

Розглянуто питання обробки сигналів ультразвукового неруйнівного контролю. Показано, що застосування статистичних методів обробки фазових характеристик сигналів дозволяє підвищити вірогідність контролю нових конструкційних матеріалів зі значним загасанням ультразвукових коливань

Ключові слова: ультразвуковий неруйнівний контроль, статистична обробка, фазові характеристики сигналів, обвідна сигналу, вибіркова результуюча довжина

Рассмотрены вопросы обработки сигналов ультразвукового неразрушающего контроля. Показано, что применение статистических методов обработки фазовых характеристик сигналов позволяет повысить достоверность контроля новых конструкционных материалов со значительным затуханием ультразвуковых колебаний

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, статистическая обработка, фазовые характеристики сигналов, огибающая сигнала, выборочная результирующая длина

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВОГО МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

І. М. Бистра

Аспірант*

Контактний тел.: 063-300-29-89

E-mail: la-inna@ukr.net

Ю. В. Куц

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри*

Контактний тел.: 044-408-58-55

E-mail: ivs@nau.edu.ua

Ю. А. Олійник

Аспірант*

Контактний тел.: 066-138-32-67

E-mail: oliynik.y@gmail.com

*Кафедра інформаційно-вимірювальних систем

Національний авіаційний університет

пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03680

1. Вступ

Методи і засоби ультразвукового неруйнівного контролю (УНК) постійно вдосконалюються, підвищуються їх продуктивність, інформативність та вірогідність. В першу чергу це пов'язано з дослідженням нових конструкційних матеріалів, зокрема композитів [1]. Поширення ультразвукових хвиль в таких матеріалах пов'язана з особливостями їх структури, значною неоднорідністю і анізотропією, значним загасанням, що обумовлює високий рівень шумів, отже, необхідність аналізу сигналів УНК з пониженим відношенням сигнал/шум. За таких умов процес визначення інформаційних параметрів сигналів УНК значно ускладнюється і потребує застосування спеціальних методів обробки.

В УНК використовуються методи обробки сигналів які базуються на аналізі їх амплітудних характеристик [2], такі методи застосовуються у випадку, коли відношення сигнал/шум значно перевищує одиницю. В роботах [3, 4, 5] доведена можливість застосування фазових характеристик сигналів в сукупності з їх статистичною обробкою для розв'язку задачі виявлення сигналів на фоні шумів співставних за рівнем з сигналом. Ефективність такої обробки була підтверджена результатами моделювання, які наведені в роботах [6, 7, 8, 9].

Використання статистичних методів обробки фазових характеристик сигналів, дозволяє вирішувати задачу виявлення сигналів УНК навіть при співвідношенні сигнал/шум одиниця і менше.

Метою статті є експериментальне дослідження ефективності використання статистичної обробки фазових характеристик сигналів для розв'язку задачі виявлення корисної складової сигналів УНК на фоні значних шумів (при відношенні сигнал/шум близько до одиниці).

2. Постановка задачі

Виконується дослідження стандартного зразку СО-А2 [10] з товщиною 56 мм і часом поширення ультразвукового сигналу $T_3 = 18,9$ мс.

Зондуючий сигнал являє собою радіоімпульс виду:

$$u_3(t) = U(t) \sin(2\pi ft), \quad t \in [0, T_A], \quad (1)$$

де $U(t)$ – обвідна сигналу; f – частота несучого сигналу; t – поточний час; T_A – тривалість радіоімпульсу, $T_A > f^{-1}$.

Аналізу підлягає сигнал УНК, який являє собою адитивну суміш корисного сигналу у вигляді періодичної (період повтору $T_{\Pi} = 2T_3$) послідовності відбитих (донних) радіоімпульсів і реалізації гауссівського шуму $\xi(t)$ виду

$$u_d(t) = \sum_{i=1}^k k_{\text{ЕАТ},i} \cdot u_3(t - \tau - (i-1)T_{\Pi}) + \xi(t), \quad (2)$$

де k_{EAT_i} – коефіцієнти електроакустичного тракту для i -того донного імпульсу, $i=1, k$, τ – затримка першого донного імпульсу відносно зондуєчого, $\xi(t)$ – гаусівський шум.

