

П.Ю. Костенко, В.В. Слободянюк, С.В. Волинець, М.Л. Крючка

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ IID-СКРИТНОСТІ БЕЗПЕРЕВНИХ ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ

У статті розглядається метод конструювання хаотичних послідовностей, що володіють статистичними й динамічними характеристиками близькими до характеристик «білого» шуму. Вивчаються фазові портрети сконструйованих послідовностей і їх інтерполяції для одержання безперервних сигналів, передаваних по радіоканалу. Введена чисельна міра скритності сигналу та запропоновано підхід до формування сигнальної конструкції, що використовує просту одномірну модель хаосу зі структурованою безліччю точок у фазовому просторі й концепцію аналітичного сигналу. Проводиться порівняльний аналіз IID-скритності дискретних і безперервних хаотичних сигналів. Результати статті можуть бути використані для оцінки скритності радіотехнічних систем передачі інформації.

Ключові слова: хаотична послідовність, дискретний хаотичний сигнал, фазовий простір, безперервний хаотичний сигнал, IID-скритність, BDS-статистика.

Вступ

При розробці сучасних радіотехнічних систем (РТС) передачі конфіденційної інформації спостерігається тенденція до використання сигналів, властивості яких близькі до властивостей білого шуму. До таких сигналів можна віднести хаотичні послідовності (каскади). Однак, володіючи ознаками випадковості, найпростіші математичні моделі хаотичних послідовностей мають структурований образ у фазовому просторі, що відрізняє їх від звичайних білих шумів. Тому, безпосереднє використання хаотичних послідовностей для передачі інформації не вирішує завдання забезпечення скритності РТС.

Є кілька властивостей сигналів, які тією чи іншою мірою обумовлюють їхню скритність [1–7]. Тут під скритністю будемо розуміти близькість безлічі точок образу сигналу у фазовому просторі до образу білого шуму, тобто ступінь його маскуванню під шум. Чисельною мірою якості маскуванню (скритності сигналу) визначимо значенням BDS-статистики сигналу [7–8]. Її значення, для незалежних однаково розподілених (Independent and Identically Distributed – IID) випадкових величин (білого шуму), перебувають в інтервалі $(-1,96; 1,96)$, який відповідає рівню значимості $\alpha = 0,05$. Відхилення значень BDS-статистики сигналу від даного інтервалу можна характеризувати мірою скритності, яку назовемо IID-скритністю.

У контексті вирішення завдання забезпечення IID-скритності сигналів, у роботі [7] запропонований підхід до формування сигнальної конструкції, що використовує просту одномірну модель (парадигму) хаосу зі структурованою безліччю точок у фазовому просторі та концепцію аналітичного сигналу.

Важливо відзначити, що використання математичного хаосу для конструювання дискретних хаотичних сигналів, що володіють необхідною скритністю, обмежується їхнім використанням у телекомунікаційних мережах. Для передачі інформації по радіоканалу використовується фізичний хаос, коли хаотичний сигнал, генерується безпосередньо в радіо- або НВЧ-діапазоні довжин хвиль (прямохаотичні системи зв'язку) [9]. Інформацію вводять або шляхом модуляції параметрів передавача, або за рахунок її накладення на хаотичний носій уже після його генерації. Добування інформаційного сигналу з хаотичної несучої також здійснюють в області високих або надвисоких частот. На жаль, прямохаотичні системи зв'язку працюють на відносно невеликих відстанях, в основному, усередині приміщень.

У теперішній час у зв'язку з розвитком цифрових методів формування та обробки сигналів з'явилась можливість створення джерел хаотичних сигналів на основі цифро-аналогових пристроїв, які серійно випускаються з різним ступенем інтеграції, які дозволяють формувати широкосмугові й смугові сигнали з більшим радіусом дії для навігаційних, телекомунікаційних і радіолокаційних систем [10–11].

Метою роботи є формування безперервних хаотичних сигналів, а також дослідження їх скритності.

