DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-5-12

УДК 621.396

М. С. Гребенев, А. В. Кондрашов, В. В. Перепеловский
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

ПЕРЕДАЧА ДВОИЧНЫХ ДАННЫХ НА ХАОТИЧЕСКИ СФОРМИРОВАННЫХ НЕСУЩИХ ЧАСТОТАХ

Аннотация. Впервые предложен и экспериментально исследован метод передачи и приема двоичных данных, использующий динамический хаос в качестве источника множества несущих частот. На стороне сервера формируется информационный сигнал в форме сетки частот с хаотически меняющимися частотами спектра, амплитуды которых соответствуют передаваемому информационному сообщению. На стороне клиента происходит восстановление передаваемой информации по хаотически выбранным спектральным окнам. Синхронизация генераторов динамического хаоса сервера и клиента происходит средствами TCP/IP-протокола. Предлагаемый метод обеспечивает передачу информационного сообщения по каналу связи совместно с фоновым сигналом, мощность которого в значительной степени превышает мощность информационного. Такое соотношение мощностей позволяет реализовать скрытную передачу информационного сообщения в двоичной форме. В качестве фонового сигнала может быть использован другой информационный сигнал, в частности, голосовое сообщение. Добавление маломощного сигнала в форме хаотически сформированной сетки частот не приводит к значительным изменениям фонового сигнала ни в спектральной, ни во временных областях. Таким образом, предлагаемый способ позволит реализовать вторичное использование канала связи. Исследовано влияние на соотношение сигнал-шум порядка фильтра, реализующего спектральные окна в приемнике, и ширины спектрального окна. Показана возможность снижения соотношения сигнал-шум при увеличении порядка фильтра и ширины спектрального окна.

Ключевые слова: динамический хаос, система уравнений Лоренца, методы передачи информационных сигналов, LabView

Для цитирования: Гребенев М. С., Кондрашов А. В., Перепеловский В. В. Передача двоичных данных на хаотически сформированных несущих частотах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 5–12. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-5-12

Maksim S. Grebenev, Alexander V. Kondrashov, Vadim V. Perepelovsky
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

BINARY DATA TRANSMISSION ON CHAOTICALLY FORMED CARRIER FREQUENCIES

Abstract. In this paper, the method of binary data transmission and receiving is first suggested and experimentally investigated. The method uses dynamical chaos as a source of multiple carrier frequencies. On the server side, the transmitter configures informational signal in the form of frequency grid with chaotically varying frequencies of the spectrum with their amplitudes corresponding to transmitted information message. On the client side, the transmitted information is re-stored using chaotically selected spectral windows. Synchronization of the server and client dynamic chaos generators is achieved by means of TCP/IP protocol. Suggested method is based on combined transmission of information message via transmission channel and background signal. Power of background signal significantly exceeds power of informational one. The method allows using different informational signal as a background signal, such as voice message. The addition of low power chaotically formed frequency grid signal does not lead to significant background signal formation either in spectral or in

time domain. Thus, the described method allows repeated application of the transmission channel. The effect of signal-to-noise ratio of the order of the filter implementing the spectral windows in the receiver and the width of the spectral window is investigated. Signal-to-noise ratio can be reduced with increasing filter order and spectral window width.

Key words: dynamical chaos, Lorenz equations system, data transmission methods, LabView

For citation: Grebenev M. S., Kondrashov A. V., Perepelovsky V. V. Binary Data Transmission on Chaotically Formed Carrier Frequencies. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 5, pp. 5–12. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-5-12 (In Russian)

Введение. Непрерывно растущие требования, предъявляемые к информационно-телекоммуникационным системам, обуславливают необходимость поиска новых способов передачи информационных сигналов, новых методов ввода информационных сигналов в несущее колебание, возможности вторичного использования занятых каналов связи, повышения уровня скрытности передаваемых сигналов и др. Решить ряд перечисленных задач можно используя динамический хаос. Интерес к исследованию методов генерации динамического хаоса объясняется возможностью использования его в качестве несущего колебания в телекоммуникационных системах [1]–[3], радарных системах [4]–[7], при разработке систем генерации случайных чисел [8], [9], а также в системах радиоосвещения [10].

