

УДК 621.391

Ю.В. Стасєв, К.С. Васюта, С.В. Женжєра

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків***ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОГО ХАОСУ**

В роботі сформульовано принципи побудови інформаційних систем на основі динамічного хаосу, проілюстровано переваги таких систем перед існуючими. Проведено аналіз принципів генерування хаотичних процесів та принципу побудови телекомунікаційних систем, що використовують хаотичні процеси для передачі інформації. Показано, що низькочастотні моделі джерел хаосу можуть бути використані як прототипи для побудови високочастотних і надвисокочастотних джерел хаосу. Проілюстровано принцип передачі інформації у широкосмуговій прямохаотичній системі зв'язку.

Ключові слова: інформаційні системи, динамічний хаос.

Вступ

На сучасному етапі розвитку телекомунікаційних технологій виникла необхідність у створенні нових систем передачі інформації, що володіють високою завадостійкістю, що мають більшу інформаційну ємність і забезпечують високу скритність. Відомо, що це може бути досягнуто при використанні широкосмугових систем зв'язку. Розробка таких систем ведеться з першої половини минулого століття й у цей час реалізовано досить велика кількість подібних систем, наприклад протокол бездротового зв'язку 802.16, стандарти стільникового зв'язку CDMA і так далі. У цих системах широкий спектр повідомлення досягається шляхом зміни несійної частоти сигналу відповідно до деякого псевдовипадкового закону [1]. Причому кількість різних псевдовипадкових послідовностей мають суворе обмеження.

В останні п'ятнадцять років одержало розвиток інший напрямок побудови широкосмугових систем зв'язку, яке засновано на якісно інших принципах [2]. В основі цих систем лежить явище синхронізації генераторів динамічного хаосу. Динамічним хаосом називають складні періодичні коливання, породжувані нелінійними системами. Дані коливання мають властивості, що притаманні звичайним випадковим процесам, такі як суцільний спектр потужності й експоненційно-кореляційну функцію, непередбачуваність на великих інтервалах часу. Але в той же час, вид цих коливань повністю визначається параметрами динамічної системи, її початковими умовами. Спочатку такі коливання були отримані як рішення динамічних систем, що описують системи, далекі від радіотехнічних схем, наприклад у системі Лорєнца, що має динаміку атмосферних явищ або в системі Рєслєра, що має динаміку хімічних реакцій. Ці коливання, на відміну від випадкових процесів, мають такі динамічні властивості, як висока чутливість до початкових умов і експоненційне розбігання близьких фазових траєкторій.

Використання динамічного хаосу в системах передачі інформації привабливо за наступними принципами: по-перше такі коливання можна одержувати за допомогою досить простих динамічних схем, таких як генератор Піковського-Рабіновича або генератора Чуа (рис. 1) [3]. По-друге для систем зв'язку можна створювати велике число різних закритих каналів зв'язку, що сприяє збільшенню скритності системи. Третя перевага, полягає в різноманітності методів введення повідомлення в хаотичний сигнал. Також варто віднести до переваг можливості самосинхронізації приймача й передавача та потенційно більшу інформаційну ємність хаотичних систем зв'язку. Саме ці переваги є причиною використання систем зв'язку на основі динамічного хаосу замість традиційних систем з регулярними носіями інформації.

Нижче в роботі розглядаються сукупність питань, що мають вирішальний вплив на розвиток цієї комунікаційної технології.

Генератори динамічного хаосу – ефективні джерела шумоподібних сигналів

Основним елементом хаотичної системи зв'язку є генератор хаосу. Далі не будемо розглядати системи зв'язку, що використовують хаос як проміжний носій. Тому буде розглянуто генератори хаосу радіо- і НВЧ діапазонів.

До теперішнього часу відомий не один десяток різних динамічних систем, що демонструють хаотичне поведіння [4]. Однак створити генератор хаосу в радіодіапазоні не так легко.

По-перше, нам необхідно отримати систему, що породжує хаос із певними спектральними властивостями. Наприклад, система, що породжує хаос із відносно рівномірною спектральною щільністю в заданому діапазоні частот.

По-друге, ця система повинна бути реалізована на стандартних елементах, що використовуються у

радіотехніці.

По-третє, система, що генерує хаос на високих або дуже високих частотах, можливо близьких до граничних характеристик технології НВЧ.

По-четверте, можуть бути додаткові обмеження з боку технології. Наприклад, вимога, щоб система була реалізована на CMOS технології.

