

Применение гипер-хаотической системы Лоренца для передачи данных

А.В. Кондрашов, М.С. Гребнев, А.Б. Устинов, В.В. Перепеловский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: разработан и экспериментально исследован новый метод цифровой передачи данных. Основная идея метода состоит в том, чтобы преобразовать цифровые данные в хаотический спектр, смешать его с некоторым фоновым сигналом и передать на приемник по протоколу ТСР/ІР. В качестве источника хаотических несущих используется гипер-хаотическая система дифференциальных уравнений Лоренца. Предлагаемый метод не использует хаотическую синхронизацию, что позволяет повысить стабильность передачи данных. В качестве фонового сигнала используется голосовое сообщение. Следовательно, способ позволяет использовать один канал связи для передачи разных сигналов без потерь. Численные исследования подтвердили, что преобразование хаотического сигнала не меняет хаотическую природу системы Лоренца.

Ключевые слова: динамический хаос, гиперхаотическая система Лоренца, передача информации, Фурье-спектр, шифрование.

1. Введение

Динамический хаос вызывает особый интерес исследователей, поскольку он может быть использован при разработке новых систем связи [1], радиолокационных систем [2-5], генераторов случайных чисел [6,7], источников радиочастотного освещения [8], а также для шифрования изображений [9]. Главными преимуществами основанных на хаосе телекоммуникационных систем являются высокий уровень конфиденциальности и информационной емкости. В настоящее время существует множество алгоритмов применения хаоса для передачи сигналов. Например, хаос может быть использован для маскировки сигнала или в качестве несущего сигнала. Большая часть разработанных алгоритмов основана на явлении хаотической синхронизации нескольких связанных хаотических генераторов [10]. Сложность установления и поддержания синхронного состояния является основным недостатком этих методов. Другая проблема - высокая чувствительность телекоммуникационных систем на основе хаоса к помехам в цепи связи. В настоящей работе демонстрируется новый метод цифровой передачи данных, основанный на динамическом хаосе. В отличие от существующих методов, динамический хаос не используется ни в качестве носителя, ни в качестве маскирующего сигнала.

2. Принципы работы

Экспериментальные прототипы передатчика и приемника выполнены с использованием программного обеспечения LabView. Любой тип компьютерной сети, на базе протокола ТСР/ІР, может быть использован в качестве канала связи. Использование протокола ТСР/ІР позволяет исключить влияние шума в цепи связи. Передатчик, и приемник основаны на двух гипер-хаотических системах. Модифицированная хаотическая система Лоренца (1) используется в качестве гипер-хаотической системы [11]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \sigma(x_2 - x_1), \\ \dot{x}_2 = rx_1 + x_2 - x_1x_3 - x_4, \\ \dot{x}_3 = x_1x_2 - dx_3, \\ \dot{x}_4 = kx_2x_3, \end{cases} \quad (1)$$

Значения параметров σ , r , d и k в модели составляют 10, 28, 2,67 и 0,1 соответственно. В процессе передачи для решения хаотической системы используется метод Эйлера.

Процедура передачи состоит из двух частей. Первая часть - это установление режима синхронного решения хаотических систем передатчика и приемника. В работе синхронизация достигается путем установления одинаковых начальных условий для обеих пар систем Лоренца.

Общая идея второй части процедуры передачи состоит в том, чтобы смешать информационный сигнал и аналоговый сигнал в передатчике и разделить их после приема. Другими словами, схема передатчика должна работать с двумя источниками сигнала: источником непрерывного аналогового сигнала, спектр которого непрерывно изменяется, и цифровым источником информационного сообщения. В экспериментальном исследовании голосовое сообщение используется в качестве аналогового сигнала. В качестве информационного сообщения используются данные в форме двоичного ASCII-кода. Информационное сообщение передается пошагово. На рисунке 1 показана блок-схема одного шага.

