

УДК 621.395.721.5

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.024754

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

## ВИКОРИСТАННЯ СКРЕМБЛЮЮЧИХ КОДОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ НА ОСНОВІ ПРИМІТИВНИХ ПОЛІНОМІВ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

*Розглянуто можливості використання різних скремблюючих кодових послідовностей у телекомунікаційних мережах інформаційних систем для підвищення завадозахищеності та прихованості передавання інформації. Запропоновано використовувати кодові послідовності, побудовані на основі примітивних поліномів. Зроблено вибір примітивного полінома восьмого порядку та на його основі синтезовано скремблюючу кодову послідовність. Комп'ютерним моделюванням досліджено автокореляційні властивості кодової послідовності та її характеристик під час передавання інформації за наявності внутрішніх шумів каналу та зовнішніх завад. Доведено, що синтезована кодова послідовність дає можливість істотно покращити показники якості передавання інформації. Запропоновано використовувати отриману кодову послідовність для скремблювання бітових сигналів 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 широко використовуються в телекомунікації та радіолокації як складова частина технології **DSSS** (*Direct Sequence Spread Spectrum*). Ця технологія забезпечує більшу завадозахищеність та пропускну здатність безпроводових телекомунікаційних мереж завдяки розширенню спектра сигналу, що передається. Метод полягає в тому, що кожному біту (або символу) повідомлення ставиться у відповідність певна досить довга псевдовипадкова послідовність. Показники якості передавання інформації під час застосування цієї технології значною мірою визначаються автокореляційними та взаємокореляційними властивостями використовуваних кодових послідовностей. З огляду на це пошук кодових послідовностей із гарними кореляційними властивостями є дуже важливою та складною проблемою. Ця проблема додатково ускладнюється тим, що для отримання гарних показників якості необхідно використовувати доволі протяжні кодові послідовності, під час застосування яких забезпечується значне розширення спектра. Одними з відомих кодових послідовностей, що можуть допомогти розв'язати розглядувану проблему, є ті, котрі будуються на основі примітивних поліномів. Такі кодові послідовності широко застосовуються в системах мобільного зв'язку 3-го покоління. Незважаючи на те, що в них розширення спектра здійснюється всього в 256 (512) разів, у цих мережах використовуються дуже протяжні кодові послідовності. У результаті цього сусідні біти кодуються різними ділянками протяжної скремблюючої послідовності в поєднанні із застосуванням іншої послідовності — такої як код Уолша. З огляду на наведене важливим є завдання пошуку та оцінювання ефективності таких скремблюючих кодових послідовностей, в яких кожний біт інформації кодується однією і тією самою короткою послідовністю з гарними кореляційними властивостями.

**Аналіз літературних джерел.** Питання пошуку та дослідження характеристик різних скремблюючих кодових послідовностей широко висвітлюються в науково-технічній літературі [1–5]. При цьому зазначається, що вимоги, які висуваються до завадозахищеності та пропускну здатності каналів передавання інформації в телекомунікаційних мережах, призводять до потреби використовувати все більший коефіцієнт розширення спектра сигналу, що передається [4; 5].

Водночас у літературних джерелах наведено достатньо примітивних поліномів, за допомогою яких є можливим синтезувати скремблюючі кодові послідовності для використання в телекомунікаційних мережах [3].

Проте в джерелах інформації не достатньо приділено уваги вибору та перевірці характеристик коротких скремблюючих кодових послідовностей на основі примітивних поліномів, які можуть вирішити вказані проблеми підвищення завадозахищеності та пропускну здатності телекомунікаційних мереж.

**Невирішені питання.** З аналізу літературних джерел можна дійти висновку, що розробленню коротких скремблюючих псевдовипадкових кодових послідовностей, синтезованих на основі примітивних поліномів для використання в телекомунікаційних мережах, не приділено достатньо уваги і в цьому напрямку потрібно проводити подальші дослідження. Нагальною проблемою є синтез таких кодових послідовностей та перевірка їх автокореляційних властивостей як за відсутності особистих шумів каналів та завад, так і за їх наявності.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є пошук примітивного полінома потрібного порядку з подальшим синтезом на його основі псевдовипадкової скремблюючої кодової послідовності і перевіркою її характеристик як за відсутності завадових сигналів, так і за їх наявності.