Використання задачі ультразвукової товщинометрії для експериментальної оцінки ефективності методів виявлення сигналів уявляється доцільним, оскільки, по-перше, дозволяє сформулювати в одному експерименті послідовність сигналів з різним відношенням сигнал/шум, по-друге, досить легко реалізується на практиці.

Сигнал (2) представлений вибіркою $\{u_d[j], j=1, N\}$, де N – обсяг вибірки значення якої отримані в дискретні моменти часу jT_d , $j=1, [T_A/T_d]$, T_d – період дискретизації.

Відношення сигнал/шум визначається величиною $U_{max,i}/\sigma_{ш}$, де $U_{max,i}$ – максимальне значення обвідної i -того донного сигналу, $\sigma_{ш}$ – середньоквадратичне значення шуму.

Необхідно експериментальним шляхом оцінити ефективність фазового методу виявлення донних імпульсів, методика якого ґрунтується на статистичній обробці фазових характеристик сигналів [6-9].

3. Розв’язок поставленої задачі

Виконаємо розв’язок задачі поетапно. Для кращого розуміння проведених експериментальних досліджень спочатку стисло розглянемо ідею запропонованого методу і методики обробки.

1. Сутність обробки експериментальних даних для запропонованого фазового методу.

Метод обробки сигналів УНК передбачає виконання дискретного перетворення Гільберта вибірки $u_d[j]$ і отримання її гільберт-образа

$$\tilde{u}[j] = H_d[u_d[j]], \tag{3}$$

де H_d – оператор дискретного перетворення Гільберта.

Дискретна обвідна сигналу $u_d[j]$ визначається за формулою

$$A[j] = \sqrt{(u[j])^2 + (\tilde{u}[j])^2}. \tag{4}$$

Оцінка дробової частини дискретної фазової характеристики сигналу (тобто частини фазової характеристики в межах інтервалу $[0, 2\pi)$) відбувається за формулою

$$\phi[j] = \arctg \frac{\tilde{u}[j]}{u[j]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign}(\tilde{u}[j])(1 + (\text{sign}(u[j])))\}, \tag{5}$$

де $\text{sign}(\cdot)$ – знакова функція.

Виявлення радіоімпульсів відбувається за статистикою γ – вибірковою результуючою довжиною [3, 4].

У загальному випадку представлення результатів фазових вимірювань – вибірки $\phi[j]$, $j=1, N$, де N – обсяг вибірки, в декартовій системі координат точками кола одиничного радіуса [3], вектор \vec{r} починається

в точці з координатами $(0,0)$ і закінчується в точці (\bar{C}, \bar{S}) .

Модуль вектора \vec{r} дорівнює

$$\gamma = \sqrt{\bar{C}^2 + \bar{S}^2}. \tag{6}$$

Значення складових \bar{C} і \bar{S} визначаються за загальними виразами виду:

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \cos\phi[j], \quad \bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sin\phi[j], \tag{7}$$

Статистика γ приймає значення на інтервалі $(0,1]$.

В запропонованому методі виявлення донних імпульсів статистика γ визначається для різниці дискретної фазової характеристики сигналу (2) і дискретних значень фази гармонічного коливання з частотою f (в межах напівінтервалу $[0, 2\pi)$) за формулою

$$\Delta\phi[j] = (\phi[j] - (2\pi f j T_d)) \pmod{2\pi}, \quad j = \overline{1, N}, \quad N = \frac{T_A}{T_d}, \tag{8}$$

де $a \pmod{2\pi}$ – операція отримання лишку від ділення числа a на 2π .

Для визначення статистики γ застосовується віконна обробка [11] множини $\Delta\phi[j]$ в ковзному режимі під час руху прямокутного вікна з апертурою M_w відносно вибірки сигналу. В кожному j -тому такті ковзне вікно відбирає частину значень $\Delta\phi[j]$ на інтервалі часу, кратному τ^{-1} . Відповідне поточне значення статистики γ визначається за виразом

$$\gamma[j, M_w] = \frac{1}{M_w} \sqrt{\left(\sum_{k=j-0.5M_w}^{j+0.5M_w} \cos \Delta\phi[k] \right)^2 + \left(\sum_{k=j-0.5M_w}^{j+0.5M_w} \sin \Delta\phi[k] \right)^2}, \quad j = \overline{0.5M_w, N - 0.5M_w}. \tag{9}$$

Значення $\gamma[j, M_w]$ на інтервалах часу де присутні радіосигнали (донні сигнали) збільшуються, а поза межами цих часових інтервалів зменшуються. Тому ознакою наявності радіосигналу є перевищення статистикою $\gamma[j, M_w]$ певного порогу $\Pi \in (0, 1)$. Значення порогу виявлення сигналів Π вибирається за заданими рівнями похибок першого і другого роду.

