УДК 621.396.253

К.С. Васюта, І.В. Захарченко

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ОЦІНКА ПОТЕНЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ОРГАНІЗАЦІЇ БАГАТОКАНАЛЬНОСТІ В ХАОТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Отримано подальший розвиток методу збільшення кількості каналів передачі інформації в інформаційних телекомунікаційних мережах автоматизованих систем управління спеціального призначення. Показано, що застосування процедури ортогоналізації хаотичних повідомлень дозволяє підвищити кількість каналів передачі даних в телекомунікаційних системах.

Ключові слова: *хаотичний процес, відображення, ортогоналізація, кореляційна функція.*

Вступ

Постановка проблеми. Вирішення задачі забезпечення доступу великого числа абонентів до обмеженого частотного ресурсу є необхідним для побудови сучасних безпроводових систем передачі інформації спеціального призначення.

Найбільш перспективною технологією з точки зору збільшення кількості підключених абонентів є технологія CDMA, що припускає застосування широкосмугових сигналів.

Традиційно, для розширення спектру сигналу, застосовуються фазоманіпульовані сигнали, що формуються на основі псевдовипадкових (кодових) послідовностей. Все частіше в роботах [1, 2] пропонується використовувати для систем передачі інформації новий вид широкосмугових сигналів – хаотичні, які мають ряд властивостей, цікавих з точки зору організації багатоканальної передачі інформації.

Аналіз останніх досліджень. В роботі [1] розглядалась можливість побудови багатоканальної системи передачі інформації спеціального призначення з використанням властивостей хаотичних несучих. Для розподілу абонентів пропонувалось генерувати ортогональні хаотичні коливання з різними початковими умовами. В якості інструменту виміру залежності двох хаотичних процесів в роботі [1] використовувався коефіцієнт кореляції Пірсона. Отриманий в [1] коефіцієнт не перевищував значення 5×10^{-5} на всьому інтервалі $\Delta x \in (10^{-10} \ldots 1)$, що свідчило про відсутність будь-якої кореляції між двома хаотичними коливаннями. Початкові умови їх формування –:

$$x_0 = (x_{01}, x_{02}; x_{03}, x_{04}; \ldots; x_{0\,N-1}, x_{0\,N}), \qquad (1)$$

де N – кількість абонентів, x_{0i} – реалізації, що виступали в якості кодів абонентів.

Мета роботи представляє інтерес кількісна оцінка потенційної можливості організації багатоканальності з використанням хаотичних несучих в системах передачі інформації.

Основна частина

Для досягнення поставленої мети виконувалось математичне моделювання кореляційного прийому хаотичного сигналу, присутнього у груповому сигналі, який складається з N хаотичних реалізацій:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{N} x_i(t), \qquad (2)$$

де S – суміш хаотичних коливань, яка спостерігається; x_i – реалізація хаотичного сигналу, що відповідає i-му каналу передачі даних з N можливих.

Для генерації хаотичних процесів використовувалось відображення Чебишева 1-го роду 3-го порядку:

$$x_{n+1} = 4(x_n)^3 - 3x_n. \qquad (3)$$

Початкові умови x_0 у відображенні (3) були задані в інтервалі $x_0 \in (0;1)$. Відбір початкових умов здійснювався послідовно за такими виразами:

$$x_i = 0.1 \cdot i \qquad i = 1...9\,; \qquad (4)$$

$$x_i = 0.01 \cdot i \qquad i = 1...99\,; \qquad (5)$$

$$x_i = 0.001 \cdot i \qquad i = 1...999\,. \qquad (6)$$

Для кількісного порівняння кореляційних функцій, отриманих при різних початкових умовах введемо поняття коефіцієнта

$$K_{K\Phi} = \frac{\max\{K\Phi_{\tau \neq 0}\}}{K\Phi_{\tau=0}}, \qquad (7)$$

в якому $K\Phi_{\tau=0}$ – відлік кореляційної функції хаотичних процесів, які порівнюються при зсуві $\tau = 0$ однієї реалізації відносно другої; $\max\{K\Phi_{\tau \neq 0}\}$ – максимальне значення відліку кореляційної функції при $\tau \neq 0$.

