

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33, № 5  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(5)

Научная статья  
УДК 621.396

DOI: 10.18500/0869-6632-003181  
EDN: XXXMOZ

## Пространственно-временное когерентное сложение сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов. Эксперимент

Л. В. Кузьмин<sup>✉</sup>, А. А. Кривенко, П. А. Владыка, Е. В. Ефремова

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия  
E-mail: ✉lvk@cplire.ru, krivenko.aa@phystech.edu, pavvladyka@yandex.ru, efremova@cplire.ru,

Поступила в редакцию 28.03.2025, принята к публикации 17.04.2025,  
опубликована онлайн 19.06.2025, опубликована 30.09.2025

**Аннотация.** Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение физической реализуемости когерентного сложения хаотических сигналов (сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов) в пространстве и времени. Идея когерентного сложения по-разному используется в современной физике, и на сегодняшний день нет примеров явной демонстрации когерентного сложения СШП хаотических сигналов. Сложности, связанные с практической реализуемостью такого сложения, как минимум две: во-первых, до настоящего времени было непонятно, как получать сигналы одинаковой формы (необходимое условие когерентного сложения); во-вторых, как реализовать собственно технику суммирования. **Методы.** В работе использовались методы натурного макетирования процессов излучения сверхширокополосных хаотических сигналов, их приема и численной обработки после оцифровки осциллографом. Результаты получены на базе макета, который включает четыре идентичных излучателя и одно приёмное устройство. **Результаты.** Экспериментально явно показана закономерность линейного увеличения среднеквадратичной амплитуды сигнала в точке приема при когерентном и линейного увеличения мощности суммарного сигнала при некогерентном сложении сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов с ростом числа излучателей. **Заключение.** Экспериментальная демонстрация явления когерентного сложения сверхширокополосных хаотических сигналов является основой для дальнейшего развития и применения этого явления в беспроводных многоантенных сверхширокополосных системах.

**Ключевые слова:** сверхширокополосные сигналы, хаотические сигналы, когерентный прием хаотических сигналов, когерентное излучение хаотических сигналов, генерация хаотических колебаний.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, шифр FFWZ-2025-0015.

**Для цитирования:** Кузьмин Л. В., Кривенко А. А., Владыка П. А., Ефремова Е. В. Пространственно-временное когерентное сложение сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов. Эксперимент // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 5. С. 657–673. DOI: 10.18500/0869-6632-003181. EDN: XXXMOZ

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## Spatiotemporal coherent summation of Ultra-Wideband chaotic radio pulses. Experiment

L. V. Kuzmin<sup>✉</sup>, A. A. Krivenko, P. A. Vladyka, E. V. Efremova

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia

E-mail: ✉lvk@cplire.ru, krivenko.aa@phystech.edu, pavvladyka@yandex.ru, efremova@cplire.ru,

Received 28.03.2025, accepted 17.04.2025, available online 19.06.2025, published 30.09.2025

**Abstract.** The aim of this work is to experimentally confirm the physical possibility of coherent summation of chaotic signals (ultra-wideband chaotic radio pulses) in space and time. Coherent summation is used in modern physics in various ways, but to date there are no examples of explicit demonstration of coherent summation of ultra-wideband chaotic signals. The practical feasibility of such summation faces at least two difficulties: firstly, it has been unclear how to obtain signals of the same shape (a necessary condition for coherent summation), and secondly, how to implement the summation method itself. **Methods.** The approach of full-scale modeling of the processes of emission of ultra-wideband chaotic signals, their reception and digital processing after digitization by an oscilloscope is used. The results are obtained on the basis of an experimental setup including four identical emitters and one receiver. **Results.** A linear increase in the root-mean-square amplitude of the signal at the reception point with coherent and a linear increase in the power of the total signal with incoherent summation of ultra-wideband chaotic radio pulses with an increase in the number of emitters has been experimentally demonstrated. **Conclusion.** The experimental demonstration of the phenomenon of coherent summation of ultra-wideband chaotic signals is the basis for further development and application of this phenomenon in wireless multi-antenna ultra-wideband systems.

**Keywords:** ultra-wideband signals, chaotic signals, coherent reception of chaotic signals, coherent emission of chaotic signals, generation of chaotic oscillations.

**Acknowledgements.** This work was supported by the State Assignment of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, project no. FFWZ-2025-0015.

**For citation:** Kuzmin LV, Krivenko AA, Vladyka PA, Efremova EV. Spatiotemporal coherent summation of Ultra-Wideband chaotic radio pulses. Experiment. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(5):657–673. DOI: 10.18500/0869-6632-003181

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

Когерентная во времени и пространстве обработка радиосигналов является одной из центральных идей современной радиофизики и беспроводных технологий. Имеется несколько причин, по которым когерентное сложение сигналов в пространстве представляет научный и практический интерес.

Первая связана с ограниченностью пропускной способности канала типа «точка–точка», которая, как известно, пропорциональна полосе  $W$  частот сигнала и двоичному логарифму от отношения сигнал–шум  $S/N$ . Для увеличения предельной пропускной способности канала, например, в десять раз необходимо увеличить отношение сигнал/шум в 1000 раз, что для радиотехники является довольно значительной величиной и практически убивает возможность какого-либо реального использования такого подхода «в лоб».

Увеличение ширины полосы на практике также не всегда возможно, так как имеются ограничения на полосу беспроводного канала со стороны органов госрегулирования. Яркий пример этого — сверхширокополосные (СШП) системы [1, 2], на которые накладываются очень серьезные (по сравнению с узкополосными решениями) ограничения на излучаемую мощность [3, 4].

Кузьмин Л. В., Кривенко А. А., Владыка П. А., Ефремова Е. В.

Известия вузов. ПНД, 2025, т. 33, № 5

Мощность СШП сигналов не должна превышать долей милливатт согласно зарубежным законодательным ограничениям (правила разнятся в зависимости от страны) и единиц микроватт согласно российским нормам. Это очень малые величины: для сравнения, типичная мощность сигналов в узкополосных системах (Wi-Fi, Bluetooth и им подобных, применяемых в ISM — Industrial Scientific Medicine диапазоне) составляет единицы и десятки милливатт.

Для достижения как можно более высоких скоростей передачи разработчикам беспроводных систем приходится либо использовать более сложные методы модуляции/кодирования радиосигналов, которые повышают спектральную эффективность (число бит, передаваемых на Герц полосы), либо разрабатывать не менее сложные схемы пространственно-временного кодирования, в которых разделение пользователей достигается за счет формирования заданной пространственно-временной диаграммы направленности, на основе когерентного сложения радиосигналов в местах расположения пользователей (MIMO — Multiple Input-Multiple Output системы). Тем самым достигается многократное использование одного и того же частотного диапазона за счет базового для физики явления интерференции и увеличение пропускной способности. Платой за это является усложнение схемы передачи информации: на передающей стороне необходимо использовать множество антенн для формирования заданной направленности излучения радиосигнала. Задача передатчика заключается в создании в точках расположения приемных антенн интерференционных максимумов полезного сигнала. Формально предельная пропускная способность канала в этом случае увеличивается в число раз, пропорциональное числу пар передающих и приемных антенн.

Существенным в этом случае является использование узкополосных (гармонических) сигналов, которые, как известно, в любых комбинациях (сложение, умножение) дают опять же гармонический сигнал. Теория генерации и приема таких сигналов развивается уже несколько десятилетий, а уровень развития современной радиоэлектронной базы дает возможность разработчикам полностью отойти от физики процесса и сосредоточиться исключительно на математических аспектах преобразования гармонических сигналов, пользуясь хорошо развитым аппаратом линейной алгебры и теории гармонических функций.