Основным явлением, используемым при построении приемопередающих систем на динамическом хаосе, является хаотическая синхронизация. Одним из первых способов передачи информационных сигналов с использованием хаоса была хаотическая маскировка [1], позволяющая передавать непрерывные информационные сигналы. Для передачи цифровых сигналов можно использовать переключение хаотических режимов или модулирование параметров генератора хаотического сигнала [11]–[13]. Однако этим методам свойственна сильная чувствительность к шуму в канале связи. Также серьезным недостатком является необходимость создания двух идентичных генераторов в приемнике и передатчике. Зачастую задача построения идентичных генераторов оказывается сложной. Вместе с тем в ряде случаев существует возможность реконструкции параметров передающего генератора и последующего дешифрования информационного сообщения третьей стороной. Решить проблемы устойчивости к шумам и необходимости построения двух идентичных хаотических генераторов можно используя обобщенную хаотическую синхронизацию для построения приемопередающего тракта [14], [15]. Однако в таком случае возникают сложности при извлечении информационного сигнала в приемнике.

Постановка задачи. Цель настоящей статьи – представить принципиально новый способ скрытой передачи информационного цифрового сигнала с помощью динамического хаоса, который позволил бы решить задачу устойчивости к шуму.

Впервые описывается способ скрытой передачи информационного сигнала между двумя компьютерами с помощью протокола TCP/IP посредством использования динамического хаоса. Важной особенностью предложенного способа является то, что динамический хаос используется не в качестве несущего колебания, а в качестве источника множества несущих частот информационного колебания.

Основная часть. Алгоритм работы передатчика показан на рис. 1. Предлагаемый способ передачи схож с хаотической маскировкой. Информационный сигнал B подмешивается к фоновому сигналу A . Подмешивание осуществляется в соответствии с выражением $!B \cdot A$ (знак "!" обозначает логическую операцию инверсии, производимую над сигналом B). Поскольку спектры информационного и фонового сигналов находятся в одном диапазоне частот, то приведенный способ подмешивания заменяет соответствующие части в спектре фонового сигнала на спектр информационного. Соотношение мощностей фонового и информационного сигналов таково, что при их суммировании невозможно выделить спектр информационного сигнала.

Важной отличительной особенностью предлагаемого метода является то, что для скрытия информационного сигнала используется фоновый нехаотический сигнал, который может представлять собой некоторое дополнительное информационное сообщение, передаваемое открыто. Информационное сообщение представляет собой двоичный код, состоящий из восьми бит. Информационный сигнал в форме сетки частот формируется с помощью восьми генераторов монохроматического сигнала. Значения частот каждого монохроматического сигнала определяются решением системы уравнений, демонстрирующих хаотическое поведение. В настоящей статье в качестве такой системы была выбрана система

Рис. 1

уравнений Лоренца [16]. Амплитуды каждой из восьми гармоник соответствуют значению бита. Большая амплитуда соответствует логической единице, а меньшая – логическому нулю. Описанный способ формирования информационного сигнала эквивалентен побитовому произведению амплитуды отдельных гармоник на соответствующий бит. Сигналы как большой, так и маленькой амплитуды по мощности значительно слабее фонового. На следующем этапе суммируются спектры фонового и информационного сигналов. Далее выполняется обратное преобразование Фурье, полученная временная реализация оцифровывается и передается в цепь связи средствами протокола TCP/IP.

