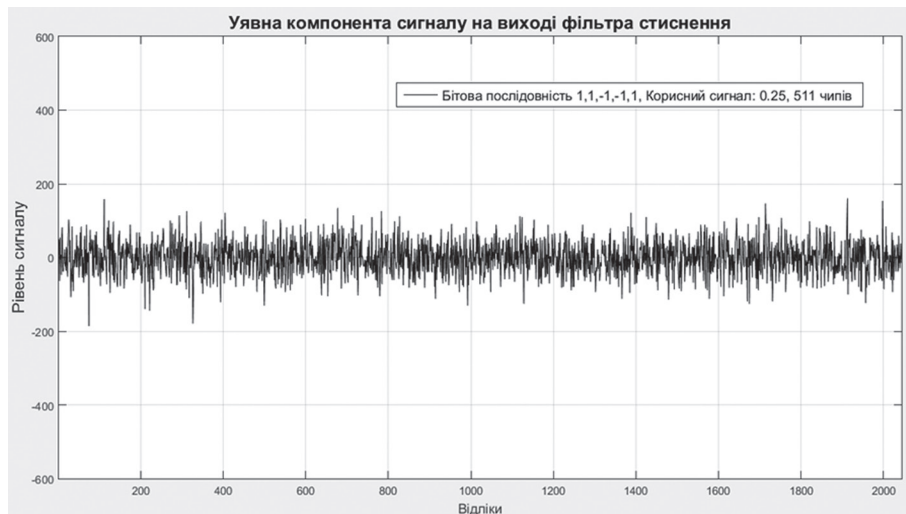


Рис. 10. Уявна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,25

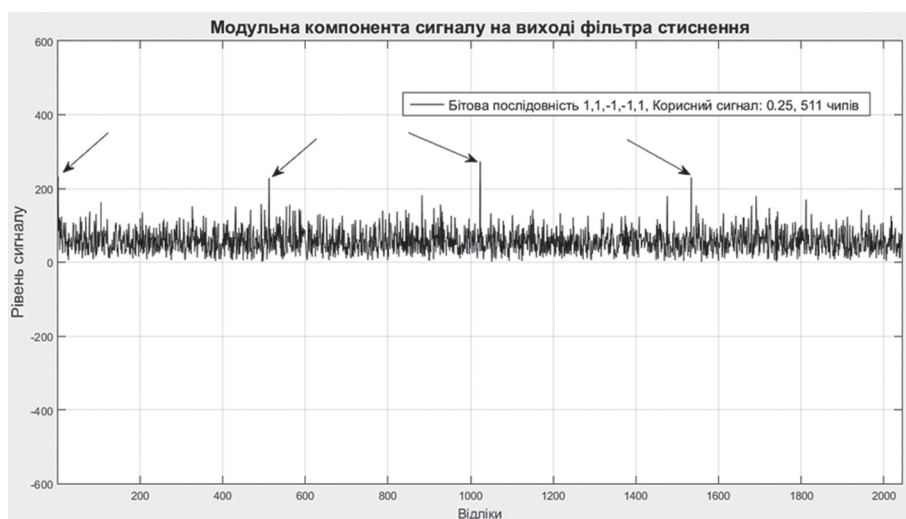


Рис. 11. Модульна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,25

У цьому разі сумарна потужність внутрішнього шуму та завади перевищує потужність корисного сигналу в 16 разів або на 12 дБ. Аналіз показує, що відношення корисний сигнал/завада на виході фільтра стиснення погіршилося порівняно з попереднім випадком, але все одно є достатнім для відновлення бітової послідовності, що передається.

Результати моделювання для наведених раніше умов та відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,125, зображено на рис. 12, рис. 13, та рис. 14. У цьому разі сумарна потужність внутрішнього шуму та завади перевищує потужність корисного сигналу в 32 рази або на 15 дБ.