Для досягнення цієї мети розв'язуються такі наукові завдання:

- аналіз примітивних поліномів із метою вибору потрібного для вирішення поставлених проблем;
- синтез псевдовипадкової кодової послідовності на основі вибраного примітивного полінома;
- дослідження характеристик синтезованої кодової послідовності комп'ютерним моделюванням за різних завадових ситуацій.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

### Вибір скремблюючої кодової послідовності для алгоритмів DSSS

Для застосування як скремблюючі потрібно використовувати псевдовипадкові кодові послідовності з дуже гарними автокореляційними властивостями. До таких належать ті, що синтезуються, наприклад, на основі примітивних поліномів. Зазвичай примітивні поліноми певного порядку дістають поліноміальним діленням [3], але в джерелах інформації можливо знайти довідникові дані про примітивні поліноми певного порядку [3]. Для дослідження пропонується вибрати примітивний поліном восьмого порядку, який дає можливість створити скремблюючу послідовність протяжністю 255 чіпів. Якщо взяти стандартний канал передавання телекомунікаційних сигналів 5 МГц, то це дає змогу забезпечити швидкість передавання приблизно 20 кбіт/с. У процесі подальшого дослідження порядок полінома може бути збільшено.

Один із примітивних поліномів восьмого порядку над полем Галуа GF(2) має такий вигляд [3]:

$$x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1. \quad (1)$$

Псевдовипадкову скремблюючу послідовність, отриману за допомогою (1) та сформовану в логіці 1 та -1, наведено на рис. 1, автокореляційну функцію послідовності з п'яти однакових бітів, скрембльованих отриманою кодовою послідовністю, зображено на рис. 2.

Скремблюючі псевдовипадкові послідовності, сформовані з примітивних поліномів, мають унікальні властивості, а саме те, що за відсутності зсуву значення автокореляційної функції дорівнює кількості чіпів у послідовності, тобто 255, тоді як у разі будь-якого зсуву значення автокореляційної функції дорівнює -1. Це все наочно демонструє графік на рис. 2.

Якщо кодована послідовність бітів не складається з однакових бітів, то ця унікальна кореляційна властивість втрачається і виникають бічні пелюстки автокореляційної функції, як це унаочнює рис. 3, на якому зображено автокореляційну функцію для бітової послідовності 1, 1, -1, -1, 1. Вочевидь, наявність цих бічних пелюсток може погіршувати характеристики каналу, в якому використовується така скремблююча кодова послідовність.

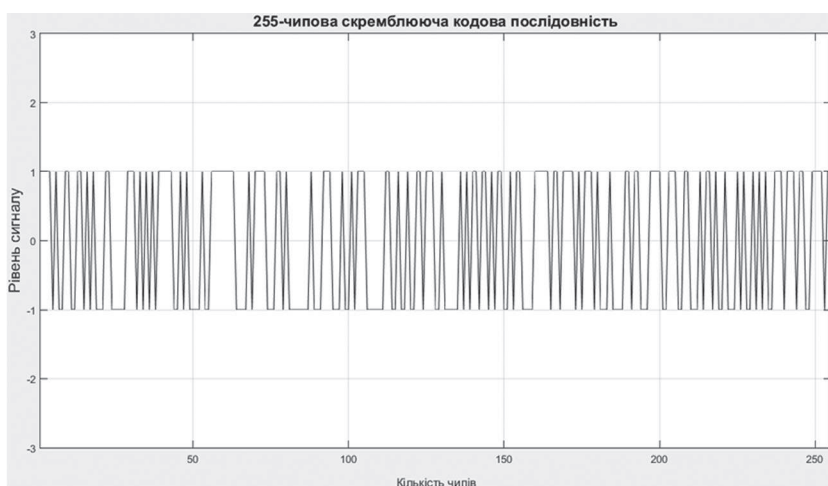


Рис. 1. Скремблююча кодова послідовність з 255 чіпів, створена з використанням (1)