На рис. 2 показан алгоритм работы приемника. После приема сигнала A выполняется преобразование Фурье для получения его частотного

спектра. В приемнике используется точно такая же система уравнений Лоренца, как и в передатчике. Параметры и начальные условия работы хаотической системы выбраны такими, чтобы системы приемника и передатчика работали синхронно. Синхронизация достигается использованием особенностей организации протокола TCP/IP. Хаотическая система приемника (уравнения Лоренца) генерирует набор из восьми частот. Благодаря синхронизации эти частоты в точности соответствуют частотам, сгенерированным системой Лоренца, использованной в передатчике. Далее на полученных частотах из спектра принятого сигнала вырезаются узкие спектральные окна и измеряется мощность сигнала в этих окнах, что эквивалентно произведению спектра полученного сигнала на спектр сгенерированной сетки частот ($B \cdot A$) на каждой отдельной частоте. Уро-

Рис. 2

Рис. 3

вень мощности определяет значение соответствующего бита. Большей мощности соответствует логическая единица, а меньшей – логический ноль.

Таким образом, скрытность достигается двумя способами. Во-первых, частоты гармоник сетки частот информационного сигнала изменяются хаотически; во-вторых, мощность информационного сигнала значительно меньше мощности фонового сигнала.

Работоспособность предложенного алгоритма проверялась с помощью созданных в среде LabView программ, моделирующих работу приемного и передающего модулей. Программы запускались на удаленных компьютерах. Связь между компьютерами осуществлялась по протоколу TCP/IP.

В основе программ каждого из модулей лежал цикл, реализующий численное решение системы уравнений Лоренца [16]. В качестве фонового сигнала использовалась аудиозапись длительностью 10 с. Временная реализация и частотный

спектр фонового сигнала показаны на рис. 3, а. Из рисунка видно, что максимум спектральной плотности находился вблизи 150 Гц.

На рис. 3, б показаны временная реализация и частотный спектр информационного сигнала. Информационный сигнал соответствует передаче числа 252, которое в двоичной системе записывается как 11111100. Поскольку в двоичной системе 6 единиц и 2 нуля, то и в спектре сетки частот только 6 гармоник. Амплитуды каждого из сигналов сетки частот значительно меньше амплитуды фонового сигнала, а их частоты находятся вблизи максимума спектральной плотности фонового сигнала. Следует отметить, что представленные картинки описывают мгновенные значения частот информационного сигнала, т. е. в следующий момент времени частоты гармоник сетки частот информационного сигнала хаотически изменятся.

На рис. 3, в представлены спектры и временные реализации "суммарного" сигнала, получаемого

Рис. 4

го в соответствии с описанным ранее алгоритмом. Из графиков видно, что информационный сигнал не заметен ни в спектральной, ни во временной областях. На передатчике из принятого сигнала информационное сообщение извлекалось с высокой точностью. Поскольку суммирование информационного и фоновых сигналов производится прямо перед вводом сигнала в цепь связи, то влияние шумов определяется степенью помехозащитности протокола TCP/IP.

Важно отметить, что в качестве фоновых сигналов можно использовать другой информационный сигнал, в частности, голосовое сообщение. Добавление слабого сигнала в форме сетки частот не изменит его существенно. Таким образом, предлагаемый способ позволит повторно использовать канал связи.

При добавлении информационного сигнала к голосовому сообщению спектр "суммарного" сигнала изменится, поэтому необходим анализ влияния полосно-запирающих фильтров на спектр фоновых сигналов. Для эксперимента в качестве фоновых сигналов было записано голосовое сообщение низким мужским голосом. Запись была проведена несколько раз для выявления изменения в спектре фоновых сигналов, связанного с различным прочтением фразы. Произносилась фраза "three, two, one, go!", на

рис. 4, а показана временная реализация, а на рис. 4, б – частотный спектр получившегося сигнала. Передаваемое информационное сообщение соответствовало числу 128. В двоичной системе это число записывается как 10000000. Для данного эксперимента частоты гармоник сетки частот задавались с помощью системы уравнений Лоренца один раз. В данном случае значения частот составили: 104, 150, 210, 275, 300, 365, 410, 450 Гц соответственно от старшего до младшего бита сообщения. Поскольку передаваемое сообщение содержало лишь одну единицу, то сформированный информационный сигнал состоял из одной гармоники на частоте 104 Гц. К полученным временным реализациям фоновых сигналов в соответствии с ранее описанным методом добавлялось информационное сообщение. Далее оценивалось, что сильнее изменяет форму спектра и временной реализации передаваемого по каналу связи сигнала – другое произношение фоновых сигналов или добавление информационного сигнала.