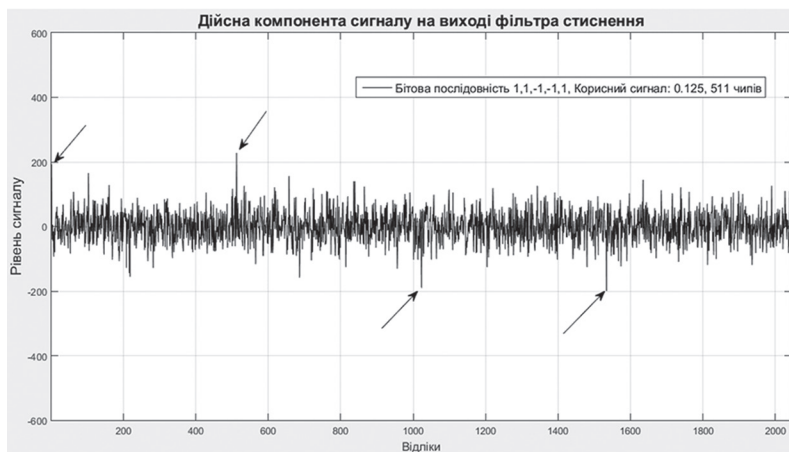


Рис. 12. Дійсна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,125

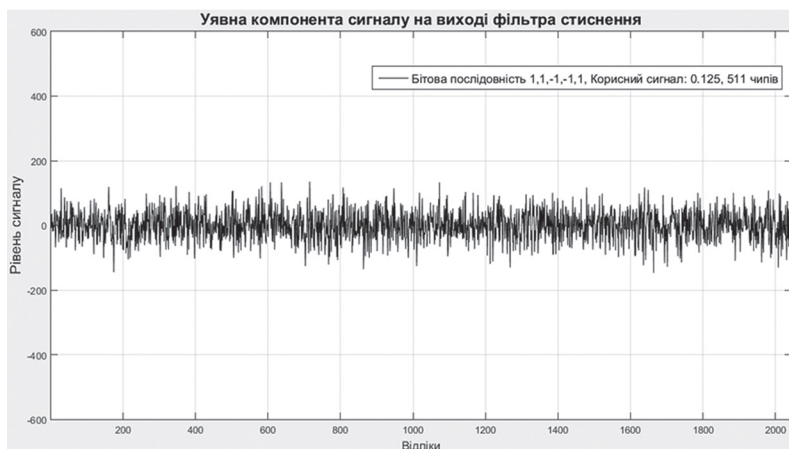


Рис. 13. Уявна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,125

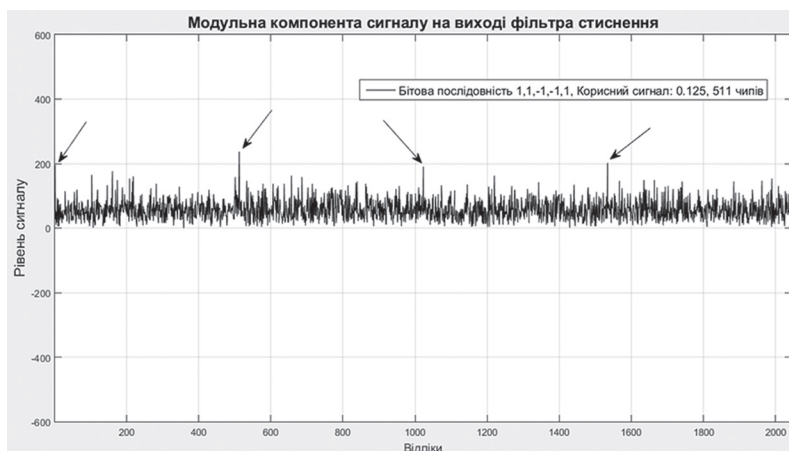


Рис. 14. Модульна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,125

Аналіз показує, що відношення корисний сигнал/завада на виході фільтра стиснення стало ще гіршим, але все ще уможливило впевнене відновлення бітової послідовності, що передається.

Стрілки на рис. 12 та рис. 14 також позначають корисний сигнал після стиснення.

Аналіз здобутих результатів моделювання дає можливість дійти таких висновків:

1. Скремблююча псевдовипадкова кодова послідовність має гарні автокореляційні властивості. Коли бітова послідовність, що передається, є незмінною, то ці автокореляційні властивості є ідеальними. Якщо бітова послідовність, що передається, змінюється, то ці властивості погіршуються.

2. Попереднє розширення спектра бітової послідовності синтезованою псевдовипадковою кодовою послідовністю з подальшим стисненням цієї бітової послідовності у фільтрі стиснення дає змогу виокремити біти, що передаються в телекомунікаційній мережі.

3. Синтезована скремблююча кодова послідовність уможливило відновлення бітової послідовності, що передається, у ситуаціях, коли сумарний рівень внутрішнього шуму та завади перевищує корисний сигнал на значення до 15 дБ.

4. Використання скремблюючої кодової послідовності, здобутої з примітивного полінома дев'ятого порядку, дає змогу на 3 дБ підвищити якість передавання бітів у телекомунікаційному каналі порівняно з тим, що дозволяє використання примітивного полінома восьмого порядку.

### ВИСНОВКИ

Скремблюючі кодові послідовності є потужним інструментом для підвищення завадостійкості та прихованості телекомунікаційних мереж інформаційних систем. Авторами синтезовано 511-чипову скремблюючу кодову послідовність на основі примітивного полінома дев'ятого порядку. Створена кодова послідовність продемонструвала гарні автокореляційні властивості. Було проведено комп'ютерне імітаційне моделювання оброблення фільтром стиснення суміші бітової послідовності, скремблюваної синтезованою послідовністю, та внутрішніх шумів і завадового сигналу за різних рівнів корисного сигналу. Це дало змогу дослідити потенціал використання цієї послідовності в телекомунікаційних каналах передавання даних. З огляду на результати моделювання можна дійти висновків, що бітова послідовність може відновлюватися з адитивної суміші навіть у ситуаціях, коли сумарна потужність завадових сигналів перевищує потужність корисного сигналу на 15 дБ.