Розглянемо систему, що породжує хаотичні коливання з використанням генератора, який зібрано на ланцюгах Чуа [3].

Відмітною рисою даної радіотехнічної схеми є її простота (рис. 1), і у той же час, різноманіття різних хаотичних режимів, які можливо отримати в даній схемі, незначно змінюючи її параметри.

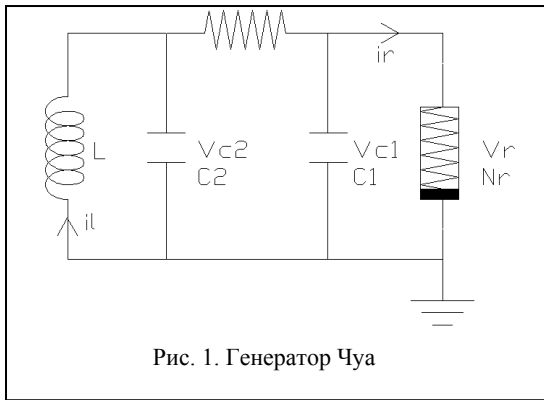


Рис. 1. Генератор Чуа

Основним елементом, що визначає складне поведіння системи, є нелінійний елемент N_r , рівняння Кірхгофа для цієї системи мають вигляд:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} &= \frac{1}{R} (V_{C2} - V_{C1}) - f(V_{C1}); \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} &= \frac{1}{R} (V_{C1} - V_{C2}) - i_L; \\ L \frac{di_L}{dt} &= -V_{C2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Тут нелінійність $f(V_{C1})$ задається кусочно-лінійною функцією, яку представлено на рис. 2.

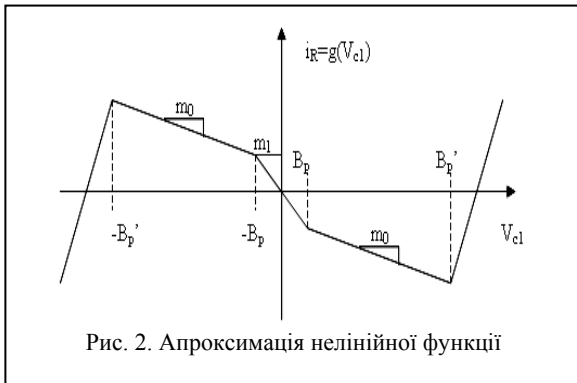


Рис. 2. Апроксимація нелінійної функції

Для зручності аналізу, дані рівняння зводяться зміною складових до системи, що не має розмірність (2).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(y - x - f(x)); \\ \dot{y} &= x - y + z; \\ \dot{z} &= -\beta y. \end{aligned} \quad (2)$$

Докладне дослідження даної системи проводиться в [3]. Зупинимося лише на тому, що досить у широкій області параметрів, у фазовому просторі системи (2) виникає хаотичний аттрактор, у формі подвійного завитку (рис. 3).

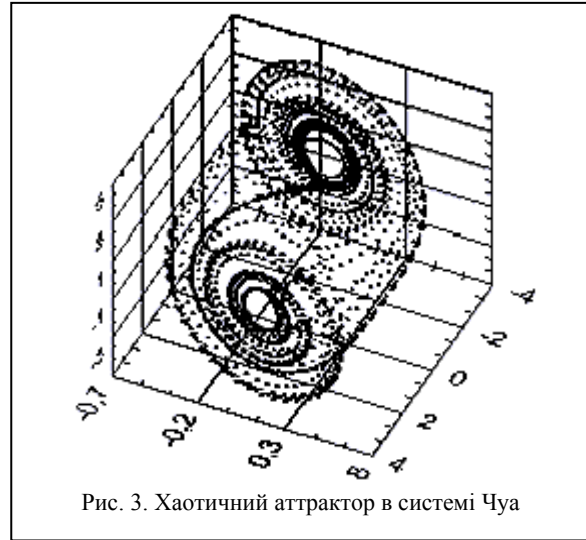


Рис. 3. Хаотичний аттрактор в системі Чуа

Для того, щоб описувати процес синхронізації таких генераторів, системи варто піддати декомпозиції, тобто поданню вихідної системи у вигляді двох взаємозалежних підсистем. Математично дану операцію можна описати в такий спосіб. Нехай існує динамічна система

$$\frac{d\vec{U}}{dt} = \vec{f}(\vec{U}), \quad (3)$$

де $\vec{U} \in \mathbb{R}^n$.