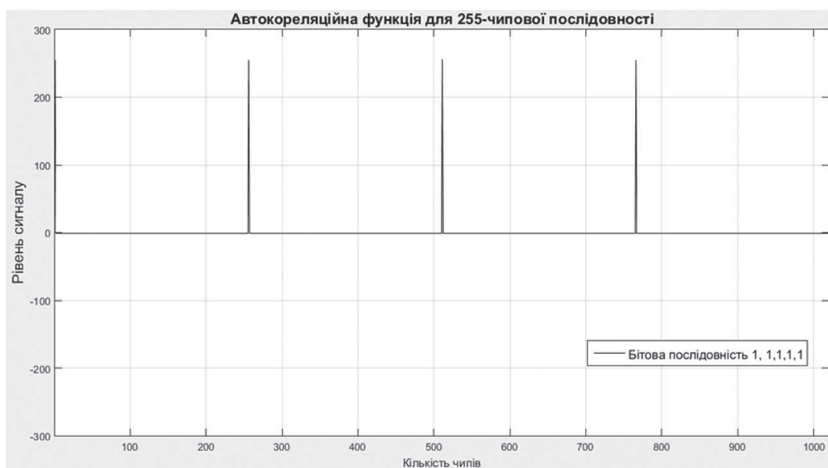


Рис. 2. Автокореляційна функція послідовності з п'яти однакових бітів, скремблених кодовою послідовністю, зображеною на рис. 1

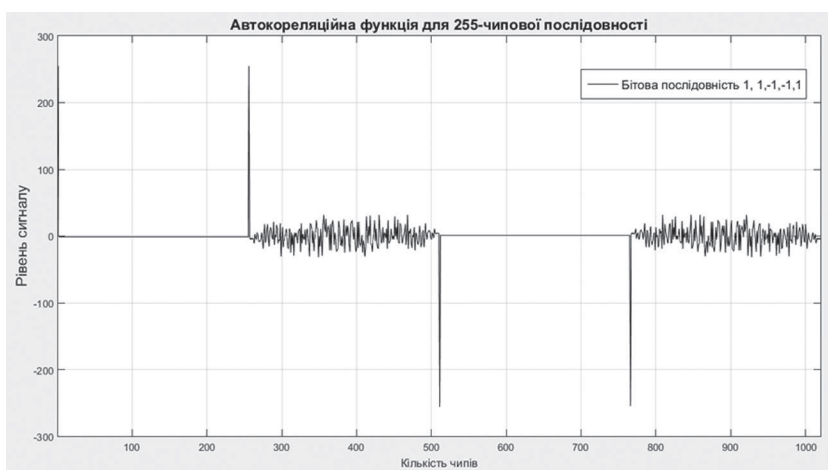


Рис. 3. Автокореляційна функція послідовності з п'яти різних бітів, скремблених кодовою послідовністю, зображеною на рис. 1

### *Дослідження можливості використання синтезованої скремблюючої послідовності в каналі із внутрішніми шумами та зовнішньою завадою*

Дослідження характеристик каналу, що використовує синтезовану скремблюючу послідовність, здійснювалося за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання. Імітаційне моделювання було проведено за таких умов:

- 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 біту 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 0,25, 0,5 та 1;
- 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 одиниці, зображено на рис. 4–9.

Дійсну, уявну та модульну складові адитивної суміші сигналів унаочнюють відповідно рис. 4, рис. 5 та рис. 6. При цьому сумарна потужність шумів каналу та завадового сигналу перевищує потужність корисного сигналу вчетверо або на 6 дБ.

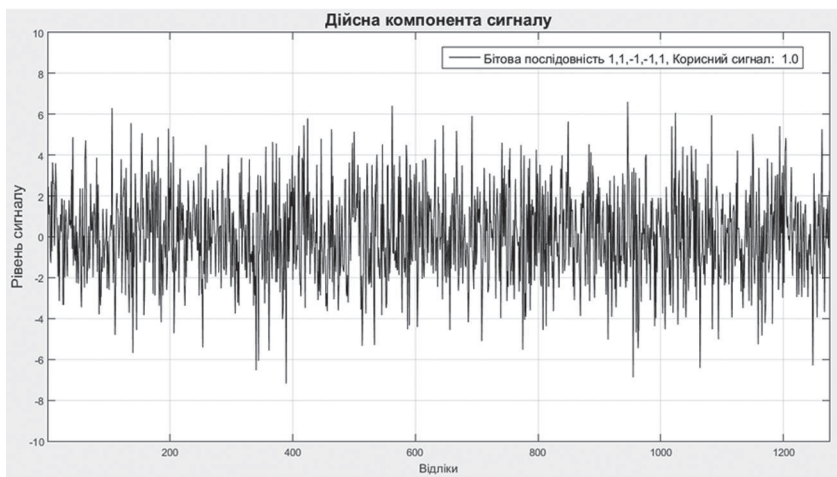


Рис. 4. Дійсна компонента адитивної суміші корисного сигналу, внутрішнього шуму та завадового сигналу для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює одиниці