Наработки в области применения узкополосных сигналов для реализации пространственно-временного кодирования и организации независимой передачи данных между пользователями в беспроводном канале показали большую перспективность применения явления когерентного сложения радиосигналов, но гармонические сигналы не единственный тип носителя, который можно для этого использовать. В этом контексте имеет смысл обратить внимание на широкополосные или сверхширокополосные хаотические сигналы [5–11] и хаотические последовательности [12–14] с той точки зрения, что последние имеют потенциально очень хорошие характеристики в условиях интерференции: чем шире полоса, тем уже функция пространственной когерентности сигналов, следовательно, тем более высокую плотность пространственного размещения приемников можно получить при использовании таких сигналов. При этом, как минимум теоретически, в точках, куда сигналы приходят одновременно, будет наблюдаться сложение по амплитуде, то есть амплитуда суммарного сигнала будет пропорциональна числу излучателей, а в точке, куда сигналы приходят вразнобой, сложение будет осуществляться по мощности, то есть мощность сигнала в точке приема будет пропорциональна числу излучателей.

Достичь полной ортогональности сигналов, естественно, не удастся [15, 16], но за счет отказа от полной ортогональности излучающую систему можно упростить.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению возможности когерентного сложения СШП хаотических сигналов. В основу положен способ формирования хаотических радиоимпульсов с одинаковой формой, описанный в [17, 18]. Одинаковость формы сигналов при когерентном сложении это, естественно, необходимое условие для его реализации.

Задача в целом распадается на несколько этапов: разработка способов генерации хаотических сигналов одинаковой формы, способов согласования моментов их излучения для достижения одновременности прихода импульсов от разных излучателей в заданную точку пространства, разработка излучающих систем, которые могут быть воспроизведены с высокой степенью точности, способ сравнения между собой сигналов от различного числа излучателей в точке приема.

Цель и новизна данной работы заключается в экспериментальной демонстрации практической возможности когерентного суммирования в заданной точке пространства СШП хаотических радиоимпульсов одной и той же формы, генерируемых разными генераторами; доказательстве того, что после прохождения канала форма сигналов сохраняется; исследовании процессов формообразования сигналов сложной формы и сохранения этой формы при передаче от излучателя к приемнику. В работе экспериментально исследуются эти процессы и показывается, что процесс когерентного суммирования СШП хаотических радиоимпульсов действительно реализуем. Результаты работы послужат основой для создания беспроводной многоантенной системы, осуществляющей направленную передачу информации за счет когерентного сложения СШП сигналов.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 описывается схема эксперимента, структура макета и его функциональные блоки. В разделе 2 описаны эксперименты по некогерентному и когерентному сложению СШП хаотических сигналов и их результаты.

## 1. Схема эксперимента

Для решения поставленной задачи — экспериментальной демонстрации и исследования когерентного сложения хаотических радиоимпульсов — был разработан и изготовлен экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 1.

Экспериментальный стенд состоит из четырех излучателей СШП хаотических радиоимпульсов (генераторов хаотических колебаний, которые подключены к излучающим антеннам). Генераторы управляются модуляторами, на которые подается модулирующий видеосигнал, формируемый при помощи программно-аппаратной системы управления. Фотография излучателя (антенны с генератором) и кросс-платы, осуществляющей управление генераторами, приведена на рис. 1, а. Передача управляющего сигнала от кросс-платы к излучателям осуществлялась при помощи кабелей. Эксперименты по некогерентному и когерентному сложению в пространстве, согласно схеме на рис. 1, а, проводились в офисном помещении размером  $6.6 \times 6 \times 4$  м. Антенны размещались по периметру квадрата с длиной стороны около 3.5 м на одинаковом расстоянии от приемной антенны, расположенной в центре квадрата. Расстояние между передающей и приемной антенной составляло 1.75 м.

Эксперимент проводился исходя из следующих положений:

- используются несколько независимых излучателей СШП импульсов;
- применяются генераторы СШП хаотических радиоимпульсов, которые могут генерировать импульсы разной формы и длительности;
- моменты времени начала излучения хаотических радиоимпульсов выбираются так, чтобы в точку приема импульсные сигналы от разных излучателей приходили одновременно;
- отсутствует принципиальное ограничение на выбор точки приема.

В ходе реализации данной схемы измерений были разработаны методы, программные и аппаратные решения, которые позволяют экспериментально реализовать когерентное сложение СШП хаотических радиоимпульсов в заданной точке пространства на базе независимых хаотических генераторов. Ниже описывается реализация данного подхода.

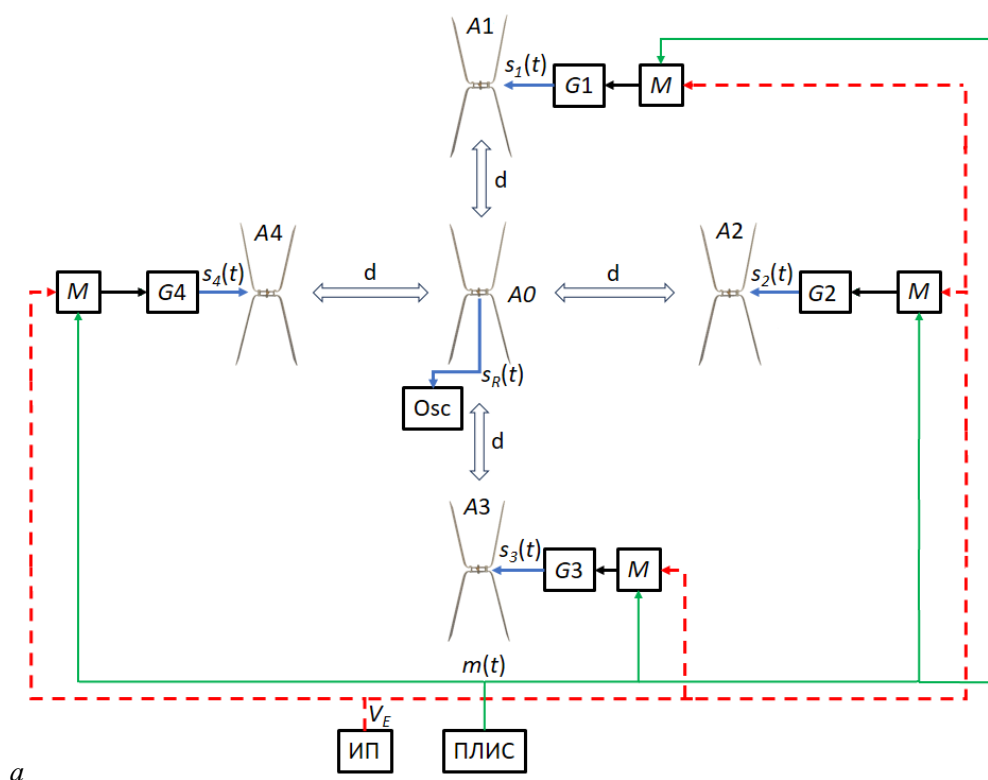


Рис. 1. *a* — Схема экспериментального стенда по пространственно-временному сложению импульсов:  $s_1(t), \dots, s_4(t)$  — сигналы от генераторов хаоса  $G_1, \dots, G_4$  соответственно; ПЛИС — макетная плата генератора периодической последовательности видеоимпульсов  $m(t)$  на базе макетной платы DE10-Lite; ИП — источник питания,  $V_E$  — значение напряжения питания;  $M$  — ключ, модулирующий питание генераторов;  $A_1, \dots, A_4$  — излучающие антенны, соединенные с генераторами;  $A_0$  — приемная антенна;  $d$  — значения расстояний между приёмной и передающей антеннами (1.75 м). Красная пунктирная линия — питание генераторов, зеленая сплошная — модулирующий сигнал. OSC — цифровой запоминающий осциллограф. *b* — Фотография излучателя, состоящего из антенны, генератора СШП хаотических радиоимпульсов и кросс-платы, осуществляющей управление излучателями (цвет онлайн)