Обсуждение результатов. Рассмотрим влияние добавления информационного сигнала к фоновому в соответствии с описанным алгоритмом на форму спектра. На рис. 5 показан фрагмент спектра фоновых сигналов с записанным логическим нулем (рис. 5, а) и единицей (рис. 5, б) на частоте 104 Гц. Положение соответствующей гар-

Рис. 5

Рис. 6

Рис. 7

моники информационного сигнала показано стрелкой. Из рисунка видно, что влияние на спектр незначительно, хотя и заметно.

Рассмотрим теперь влияние повторного произнесения фоновой фразы на частотный спектр и форму временной реализации суммы информационного и фоновых сигналов. На рис. 6 и 7 представлены временные реализации (рис. 6, а и 7, а) и спектральные характеристики (рис. 6, б и 7, б) одного и того же фрагмента фонового сигнала, произнесенного 2 раза с добавленным к ним информационным сообщением. Из рисунков видно, что повторное произношение той же самой фразы значительно изменяет форму сигнала в спектральной области. В спектре фонового сигнала появляются новые гармоники. Таким образом, из рис. 5–7 можно сделать вывод, что изменения, вносимые информационным сигналом, незначительны по сравнению с изменениями, возникающими в результате различного прочтения одной и той же фразы фонового сигнала. Не зная заранее частоты гармоник информационного сообщения, определить их положение представляет нетривиальную задачу.

Учитывая, что в ходе передачи информационного сообщения частоты гармоник информационного сигнала изменяются хаотически, выделить информационное сообщение не представляется возможным.

Рассмотрим влияние полосы пропускания цифрового фильтра (ширины спектрального окна) и порядка цифрового фильтра на допустимое значе-

Рис. 8

ние отношения полезный сигнал/шум (ОСШ). В описываемом способе использовались полосно-пропускающий и полосно-запирающий фильтры Чебышева. Как видно из графика (рис. 8), увеличивая ширину спектрального окна и порядок цифрового фильтра, можно уменьшить ОСШ, т. е. добиться большей скрытности передаваемого сигнала. Обратной стороной увеличения ширины полосы пропускания цифрового фильтра является искажение спектра исходного фонового сигнала. Увеличение порядка цифрового фильтра приводит к росту времени обработки передаваемого сигнала.

Компромисс между скоростью обработки сигнала и уровнем модификации спектра фонового сигнала для фильтра Чебышева, реализованного в среде LabView, определяется следующими значениями: порядок фильтра – 3; ширина полосы пропускания фильтра – 2 Гц.

Выводы и заключение. Впервые предложен и исследован новый метод передачи информационного сигнала по цифровым каналам связи. В отличие от ранее разработанных методов в предлагаемом методе динамический хаос используется не в качестве несущего или фоновых сигнала, а в качестве источника значений несущих частот для передаваемых двоичных данных на стороне пере-