Піддати систему (3) декомпозиції, означає подання її у вигляді систем

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{g}(\vec{V}, \vec{W}), \quad (4)$$

де $\vec{V} = (U_1, U_2, \dots, U_m)$; $\vec{g} = (f_1(\vec{U}), f_2(\vec{U}), \dots, f_m(\vec{U}))$;

$$\frac{d\vec{W}}{dt} = \vec{h}(\vec{V}, \vec{W}), \quad (5)$$

де

$$\vec{W} = (U_{m+1}, U_{m+2}, \dots, U_n);$$

$$\vec{h} = (f_{m+1}(\vec{U}), f_{m+2}(\vec{U}), \dots, f_n(\vec{U})).$$

Тепер, візьмемо дві системи, які можна піддати декомпозиції, і розірвемо в одній з них зв'язок між підсистемами. Сигнал на виході іншої підсистеми будемо подавати на вхід першої підсистеми. Систему, з розірваним внутрішнім зв'язком назвемо "веденою", а систему, що передає сигнал – "ведуча". Якщо параметри цих систем близькі між собою, то в подібних системах може спостерігатися явище син-

хронізації. У цьому випадку під синхронізацією розуміється явище фазової синхронізації, тобто виконання співвідношення

$$|\bar{V}_1(t) - \bar{V}_2(t)| \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0. \quad (6)$$

Ступінь синхронізації системи "ведена-ведуча" можна оцінювати, увівши величину

$$\eta = \frac{\langle \Delta V^2 \rangle}{\langle V_1^2 \rangle} = \frac{\langle (V_2 - V_1)^2 \rangle}{\langle V_1^2 \rangle} = \frac{P_{\Delta V}}{P_{V_1}}, \quad (7)$$

де (7) – "коефіцієнт синхронізації".

Для того, щоб система "ведена-ведуча" демонструвала синхронний відгук, необхідно виконання двох умов. По-перше, в обох системах повинна існувати загальна фазова траєкторія. По-друге, рух системи, що синхронізується, уздовж цієї траєкторії повинне бути стійким стосовно будь-яким малим, трансверсальним збурюванням.

Ланцюг Чуа може бути піддано декомпозиції й з математичної й з фізичної точки зору (рис. 4).

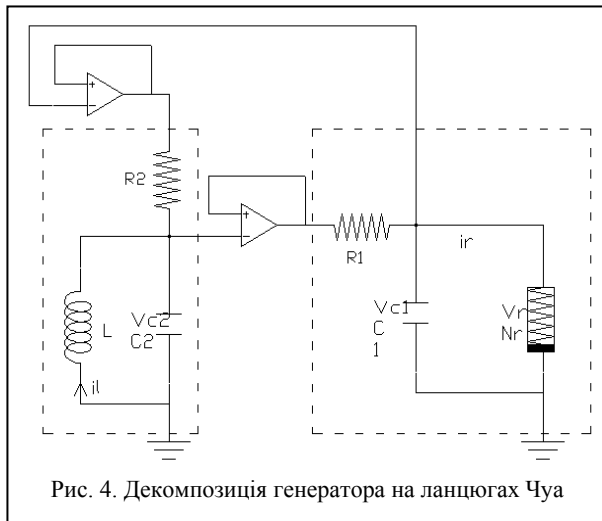


Рис. 4. Декомпозиція генератора на ланцюгах Чуа

Якщо вибирати близькі параметри "веденої-ведучої" систем, то перша умова синхронізації буде виконуватися, причому, у певній області параметрів загальною траєкторією буде хаотичний аттрактор, представлений на рис. 3.

З іншого боку в [5] показується, що хаотичний аттрактор, який виникає у фазовому просторі системи (2), має стійкість по відношенню до малих відхилень у деякому шарі фазового простору. Тобто, в системі "ведена-ведуча", зібраної на ланцюгах Чуа можлива синхронізація хаотичних коливань. Причому синхронний відгук буде стійким до деякого шумового впливу.

Дали розглянемо, як застосовується зазначений підхід на прикладі розробки НВЧ генератора хаосу на основі трьохточкового осцилятора. Схема генератора хаосу на основі трьохточочки з використанням транзистора, як активного елементу, наведено на рис. 5.