Аналіз вірогідності виявлення радіоімпульсів на фоні шумів було виконано в роботах [7, 8, 9] де обґрунтовано вибір бета-розподілу статистики γ , виконано перевірку гіпотези про закон розподілу статистики γ за критерієм Колмогорова та розглянуто методику оцінки похибок першого і другого роду.

2. Апаратне забезпечення вимірювального експерименту.

Для проведення експериментального дослідження було складено стенд, структурна схема якого наведена на рис. 1.

Коротко зупинимось на характеристиках складових вимірювального стенду.

Для формування сигналу використовувався генератор сигналів заданої форми АНР-3122, виробництва компанії «Актаком», (Російська Федерація). Він являє собою керований ПК пристрій з функцією генерації сигналів з формами: синус, прямокутник, трикутник, довільною формою сигналу. Основні параметри:

- смуга частот 0,02 Гц – 10 МГц;
- ЦАП 12 біт;

- максимальна кількість точок на канал 128 К;
- максимальна частота оцифровки 80 МГц;
- максимальний рівень вихідного сигналу 10 В для навантаження 50 Ом.

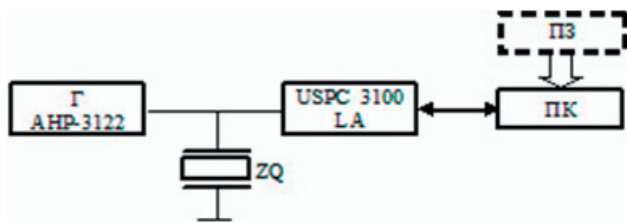


Рис. 1. Структурна схема вимірювального стенду: Г – генератор сигналів, ZQ – п’єзоелектричний перетворювач, USPC – дефектоскоп, ПК – персональний комп’ютер, ПЗ – програмне забезпечення

Сигнал подавався на п’єзоелектричний перетворювач суміщеного типу ZQ, з робочою частотою 5 МГц.

В якості пристрою попередньої обробки використовувався одноканальний дефектоскоп USPC 3100 LA виробництва компанії «Socomate» (Франція). Він виконаний у вигляді PCI – плати для ПК. Плата здійснює підсилення, фільтрацію та оцифровку сигналу, попередню цифрову обробку та зберігання результату в пам’яті плати для подальшої передачі пакетами в ОЗУ ПК. Основні параметри дефектоскопу USPC 3100 LA:

- смуга частот приймача 0,35-30 МГц;
- динамічний діапазон амплітуди сингалу не перевищує 105 дБ;
- АЦП з частотою дискретизації 100 МГц і розрядністю 10 біт.

П’єзоперетворювач ZQ встановлювався на досліджуваній зразок СО-А2. Такі зразки використовуються при контролі ультразвуковим дефектоскопом виробів з металів, що відрізняються по акустичним характеристикам від маловуглецевої і низьколеговоаної сталі, для визначення таких характеристик і параметрів приладів як умовна чутливість, мертва зона, похибка глибиноміру, кут введення ультразвукового променя в контрольований зразок, ширина основної пелюстки діаграми напрямленості, гранична чутливість та ін.

3. Параметри, характеристики сигналів та режими вимірювання.

В якості зонduючого сигналу використовувався радіоімпульсний сигнал виду (1), з наступними параметрами: обвідна сигналу $U(t)$ подібна до гаусівської, максимальне амплітудне значення обвідної 5 В, частота $f = 2,5$ МГц, тривалість радіоімпульсу складає 5 періодів сигналу заповнення.

Дискретизація сигналів в дефектоскопі виконувалася з частотою $f_d = 50$ МГц, в результаті отримувалась вибірка значень обсягом $N = 15000$.