Кореляційна функція, наведена на рис. 1 може бути представлена у вигляді рис. 2. Вона набуває такого вигляду після того, як всі відліки $K\Phi_{\tau \neq 0}$ ранжуються у порядку зменшення від $\max\{K\Phi_{\tau \neq 0}\}$ до $\min\{K\Phi_{\tau \neq 0}\}$. Коефіцієнт $K_{K\Phi}$ буде знаходитися в інтервалі $K_{КФ} \in (-\infty;\infty)$ при умові, що $\max\{КФ_{\tau\neq0}\} \neq 0$. Будемо вважати, що вигляд кореляційної функції є задовільним, якщо $K_{КФ} < 0.5$, тобто коли значення $\max\{КФ_{\tau\neq0}\}$ не перебільшує половини значення $КФ_{\tau=0}$.

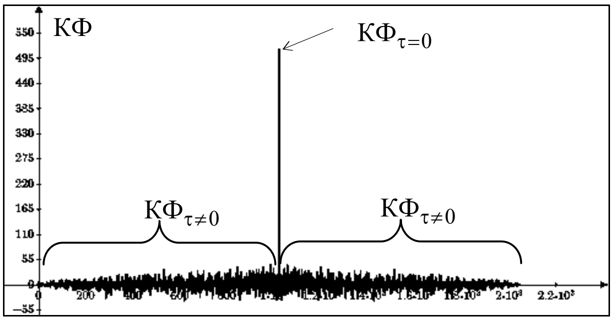


Рис. 1. Автокореляційна функція хаотичного коливання для відображення Чебишева 1-го роду 3-го порядку

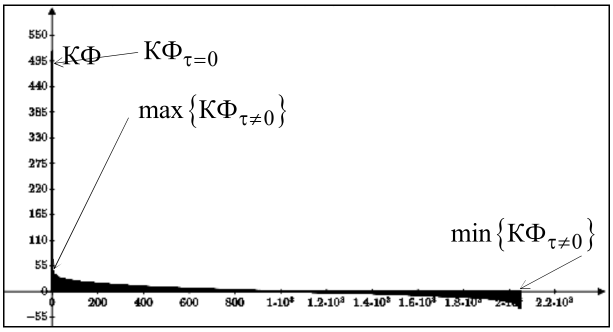


Рис. 2. Кореляційна функція двох хаотичних коливань після перетворення

Далі моделювався груповий хаотичний сигнал, що складався з суміші хаотичних реалізацій за виразом (2) при відсутності адитивних шумів. Кількість хаотичних реалізацій N у суміші змінювалась від 1 до 179.

Елементами матриці є значення коефіцієнтів кореляційного прийому $K_{КФ(i,j)}$, де i - еталонне значення хаотичної реалізації, j - кількість хаотичних реалізацій в груповому сигналі ($j = 1..N$).

Результати кореляційного прийому окремого хаотичного процесу n в груповому сигналі, що складається з N хаотичних реалізацій (N каналів) при фіксованій кількості дискретних відліків сигналу представляються у вигляді матриці коефіцієнтів кореляційного прийому $K_{КФ}$ (рис. 3). Оскільки порядок розташування хаотичних реалізацій в груповому сигналі не має значення, матриця має трикутний вигляд. Для полегшення візуального аналізу матриці коефіцієнтів $K_{КФ(i,j)}$ в цілому, особливо коли розмірність матриці велика, пропонується наводити її у графічному вигляді. В цьому вигляді елементи матриці, що мають значення більше 0,5 представляються чорним кольором, менше 0,5 – білим, нульові елементи (які не аналізуються) представлені сірим кольором. На рис. 4 у графічному вигляді наведено результати кореляційного прийому окремих хаотичних реалізацій з групового сигналу, який складається з 14 хаотичних процесів при 1024 дискретних відліках сигналу ($N = 14$).

$$res2 = \begin{bmatrix} \overbrace{\left.\begin{matrix} 0.087 & 0.143 & 0.156 & 0.186 & 0.219 & 0.233 & 0.222 & 0.246 & 0.265 & 0.323 & 0.342 \\ 0 & 0.131 & 0.175 & 0.199 & 0.175 & 0.216 & 0.264 & 0.272 & 0.245 & 0.269 & 0.291 \\ 0 & 0 & 0.138 & 0.154 & 0.175 & 0.212 & 0.227 & 0.238 & 0.262 & 0.342 & 0.398 \\ 0 & 0 & 0 & 0.182 & 0.215 & 0.232 & 0.253 & 0.276 & 0.244 & 0.24 & 0.253 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.241 & 0.236 & 0.258 & 0.304 & 0.338 & 0.347 & 0.399 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.243 & 0.275 & 0.262 & 0.315 & 0.281 & 0.282 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.278 & 0.301 & 0.312 & 0.273 & 0.321 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.229 & 0.288 & 0.309 & 0.337 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.28 & 0.312 & 0.291 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.293 & 0.289 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.278 \end{matrix}\right\} i}^{j} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \ddots \end{bmatrix}$$