Математична модель для цієї схема описується системою диференціальних рівнянь [6]:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} &= -\alpha_F f(V_{C2}) + I_L; \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} &= (1 - \alpha_F) f(-V_{C2}) + I_L - I_0; \\ L \frac{di_L}{dt} &= -V_{C1} - V_{C2} - R I_L + V_{CC}, \end{aligned} \quad (8)$$

де V_{C1} – напруга на ємності C_1 ; V_{C2} – напруга на ємності C_2 ; I_L – струм через індуктивність L ; I_0 – струм, який створено джерелом струму; V_{CC} – напруга на джерелі струму; $f(\cdot)$ – нелінійна вольт-амперна характеристика транзистору, що описує залежність струму емітера від напруги база-емітер. $\alpha_F \approx 1$ – відношення струмів колектора і емітера.

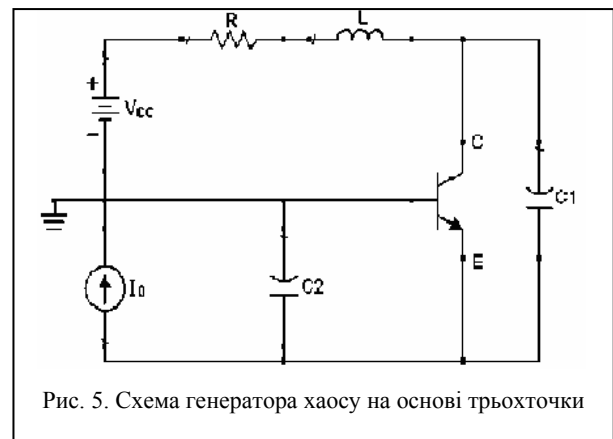


Рис. 5. Схема генератора хаосу на основі трьохточочки

Для аналізу зміни динамічних режимів при підвищенні діапазону робочих частот використано наступну процедуру: значення параметрів C_1 , C_2 , I зменшувалися в γ разів, що еквівалентно збільшенню частоти в γ раз:

$$C'_1 = C_1 / \gamma; \quad C'_2 = C_2 / \gamma; \quad L' = L / \gamma. \quad (9)$$

Результати моделювання ілюструють рис. 6, а, б, на яких наведені спектри потужності сигналів, що генеровані генератором трьохточочки на різних частотних діапазонах. Параметри генераторів вибиралися виходячи зі співвідношень (9). Як видно з рис. 6 – має місце якісний збіг форми спектральної характеристики.

Біфруктаційна діаграма для гігагерцового діапазону частот зображена на рис. 7. Навіть на таких високих частотах у системі виникають складні динамічні режими. Як видно з рис. 6 при підвищенні частоти вихідний хаотичний характер режиму коливань не зберігається, і на високих частотах коливання регулярні. Однак, шляхом варіювання параметрів системи й на цих частотах можна одержати хаотичні коливання.

Таким чином, приклад трьохточкової схеми показує, що низькочастотні моделі джерел хаосу можуть бути використані як прототипи для побудови високочастотних і надвисокочастотних джерел хаосу.

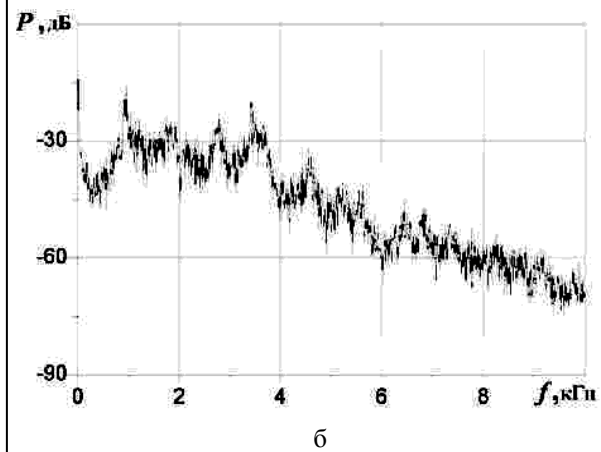
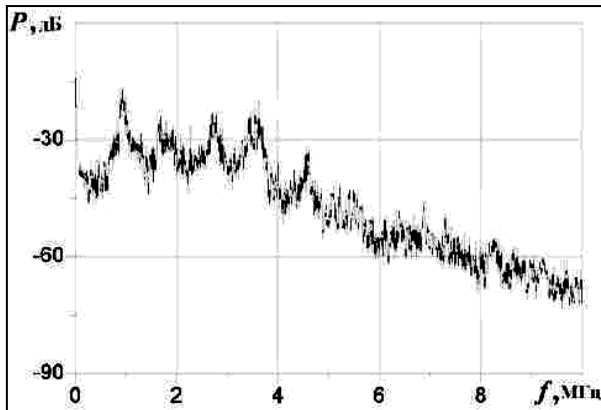