Виклад основного матеріалу

Також як і в роботі [7] використаємо перетворення по Гільберту дійсної $(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ та уявної $(y_0, y_1, \dots, y_{N-1})$ компонент комплекснозначної хаотичної послідовності (ХП) для визначення її комплексної амплітуди. Ці компоненти можуть бути сформовані різними відображеннями або тим самим відображенням, але з різними початковими значеннями.

На рис. 1 показана реалізація S_n такої ХП, що утворена комплексною амплітудою перенесеною на частоту ω . Така ХП отримана з використанням полінома Чебишева першого роду 6-го порядку з параметрами $x_0 = 0,6$ й $y_0 = 0,67$, $N = 300$, $\omega = 2,75$ і має ускладнену структуру атрактора.

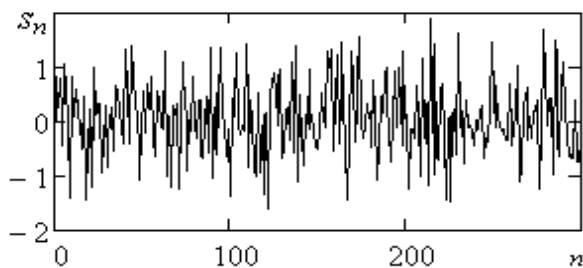


Рис. 1. Реалізація ХП, що утворена комплексною амплітудою перенесеною на частоту ω

Образи (зображуючі точки) ХП на фазовій площині, в якій по осях координат відкладаються поточне й попереднє значення послідовності, показані на рис. 2 і на рис. 3.

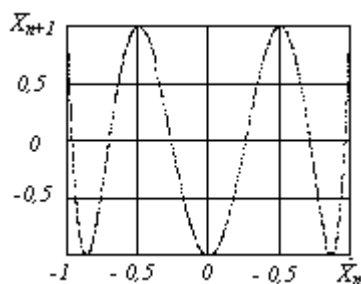


Рис. 2. Образ ХП на фазовій площині, отриманої з використанням полінома Чебишева

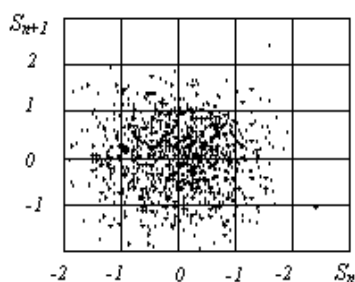


Рис. 3. Образ ХП на фазовій площині, що утворена комплексною амплітудою перенесеною на частоту ω

Еволюція точок, що зображують ХП, стрибками змінює положення, залишаючись при цьому на кривій, яка описується поліномом Чебишева першого роду 6-го порядку, який рекурентно використовувався при конструюванні ХП.

Візуальний аналіз атрактора, сконструйованого ХП, дає підставу вважати, що він має високу скрит-

ність у згаданому вище сенсі. Для підтвердження цього висновку розрахуємо для ХП BDS-статистику. Нагадаємо, що в якості міри скритності прийняте значення BDS-статистики. На рис. 4 показана залежність значення BDS-статистики ХП від частоти на множині $\{\omega_i = i\Delta_\omega\}_{i=1}^{200}$, які при моделюванні змінювалися із кроком $\Delta_\omega = 0,05$.

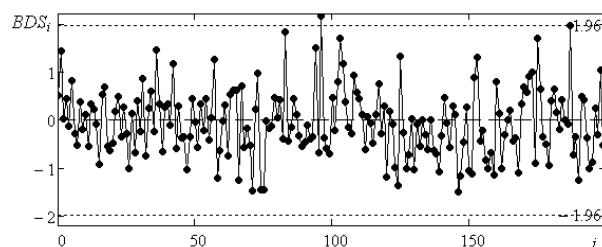


Рис. 4. Залежність значення BDS-статистики ХП від частоти ω

Аналіз значень BDS-статистики від частоти ХП показує, що практично всі її значення попадають в інтервал IID. Таким чином, розрахунки BDS-статистики так само, як і візуальний аналіз атрактора (фазового портрета) ХП, підтверджують його нерозрізненість від образу білого шуму у фазовому просторі.