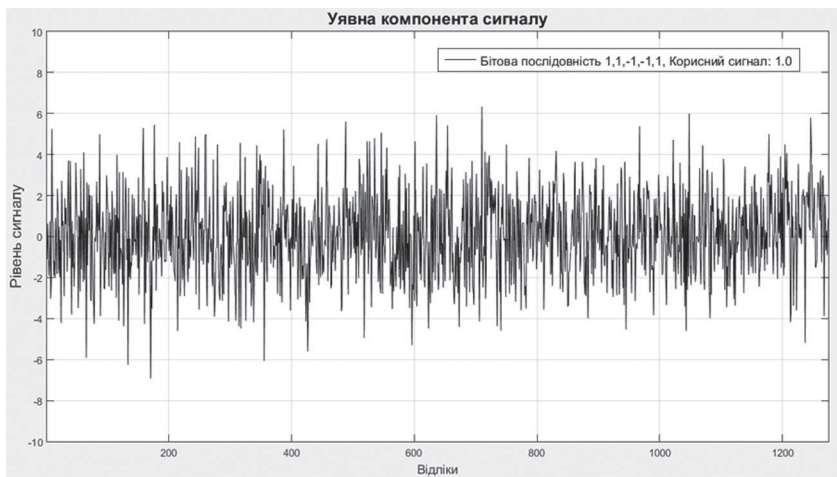


Рис. 5. Уявна компонента адитивної суміші корисного сигналу, внутрішнього шуму та завадового сигналу для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює одиниці

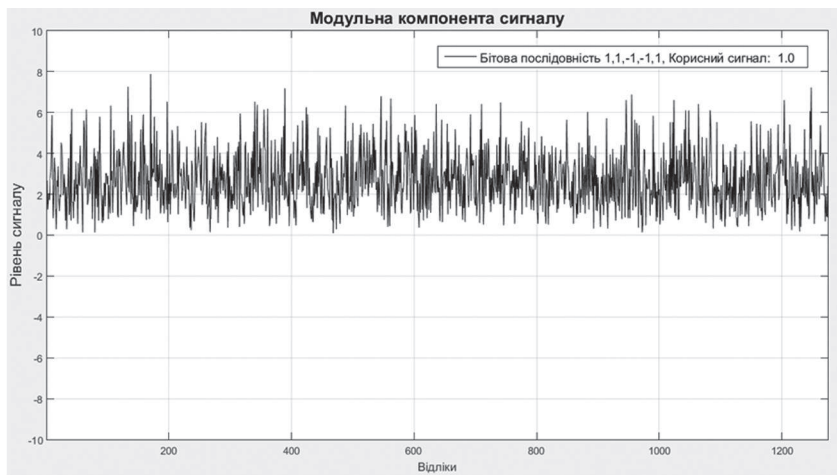


Рис. 6. Модульна компонента адитивної суміші корисного сигналу, внутрішнього шуму та завадового сигналу для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює одиниці

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

Дійсну, уявну та модульну складові сигналу на виході фільтра стиснення унаочнюють відповідно рис. 7, рис. 8 та рис. 9. Аналіз показує, що корисний сигнал впевнено виокремлюється на фоні шумових сигналів і може бути відновлено закодовану бітову послідовність.