Середньоквадратичне значення шуму $\sigma_{ш}$ обчислювалось для інтервалів вибірки, що не містили донних імпульсів і дорівнювало $\sim 0,0085$ В. Значення $U_{max,i}$ для перших п’яти відгуків становить 0,94 В, 0,49 В, 0,27 В, 0,16 В та 0,1 В відповідно.

4. Результати експериментальних досліджень.

Отримані в ході експерименту дані представлені на рис. 2 на якому зображено: а) графік отриманого

сигналу УНК; б) визначена за формулою (4) обвідною сигналу (2) (крива 1), загасання послідовності радіоімпульсів відбувається за експоненціальним законом (крива 2); в) фрагмент графіка різниці дискретної фазової характеристики сигналу УНК і дискретних значень фази гармонічного сигналу (8); г) графік значень статистики $r[j, M_w]$ отриманих за формулою (9) для ковзного вікна з апертурою $M_w = 20$.

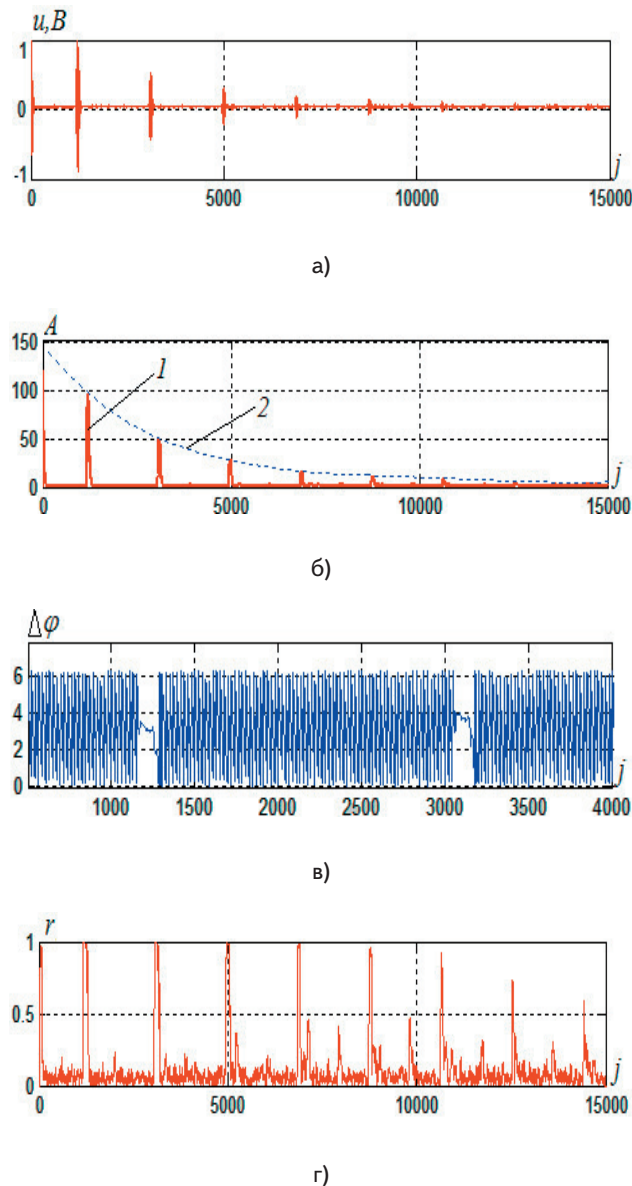


Рис. 2. Графіки представлені вибірками $j = \overline{1, N}$, отриманими в дискретні моменти часу: а) сигнал, що досліджується $u_d[j]$; б) обвідна сигналу $A[j]$; в) фрагмент різниці дискретної фазової характеристики сигналу і фази гармонічного сигналу $\Delta\phi[j]$; г) вибіркова результуюча довжина отримана в ковзному режимі $r[j, M_w]$

З рис. 2а, 2б визначено, що аналізований сигнал являє собою послідовність донних радіоімпульсів в суміші з гаусівським шумом, які загасають за експоненціальним законом $e^{-\frac{t}{\tau}}$ з постійною часу $\tau \approx 63,54$ мкс (з урахуванням $T_d = 0,02$ мкс).