Fig. 1. *a* — Schematic diagram of the experimental setup for spatio-temporal pulse summation:  $s_1(t), \dots, s_4(t)$  — signals of chaotic oscillators  $G_1, \dots, G_4$ , respectively; ПЛИС (FPGA) — source of the periodic sequence of video pulses  $m(t)$  based on the DE10-Lite FPGA breadboard; ИП (PS) — power supply,  $V_E$  — supply voltage value;  $M$  — switch modulating the power supply;  $A_1, \dots, A_4$  — emitting antennas connected to the chaotic oscillators;  $A_0$  — receiving antenna;  $d$  — values of the distances between the receiving and transmitting antennas (1.75 m). Red dotted line — the generator power supply, green solid line — the modulating signal. OSC — digital storage oscilloscope. *b* — Photograph of an emitter consisting of an antenna, a generator of UWB chaotic radio pulses and a cross-board that controls the emitters (color online)

**1.1. Генераторы сигналов.** В настоящей работе использовались твердотельные одно-транзисторные генераторы на сосредоточенных элементах [19, 20], обеспечивающие генерацию хаотических колебаний мощностью 1.5 мВт в диапазоне частот 150...500 МГц. Принцип работы генераторов и принцип формирования одинаковых хаотических радиоимпульсов подробно описан в работах [17, 18]. Суть подхода заключается в том, что за счет модуляции генератора видеоимпульсами при соблюдении определенных условий обеспечивается генерация разными экземплярами генераторов импульсов с одинаковой формой. В работах [17, 18] это продемонстрировано для случая передачи сигнала по проводу.

В случае передачи сигнала по беспроводному каналу ситуация осложняется влиянием передающей и приемной антенн и самого беспроводного канала. Поэтому возможность сохранения подобия формы импульсов от разных излучателей после прохождения беспроводного канала не очевидна. Передающая антенна, являющаяся линейной колебательной системой, будучи включенной в колебательный контур генератора, становится частью динамической системы излучателя, что оказывает влияние на режим колебаний.

Решение задачи воспроизведения импульсов с одной и той же формой требует решения двух подзадач: повторение формы импульсов, генерируемых одним генератором, и повторение формы импульсов, генерируемых разными генераторами и излучаемых при помощи антенн.

Для того чтобы убедиться, что различные генераторы, используемые в эксперименте, демонстрируют одинаковые режимы работы и формируют колебания с одинаковыми характеристиками, было проведено исследование их динамических режимов.

При помощи цифрового осциллографа были построены бифуркационные диаграммы зависимости динамических режимов генераторов от напряжения питания (рис. 2). Диаграммы

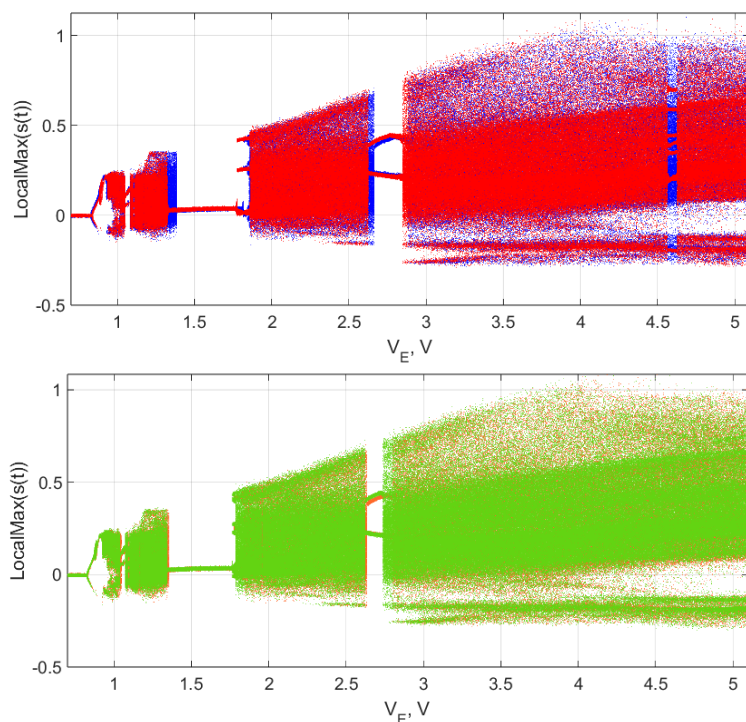


Рис. 2. Бифуркационные диаграммы режимов колебаний для первой пары генераторов (1 и 2, синий и красный), и второй (3 и 4, оранжевый и зеленый), полученные в ходе эксперимента (цвет онлайн)

Fig. 2. Bifurcation diagrams of oscillation modes for the first pair of generators (1 and 2, blue and red), and the second (3 and 4, orange and green) obtained in the experiment (color online)



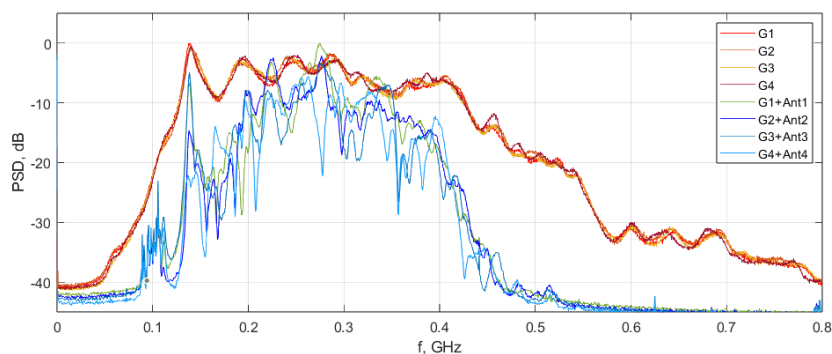


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности мощности от частоты для сигнала на выходе генераторов ( $G_1...G_4$ ) и после прохождения излучающей и приемной антенн и беспроводного канала ( $G_1 + Ant_1...G_4 + Ant_4$ ) (цвет онлайн)

Fig. 3. Power spectral density of the signal at the chaotic oscillator outputs ( $G_1...G_4$ ) and after passing the emitting and receiving antennas and the wireless channel ( $G_1 + Ant_1...G_4 + Ant_4$ ) (color online)

строились путем последовательного увеличения напряжения питания с шагом 0.001 В, фиксации временной реализации сигнала генератора и последующего выбора локальных максимумов из этих реализаций.

Сходство бифуркационных диаграмм свидетельствует о высокой степени воспроизводимости режимов колебаний у различных экземпляров генераторов.

Для дальнейших экспериментов был выбран режим, соответствующий напряжению питания  $V_E = 5$  В, для которого генераторы демонстрируют режим хаотических колебаний. Зависимость спектральной плотности мощности от частоты для данного режима колебаний приведена на рис. 3 (линии  $G_1...G_4$ ).

**1.2. Антенны.** Коэффициенты стоячей волны (КСВ) антенн, использованных в настоящей работе, приведены на рис. 4. Измерение КСВ осуществлялось при помощи прибора Libra VNA [21], обеспечивающего измерение КСВ в диапазоне от 0 до 6 ГГц.