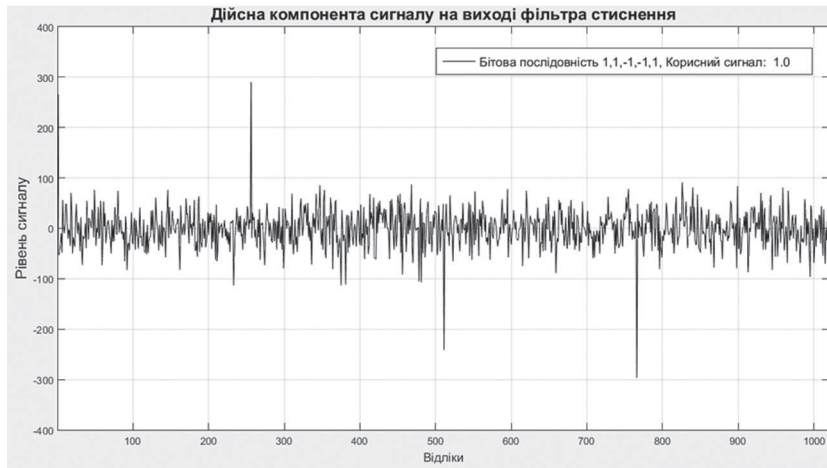


Рис. 7. Дійсна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює одиниці

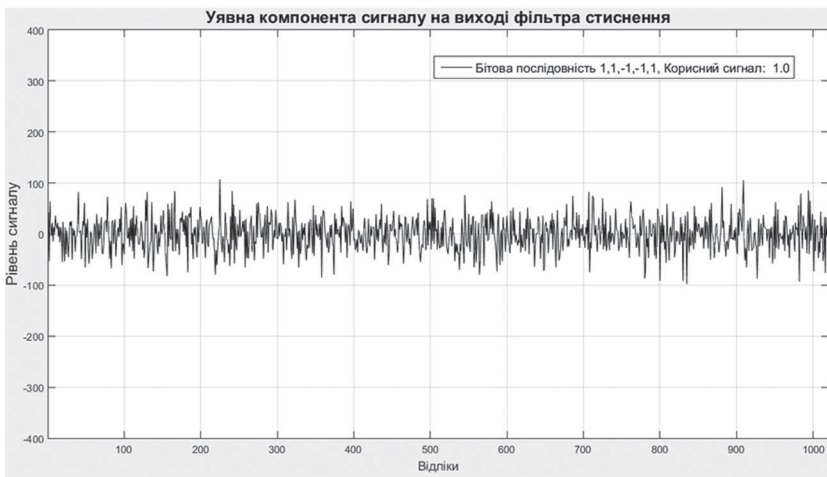


Рис. 8. Уявна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює одиниці



Рис. 9. Модульна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює одиниці

Результати моделювання для наведених раніше умов та відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5, зображено відповідно на рис. 10, рис. 11 та рис. 12. У цьому разі сумарна потужність внутрішнього шуму та завади перевищує потужність корисного сигналу у вісім разів або на 9 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.