Для часового узгодження із ЦАП – цифроаналоговим перетворювачем – хаотична послідовність надходить в інтерполятор, який перетворює її в аналоговий сигнал, що займає задану смугу частот у діапазоні від 0 до деякої верхньої граничної частоти $f_b = F$. Коли верхня границя спектра перевищує нижню границю у два рази, тобто $f_b = 2f_n$, одержуємо широкопasmовий радіосигнал з безперервним спектром шириною більш однієї октави. Іноді сигнал вважається широкопasmовим, якщо ширина спектра становить близько 1/10 від частоти, на якій передається сигнал. При більш вузькому спектрі сигнал можна вважати вузькосмуговим, при більш широкому – надширокосмуговим. Далі сигнал надходить у передавач – аналоговий блок, що здійснює підсилення сигналу, що й реалізує інтерфейс із каналом зв'язку (антенна система для радіоканалу). У процесі проходження модульованого сигналу через канал зв'язку сигнал зазнає впливу шумів і перешкод. Спотворений сигнал надходить на вхід приймача. При санкціонованому доступі приймання такого сигналу можна виконати відомими методами статистичної обробки спостережень [12].

Важливо відзначити одну принципову обставину, пов'язану з перетворенням дискретного хаотичного сигналу в аналоговий сигнал з використанням інтерполяції Шенона-Котельникова. Безліч точок на фазовій площині, що є образом аналогового сигналу, проявляє більшу структурованість, ніж аналогічна безліч для дискретного хаотичного сигналу. Як

наслідок, IID-скритність аналогового еквівалента хаотичного сигналу зменшується.

Для аналізу еволюції безлічі точок двовимірною фазового простору при переході від дискретного хаотичного сигналу до його безперервного представлення скористаємося відомими результатами Шенона-Котельникова [12].

Процес $x(t)$ з обмеженим спектром ($f_b=F$) повністю визначається послідовністю своїх відліків (миттєвих значень) $\{x(kT_0), k=0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$, що відстають один від одного на інтервал $T_0 \leq 1/2F$. Значення процесу $x(t)$ у довільний момент часу $t \in (-\infty, \infty)$ виражається формулою:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k \gamma_k(t), \quad x_k = x(kT_0), \quad (2)$$

де $\{\gamma_k(t)=\gamma_0(t-kT_0), k=0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ – сімейство функцій відліків $\gamma_k(t) = \frac{\sin[2\pi F(t-kT_0)]}{2\pi F(t-kT_0)}$; $\gamma_0(t)$ – нульова функція відліків.

Вираз (2) узагальнюється на часову дискретизацію вузькосмугових сигналів [6]:

$$x(t) = \sum_k x_k \gamma_k(t) \cos[2\pi f_0(t-kT_0)] - \sum_{\perp k} x_{\perp k} \gamma_k(t) \sin[2\pi f_0(t-kT_0)]. \quad (3)$$

Особливість полягає в тому, що при періодичній дискретизації вузькосмугового сигналу $x(t)$ потрібно формувати відліки $x(kT_0)$ не тільки вихідного процесу $x(t)$, але й відліки $x_{\perp}(kT_0)$ сполученого по Гільберту процесу $x_{\perp}(t)$. Число відліків збільшується у два рази ($n=2 \cdot 2FT$).

Будемо вважати, що по радіоканалу передається сигнал наступного виду:

$$x(t) = \sum_{q=1}^Q \left(\sum_k x_{q,k} \gamma_k(t) \cos[2\pi f_q(t-kT_0)] - \sum_{\perp k} x_{\perp q,k} \gamma_k(t) \sin[2\pi f_q(t-kT_0)] \right). \quad (4)$$

Тут $f_q \geq f_{q-1} + 2F$, $f_0 = F$; q – номер переданої хаотичної послідовності

Спектр $g_x(f)$ смугового радіосигналу складається із двох смуг $f \in \{(\pm f_q - F, \pm f_q + F)\}_{q=1}^Q$, що поєднують смуги частот його компонент.