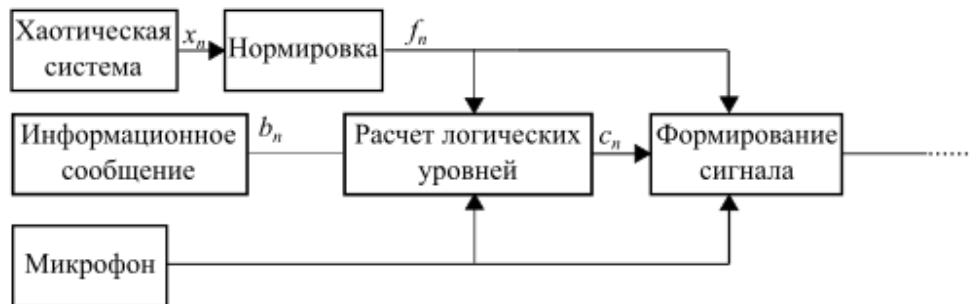


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма работы передатчика.

В начале процедуры передачи на вход передатчика поступают два сигнала, цифровой и аналоговый. Один сигнал - это информационное сообщение, состоящее из восьми битов b_n , где n - это индекс бита в передаваемом символе. Второй сигнал - голосовое сообщение, которое может быть описано как функция $A(t)$. Аналоговый сигнал преобразуется в дискретный цифровой сигнал. Частота дискретизации определяется согласно теореме Котельникова в зависимости от производительности приемно-передающей системы. Передатчик выполняет преобразование Фурье аналогового сигнала, получая его частотный спектр $A(f)$. Далее модель передатчика делает несколько итераций решения гипер-хаотических систем для определения восьми уникальных значений переменных x_n . Затем модель масштабирует полученные значения x_n таким образом, чтобы масштабированные значения f_n попадали в диапазон частот аналогового сигнала $A(f)$. После масштабирования амплитуды спектральных составляющих голосового сообщения $A(f_n)$ изменяют свои значения в соответствии со значениями битов. При этом амплитуда составляющей $A(f_n)$, соответствующей логической единице, находится как среднее значение ближайших амплитуд спектра аналогового сигнала $A(f)$. Амплитуда, соответствующая логическому нулю, определяется путем умножения амплитуды

логической единицы на некоторый коэффициент. Таким образом, в результате преобразований незначительно преобразованный спектр аналогового сигнала, который передается в приемник. Все последующие части информационного сообщения передаются аналогичным образом, при этом значения f_n хаотически изменяются в ходе передачи.

На рисунке 2 представлены примеры спектров человеческого голоса до смешивания информационных данных (см. рисунок 2(a)) и после него (см. рисунок 2(b)). Значения f_n в этом примере составляют 104 Гц, 150 Гц, 210 Гц, 275 Гц, 300 Гц, 365 Гц, 410 Гц, 450 Гц. Видно, что спектры практически одинаковы. Стоит отметить, что повторение какого-либо слова или предложения одним и тем же человеком изменяет спектр голоса более значительно. Поэтому добавление информационных данных не оказывает заметного влияния на голосовое сообщение.

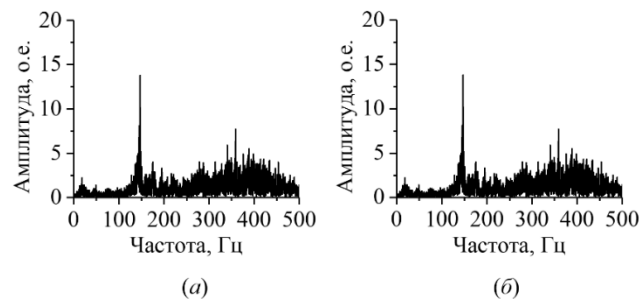


Рисунок 2. Фурье-спектры голосового сообщения до ввода информационного сообщения (a) и после (b).

Выделение информационного сообщения в приемнике происходит схожим образом. Приемник определяет те же значения x_n и f_n , что и передатчик. После получения сигнала он измеряет амплитуды $A(f_n)$, сравнивает их со средним значением и определяет значение соответствующих битов. Таким образом, описанный способ позволяет передавать несколько сигналов в одном и том же канале связи без значительного взаимного влияния этих сигналов друг на друга.