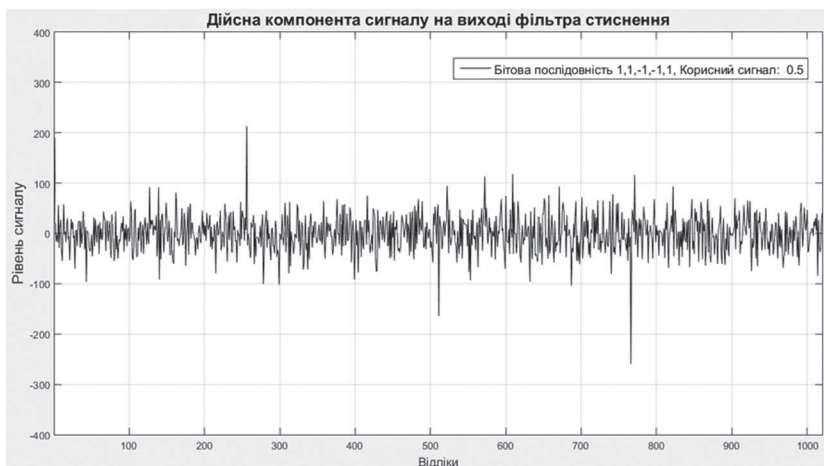


Рис. 10. Дійсна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5

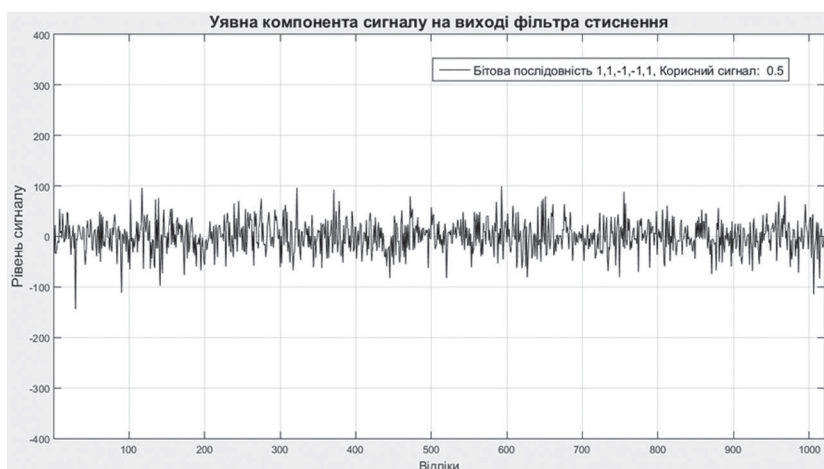


Рис. 11. Уявна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5



Рис. 12. Модульна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,5

Результати моделювання для наведених раніше умов та відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,25, зображено відповідно на рис. 13, рис. 14 та рис. 15 (стрілочками позначено корисний сигнал після стиснення). 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 стало ще гірше і перебуває на межі того, щоб мати здатність відновити бітову послідовність, що передається.