Графік різниці дискретної фазової характеристики сигналу УНК і дискретних значень фази гармонічного

сигналу (рис. 2в) являє собою пілкоподібну функцію, що хаотично змінюється з розподілом на інтервалі $[0, 2\pi)$ близьким до рівномірного. На інтервалах, в межах яких донні імпульси відсутні, графік набуває виду кривої яка змінюється в інтервалі значно меншому за інтервал $[0, 2\pi)$.

Співставний аналіз обвідної (рис. 2б) і статистики $r[j, M_w]$ (рис. 2г) дозволяє зробити висновок про те, що запропонований і досліджений метод фазової обробки сигналів УНК є більш ефективним оскільки забезпечує можливість виявлення більшої кількості донних імпульсів тобто можливість їх виявлення за пониженого відношення сигнал/шум. Дійсно, обвідна донних імпульсів починаючи з $i=5$ практично не вирізняються на фоні шуму. Натомість графік статистики $r[j, M_w]$ свідчить про те, що в даному експерименті впевнено виявляються перші вісім донних імпульсів. Для восьмого імпульсу відношення сигнал/шум становить $U_{\max,i}/\sigma_{\text{ш}} \approx 1,8$.

Додаткові дослідження підтвердили, що граничне значення відношення сигнал/шум при яких зберігається можливість виявлення донних імпульсів залежить від ширини вікна аналізу, співвідношення частоти сигналу і періоду дискретизації і може бути зменшене за рахунок їх раціонального вибору.

4. Висновки

Досліджено метод виявлення корисних сигналів УНК на фоні значних адитивних завад, який полягає в опрацюванні фазових характеристик цих сигналів і їх статистичної обробки.

Виявлення сигналів відбувається за однією з кругових характеристик – результуючою довжиною вектора.

Остання отримується під час аналізу обмеженої в часі ділянки значень фазової характеристики сигналу у ковзному режимі.

Експериментально підтверджено ефективність статистичної обробки фазових характеристик сигналів УНК в задачах виявлення радіосигналів на фоні значного шуму. Розглянутий метод дозволяє вирішувати задачу виявлення сигналів в УНК на фоні значних завад (для відношення сигнал/шум рівному одиниці і менше).

Розглянутий метод опрацювання сигналів може бути використаним у прецизійних ультразвукових дефектоскопах і ультразвукових товщиномірах. При виконанні контролю виробів матеріалів які характеризуються значними загасанням сигналів, неоднорідністю та анізотропією, зокрема під час контролю виробів з композиційних матеріалів.

Література

1. Механіка руйнування і міцності матеріалів [Текст]: довідн. посібник. Т.9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Осташ, В.М. Федірко, В.М. Учанін та ін.; під заг. ред. В.В. Панасюка; Львів: Вид-во «Споллом», 2007.-1068 с.
2. Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів [Текст]: навч. посібник / В.К. Качанов, О.В. Мозговий, О.І. Пітолін, та ін.; за ред. В.П. Бабака. – К.:ІСДО, 1994. – 132 с.
3. Куц, Ю.В. Статистична фазометрія [наукова монографія]./ Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет, 2009р. – 383 с.
4. Мардиа, К. Статистический анализ угловых наблюдений [Текст] / К. Мардиа. – М.: Гл. ред. физ.-мат. литературы изд-ва «Наука», 1979. –240 с. –110 с.
5. Патент України на корисну модель № 35057. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів / Ю.В. Куц, В.С. Єременко, О.В. Монченко, І.М. Лапіга. – Опубл. 26.08.2008, Бюл. №16, 2008.
6. Куц, Ю.В. Фазовий спосіб ультразвукового измерения толщины изделий [Текст] / Ю.В. Куц, С.А. Быстрый, И.Н. Лапига, О.В. Монченко // 19th National scientific symposium «Metrology and Metrology Assurance 2009», Sozopol, Bulgaria, september 10-14 2009. – Proceedings of the symposium. - Sozopol, Bulgaria, 2009. – p.192-197.
7. Близнюк, Е.Д. Анализ достоверности обнаружения сигналов ультразвукового неразрушающего контроля на основе использования метода статистической фазометрии [Текст] / Е.Д. Близнюк, В.С. Єременко, Ю.В. Куц, И.Н.Лапига, С.В. Шенгур // «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: Материалы Семнадцатой международной конференции, 5-9 октября 2009 г. - г. Ялта, 2009. – С. 73-76.
8. Близнюк, О.Д. Застосування методу статистичної фазометрії в ультразвуковому неруйнівному контролі [Текст] / О.Д. Близнюк, В.С. Єременко, Ю.В. Куц, І.М. Лапіга, С.В. Шенгур // «Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій», Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Збірник наукових праць НАНУ Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. Випуск 14. –2009. – С. 50–55.
9. Близнюк, Е.Д. Фазовий обнаружитель сигналов для ультразвукового неразрушающего контроля [Текст] / Е.Д. Близнюк, В.С. Єременко, Ю.В. Куц, И.Н. Быстрая, Е.В. Монченко, В.К. Цапенко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2011. - №2. С. 21-24.
10. ГОСТ 14782-86 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые [Текст]. – М.: ИПК Изд-во Стандартов, 2005. – 27 с.
11. Куц, Ю.В. Дослідження виконної обробки сигналів в задачах фазометрії [Текст] / Ю.В. Куц, І.М. Лапіга, О.В. Монченко / Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2008. – № 1(16). – С. 62–65.