Вихідний сигнал $x(t)$ може бути відновлений з послідовностей $\{x_{q,0}, x_{q,1}, \dots, x_{q,N-1}\}$ і $\{x_{\perp q,0}, x_{\perp q,1}, \dots, x_{\perp q,N-1}\}$ пропусканням останніх через фільтри із частотними характеристиками

$$K_q(f) = \frac{1}{2F} \Pi\left(\frac{f-f_q}{2F}\right) \quad (5)$$

або відповідними імпульсними характеристиками

$$h_q(t) = \gamma_0(t) \exp(j2\pi f_q t). \quad (6)$$

Реальні сигнали мають кінцеву тривалість T і одночасно обмежені по частоті величиною F . У цьому випадку для інтерполяції Шенона-Котельникова буде досить кінцевого числа доданків у вираженні (3). Число ненульових відліків n приблизно дорівнює відношенню тривалості повідомлення до інтервалу дискретності:

$$n \cong \frac{T}{T_0} = 2FT. \quad (7)$$

Проведемо аналіз впливу інтерполяції часової послідовності, на скритність отриманого з неї безперервного процесу.

Послідовність можна трактувати як результат дискретизації по Шенону-Котельникову процесу зі спектром у діапазоні від 0 до деякої верхньої граничної частоти $f_b=F$.

З дискретної послідовності можна сформулювати як безперервні ширококутові радіосигнали, так і радіосигнали зі смугою частот, верхня границя якої перевищує нижню у два рази, тобто $f_b=2f_n$, яку називають октавою.

Враховуючи, що максимальною IID-скритністю володіє послідовність, що володіє властивостями «білого» шуму, проведемо аналіз скритності отриманого із неї безперервного гаусівського процесу. Її можна прийняти за еталон, а скритність безперервних хаотичних і складних процесів характеризувати ступенем відхилення значень відповідних BDS-статистик від BDS-статистики безперервного гаусівського процесу. При цьому важливі не абсолютні значення BDS-статистик, а вміння їх порівнювати з BDS-статистикою безперервного гаусівського процесу.

Нижче проведемо аналіз вибіркової функції $\xi(t)$ стаціонарного гаусівського ширококутового процесу, отриманого в результаті інтерполяції по Шенону-Котельникову відповідної послідовності.

Залежності від частоти f_n BDS-статистики шуму, отриманого інтерполяцією випадкової некорельованої послідовності, показана на рис. 5.

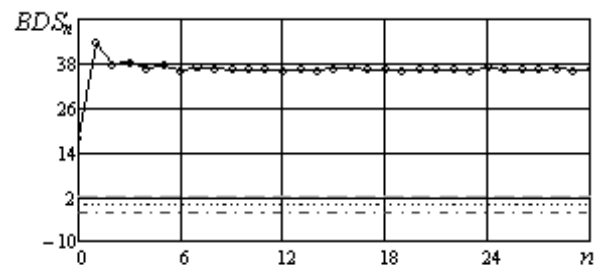


Рис. 5. Залежності BDS-статистики від частоти, отриманого інтерполяцією випадкової некорельованої послідовності

Розрахунок значень BDS-статистики проводився для множини значень центральних частот $\{f_n = F \cdot n\}_{n=0}^{30}$, смугового шуму, реалізація якого містила $N = 900$ значень при кроці дискретизації $\Delta = 1$ й $F = 1/2\Delta$. При розрахунках BDS-статистики її середнє значення було рівним 36,2 для $n \geq 2$.

При розрахунках з обраними вище параметрами максимальне значення реалізації BDS-статистики 43,8, а мінімальне 17,9 при $n = 0$, тобто при широкопasmовому шумі. У міру збільшення центральної частоти в спектрі смугового шуму BDS-статистики наближаються до середнього значення. Така поведінка BDS-статистики статистики характерна для корельованого шуму, який формується в приймальній системі після смугової фільтрації білого шуму. У цьому випадку фазовий портрет здобуває структурованість у вигляді квазізамкнених траєкторій упорядкованих уздовж еліптичних траєкторій.

Розподіл точок на фазовій площині у випадку широкопasmового шуму з верхньою частотою в спектрі рівної значенню $f_b = F$ ($n=0$) менше структурований, ніж для смугового шуму при $n \geq 2$. Цей якісний висновок підтверджується відповідними значеннями BDS статистики.