Рис. 3. Фрагмент матриці коефіцієнтів кореляційного прийому

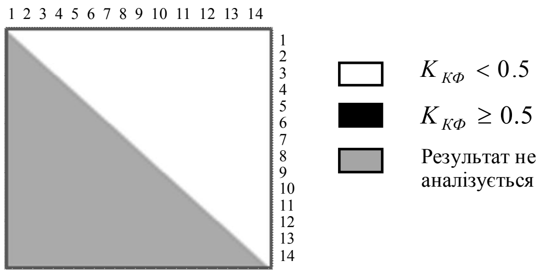


Рис. 4. Графічна матриця якості кореляційного прийому окремих хаотичних коливань в груповому сигналі з 14 хаотичних реалізацій при 1024 дискретних відліках

При збільшенні кількості реалізацій у груповому сигналі ($N = 15$) при тієї ж кількості відліків (1024) в матриці з'являється чорний колір (рис. 5), що говорить про те, що здійснювати задовільний кореляційний прийом в цьому випадку стає неможливо.

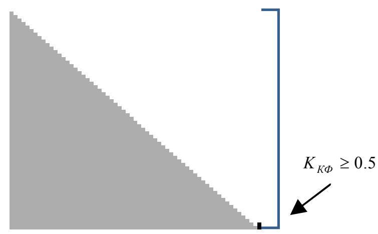
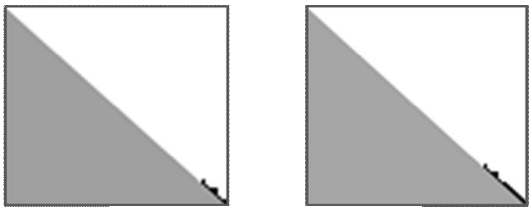


Рис. 5. Графічна матриця якості кореляційного прийому окремих хаотичних реалізацій з групового сигналу (N = 15) для 1024 дискретних відліків

При подальшому збільшенні кількості реалізацій j у груповому сигналі вигляд матриці значно погіршується. На рис. 6 наведено вигляд такої матриці при N = 21 та N = 26. Для подальшого збільшення кількості реалізацій $N > 14$ в груповому сигналі, а відповідно й кількості каналів, потрібно збільшувати кількість дискретних відліків хаотичних реалізацій (більше 1024).



а б

Рис. 6. Графічна матриця якості кореляційного прийому окремих хаотичних реалізацій з групового сигналу при N = 21 (а) та N = 26 (б) для 1024 дискретних відліків

Слід зазначити, що збільшення кількості відліків хаотичних реалізацій обмежується можливостями цифро-аналогових перетворювачів. Тому потрібно шукати додаткові методи збільшення кількості каналів передачі даних. Для цього більш детально розглянемо ортогональні властивості хаотичних реалізацій у векторному просторі. Відомо [4], що два вектори у багатомірному просторі є ортогональними, якщо їх скалярний добуток дорівнює нулю.

$$\left\langle \mathsf{X}_i, \mathsf{X}_{i+1} \right\rangle = 0 \qquad (8)$$

Здійснимо перевірку ортогональності отриманої групи хаотичних реалізацій. Для цього порахуємо скалярні добутки між усіма можливими поєднаннями пар векторів (хаотичних реалізацій). Отримані результати у графічному вигляді представлені на рис. 7, де чорним кольором зображено скалярний добуток $\left\langle \mathsf{X}_i, \mathsf{X}_{i+1} \right\rangle \neq 0$, білим кольором – $\left\langle \mathsf{X}_i, \mathsf{X}_{i+1} \right\rangle = 0$, сірим – результати, які не аналізуються.

Рис. 7. Графічна матриця скалярних добутків між парами векторів хаотичних реалізацій

Аналіз рис. 7 показує, що хаотичні сигнали не є ортогональними, тобто величина кутів між парами векторів (хаотичних реалізацій) не дорівнює 90°.