датчика и для определения положения спектральных окон на стороне приемника. Такой метод обеспечивает скрытую передачу цифровых данных в каналах связи, основанных на TCP/IP-протоколе. Вместе с тем использование в качестве фоновых сигнала голосовых сообщений или иных информационных сообщений позволят повторно использовать канал связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 252 с.
2. Chaos-Based Communications at High Bit Rates Using Commercial Fibre-Optic Links / A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger, V. Annovazzi-Lodi, P. Colet, I. Fischer, J. Garcia-Ojalvo, C. R. Mirasso, L. Pesquera, K. A. Shore // Nature. 2005. Vol. 438 (7066). P. 343–346.
3. Chaotic Ultra-Wideband Over Fiber Link Based on Optical Feedback Laser Diode / M. Zhang, J. Zheng, A. Wang, Y. Wang, J. Jiang, T. Liu // Microwave and optical technology letters. 2013. Vol. 55, № 7. P. 1504–1507.
4. Flores B. C., Solis E. A., Thomas G. Chaotic Signals for Wideband Radar Imaging // Intern. Society for Optics and Photonics. 2002. Vol. 4727. P. 100–111.
5. Radar Signal Design Using Chaotic Signals / A. Ashtari, G. Thomas, H. Garces, B. C. Flores // Intern. Waveform Diversity and Design Conf., Pisa, Italy, June 4–8, 2007. Piscataway: IEEE, 2007. P. 353–357.
6. Principles of Chaotic Signal Radar / Z. Liu, X. Zhu, W. Hu, F. Jiang // Intern. J. of Bifurcation and Chaos. 2007. Vol. 17. P. 1735–1739.
7. Lin F. Y., Liu J. M. Chaotic Radar Using Nonlinear Laser Dynamics // IEEE J. Quantum Electron. 2004. Vol. 40, № 6. P. 815–820.
8. Implementation of 140 Gb/s True Random Bit Generator Based on a Chaotic Photonic Integrated Circuit / A. Argyris, S. Deligiannidis, E. Pikasis, A. Bogris, D. Syvridis // Optics express. 2010. Vol. 18, iss. 18. P. 18763–18768.
9. Akgul A., Li C., Pehlivan I. Amplitude Control Analysis of a Four-Wing Chaotic Attractor, its Electronic Circuit Designs and Microcontroller-Based Random Number Generator // J. Circuit syst comp. 2017. Vol. 26, № 12. Art. 1750190.
10. Dmitriev A. S., Efremova E. V. Radio-Frequency Illumination Sources Based on Ultrawideband Microgenerators of Chaotic Oscillations // Tech. Phys. Lett. 2017. Vol. 43, iss. 1. P. 42–45.
11. Dedieu H., Kennedy M. P., Hasler M. Chaos Shift Keying: Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier Using Self-Synchronizing Chua's Circuits // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing. 1993. Vol. 40, № 10. P. 634–642.
12. Yang T., Chua L. O. Secure Communication via Chaotic Parameter Modulation // IEEE Trans. Circuits Syst.: I Regular Papers. 1996. Vol. 43, iss. 9. P. 817–819.
13. Pat. US № 5291555. Communication Using Synchronized Chaotic Systems / K. Cuomo, A. Oppenheim. 1994.
14. Terry J. R., VanWiggeren G. D. Chaotic Communication Using Generalized Synchronization // Chaos, Solitons and Fractals. 2000. Vol. 12. P. 145–152.
15. Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. On the Use of Chaotic Synchronization for Secure Communication // Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences). 2009. Vol. 52, № 12. P. 1213–1239.
16. Lorenz E. N. Deterministic Nonperiodic Flow // J. of the Atmospheric Sciences. 1963. Vol. 20. P. 130–141.

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2018 г.

Гребенев Максим Сергеевич – бакалавр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2018), магистрант 1-го курса Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – динамический хаос, методы передачи информационных сигналов.

E-mail: magrebennev@yandex.ru

Кондрашов Александр Викторович – кандидат физико-математических наук (2012), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 26 научных работ. Сфера научных интересов – нелинейная волновая динамика и хаос; солитоны; радиофотоника.

E-mail: avkondrashov@etu.ru

Перепеловский Вадим Всеволодович – кандидат физико-математических наук (1992), доцент (1995) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – хаос; моделирование приборов твердотельной электроники.