Таким чином, IID-скритність випадкового безперервного процесу в діапазоні аналізованих частот менша ніж в у випадкової послідовності, що його породжує.

Розглянемо залежність BDS-статистики смугового хаотичного процесу від частоти f_n , отриманого інтерполяцією хаотичної послідовності ХП. Для розрахунків BDS-статистики безперервного процесу необхідно перейти до еквівалентного його часовому ряду без втрати інформації про його скритність. При цьому виникає питання, з якою частотою необхідно брати відліки сигналу. Насамперед, необхідно, щоб образ часового ряду у фазовому просторі представляв траєкторію, що має єдину дотичну в кожній точці.

У цьому випадку відліків сигналу повинно бути значно більше, чим відліків, що породжують його хаотичну послідовність. При моделюванні хаотичного безперервного сигналу використовувалося тисячу значень хаотичної послідовності ХП.

Після її інтерполяції розрахунки BDS-статистики проводилися по часовим відлікам, число яких було обрано рівним десяти на період максимальної частоти в спектрі безперервного сигналу. Отримана залежність BDS-статистики від частоти f_n показана на рис. 6.

Максимальне значення BDS-статистики дорівнює 46,64. Її середнє значення при $n \geq 2$ дорівнює 42,32. При $n = 0$ BDS-статистики має мінімальне значення, рівне 17,95, близьке до аналогічного значення, отриманого для шуму.

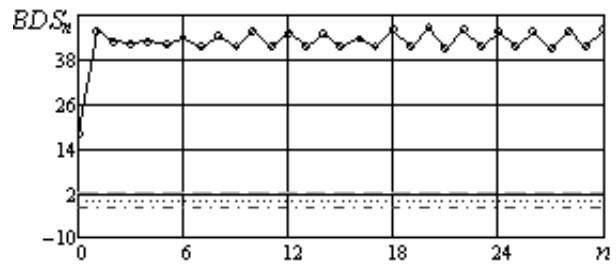


Рис. 6. Залежність BDS-статистики від частоти

Чисельний експеримент показав, що збільшення числа часових відліків аналізованих процесів може змінити вид їх траєкторій у фазовому просторі й вплинути на значення BDS-статистик. Тому доцільно аналізувати її значення щодо деякої еталонної BDS-статистики. У якості еталонної можна вибрати значення BDS-статистики шуму.

Міру скритності процесу $x(t)$ зручно характеризувати коефіцієнтом

$$k_{\text{скр}}(f_n) = \frac{BDS_{\xi}(f_n)}{BDS_x(f_n)}, \quad (8)$$

який відображає ступінь зниження скритності аналізованого процесу $x(t)$ в порівнянні з еталонним значенням, у якості якого прийнято значення BDS-статистики випадкового процесу (шуму) $\xi(t)$.

Для розглянутих хаотичних процесів $x(t)$, як правило, значення коефіцієнта скритності розподілені в околиці $k_{\text{скр}} = 1$. У проведеному дослідженні при $n = 0$ маємо $k_{\text{скр}} = 1$, а при f_n його значення приблизно рівно $k_{\text{скр}} = \frac{36,2}{42,31} \approx 0,855$.

Нижче проведемо аналіз вибіркової функції $\xi(t)$ стаціонарного гаусівського широкопasmового процесу (безперервна крива на рис. 7), отриманої в результаті інтерполяції по Шеннону-Котельникову. У нашому випадку це буде реалізація процесу $\xi(t)$ (безперервна крива) і його прирощення («похідна») (пунктирна крива), масштаб якого, для наочності, збільшений вдесятеро.