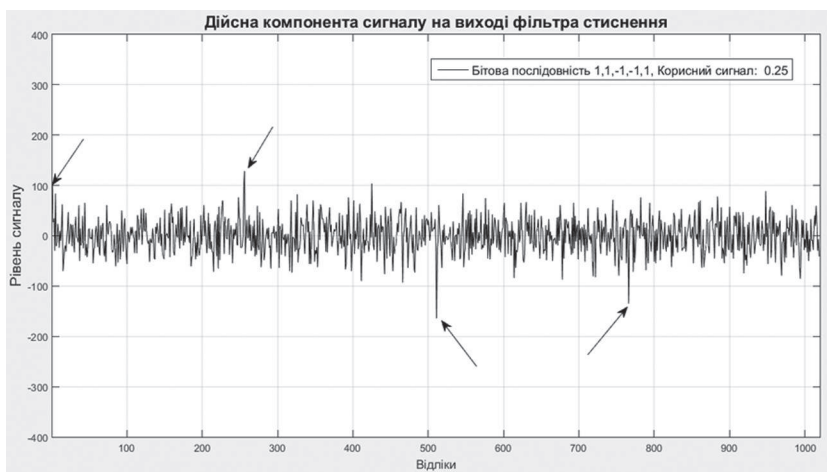


Рис. 13. Дійсна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,25

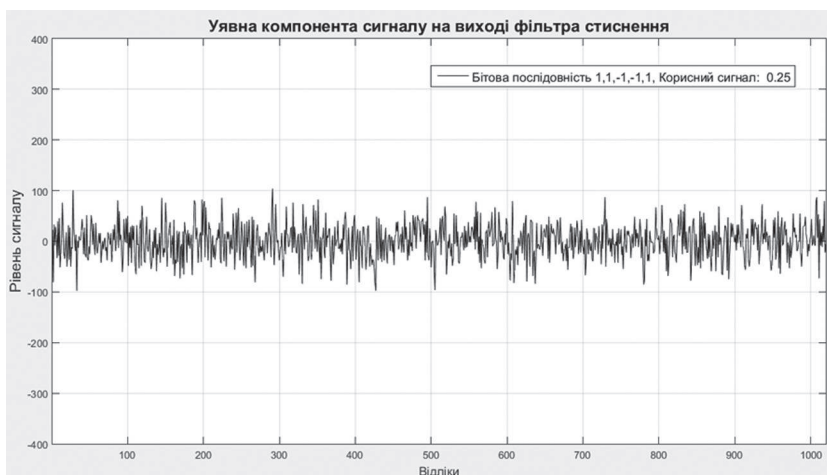


Рис. 14. Уявна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,25

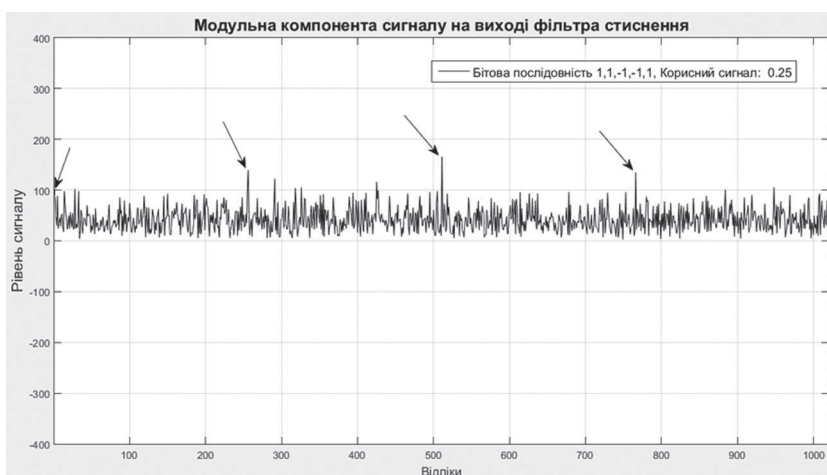


Рис. 15. Модульна компонента сигнальної суміші на виході фільтра стиснення для відносної потужності корисного сигналу, що дорівнює 0,25

Аналіз зданих 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 можливість виокремити біти, що передаються, у телекомунікаційній мережі.

3. Синтезована скремблююча кодова послідовність дозволяє відновити бітову послідовність, що передається, у ситуаціях, коли сумарний рівень внутрішнього шуму та завади перевищує корисний сигнал на до 12 дБ.

### ВИСНОВКИ

Скремблюючі кодові послідовності є потужним інструментом для покращення завадостійкості та пропускної здатності телекомунікаційних мереж інформаційних систем. Авторами синтезовано 255-позиційну скремблюючу кодову послідовність на основі примітивного полінома восьмого порядку. Створена кодова послідовність має гарні автокореляційні властивості. Для оцінювання можливостей застосування цієї послідовності в телекомунікаційних мережах було проведено комп'ютерне моделювання оброблення фільтром стиснення суміші бітової послідовності, спектр якої розширюється скремблюючою кодовою послідовністю, та внутрішніх шумів і завадового сигналу за різних рівнів корисного сигналу. Результати моделювання дають можливість стверджувати, що бітова послідовність може відновлюватися з адитивної суміші навіть у ситуаціях, коли сумарна потужність завадових сигналів перевищує потужність корисного сигналу на 12 дБ.

Для покращення характеристик завадостійкості та пропускної здатності потрібно збільшувати кількість чіпів у коді до 511 та навіть 1023. Це планується зробити у подальших дослідженнях.

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

### Список використаної літератури

1. *EUAV Networks and Communications / Kamesh Namuduri, Serge Chaumette, Jae H. Kim, James P. G. Sterbenz. 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. *Lee, Jhong S., Miller, Leonard E. 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. Зубарева. Москва: Радио и связь, 2005. 332 с.*

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

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКРЕМБЛИРУЮЩИХ КОДОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИМИТИВНЫХ ПОЛИНОМОВ В ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены возможности использования разных скремблирующих кодовых последовательностей в телекоммуникационных сетях информационных систем для повышения помехозащищенности та скрытности передачи информации. Предложено использовать кодовые последовательности, построенные на основе примитивных полиномов. Сделан выбор примитивного полинома восьмого порядка и на его базе синтезирована скремблирующая кодовая последовательность. Методом компьютерного моделирования проведено исследование автокорреляционных свойств кодовой последовательности и ее характеристик в условиях передачи информации в присутствии внутренних шумов канала и внешних помех. Доказано, что синтезированная кодовая последовательность позволяет существенно улучшить показатели качества передачи информации. Предложено использовать полученную кодовую последовательность для скремблирования битовых сигналов 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

### UTILIZATION OF SCRAMBLING CODING SEQUENCES BASED ON PRIMITIVE POLYNOMIALS IN TELECOMMUNICATION NETWORKS OF INFORMATION SYSTEMS

Properties of different scrambling coding sequences are considered with the aim to enhance noise immunity and concealment characteristics of information transmission. It is proposed to use coding sequences based on primitive polynomials, which are known to possess very good autocorrelation properties. Those polynomials can be deduced through polynomial division or found in a reference table. An eighth degree polynomial is selected and the corresponding scrambling coding sequence is synthesized. This coding sequence includes