Антенны с подсоединенными к ним генераторами образуют излучатель, который формирует либо импульсный, либо непрерывный сигнал под действием внешнего модулирующего видеосигнала. После прохождения беспроводного канала спектр мощности непрерывного хаотического сигнала на выходе приемной антенны имеет вид, приведенный на рис. 3.

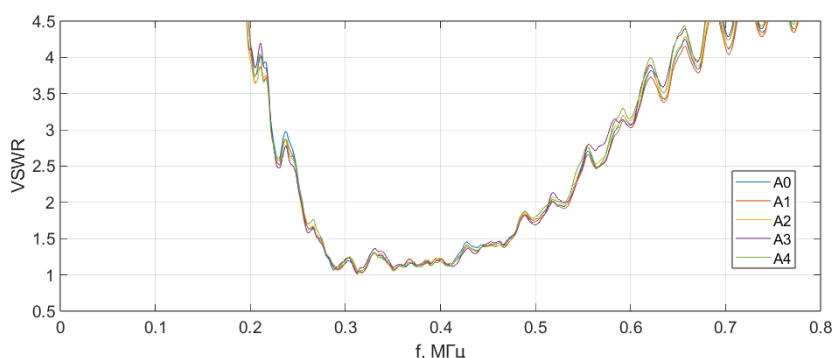


Рис. 4. Коэффициент стоячей волны антенн, используемых в эксперименте:  $A_0$  — приемная антенна,  $A_1...A_4$  — антенны излучателей (цвет онлайн)

Fig. 4. Standing wave ratio of antennas used in the experiment:  $A_0$  — receiving antenna,  $A_1...A_4$  — transmitter antennas (color online)

**1.3. Система управления.** Задача излучателей в данной работе — формировать импульсы со сложной одинаковой формой в заданные моменты времени. Для определенности можно считать, что центр полосы сигнала находится на частоте 300 МГц, что соответствует длине волны 1 м. Для уверенного когерентного сложения хаотических радиоимпульсов необходимо, чтобы сдвигка в приходе импульсов в точку приема составляла менее одной десятой длины волны, то есть 10 см. Это соответствует точности согласованного излучения импульсов 330 пс. Реализация системы управления генераторами, которая обеспечивает одновременность излучения импульсов с такой точностью, была реализована на базе макетной платы ПЛИС DE10–Lite.

Система управления включает:

- макетную плату ПЛИС DE10–Lite, оснащенную кросс-платой, к которой подключаются кабели для передачи модулирующих видеоимпульсов от макетной платы ПЛИС к каждому излучателю, длина кабелей 3 м;
- узел для передачи команд от ПК на макетную плату ПЛИС DE10–Lite (преобразователь USB-UART);
- программное приложение, оснащенное графическим интерфейсом, выполняемое на ПК.

Макетная плата Terasic DE10–Lite включает микросхему ПЛИС из семейства MAX10: 10M50DAF484C7G (Altera Corporation). Задача ПЛИС в составе стенда — формирование видеоимпульсов (модулирующих сигналов для генераторов) заранее заданной длины с возможностью выбора момента начала сигнала. Последнее необходимо для реализации синхронного прихода СШП радиоимпульсов в заданную точку пространства. Данная задача решается с помощью внутренних цепей ФАПЧ ПЛИС [22]: ФАПЧ генерирует видеоимпульсы, используя в качестве входного сигнала тактирующие импульсы от внутреннего кварцевого генератора ПЛИС. Выходы ФАПЧ соединены через I/O выходы ПЛИС с кросс-платой, к которой подсоединены кабели для передачи генераторам модулирующего сигнала и питания.

Для визуализации процесса выбора взаимных задержек между модулирующими импульсами разработано приложение с графическим интерфейсом, в задачи которого входит расчет взаимных задержек между модулирующими сигналами на основании известных координат излучателей и приёмной антенны и управление работой ПЛИС по каналу USB-UART.

При помощи управляющей системы в процессе проведения эксперимента осуществлялся ввод координат точки приёма/излучателей в графическом интерфейсе программы; проводился расчёт необходимых задержек для формирования модулирующих сигналов; рассчитанные значения задержек отправлялись на ПЛИС; ПЛИС формировал модулирующие сигналы (периодические последовательности видеоимпульсов) для излучателей с учетом индивидуальных взаимных задержек.

## 2. Результаты экспериментов

В ходе эксперимента проверялись следующие предположения:

- сохранение и повторение формы импульсов после прохождения беспроводного канала;
- воспроизводимость форм импульсов от разных генераторов;
- возможность когерентного сложения импульсов в заданной точке пространства.

Перед началом эксперимента было проанализировано состояние эфира в точке приема в отсутствие полезного сигнала. Это необходимо для того, чтобы оценить насколько точно могут быть воспроизведены формы импульсов с учетом наличия помех. В рабочем диапазоне частот наблюдался значительный уровень помех, связанный с работой современных систем связи, поэтому при выполнении экспериментов на приемном устройстве применялся фильтр,



разработанный согласно методике, описанной в [23], который является согласованным с частотно-колебательной системой генератора хаоса. Применение данного фильтра позволило значительно снизить уровень помеховых сигналов в рабочем диапазоне частот системы.

В ходе экспериментов анализировались две ситуации: некогерентное сложение сигналов и когерентное сложение. Как известно, при некогерентном сложении дельта-коррелированных случайных процессов аддитивно складываются их дисперсии, что в переложении на радиофизику означает линейный рост мощности сигнала в точке приема с увеличением числа излучателей-независимых источников [24]. При когерентном сложении линейно растет амплитуда суммарного сигнала. Постановка данной работы позволяет оценить обе ситуации и в сравнении выяснить, как количественно отличается некогерентное и когерентное сложение СШП хаотических сигналов. Далее описаны этапы эксперимента: некогерентное сложение как точка отсчета и когерентное сложение.

**2.1. Форма хаотических радиоимпульсов.** Перед началом экспериментов по передаче хаотических радиоимпульсов через беспроводной канал необходимо убедиться, что импульсы каждого генератора и импульсы различных генераторов имеют совпадающую форму. Для этого был измерен сигнал непосредственно с выходов четырех генераторов до подачи на излучающую антенну (рис. 5, а). Цель измерения заключалась в установлении идентичности формы сигналов, которые производят генераторы, и синхронизации моментов излучения импульсов генераторами, что необходимо для дальнейших измерений. Точность синхронизации была установлена в пределах 100 пс. Сравнение временных реализаций генераторов показывает, что начальные фрагменты импульсов совпадают, время когерентности составляет приблизительно 35 нс, далее колебания расходятся.

На следующем шаге измерялись характеристики сигналов после прохождения излучающей системы, канала и приемной антенны в режиме «точка–точка» (измерения проводились для каждого излучателя в отдельности). Для того чтобы убедиться, что после прохождения беспроводного канала повторяемость формы импульсов сохранилась, было проведено сопоставление их формы двумя способами: сравнивались импульсы от каждого генератора в отдельности и средние профили импульсов от разных генераторов. Результаты этого сравнения приведены на рис. 5, б, в. Фрагменты временной реализации сигналов четырех излучателей в точке приема были оцифрованы при помощи осциллографа с частотой дискретизации 20 Гсмп/с. На рис. 5, б показаны 400 реализаций импульсов от одного из излучателей. На рис. 5, в показан результат усреднения реализаций импульсов каждого из излучателей.

Из представленных данных видно, что канал и антенны неизбежно искажают первоначальную форму импульсов, но несмотря на это сохраняется повторяемость формы импульсов как у каждого излучателя в отдельности, так и у различных излучателей. Полученные данные на уровне формы сигналов убедительно доказывают, что базовое условие когерентного сложения — подобие формы сигналов — соблюдается.