Abstract

The article concerns an experimental study of the efficiency of statistical processing of phase characteristics of signals to solve the problem of identification of the useful component of signals of ultrasonic nondestructive control against the background of considerable noises. The method consists in processing of the signal, received experimentally; in detection of its phase characteristics and their statistical treatment. Identification of information signals is caused by one of circular features, which is the resulting length of a vector, and which is obtained during the analysis of time-limited area of values of the phase characteristic of the signal in the sliding mode.

The data, obtained during the experiment, shows that on the time intervals, where information signals are present, the values of the resulting length of a vector increase, but outside these time intervals they reduce. Therefore, the sign of the radio signal is the excess of a certain vector *P* by the resulting length of a vector. The value of the level of detection of the *P* signals is chosen, according to given levels of errors of the first and second kind.

The considered method of signal processing can be used in precision ultrasonic flaw detectors and ultrasonic thickness meters while controlling products, which materials are characterized by significant signal extinction, heterogeneity and anisotropy.

It was shown that the use of statistical methods of processing of phase characteristics of signals allowed us to solve the problem of detection of signals of ultrasonic nondestructive control against the background of noises, comparable according to the level with a signal that increases the possibility of control of new structural materials, which are characterized by a significant extinction of ultrasonic vibrations

Keywords: ultrasonic nondestructive control, statistical processing, phase characteristics of signals, envelope of a signal, selective resulting length

Розглядаються питання застосування хаотичних сигналів в сучасних конфіденційних системах зв'язку. Запропоновано метод підвищення структурної скритності сигнальних конструкцій, що сформовані на безлічі взаємно-ортогональних хаотичних послідовностей. Показано, як за допомогою кореляційного прийому здійснюється виділення інформаційного сигналу

Ключові слова: хаотичний сигнал, ортогональність, конфіденційний, сигнатура

Рассматриваются вопросы применения хаотических сигналов в современных конфиденциальных системах связи. Предложен метод повышения структурной скритности сигнальных конструкций, формируемых на множестве взаимно-ортогональных хаотических последовательностей. Показано, как с помощью корреляционного приема осуществляется выделение информационного сигнала

Ключевые слова: хаотический сигнал, ортогональность, конфиденциальный, сигнатура

УДК 621.391

ПОВЫШЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ СКРЫТНОСТИ ПЕРЕДАЧИ СИСТЕМ С ХАОТИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ

В. В. Корчинский

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра информационной безопасности и передачи данных
Одесская национальная академия связи
им. А. С. Попова
ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина, 65029
Контактный тел.: 063-631-83-77

1. Введение

Большинство современных систем связи в качестве носителя информации использует в основном гармоническое колебание, с помощью которого реализуются различные виды модуляции. В таких системах защита информации от несанкционированного доступа чаще всего осуществляется на старших уровнях эталонной

модели OSI. Внедрение явления динамического хаоса в область инфокоммуникационных технологий открывает новые перспективы не только по созданию эффективных систем криптокодирования, но и расширяет возможности по синтезу сигнальных конструкций, обеспечивающих потенциально высокую скрытность передачи на первом физического уровне модели OSI. Исследования, проведенные в [1, 2, 3], по-