Порівняльне оцінювання характеристик кодової послідовності, синтезованої з примітивного полінома дев'ятого порядку, з тією, що синтезована з примітивного полінома восьмого порядку дає можливість стверджувати, що вигреш як передавання інформації становив два рази або 3 дБ. Але це досягнуто завдяки збільшенню кількості чіпів у послідовності вдвічі і збільшенню ширини використовуваного спектра.

Синтезована скремблююча кодова послідовність може бути використана в перспективних телекомунікаційних мережах інформаційних систем для покращення їх завадозахищеності та пропускну здатності.

### Список використаної літератури

1. Edited by Kamesh Namuduri, Serge Chaumette, Jae H. Kim, James P. G. Sterbenz. *UAV Networks and Communications*. UK: Cambridge University Press, 2017. 242 p.

2. Schulze H., Luders C. *Theory and Applications of OFDM and CDMA Wideband Wireless Communications*. UK: John Wiley & Sons, 2005. 420 p.

3. Jhong S. Lee, Leonard E. Miller. *CDMA systems engineering handbook*. Artech House, Boston, London, 1998. 1228 p.

4. Holma H., Toskala A. *WCDMA for UMTS. Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. 2nd ed. New York: John Wiley&Sons, 2002. 384 p.

5. Величко В. В. *Передача данных в сетях мобильной связи третьего поколения / Под ред. Ю. Б. Зу-барева*. Москва: Радио и связь, 2005. 332 с.

А. Г. Плющ, В. В. Вишнеvский, С. В. Прокопов, С. М. Ищеряков

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СКРЕМБЛИРУЮЩЕЙ КОДОВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРИМИТИВНОГО ПОЛИНОМА ДЕВЯТОГО ПОРЯДКА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В предыдущей работе с целью повышения помехоустойчивости и скрытности передачи информации авторами были исследованы возможности применения в телекоммуникационных сетях информационных систем скремблирующей кодовой последовательности, построенной на основе примитивного полинома восьмого порядка. Хотя указанная последовательность в определенной



мере и улучшала показатели качества передачи информации, были выявлены ее определенные ограничения, обусловленные количеством чипов, которые в ней используются. В этой статье для преодоления указанных проблем предлагается использовать для синтеза скремблирующей последовательности примитивный полином девятого порядка. Методами компьютерного моделирования было установлено, что скремблирующая кодовая последовательность, синтезированная на основе этого полинома, дает возможность существенно улучшить показатели качества передачи информации в сравнении с предыдущим случаем. Так, отношение мощности смеси мешающий сигнал и внутренний шум к мощности полезного сигнала, при котором возможно выделение битовой последовательности, которая передается, выросло на три децибела. Сделан вывод о возможности использования синтезированной кодовой последовательности при практическом построении телекоммуникационных каналов.

**Ключевые слова:** телекоммуникационные сети; примитивные полиномы; скремблирующие кодовые последовательности; показатели качества канала; компьютерное моделирование; информационные системы.

*O. G. Pliushch, V. V. Vyshnivskiy, S. V. Prokopov, S. M. Ishcheryakov*

### **STUDYING OF THE SCRAMBLING CODING SEQUENCE PERFORMANCE BASED ON THE NINTH ORDER PRIMITIVE POLYNOMIAL IN TELECOMMUNICATION NETWORKS OF INFORMATION SYSTEMS**

*Scrambling coding sequences find wide application in telecommunication networks to improve noise immunity and information transmission concealment. There are many different scrambling coding sequences with different autocorrelation properties from which one can be chosen. In the previous paper the authors researched a possibility of using scrambling coding sequences built on the base of the primitive eighth degree polynomial in telecommunication networks of information systems to enhance noise immunity and concealment of information transmission. This sequence, consisting of two hundred and fifty five chips, showed some good performance in terms of information transmission quality indicators. Nevertheless, some of its limitations were also revealed, which are mostly linked to the number of used chips. This paper aims to overcome the problems by proposing to use scrambling coding sequences based on the ninth degree primitive polynomial. The required polynomial was selected and the needed scrambling sequence generated. This scrambling coding sequence includes five hundred and eleven chips. Computer simulation helped to establish that scrambling coding sequence synthesized using this polynomial permits to substantially improve information transmission quality indicators as compared to the case of the scrambling coding sequence based on the eighth degree polynomial. For example, the interfering signal and internal noise to desired signal ratio, for which reception of transmitted bit sequence is still possible, increased by three decibels. It is clearly linked to the doubling of the number of the used chips. To preserve the transmission rate, the occupied frequency spectrum needs to be doubled. An inference is made as to a possibility of using the synthesized coding sequence in practical realizations of telecommunication channels.*

**Keywords:** telecommunication networks; primitive polynomials; scrambling coding sequences; channel quality indicators; computer simulation; information systems.