Рис. 6. Спектр потужності сигналу в трьохточковій схемі генератора з моделлю Гуммель-Пуна для транзистору ВРР620

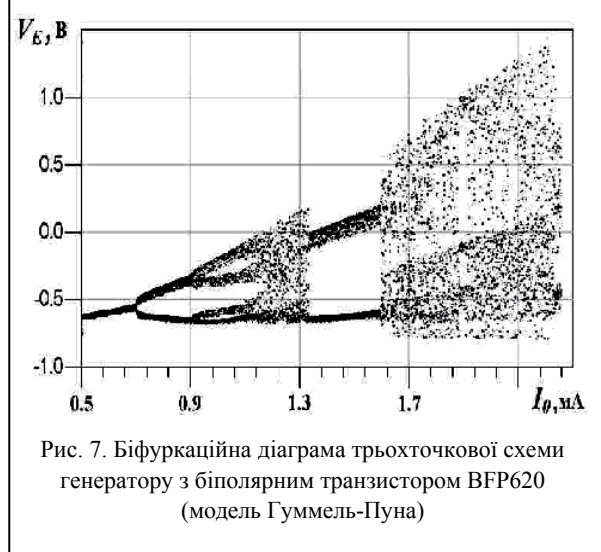


Рис. 7. Біфуркаційна діаграма трьохточкової схеми генератора з біполярним транзистором ВРР620 (модель Гуммель-Пуна)

Розглянемо принципи застосування цих пристроїв у системах зв'язку.

Широкопasmові прямохаотичні системи зв'язку

Прямохаотичною схемою зв'язку (ПХСЗ) називається [7] система зв'язку в якій:

- а) джерело хаосу генерує хаотичні коливання безпосередньо в заданій смузі радіо або НВЧ діапазону;
- б) введення інформаційного сигналу в хаотичний здійснюється шляхом формування відповідного потоку хаотичних радіоімпульсів;
- в) відновлення інформації з НВЧ сигналу здійснюється без проміжного перетворення частоти.

Структура прямохаотичної системи зв'язку наведено на рис. 8.

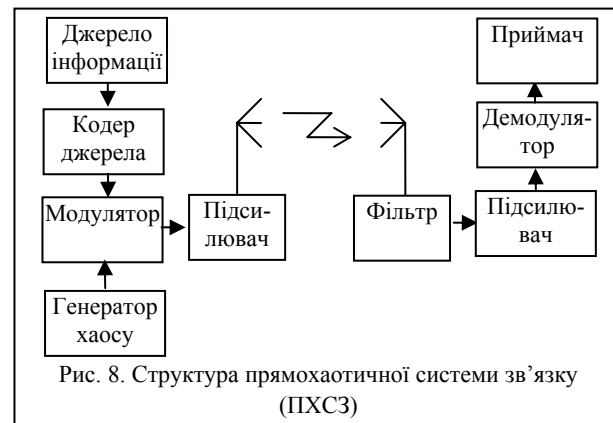


Рис. 8. Структура прямохаотичної системи зв'язку (ПХСЗ)

У прямохаотичних системах зв'язку можуть використовуватися різні види модуляції: наявність або відсутність хаотичного імпульсу на інформаційній позиції (chaotic on-off keying – COOK), відносна хаотична маніпуляція (differential chaotic shift keying – DCSK), модуляція позицій імпульсів (pulse position modulation – PPM) [8]. А також нелінійне підмішуванням інформаційного повідомлення $m(t)$ до хаотичного процесу $x(t)$ [9].

Тут корисний сигнал $s(t)$ може бути представлений у вигляді квазігармонійного коливання

$$s(t, x, \varphi) = U_0 \cos[\omega_0 + x(t) + \varphi], \quad (10)$$

а суміш сигналу і шуму, що приймається

$$m(t) = s(t, x, \varphi) + n(t), \quad (11)$$

де U_0 – постійна амплітуда;

ω_0 – середня частота коливань;

$x(t)$ – хаотичний процес;

φ – випадкова початкова фаза вузькосмугового процесу (10);

$n(t)$ – білий гаусівський шум з постійною спектральною щільністю і функцією кореляції у вигляді дельта-функції.