**2.2. Некогерентное сложение в пространстве.** Распространение сигнала в пространстве и их прием в различных точках пространства — это малопредсказуемый процесс, в котором невозможно добиться полной идентичности излучателей, как следствие, они будут излучать сигнал с различной мощностью (и среднеквадратичным значением амплитуды). Более того, после прохождения через канал амплитуда каждого из сигналов меняется независимо. Поэтому для корректной оценки результата сложения хаотических сигналов по мощности необходимо измерить мощность каждого сигнала по отдельности в заданной точке приема. В ходе эксперимента поочередно включались излучатели, фиксировалась мощность сигнала от каждого излучателя в отдельности, и далее накопительным образом фиксировалась мощность сигнала от одного, двух, трех и четырех одновременно работающих излучателей.

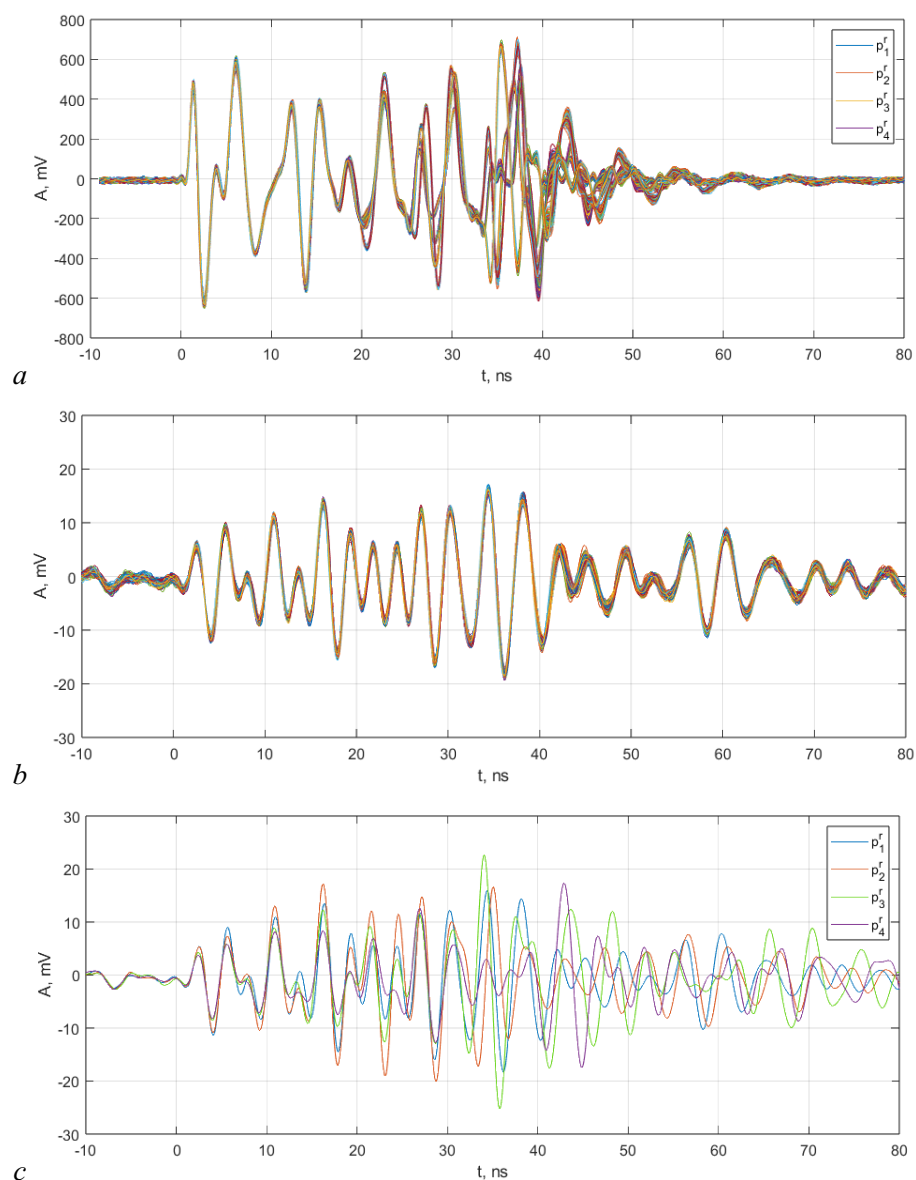


Рис. 5. Формы импульсов четырех различных генераторов, совмещенные по моменту своего начала и наложенные друг на друга: *a* — реализация 400 импульсов от каждого из генераторов до подачи на антенну, *b* — 400 импульсов от одного генератора после излучения антенной и прохождения радиоканала, *c* — усредненные реализации 400 импульсов от каждого из генераторов после излучения антенной и прохождения радиоканала (цвет онлайн)

Fig. 5. Pulse waveforms of four different generators, combined at the moment of their start and superimposed on each other: *a* — pulse waveforms of 400 pulses of each of the generators before feeding to the antenna, *b* — 400 pulses of one generator after emission by the antenna and passage of the radio channel, *c* — averaged pulse waveforms of 400 pulses of each of the generators after emission by the antenna and passage of the radio channel (color online)

В итоге по результатам эксперимента были получены реализации сигналов от каждого излучателя в отдельности и реализации суммарных сигналов в точке приема. По реализациям сигналов оценивались индивидуальные мощности принятых сигналов от каждого из излучателей  $P(s_i)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  в отдельности, и мощности суммарных сигналов от двух, трех и четырех излучателей  $P(\sum_{i=1}^K s_i)$ ,  $K = 1, 2, 3, 4$ , где  $s_i$  — непрерывный хаотический сигнал, а  $K$  — число одновременно работающих излучателей.

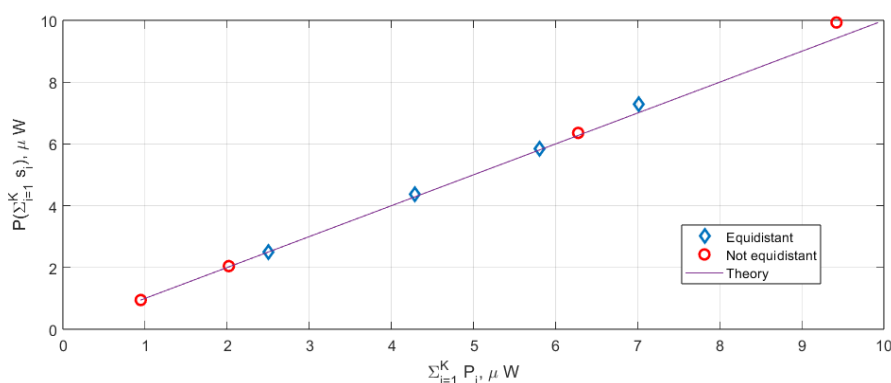


Рис. 6. Зависимость мощности суммарного сигнала от нескольких излучателей, от суммы мощностей сигналов излучателей, измеренных по отдельности. Синие ромбы — точка приема равноудалена от излучателей, красные окружности — излучатели находятся на различных расстояниях от точки приема. Фиолетовая прямая — теоретически ожидаемая закономерность (цвет онлайн)

Fig. 6. Dependence of the total signal power of several emitters on the sum of the signal powers of the emitters, measured separately. Blue diamonds — the reception point is located at an equal distance from the emitters, red circles — the emitters are located at different distances from the reception point. The purple line is the theoretically expected picture (color online)

На рис. 6 показана зависимость мощности суммарного сигнала от нескольких излучателей, от суммы  $\sum_{i=1}^K P(s_i)$ ,  $K = 1, 2, 3, 4$  мощностей сигналов излучателей, измеренных по отдельности.