Далі виконувався розрахунок значень кутів між усіма можливими парами векторів (хаотичних реалізацій) для групового сигналу ($N = 179$) за виразом:

$$\phi = \arccos\left(\left\langle \vec{a}, \vec{b} \right\rangle \Big/ \left(\left|\vec{a}\right| \cdot \left|\vec{b}\right|\right)\right), \qquad (9)$$

де $\vec{b}$ – вектор X_i, $\vec{a}$ – вектор X_{i+1},

На рис. 8 наведено графік дисперсії кутів σ^2 між усіма парами векторів для різної кількості відліків хаотичних реалізацій (K), бачимо, що кути між векторами не дорівнюють значенню 90°, хоча й наближені до цієї величини, тобто хаотичні реалізації є квазіортогональними. Також з графіку видно, що при збільшенні кількості дискретних відліків хаотичних реалізацій дисперсія знижується.

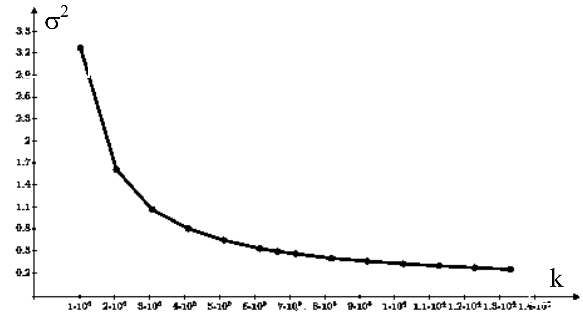


Рис. 8. Дисперсія кутів між парами хаотичних реалізацій для різної кількості відліків k

На рис. 9 наведені середні значення кутів між парами векторів для різної кількості дискретних відліків.

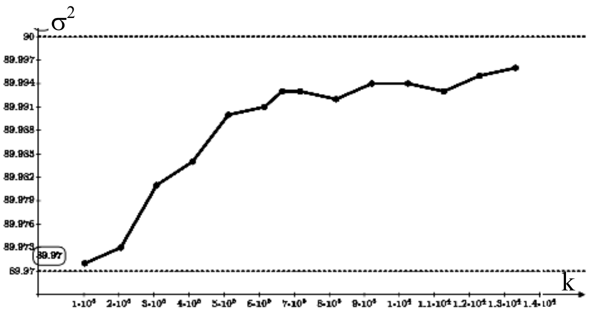


Рис. 9. Величина середнього значення кутів між парами хаотичних реалізацій для різної кількості відліків k

Бачимо, що кути між векторами не дорівнюють значенню 90°, хоча й наближені до цієї величини, тобто хаотичні реалізації квазіортогональні.

Для збільшення кількості хаотичних реалізацій у груповому сигналі пропонується провести процедуру їх ортогоналізації одним з відомих методів. В роботі [3] пропонується застосовувати алгоритм Грама-Шмідта, суть якого полягає в тому, що на основі множини лінійно незалежних векторів $a_{1 \ldots} a_N$ будується множина ортогональних векторів $b_{1 \ldots} b_N$, таких, що кожен вектор b_j може бути виражений через лінійну комбінацію векторів $a_1 \ldots a_j$. Для цієї операції вводиться оператор проекції:

$$\mathrm{Prog}_b a = \left(\left\langle a, b \right\rangle \big/ \left\langle b, b \right\rangle\right) \cdot b\,, \qquad (10)$$

де $\left\langle a, b \right\rangle$ – скалярний добуток векторів a і b. Процес ортогоналізації відбувається таким чином:

$$a_1 = b_1;\; b_N = a_N - \sum_{j=1}^{N-1} \mathrm{Prog}_{b_j} a_N\,. \qquad (12)$$

На рис. 10 наведено результати застосування процедури ортогоналізації Грама-Шмідта до групи хаотичних реалізацій, отриманих за виразом (3) при $N = 179$. Після цього проводилося моделювання кореляційного прийому окремого хаотичного процесу n з суміші N ортогональних хаотичних реалізацій. Спочатку моделювався кореляційний прийом

14 хаотичних реалізацій в груповому сигналі при кількості відліків – 1024. Було встановлено, що задовільний прийом вже 15 хаотичних реалізацій без збільшення кількості відліків неможливий. Після цього виконувалася процедура ортогоналізації, що дозволило збільшити кількість прийнятих хаотичних реалізацій до 21. В подальшому виконувалося збільшення кількість дискретних відліків на 1024 кожного разу, коли процедура ортогоналізації ставала неефективною. Максимальна кількість дискретних відліків, при яких здійснювалось моделювання обмежувалась обчислювальними можливостями ПЕОМ та склала 13312. При цьому значенні вдалося забезпечити кореляційний прийом 120 хаотичних реалізацій в груповому сигналі без виконання процедури ортогоналізації. Застосування процедури ортогоналізації дозволило забезпечити задовільний кореляційний прийом 153 хаотичних реалізацій.