E-mail: vvp@1024.ru

REFERENCES

1. Dmitriev A. S., Panas A. I. *Dinamicheskii khaos: no-vye nositeli informatsii dlya sistem svyazi* [Dynamic Chaos: Novel Type of Information Carrier for Communication Systems]. M.; Fizmatlit, 2002, 252 p. (In Russian)
2. Argyris A., Syvridis D., Larger L., Annovazzi-Lodi V., Colet P., Fischer I., Garcia-Ojalvo J., Mirasso C. R., Pesquera L., Shore K. A. Chaos-Based Communications at High Bit Rates Using Commercial Fibre-Optic Links. *Nature*. 2005, vol. 438 (7066), pp. 343–346.
3. Chaotic Ultra-Wideband Over Fiber Link Based on Optical Feedback Laser Diode. *Microwave and optical technology letters*. 2013, vol. 55, no. 7, pp. 1504–1507.
4. Flores B. C., Solis E. A., Thomas G. Chaotic Signals for Wideband Radar Imaging. *International Society for Optics and Photonics*. 2002, vol. 4727, pp. 100–111.
5. Ashtari A., Thomas G., Garces H., Flores B. C. Radar Signal Design Using Chaotic Signals. *International Waveform Diversity and Design Conference, Pisa, Italy, June 4–8, 2007. Piscataway, IEEE*, 2007, pp. 353–357.
6. Liu Z., Zhu X., Hu W., Jiang F. Principles of Chaotic Signal Radar. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2007, vol. 17, pp. 1735–1739.
7. Lin F. Y., Liu J. M. Chaotic Radar Using Nonlinear Laser Dynamics. *IEEE J. Quantum Electron.* 2004, vol. 40, no. 6, pp. 815–820.
8. Argyris A., Deligiannidis S., Pikasis E., Bogris A., Syvridis D. Implementation of 140 Gb/s True Random Bit Generator Based on a Chaotic Photonic Integrated Circuit. *Optics express*. 2010, vol. 18, iss. 18, pp. 18763–18768.
9. Akgul A., Li C., Pehlivan I. Amplitude Control Analysis of a Four-Wing Chaotic Attractor, its Electronic Circuit Designs and Microcontroller-Based Random Number Generator. *J Circuit syst comp.* 2017, vol. 26, no. 12, Art. 1750190.
10. Dmitriev A. S., Efremova E. V. Radio-Frequency Illumination Sources Based on Ultrawideband Microgenerators of Chaotic Oscillations. *Tech. Phys. Lett.* 2017, vol. 43, iss. 1, pp. 42–45.
11. Dedieu H., Kennedy M. P., Hasler M. Chaos Shift Keying: Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier Using Self-Synchronizing Chua's Circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 1993, vol. 40, no. 10, pp. 634–642.
12. Yang T., Chua L. O. Secure Communication via Chaotic Parameter Modulation. *IEEE Trans. Circuits Syst.: I Regular Papers*. 1996, vol. 43, iss. 9, pp. 817–819.
13. Cuomo K., Oppenheim A. Communication Using Synchronized Chaotic Systems. *US Patent № 5291555*, 1994.
14. Terry J. R., VanWiggeren G. D. Chaotic Communication Using Generalized Synchronization. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2000, vol. 12, pp. 145–152.
15. Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. On the Use of Chaotic Synchronization for Secure Communication. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 2009, vol. 52, no. 12, pp. 1213–1239.
16. Lorenz E. N. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963, vol. 20, pp. 130–141.

Received September, 27, 2018

Maksim S. Grebenev – Bachelor's Degree in Electronics and Nanoelectronics (2018), Master's Degree Student of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Area of expertise: dynamic chaos, information signaling methods.

E-mail: magrebenov@yandex.ru

Alexander V. Kondrashov – Ph.D. in Physics and Mathematics (2012), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 26 scientific publications. Area of expertise: nonlinear wave dynamics and chaos; solitons; radiophotonics.

E-mail: avkondrashov@etu.ru

Vadim V. Perepelovsky – Ph.D. in Physics and Mathematics (1992), Associate Professor (1995) of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: chaos; simulation of solid-state electronics devices.

E-mail: vvp@1024.ru