255 chips and can increase the occupied spectrum by eight times. It is shown that the autocorrelation properties of the sequence degrade when a bit sequence has bits with different signs in binary phase modulation. By employing computer simulation, autocorrelational properties of the coding sequence are studied, as well as its performance in information transmission on the background of the internal noise and external interference. Computer simulation was carried out for a number of desired signal values. Those values were selected to study behavior of the scrambling coding sequence in difficult interference situations; the total noise and interfering signal to desired signal ratio assumed values of 6, 9 and 12 dB. It is proven that synthesized coding sequence permits to substantially improve information transmission quality indicators; even if the above ratio equals 12 dB, the desired signal can be extracted from the mixture of the internal noise and interfering signal and the transmitted bit sequence can be identified. Designed coding sequence is proposed to be used for bit sequences scrambling in practical implementations of telecommunication channels. Further research is aimed to study properties of the coding sequences based on the primitive polynomials of the order higher than eight.

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

УДК 621.396

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.025560

О. Л. ТУРОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доцент,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

## **АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ ФАЗОМОДУЛЬОВАНОГО СИГНАЛУ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ПІД ЧАС ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У НЕПЕРЕРВНОМУ РЕЖИМІ З ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЇ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є**

*Проблеми передавання сигналів у сучасних супутникових системах визначаються певними особливостями як побудови самої системи, так і проблемами оброблення приймання та передавання сигналу. Для демодуляторів супутникових модемів, що працюють із неперервним вхідним сигналом, найбільш значущою є проблема синхронізації за частотою несучого коливання. Вказане завдання синхронізації фактично зводиться до оцінювання істинних параметрів сигналу, а саме оцінювання несучої частоти. У статті розглянуто процес оцінювання несучої частоти сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в неперервному режимі. Запропоновано функціональні залежності та на їх основі розроблено алгоритм, який дає змогу здійснити двоетапне оцінювання несучої частоти за правилом максимальної правдоподібності (МП-оцінка) з урахуванням умови невизначеності всіх параметрів сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в неперервному режимі з мінімальним інтервалом спостереження.*

*Досягнення мінімального інтервалу спостереження в поданому алгоритмі оцінювання несучої частоти забезпечується використанням функції швидкого перетворення Фур'є та двома етапами оцінювання: етапом визначення мінімальної дисперсії оцінки несучої частоти та етапом оцінювання максимуму частоти в спектрі сигналу.*

*Результати моделювання за запропонованим алгоритмом показали практичну реалізуємість поданих функціональних залежностей та актуальність застосування запропонованого алгоритму оцінювання несучої частоти сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в неперервному режимі.*

**Ключові слова:** оцінювання несучої частоти сигналу; мінімально гранична дисперсія оцінки несучої частоти; оцінювання максимуму частоти в спектрі сигналу; функція швидкого перетворення Фур'є.

### **Вступ**

Проблеми передавання сигналів у сучасних супутникових системах визначаються певними особливостями як побудови самої системи, так і проблемами оброблення приймання та передавання сигналу. Необхідно зауважити, що для демодуляції сигналів у сучасних супутникових системах зв'язку є потреба демодулювати сигнали, які передаються як у пакетному, так і в неперервному режимах.

Характерною особливістю супутникового каналу зв'язку є істотна невизначеність сигналу, що приймається по частоті (частотна невизначеність сигналу.) Ця особливість породжується переважним використанням у розглянутих системах фазової модуляції сигналів під час приймання сигналу, призначеного для передавання корисної інформації в неперервному режимі. Для демодуляторів супутникових модемів, що працюють із неперервним вхідним сигналом, найбільш значущою є проблема синхронізації за частотою несучого коливання. Зазначене завдання синхронізації фактично зводиться до оцінювання істинних параметрів сигналу, що приймається, —  $\nu$ ,  $\phi$ ,  $\tau$ ,  $d$ , знання параметрів яких необхідно для демодуляції сигналу  $z(t)$  [1]. Найкращі результати може дати сумісне оцінювання невідомих параметрів сигналу. Однак на практиці реалізувати таке оцінювання в каналі з низькою енергетикою і з великою частотною невизначеністю сигналу, що приймається в неперервному режимі, не є можливим. Тому оцінювання зміщення несучої частоти сигналу, що приймається, відносно номінального значення, проводять до того, як розпочинаються інші процедури синхронізації, а саме: синхронізація за фазою і синхронізація за тактовою частотою [1; 2].

© О. Л. Туровський, 2020