3. Анализ хаотической динамики устойчивости

Вышеописанный алгоритм смешивания и разложения сигналов предполагает, что преобразования последовательности переменных x_n не меняют их хаотической природы. Поэтому необходимо получить длинные реализации гипер-хаотической системы Лоренца, затем преобразовать их в соответствии с описанным алгоритмом и проанализировать полученные последовательности.

Одним из главных свойств хаотического сигнала является широкополосный спектр. На рисунке 3 показаны Фурье-спектры длинной временной выборки компоненты $x_1(t)$ до преобразования, после исключения дублированных значений и после масштабирования. Видно, что форма спектров меняется. Влияние исключения похоже на частотную фильтрацию. Благодаря этому низкие частоты подавляются (см. рисунок 3(b)). Процедура масштабирования эквивалентна модуляции некоторой несущей хаотическим сигналом; поэтому спектр смещается в более высокий частотный диапазон, который ближе к спектру человеческого голоса (см. рисунок 3(в)). Однако все три спектра являются широкополосными и соответствуют хаотическим сигналам.

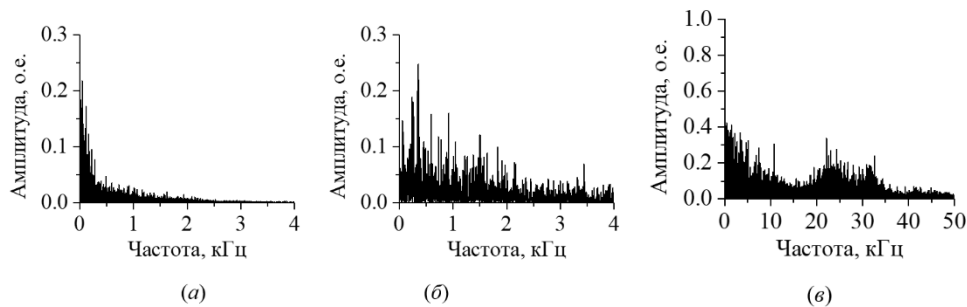


Рисунок 3. Фурье-спектры переменных x_1 до преобразований (а), после исключения дублированных значений (б) и после масштабирования (в).

Для более детального исследования необходимо выполнить анализ гипер-хаотического аттрактора системы Лоренца. Четыре дифференциальных уравнения позволяют построить фазовый портрет системы в четырехмерном пространстве x_1 x_2 x_3 x_4 . На рисунке 3 показаны три трехмерные проекции фазовых портретов гипер-хаотической фазы до трансформации, после исключения и после масштабирования. Видно, что топологии всех фазовых портретов схожи. Не модифицированный фазовый портрет состоит из двух ветвей, соединенных друг с другом. Исключение дубликатов приводит только к уменьшению плотности точек фазового портрета, но сохраняет форму фазового портрета. Такая трансформация не приводит к заметным изменениям динамики и остается хаотичной. После масштабирования значений переменных одна из ветвей фазового портрета свернулась вместе с другой. Значения переменных также смещены в частотный диапазон человеческого голоса. Это линейное преобразование не оказывает заметного влияния на динамический режим.

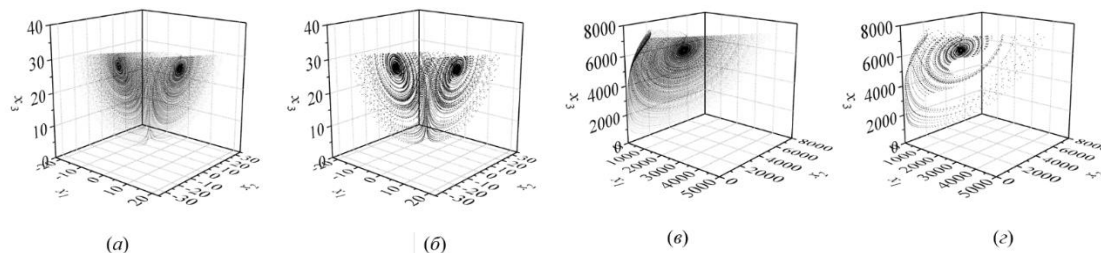


Рисунок 4. Трехмерные проекции фазового портрета гипер-хаотической системы Лоренца до преобразования (а) после исключения дублированных значений (б), после масштабирования (в), после исключения и масштабирования (г).