Хаотичний процес описується рівнянням диференціальним

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x, t), \quad (12)$$

де $f(x, t)$ – відома функція, що задовольняє умовам [10].

Процес є марківським з нульовим коефіцієнтом дифузії [11]. Для дискретного часу з інтервалом $t_k - t_{k-1} = \Delta, k = 0, 1, 2, \dots$, хаотичний процес може бути представлений відображенням $x_k = f(x_{k-1})$.

У пристрої прийому і обробки вирішується завдання оптимального відновлення процесу з суміші (11), що приймається, за умови, що початкова фаза φ постійна на інтервалі спостереження і представляє випадкову величину з рівномірною щільністю розподілу вірогідності $P(\varphi) = 1/(2\pi)$.

Висновки

У роботі проведено аналіз принципів генерування хаотичних процесів та принципу побудови телекомунікаційних систем, що використовують хаотичні процеси для передачі інформації.

Вивчення моделей інформаційних систем на хаотичній несійній показало, що процес синхронізації хаотичних систем та якість прийому і обробки при високому рівні шуму в реальних телекомунікаційних системах не ефективно.

Таким чином, при обробці сигналів на хаотичній несійній в приймальній частині інформаційної системи потрібен суворіший підхід до обробки сигналу, що заснований на статистичній теорії телекомунікаційних систем.

Список літератури

1. Тузов В.А. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / В.А. Тузов, В.И. Сивов. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
2. Дмитриев А.С. Передача сообщений с использованием хаоса и классическая теория информации / А.С. Дмитриев, С.О. Старков // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – С.37-41.
3. Matsumoto T. Birth and death of the double scroll - Physica D / T. Matsumoto, L.O. Chua, M. Komuro // Nonlinear Phenomena. – 2000. – V. 24, Issue 1-3. – P. 97-124.
4. Мун Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун. – М., 1990. – 311 с.
5. Дмитриев А.С. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи / А.С. Дмитриев, А.И. Панас. – М.: Издательство Физ.-Мат. литературы, 2002. – 252 с.
6. Kennedy M. / M. Kennedy // IEEE Tran s. – 1994. – V. CS-41, № 11. – P. 771.
7. Дмитриев А.С. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи / А.С. Дмитриев, А.И. Панас. – М.: Физматлит, 2002. – 260 с.
8. Proakis John G. Digital communications / John G. Proakis. – New York : MCGraw-Hill, 3rd ed., 1995. – 360 p.
9. Васюта К.С. Анализ эвристических моделей информационных систем на хаотической несущей / К.С. Васюта // Радиотехника. – X, 2009. – № 156. – С. 17-22.
10. Малинецкий Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент: Введение в нелинейную динамику / Г.Г. Малинецкий. – М., 2002. – 340 с.
11. Тратас Ю.Г. / Ю.Г. Тратас // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 11. – С. 57-80.

Надійшла до редколегії 10.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, доцент О.В. Лемешко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА

Ю.В. Стасев, К.С. Васюта, С.В. Женжера

В работе сформулированы принципы построения информационных систем на основе динамического хаоса, проиллюстрированы преимущества таких систем перед существующими. Проведен анализ принципов генерирования хаотических процессов и принципа построения телекоммуникационных систем, которые используют хаотические процессы для передачи информации. Показано, что низкочастотные модели источников хаоса могут быть использованы как прототипы для построения высокочастотных и сверхвысокочастотных источников хаоса. Проиллюстрирован принцип передачи информации в широкополосной прямохаотической системе связи.

Ключевые слова: информационные системы, динамический хаос.

INFORMATIVE SYSTEMS ON THE BASIS OF DYNAMIC CHAOS

Yu.V. Stasev, K.S. Vasyuta, S.V. Zhenzhera

In a robot principles of construction of the informative systems are formulated on the basis of dynamic chaos, advantages of such systems are illustrated before existing. The analysis of principles of generating of chaotic processes and principle of construction of the telecommunications systems which use chaotic processes for the information transfer is conducted. It is retined that the small frequency models of sources of chaos can be used as prototypes for construction of high-frequency and super-high-frequency sources of chaos. Principle of information transfer is illustrated in broadband straight to the chaotic communication network.

Keywords: informative systems dynamic chaos.