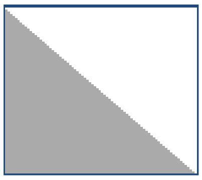


Рис. 10. Графічна матриця скалярних добутків між парами векторів хаотичних реалізацій після ортогоналізації

На рис. 11 наведено криві, що зображують зміни максимальної кількості хаотичних реалізацій у груповому сигналі до ($S_1(t)$) та після ($S_2(t)$) ортогоналізації для різної кількості дискретних відліків сигналу. З графіків видно, що процедура ортогоналізації дозволяє збільшити кількість хаотичних реалізацій у груповому сигналі, тобто збільшити кількість каналів передачі інформації.

Висновки

В роботі здійснено кількісну оцінку потенційної можливості організації багатоканальності в хаотичних системах передачі даних.

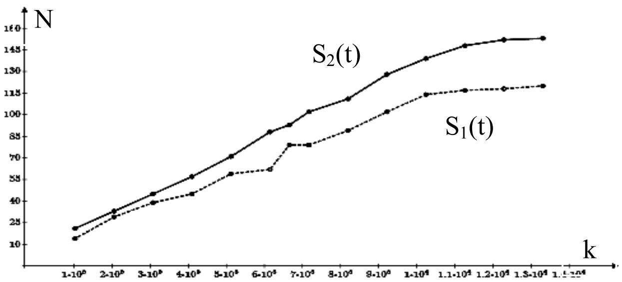


Рис. 11. Залежність кількості хаотичних реалізацій у груповому сигналі від кількості дискретних відліків сигналу до $S_1(t)$ та після $S_2(t)$ процедури ортогоналізації

Встановлено, що формування групового сигналу за допомогою ортогоналізації хаотичних реалізацій дозволяє збільшити кількість каналів передачі інформації при фіксованій кількості дискретних відліків хаотичних реалізацій. **Подальші дослідження** доцільно проводити у напрямку підвищення пропускної здатності систем передачі інформації за допомогою створення хаотичних сигнальних сузірь.

Список літератури

1. Озеров С.В. Применение MIMO технологии на хаотических несущих для разделения абонентов в многоканальных системах военной радиосвязи / С.В. Озеров // Системи озброєння і військова техніка. – № 1(33). – 2013. – С.42-45.

2. Захарченко Н.В. Многопользовательский доступ в системах передачи с хаотическими сигналами / Н.В. Захарченко, В.В. Корчинский, Б.К. Радзимовский // Восточно-европейский журнал передоых технологий. – № 5/9(53). – 2011. – С.26-29.

3. Выхованец В. Ортохаотическая передача данных / В. Выхованец, Лю Вэнькуй Труды XII Всерос. сов. по проблемам управления. – М.:ИПУ РАН, 2014. – С. 73.93–74.04.

4. Умнов А.Е. Аналитическая геометрия и линейная алгебра [Електрон. ресурс] / А.Е.Умнов. – Режим доступу до ресурсу: http://mat.net.ua.

Надійшла до редколегії 1.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.А. Кучук, Харківський університет Повітрянх Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНОСТИ В ХАОТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

К.С. Васюта, І.В. Захарченко

Получено дальнейшее развитие метода увеличения количества каналов передачи информации в информационных телекоммуникационных сетях автоматизированных систем управления специального назначения. Показано, что применение процедуры ортогонализации хаотических сообщений позволяет повысить количество каналов передачи данных в телекоммуникационных системах.

***Ключевые слова**: хаотичный процесс, отображение, ортогонализации, корреляционная функция.*

.EVALUATION OF THE POTENTIAL POSSIBILITY OF ORGANIZING MULTI-CHANNEL IN A CHAOTIC INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS

K.S. Vasyuta, I.V. Zakharchenko

Received the further development of the method of increasing the number of information channels in the information telecommunication networks of automated control systems for special purposes. As a carrier of messages using chaotic processes built using Chebyshev display. It is shown that application of orthogonalization chaotic communications can increase the number of data channels in telecommunication systems.

***Keywords:** chaotic process, mapping, orthogonalization, correlation function.*