Как известно, значения фрактальной размерности и показателя Ляпунова численно характеризуют динамику и позволяют определить, является ли она хаотической или периодической.

Оценка фрактальной размерности проводилась с использованием стандартного алгоритма Грассбергера-Прокаччия [12]. Метод, разработанный в работе [13], использовался для расчета показателей Ляпунова. Расчеты показали, что фрактальная размерность гипер-хаотической системы Лоренца равна 3.1, исключение дубликатов не влияет на это значение. Масштабирование уменьшает фрактальную размерность до 1.7. Значение старшего показателя Ляпунова после всех преобразований остались положительными. Таким образом, результаты расчетов подтверждают, что динамика остается хаотичной. Это свидетельствует о том, что значения f_n изменяются аperiodически во время передачи и никогда больше не повторяются в течение одного цикла передачи, но остаются строго детерминированными. Установление одинаковых начальных условий позволяет сохранять синхронность решения хаотических систем без связи.

4. Заключение

Был получен новый алгоритм передачи данных с использованием цифровых сетей. Разработанный метод основаны на гипер-хаотической системе дифференциальных уравнений Лоренца, но не используют хаотическую синхронизацию. Численное исследование показывает, что все преобразования хаотического сигнала не меняют его детерминированную природу.

Работа по разработке экспериментальных образцов передатчика и приемника была поддержана **Министерством образования и науки Российской Федерации (проект «Госзадание»)**. Работа по численному анализу устойчивости хаотической динамики была поддержана **грантом Президента Российской Федерации для молодых ученых и докторов наук МК-2531.2019.8.**

Список литературы

1. Eisenkraft, M. Chaotic Signals in Digital Communications / M. Eisenkraft, R. Attux, R. Suyama. — Boca Raton: CRC Press, 2013—504.
2. Flores, B. C. Chaotic Signals for Wideband Radar Imaging / B. C. Flores, [et al.] // International Society for Optics and Photonics — 2002. — Vol. 4727. — 100-111.
3. Ashtari, A. Radar signal design using chaotic signals / A. Ashtari, [et al.] // International Waveform Diversity and Design Conference — 2007. — Vol. 5. — 353-357.
4. Liu, Z. Principles of chaotic signal radar / Z. Liu, [et al.] // International Journal of Bifurcation and Chaos — 2007. — Vol. 17. — 1735-1739.
5. Lin, F.Y. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics / F.Y. Lin, [et al.] // IEEE J. Quantum Electron — 2004. — Vol. 40. — 815-820.
6. Argyris, A. Implementation of 140 Gb/s true random bit generator based on a chaotic photonic integrated circuit / A. Argyris, [et al.] // Optics express — 2010. — Vol. 18. — 18763-18768.
7. Akgul, A. Amplitude Control Analysis of a Four-Wing Chaotic Attractor, its Electronic Circuit Designs and Microcontroller-Based Random Number Generator / A. Akgul, [et al.] // J. Circuit syst. comp. — 2017. — Vol. 26. — 1750190 (1-5).
8. Dmitriev, A.S. Radio-frequency illumination sources based on ultrawideband microgenerators of chaotic oscillations / A.S. Dmitriev, E.V. Efremova // Technical Physic Letters — 2017. — Vol. 43. — 42-45.
9. Matthews, R.A. The use of genetic algorithms in cryptanalysis // Cryptologia — 1993 — Vol. 17 — 187–201.
10. Cuomo K., Oppenheim A. Communication using synchronized chaotic systems // US Patent No. 5291555 от 1.03.1994
11. Gao, M. The generation and circuit implementation of a new hyper-chaos based upon Lorenz system / M. Gao, [et al.] // Physics Letters A — 2007. — Vol. 361. — 78-86.
12. Grassberger, P. Characterization of Strange Attractors / Grassberger P., Procaccia I. // Physic Review Letters — 1983. — Vol. 50. — 346-348.
13. Wolf A., Swift Q., Swinney H.L., et al., Physica D: Nonlinear Phenomena, 16, 285-317, 1985.