Такого рода измерения были проделаны для двух сценариев: когда приемник находился в точке, равноудаленной от излучателей, и в точке, расположенной на неодинаковых расстояниях от излучателей. В обоих случаях измеренные значения с хорошей точностью укладываются на теоретически ожидаемую зависимость (диагональ): линейный рост мощности сигнала в точке приема с ростом числа излучателей СШП хаотического сигнала.

**2.3. Когерентное сложение.** Поскольку эксперимент преследовал цель добиться когерентного сложения импульсов, необходимо было обеспечить одинаковые условия приема сигнала. Применяемые антенны не являются строго всенаправленными, поэтому крайне желательно обеспечить соблюдение одинаковой взаимной ориентации излучающих и приемной антенн. В случае расположения излучающих антенн по сторонам квадрата этого можно добиться, если плоскости всех антенн будут расположены вдоль сторон квадрата, а плоскость приемной антенны будет ориентирована под углом 45 градусов к стороне квадрата.

Дальнейшие измерения проводились в условиях, когда амплитуда сигнала от различных излучателей в точке приема различна из-за неидентичности излучающих антенн и изотропности условий распространения сигнала. Поэтому для оценки приращения амплитуды в точке приема по мере увеличения числа излучателей необходимо сначала определить, каков индивидуальный вклад каждого излучателя.

Это иллюстрирует рис. 5, с, где видно, что амплитуда сигнала в точке приема от каждого излучателя несколько отличаются друг от друга и в максимуме составляет около 20 мВ. При этом формы импульсов подобны, то есть действительно можно ожидать их когерентного сложения. Как отмечалось в разделе 1.3, необходимым условием этого является одновременность прихода импульсов в точку приема.

Результат когерентного сложения оценивался по характеру изменения среднеквадратичного значения амплитуды и формы сигнала при увеличении числа излучателей рис. 7.

На рис. 7, *a* показано изменение формы сигнала при увеличении числа излучателей от одного до четырех. Формы импульсов подобны друг другу, амплитуда их увеличивается пропорционально числу излучателей.

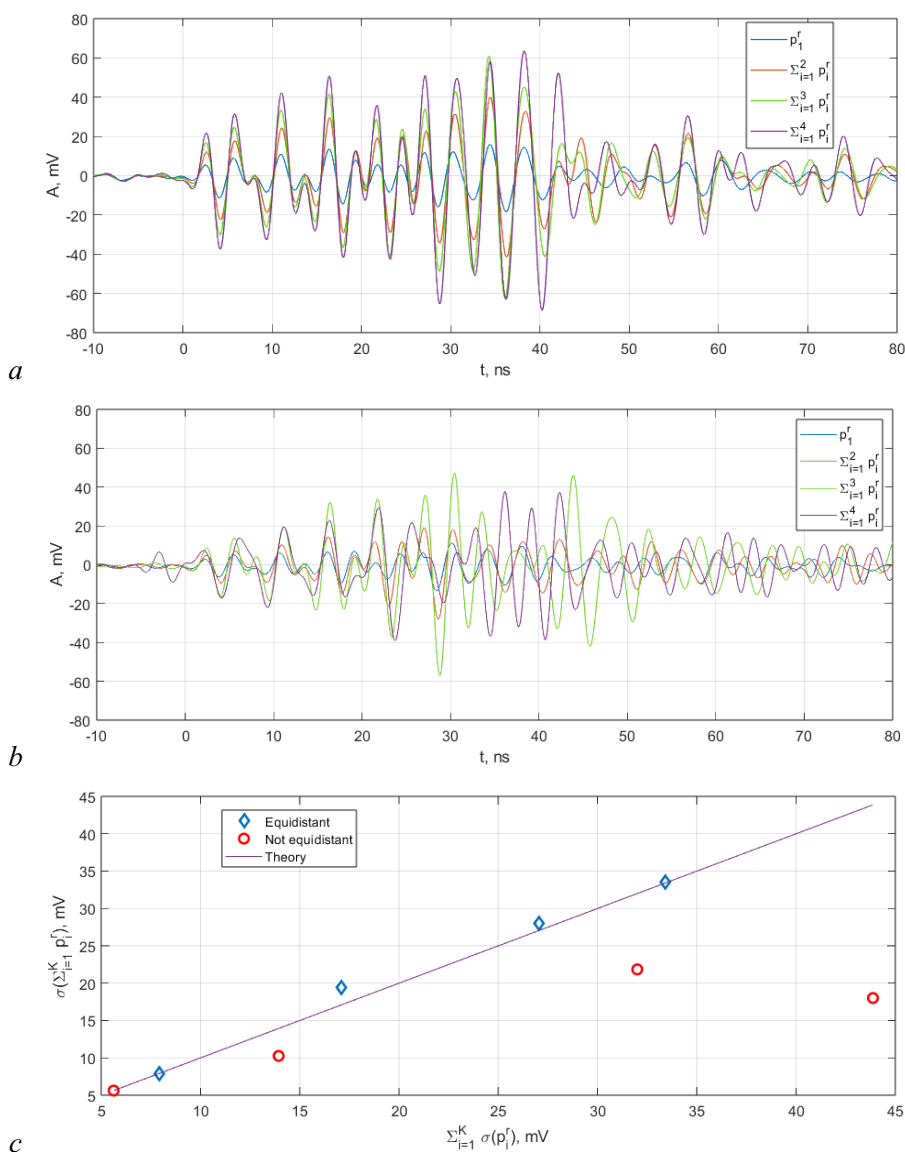


Рис. 7. *a* — Усредненные реализации суммарных импульсных сигналов от одного, двух, трех и четырех излучателей в точке приема, равноудаленной от излучателей. *b* — Усредненные реализации суммарных импульсных сигналов от одного, двух, трех и четырех излучателей в ситуации, когда излучатели находятся на разных расстояниях от точки приема. *c* — Зависимость среднеквадратичной амплитуды суммарного импульсного сигнала от суммы среднеквадратичных амплитуд сигналов излучателей, измеренных по отдельности. Синие ромбы — точка приема равноудалена от излучателей, красные окружности — излучатели находятся на различных расстояниях от точки приема. Фиолетовая прямая — теоретически ожидаемая закономерность (цвет онлайн)

Fig. 7. *a* — Averaged pulse shapes of the sum signal of one, two, three and four emitters at the reception point located equidistant from the emitters. *b* — Averaged pulse shapes of the sum signal of one, two, three and four emitters at different distances from the reception point. *c* — Dependence of the root-mean-square amplitude of the sum signal of several emitters on the sum of the root-mean-square amplitudes of the emitter signals measured separately. Blue diamonds indicate that the reception point is equidistant from the emitters, red circles indicate that the emitters are located at different distances from the reception point. The purple line is the theoretically expected pattern (color online)

Для сравнения аналогичные измерения были проведены (рис. 7, *b*), когда приемная антенна была смещена относительно центра квадрата так, что расстояния от приемной антенны до каждого из излучателей были различны. В этом случае импульсы приходят в точку приема с различными взаимными задержками, не согласованными с данной точкой приема, поэтому нарушается условие когерентного сложения, форма импульсов не является подобной и их амплитуда не находится в прямой зависимости от числа излучателей, то есть амплитуда растет, но линейной зависимости нет.