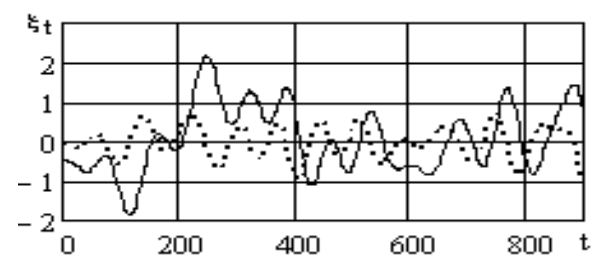


Рис. 7. Вибіркова функція $\xi(t)$ стаціонарного гаусівського широкопasmового процесу, отримана в результаті інтерполяції по Шеннону-Котельникову та її похідна

Відзначимо, що такі ж значення цього коефіцієнта були отримані й при меншому обсязі вибірки $N = 500$. При переході до аналізу простих детермінованих коливань коефіцієнт скритності ухвалює типові значення $k_{\text{скр}} \ll 1$.

Розглянемо фазову площину, у якій по осях координат відкладаються які-небудь дві змінні (фазові координати), що однозначно визначають властивості випадкового процесу. Структура фазової траєкторії на фазовій площині (рис. 8) демонструє відсутність замкнених траєкторій і не проявляє які-небудь явно виражені закономірності (граничні цикли).

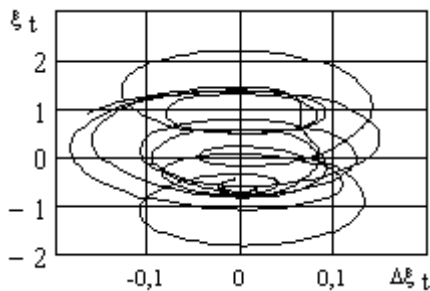


Рис. 8. Фазова траєкторія стаціонарного гаусівського широкопasmового процесу

У міру збільшення центральної частоти в спектрі смугового шуму BDS-статистики наближаються до середнього значення.

Візуальний аналіз траєкторій інтерпольованих сигналів на фазовій площині дозволяє вважати, що їх структура подібна структурі фазової траєкторії корельованого шуму. Цей висновок підтверджується значенням коефіцієнта скритності $k_{\text{скр}} \approx 1$.

Висновок

Таким чином, інтерполяція дискретних хаотичних сигналів приводить до зниження їх скритності. Найбільшої скритності мають безперервні широкопasmові сигнали, для яких $f_n = 0$. У міру збільшення несучої частоти f_n , коли $n \geq 2$, коефіцієнт скритності стабілізується й приймає значення менші, ніж для випадку, коли $n = 0$, тобто скритність смугових хаотичних сигналів менше, чим широкопasmових.

Список літератури

1. Основы теории скрытности: учеб. пособие / З.М. Каневский, В.П. Литвиненко, Г.В. Макаров и др. – Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 2006. – 202 с.
2. Kuvshinov O.V. Estimation of structural stealthiness of broadband signals / O.V. Kuvshinov, R.M. Voznyuk // Scientific Works of KPI. – 2011. – № 1. – P. 106-111.
3. Pan J. A new improved scheme of chaotic masking secure communication based on Lorenz system / J. Pan, Q. Ding, B. Du // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2012. – № 5. – 10 p.
4. Wang B. On the novel chaotic secure communication scheme design Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation / B. Wang, S. Zhong, X. Don. – 2016. – Volume 39, Issue null. – P. 108-117.
5. Zakharchenko N.V. Stealth of transmission in communication systems with chaotic signals / N.V. Zakharchenko, S.M. Horokhov, V.V. Korchyanskiy, B.K. Radzymovskiy // Measuring and Computing Devices in Technological Processes. – 2013. – № 3. – P. 41-45.
6. Kostenko P.Yu. Estimation of structural stealthiness of chaotic signals / P.Yu. Kostenko, S.N. Symonenko, A.N. Barsukov, A.V. Antonov // Radioelectronics and Communications Systems. – 2012. – № 5. – P. 3-10.
7. Kostenko P.Yu. Stealthiness of analytical chaotic signals / P.Yu. Kostenko, V.V. Slobodyanuk, A.N. Barsukov // Radioelectronics and Communications Systems. – 2017. – № 5. – P. 132-140.
8. Kostenko P.Yu. Use of BDS statistic to estimate security of a signal obtained by mixing chaotic carrier / P.Yu. Kostenko, S.N. Symonenko, A.N. Barsukov, K.S. Vasiuta // Radioelectronics and Communications Systems. – 2010. – № 5. – P. 41-45.
9. Dmitriev A.S. Direct Chaotic Communication Schemes in Microwave Band / A.S. Dmitriev, B.Ye. Kyarginsky, A.I. Panas, S.O. Starkov // Radiotekhnika i Elektronika. – 2001. – № 2. – P. 224-233.
10. Xiong L. Design and Hardware Implementation of a New Chaotic Secure Communication Technique / L. Xiong, Y. Lu, P. Gupta // PLoS ONE. – 2016. – № 11(8). – P. 56-63.
11. Huang L. The Design and its application in Secure Communication and image encryption of a new lorenz-like system with varying parameter / L. Huang, D. Shi, J. Gao // Mathematical Problems In Engineering. – 2016. – Volume 2016. – P. 1-11.
12. Фалькович С.Е. Основы статистической теории радиотехнических систем: учеб. пособие / С.Е. Фалькович, П.Ю. Костенко. – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 390 с.

References

1. Kanevskiy, Z., Litvinenko, V. and Makarov, G. (2006), "Osnovy teorii skrytnosti" [Foundations of stealth theory], Voronezh, 202 p.
2. Kuvshinov, O.V. and Voznyuk, R.M. (2011), Estimation of structural stealthiness of broadband signals, *Scientific Works of KPI*, No. 1, pp. 106-111.

3. Pan, J., Ding, Q. and Du, B. (2012), A new improved scheme of chaotic masking secure communication based on Lorenz system, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, No 5. – 10 p.
4. Wang, B., Zhong, S. and Don, X. (2016), On the novel chaotic secure communication scheme design *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 39, Issue null, pp. 108-117.
5. Zakharchenko, N.V., Horokhov, S.M., Korchynskii, V.V. and Radzymovskii, B.K. (2013), Stealth of transmission in communication systems with chaotic signals, *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, No. 3, pp. 41-45.
6. Kostenko, P.Yu., Symonenko, S.N., Barsukov, A.N. and Antonov, A.V. (2012), Estimation of structural stealthiness of chaotic signals, *Radioelectronics and Communications Systems*, No. 5, pp. 3-10.
7. Kostenko, P.Yu., Slobodyanuk, V.V. and Barsukov, A.N. (2017), Stealthiness of analytical chaotic signals, *Radioelectronics and Communications Systems*, No. 5, pp. 132-140.
8. Kostenko, P.Yu., Symonenko, S.N., Barsukov, A.N. and Vasiuta, K.S. (2010), Use of BDS statistic to estimate security of a signal obtained by mixing chaotic carrier, *Radioelectronics and Communications Systems*, No. 5, pp. 41-45.
9. Dmitriev, A.S., Kyarginsky, B.Ye., Panas, A.I. and Starkov, S.O. (2001), Direct Chaotic Communication Schemes in Microwave Band, *Radiotekhnika i Elektronika*, No. 2, pp. 224-233.
10. Xiong, L., Lu, Y. and Gupta, P. (2016), Design and Hardware Implementation of a New Chaotic Secure Communication Technique, *PLoS ONE*, No, 11(8), pp. 56-63.
11. Huang, L., Shi, D. and Gao, J. (2016), The Design and its application in Secure Communication and Image Encryption of a New Lorenz-Like System with Varying Parameter, *Mathematical Problems In Engineering*, Vol. 2016, pp. 1-11.
12. Fal'kovich, S.E. and Kostenko, P.Y. (2005), "Osnovyi statisticheskoy teorii radiotekhnicheskikh sistem" [*Foundations of the Statistical Theory of Radio Systems*], NAU "KhAI", Kharkov, 390 p.