Это явно видно на рис. 7, *c*, где показана зависимость среднеквадратичной амплитуды суммарного сигнала от двух, трех и четырех излучателей в точке приема  $\sigma(\sum_{i=1}^K p_i^r)$ ,  $K = 1, 2, 3, 4$ , где  $p_i^r$  — импульсный хаотический сигнал, а  $K$  — число одновременно работающих излучателей, от суммы  $\sum_{i=1}^K \sigma(p_i^r)$ ,  $K = 1, 2, 3, 4$  среднеквадратичных амплитуд импульсных сигналов отдельных излучателей.

### Заключение

Основным результатом работы стало экспериментальное доказательство реализуемости когерентного суммирования СШП хаотических сигналов, поступающих в заданную точку пространства от нескольких независимых излучателей СШП хаотических радиоимпульсов.

Решение данной задачи потребовало разработки метода формирования одинаковых СШП импульсов, которые генерируются различными (независимыми) генераторами хаотических колебаний. Генераторы являются полностью аналоговыми устройствами, модуляция которых осуществляется потоком видеоимпульсов.

Разработана система управления генераторами, при помощи которой можно формировать суммарный сигнал в произвольной точке пространства.

Продemonстрировано линейное увеличение амплитуды СШП хаотического сигнала в точке приема с увеличением числа излучателей при условии согласованного излучения импульсов и их когерентном приходе в точку приема, и линейное увеличение мощности при условии некогерентного сложения СШП хаотического сигнала.

Полученные результаты показывают, что в реальных физических системах с хаосом вполне можно получать стабильные и предсказуемые результаты, в основе которых лежит чувствительность хаотических колебаний к начальным условиям, что создает основу для дальнейшей разработки беспроводных систем на базе СШП хаотических сигналов, где применяется такое важное и интересное физическое явление, как когерентное сложения радиосигналов в пространстве.

### Список литературы

1. Yang L., Giannakis G. B. Ultra-wideband communications: An idea whose time has come // IEEE Signal Process. Mag. 2004. Vol. 21, no. 6. P. 26–54. DOI: 10.1109/MSP.2004.1359140.
2. Singh D. What is Ultra-Wideband (UWB) technology on Samsung Phones? How is it helpful? [Electronic resource]. Available from: <https://www.smartprix.com/bytes/phones-with-uwband-ultrawideband-connectivity/>.
3. Breed G. A summary of FCC rules for ultra wideband communications // High Freq. Electron. 2005. Vol. 4, no. 1. P. 42–44.
4. Niemela V., Haapola J., Hamalainen M., Iinatti J. An ultra wideband survey: Global regulations and impulse radio research based on standards // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19, no. 2. P. 874–890. DOI: 10.1109/COMST.2016.2634593
5. Гуляев Ю. В., Кислов В. Я., Кислов В. В. Новый класс сигналов для передачи информации — широкополосные хаотические сигналы // ДАН. 1998. Т. 359, № 6. С. 750–754.
6. Гуляев Ю. В., Кислов В. Я., Кислов В. В., Калинин В. И., Колесов В. В., Беляев Р. В., Воронцов Г. М. Широкополосные телекоммуникационные средства с кодовым разделением каналов на основе хаотических сигналов // Радиотехника. 2002. № 10. С. 3–15.

7. *Andreyev Yu. V., Dmitriev A. S., Efremova E. V., Khilinsky A. D., Kuzmin L. V.* Qualitative theory of dynamical systems, chaos and contemporary communications // *Int. J. Bifurc. Chaos*. 2005. Vol. 15, no. 11. P. 3639–3651. DOI: 10.1142/S0218127405014295.
8. *Tam W. M., Lau F. C. M., Tse C. K.* Digital Communications With Chaos: Multiple Access Techniques and Performance Evaluation. Oxford: Elsevier Science, 2010. 256 p.
9. *Eisencraft M., Attux R., Suyama R.* Chaotic Signals in Digital Communications. Boca Raton: CRC Press, 2014. 504 p.
10. *Kaddoum G.* Wireless chaos-based communication systems: A comprehensive survey // *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 2621–2648. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2572730.
11. *Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Ицков В. В., Петросян М. М., Рыжов А. И., Турканов И. Ф.* Прямохаотические средства сверхширокополосной беспроводной связи в метровом и дециметровом диапазоне радиоволн // *Радиотехника и электроника*. 2022. Т. 67, № 8. С. 797–806. DOI: 10.31857/S0033849422080046.
12. *Manikandan M. S. K., Ravikumar S., Abhaikumar V., Thiruvengadam S. J.* A novel pulse based ultrawide band system using chaotic spreading sequences // In: 2007 2nd International Conference on Communication Systems Software and Middleware. 2007, Bangalore, India. P. 1–5. DOI: 10.1109/COMSWA.2007.382453.
13. *Kotti A., Meherzi S., Marcos S., Belghith S.* Asynchronous DS-UWB communication using spatiotemporal chaotic waveforms and sequences // In: 2009 First International Conference on Communications and Networking. 2009, Hammamet, Tunisia. P. 1–5. DOI: 10.1109/COMNET.2009.5373551.
14. *Liu C., Cheng J., Zhang R.* An orthogonal mixed chaotic spread spectrum algorithm for satellite communication // In: 2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). 2019, Hangzhou, China. P. 235–240. DOI: 10.1109/ISCID.2019.10137.
15. *Song D., Liu J., Wang F.* Statistical analysis of chaotic stochastic properties based on the logistic map and Fibonacci sequence // In: Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. 2013, Harbin, China. P. 611–614. DOI: 10.1109/MIC.2013.6758038.
16. *Ben Jemaa Z., Belghith S.* Chaotic sequences with good correlation properties for MIMO radar application // In: 2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). 2016, Split, Croatia. P. 1–5. DOI: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772127.
17. *Kuzmin L. V., Efremova E. V., Itskov V. V.* Modulation, shaping and replicability of UWB chaotic radiopulses for wireless sensor applications // *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 15. P. 6864. DOI: 10.3390/s23156864.
18. *Kuzmin L., Efremova E., Vladyka P., Itskov V.* Analog replicator of long chaotic radio pulses for coherent processing // *Technologies*. 2025. Vol. 13, no. 1. P. 16. DOI: 10.3390/technologies13010016.
19. *Ефремова Е. В., Атанов Н. В., Дмитриев Ю. А.* Генератор хаотических колебаний радиодиапазона на основе автоколебательной системы с 2.5 степенями свободы // *Известия вузов. ПНД*. 2007. Т. 15, № 1. С. 23–41. DOI: 10.18500/0869-6632-2007-15-1-23-41.
20. *Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Румянцев Н. В.* Генератор микроволнового хаоса с плоской огибающей спектра мощности в диапазоне 3–8 GHz // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40, № 2. С. 1–9.
21. LibreVNA. 100kHz to 6GHz 2 port USB based VNA [Electronic resource] // Available from: <https://github.com/jankae/LibreVNA>.
22. Intel MAX 10 Clocking and PLL User Guide [Electronic resource] // Available from: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683047/18-0/introduction.html>.



23. Kuzmin L. V., Efremova E. V. Filtering and detection of ultra-wideband chaotic radio pulses with a matched frequency-selective circuit // *Electronics*. 2023. Vol. 12, no. 6. P. 1324. DOI: 10.3390/electronics12061324.
24. Андреев Ю. В., Дмитриев А. С., Лазарев В. А. Коллективная передача информации сверхширокополосным прямохаотическим ансамблем // *Физические основы приборостроения*. 2017. Т. 6, № 2(24). С. 80–89. DOI: 10.25210/jfop-1702-080089.