Надійшла до редколегії 6.03.2018

Схвалена до друку 20.03.2018

Відомості про авторів:

Костенко Павло Юрійович

доктор технічних наук професор
професор кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-3382-0684>
e-mail: kpyu@ukr.net

Слободянюк Валерій Валерійович

кандидат технічних наук
науковий співробітник Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-8291-8194>
e-mail: slova@i.ua

Волинець Сергій Вікторович

бакалавр
курсант Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0001-6459-6913>
e-mail: serega.volinet.1995@gmail.com

Крючка Максим Леонідович

бакалавр
курсант Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-1832-6183>
e-mail: maksimleonidovich@ukr.net

Information about the authors:

Pavlo Kostenko

Doctor of Technical Sciences Professor
Professor of Department of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-3382-0684>
e-mail: kpyu@ukr.net

Valeriy Slobodyanuk

Candidate of Technical Sciences
Research Associate of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-8291-8194>
e-mail: slova@i.ua

Serhii Volinets

bachelor
cadet of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0001-6459-6913>
e-mail: serega.volinet.1995@gmail.com

Maxim Kryuchka

bachelor
cadet of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-1832-6183>
e-mail: maksimleonidovich@ukr.net

АНАЛИЗ IID-СКРЫТНОСТИ НЕПРЕРЫВНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

П.Ю. Костенко, В.В. Слободянюк, С.В. Волинець, М.Л. Крючка

В статье рассматривается метод конструирования хаотических последовательностей, обладающих статистическими и динамическими характеристиками близкими к характеристикам «белого» шума. Изучаются фазовые портреты сконструированных последовательностей и их интерполяции для получения непрерывных сигналов, передаваемых по радиоканалу. Введена численная мера скрытности сигнала и предложен подход к формированию сигнальной конструкции, который использует простую одномерную модель хаоса со структурированной множеством точек в фазовом пространстве и концепцию аналитического сигнала. Проводится сравнительный анализ IID-скрытности дискретных и непрерывных хаотических сигналов. Результаты статьи могут быть использованы для оценки скрытности радиотехнических систем передачи информации.

Ключевые слова: хаотическая последовательность, дискретный хаотический сигнал, фазовое пространство, непрерывный хаотический сигнал, IID-скрытность, BDS-статистика.

ANALYSIS OF IID-STEALTHINESS OF CONTINUOUS CHAOTIC SIGNALS

P. Kostenko, V. Slobodyanuk, S. Volynec, M. Kryuchka

When developing modern radio engineering systems for the transmission of confidential information there is a tendency to use signals of properties which are close to the properties of "white" noise. These signals include chaotic sequences. It is important to note that the use of mathematical chaos for constructing discrete chaotic signals possessing the necessary secrecy is limited only to their use in telecommunication networks. Physical chaos is used to transmit information over a radio channel, when a chaotic signal is generated directly in the radio or microwave range of wavelengths (direct-chaotic communication systems). Information is entered either by modulating the parameters of the transmitter, or at the expense of its imposing on a chaotic carrier after its generation. However, direct-chaotic communication systems operate at relatively small distances. Currently, due to the development of digital methods of forming and processing signals, the possibility of creating sources of chaotic signals on the basis of digital-analog devices of different degrees of integration, allowing the formation of broadband and bandwidths with a large operating range for navigation, telecommunication and radar systems. One of the important characteristics of radio engineering information transmission systems, which operate under conditions of radio-electronic suppression and in the conditions of unauthorized access to information, is their stealthiness. Under the stealthiness sense of the ability of radio engineering systems to transmit confidential information and counteract the means of radio-intelligence with a given probability. In the article, under the stealthiness understand the proximity of many points in the attractor of the signal in the phase space to the attractor of "white" noise, that is, the degree of its masking to noise. A numerical measure of the quality of masking (stealthiness of the signal) is determined by the value of the BDS-statistics of the signal. Its value for independent and equally distributed random variables (white noise) are in the range (-1.96; 1.96). Deviations of BDS signal statistics from this interval can be characterized by the degree of stealthiness that we call IID- stealthiness.

The method of constructing chaotic sequences possessing statistical and dynamic characteristics close to the characteristics of "white" noise is considered in the article. The phase portraits of the constructed sequences and their interpolations are studied to obtain continuous signals transmitted over the radio channel. A comparative analysis of the IID- stealthiness of discrete and continuous chaotic signals is carried out. The results of the article can be used to assess the stealthiness of radio communication systems.

Keywords: chaotic sequences, discrete chaotic signal, phase space, continuous chaotic signal, IID- stealthiness, BDS statistic.