## References

1. Yang L, Giannakis GB. Ultra-wideband communications: An idea whose time has come. *IEEE Signal Process. Mag.* 2004;21(6):26–54. DOI: 10.1109/MSP.2004.1359140.
2. Singh D. What is Ultra-Wideband (UWB) technology on Samsung Phones? How is it helpful? [Electronic resource]. Available from: <https://www.smartprix.com/bytes/phones-with-uwband-ultrawideband-connectivity/>.
3. Breed G. A summary of FCC rules for ultra wideband communications. *High Freq. Electron.* 2005;4(1):42–44.
4. Niemela V, Haapola J, Hamalainen M, Iinatti J. An ultra wideband survey: Global regulations and impulse radio research based on standards. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017;19(2):874–890. DOI: 10.1109/COMST.2016.2634593
5. Gulyaev YuV, Kislov VYa, Kislov VV. A new class of signals for information transmission – wideband chaotic signals. *Sov. Phys. Doklady*. 1998;359(6):750–754. (in Russian).
6. Gulyaev YuV, Kislov VYa, Kislov VV, Kalinin VI, Kolesov VV, Belyaev RV, Vorontsov GM. Broadband telecommunication facilities with code division multiplexing based on chaotic signals. *Radio Engineering*. 2002;(10):3–15. (in Russian).
7. Andreyev YuV, Dmitriev AS, Efremova EV, Khilinsky AD, Kuzmin LV. Qualitative theory of dynamical systems, chaos and contemporary communications. *Int. J. Bifurc. Chaos*. 2005;15(11):3639–3651. DOI: 10.1142/S0218127405014295.
8. Tam WM, Lau FCM, Tse CK. *Digital Communications With Chaos: Multiple Access Techniques and Performance Evaluation*. Oxford: Elsevier Science; 2010. 256 p.
9. Eisenkraft M, Attux R, Suyama R. *Chaotic Signals in Digital Communications*. Boca Raton: CRC Press; 2014. 504 p.
10. Kaddoum G. Wireless chaos-based communication systems: A comprehensive survey. *IEEE Access*. 2016;4:2621–2648. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2572730.
11. Dmitriev AS, Efremova EV, Itskov VV, Petrosyan MM, Ryzhov AI, Turkanov IF. Direct chaotic ultra-wideband wireless communications in the very high frequency and ultra high frequency radio bands. *J. Commun. Technol. Electron.* 2022;67:1013–1021. DOI: 10.1134/S1064226922080046.
12. Manikandan MSK, Ravikumar S, Abhaikumar V, Thiruvengadam SJ. A novel pulse based ultrawide band system using chaotic spreading sequences. In: 2007 2nd Inter-national Conference on Communication Systems Software and Middleware. 2007, Bangalore, India. P. 1–5. DOI: 10.1109/COMSWA.2007.382453.
13. Kotti A, Meherzi S, Marcos S, Belghith S. Asynchronous DS-UWB communication using spatiotemporal chaotic waveforms and sequences. In: 2009 First International Conference on Communications and Networking. 2009, Hammamet, Tunisia. P. 1–5. DOI: 10.1109/COMNET.2009.5373551.
14. Liu C, Cheng J, Zhang R. An orthogonal mixed chaotic spread spectrum algorithm for satellite communication. In: 2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). 2019, Hangzhou, China. P. 235–240. DOI: 10.1109/ISCID.2019.10137.
15. Song D, Liu J, Wang F. Statistical analysis of chaotic stochastic properties based on the logistic map

- and Fibonacci sequence. In: Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. 2013, Harbin, China. P. 611–614. DOI: 10.1109/MIC.2013.6758038.
16. Ben Jemaa Z, Belghith S. Chaotic sequences with good correlation properties for MIMO radar application. In: 2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). 2016, Split, Croatia. P. 1–5. DOI: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772127.
  17. Kuzmin LV, Efremova EV, Itskov VV. Modulation, shaping and replicability of UWB chaotic radiopulses for wireless sensor applications. *Sensors*. 2023;23(15):6864. DOI: 10.3390/s23156864.
  18. Kuzmin L, Efremova E, Vladyka P, Itskov V. Analog replicator of long chaotic radio pulses for coherent processing. *Technologies*. 2025;13(1):16. DOI: 10.3390/technologies13010016.
  19. Efremova EV, Atanov NV, Dmitriev JA. Generator of chaotic oscillations of the radio range based on a self-oscillating system with 2.5 degrees of freedom. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2007;15(1):23–41. (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2007-15-1-23-41.
  20. Dmitriev AS, Efremova EV, Rumyantsev NV. A microwave chaos generator with a flat envelope of the power spectrum in the range of 3–8 GHz // *Tech. Phys. Lett.* 2014;40(1):48–51. DOI: 10.1134/S1063785014010180.
  21. LibreVNA. 100kHz to 6GHz 2 port USB based VNA [Electronic resource] Available from: <https://github.com/jankae/LibreVNA>.
  22. Intel MAX 10 Clocking and PLL User Guide [Electronic resource] // Available from: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683047/18-0/introduction.html>.
  23. Kuzmin LV, Efremova EV. Filtering and detection of ultra-wideband chaotic radio pulses with a matched frequency-selective circuit. *Electronics*. 2023;12(6):1324. DOI: 10.3390/electronics12061324.
  24. Andreev YuV, Dmitriev AS, Lazarev VA. Collective transmission of information by an ultra-wideband direct chaotic ensemble. *Physical Bases of Instrumentation*. 2017;6(2):80–89. (in Russian). DOI: 10.25210/jfop-1702-080089.



*Кузьмин Лев Викторович* — окончил факультет управления и прикладной математики МФТИ по направлению «Прикладные математика и физика» (1997). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата (2000, МФТИ) и доктора (2011, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН) физико-математических наук по специальности «Радиофизика». Работает в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 2000 года, в настоящее время в должности ведущего научного сотрудника. Научные интересы — математическое моделирование в радиофизике, беспроводные системы связи, беспроводная передача информации, применение хаотических колебаний для передачи и обработки информации. Автор более 80 научных статей по указанным направлениям.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11/7  
 Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
 E-mail: [lvk@cplire.ru](mailto:lvk@cplire.ru)  
 ORCID: 0000-0003-0466-881X  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 17498



*Кривенко Андрей Андреевич* — окончил физтех-школу радиотехники и компьютерных технологий МФТИ (2024). Инженер ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Научные интересы — компьютерные технологии, математическое моделирование, беспроводные системы связи.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11/7  
 Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
 E-mail: [krivenko.aa@phystech.edu](mailto:krivenko.aa@phystech.edu)  
 ORCID: 0009-0006-5611-8261



*Владыка Павел Александрович* — окончил факультет фундаментальных наук МГТУ им. Н. Э. Баумана (2022). Младший научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (с 2023). Научные интересы — цифровая обработка сигналов, электроника, радиотехника, беспроводная передача информации. Автор 3 научных статей по указанным направлениям.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11/7  
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
E-mail: pavladyka@yandex.ru  
ORCID: 0009-0002-7080-9350



*Ефремова Елена Валериевна* — окончила факультет прикладной физики и энергетики МФТИ по направлению «Прикладные математика и физика» (2000). Защитила диссертации на соискание учёной степени кандидата (2003, МФТИ) и доктора (2008, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН) физико-математических наук по специальности «Радиофизика». С 2003 года работает в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, в настоящее время в должности ведущего научного сотрудника. Научные интересы — нелинейная динамика, радиоэлектроника, беспроводная передача информации. Автор свыше 80 научных статей по указанным направлениям.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11/7  
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
E-mail: efremova@cplire.ru  
ORCID: 0000-0001-9560-3469  
AuthorID (eLibrary.Ru): 17497