

УДК 621.396

## **Эксперимент по генерации близких по форме сверхвысокочастотных хаотических радиоимпульсов**

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

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
ул. Моховая, д.11, стр. 7, Москва, 125009, Российская Федерация  
lvkuzmin@gmail.com*

Получено: 19 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

**Аннотация:** *Предлагается метод генерации хаотических радиоимпульсов при помощи аналогового генератора хаотических колебаний. Метод позволяет воспроизводить форму импульсов как одним и тем же экземпляром генератора хаотических колебаний, так и разными экземплярами конструктивно идентичных генераторов. Форма импульсов управляемо изменяется и воспроизводится путем изменения напряжения питания генератора хаотических колебаний. Разработан макет из четырех генераторов, экспериментально доказывающий данную возможность в диапазоне частот от 100 до 500 МГц. Предлагаемый метод необходим для создания способов когерентного приема хаотических СШП колебаний СВЧ диапазона и для когерентного излучения хаотических сигналов в задачах диаграммобразования.*

**Ключевые слова:** *сверхширокополосные хаотические радиоимпульсы, сверхширокополосные сигналы, хаотические сигналы, когерентное излучение хаотических сигналов.*

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Эксперимент по генерации близких по форме сверхвысокочастотных хаотических радиоимпульсов / Л. В. Кузьмин и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 2. С. 139—165.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Эксперимент по генерации близких по форме сверхвысокочастотных хаотических радиоимпульсов / Л. В. Кузьмин, Е. В. Ефремова, В. В. Ицков, П. А. Владыка // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 139—165.

## 1. Введение

С конца XX века использование сверхширокополосных (СШП) сигналов [1], [2] в беспроводных системах массового назначения находится в центре внимания научного сообщества. Начало работы над массовым внедрением СШП-решений, предназначенных для использования на безлицензионной основе, связывают с внедрением спектральной маски FCC США [3], [2] и последующей разработкой ряда международных стандартов СШП беспроводной связи, таких как IEEE 802.15.3a [4, 5] (в итоге не принят), IEEE 802.15.4a [6], IEEE 802.15.6 [7] и IEEE 802.15.4z [8–10]. Ряд крупных производителей бытовой электроники уже включили в свои устройства СШП-решения [11, 12].

Новое на то время направление массовой СШП связи стало стимулом для поиска сигналов нового типа, которые сочетали бы в себе возможность удовлетворять требованиям спектральной маски (распределение энергии сигнала по СШП диапазону частот), формировать сигналы с требуемой энергетикой на бит, управлять спектром и формой колебаний. В этом контексте внимание исследователей привлекла идея использования хаотических сигналов и генераторов хаоса для получения шумоподобных колебаний при помощи технически простых устройств и использования таких сигналов в схемах связи [13–16].

На сегодняшний день сложились два подхода к применению хаотических сигналов: в качестве псевдослучайных последовательностей, предназначенных для расширения спектра и организации накопления, и в качестве несущих колебаний в радиодиапазоне.

И в том, и в другом случае имеется проблема синтеза сигналов с заданными спектральными, кросс- и автокорреляционными свойствами. На сегодняшний день имеется множество примеров синтеза сигналов специальной формы как для ортогонализации сигналов, так и для синтеза сигналов с минимальной взаимной корреляцией. С вовлечением хаотических сигналов в поле зрения специалистов по передаче информации эта задача также стала решаться и для них.

В первую очередь следует упомянуть различные способы применения фрагментов хаотических сигналов при передаче цифровой информации при помощи позиционной модуляции (ПМ) [17, 26, 27, 29], и частотной модуляции несущей [20] хаотическим сигналом, применения дискретных систем (отображений) с хаосом для реализации перескока по частоте [28]. Хаотические последовательности применяются для модуляции положения и знака сверхширокополосных ультракоротких импульсов (УКИ) [18, 19, 21, 24, 25] в рамках позиционной модуляции, где символы коди-

руются последовательностями УКИ с хаотическим интервалом между ними. Позиционная модуляция с использованием хаотических сигналов применяется в подводной связи [22, 23].

Популярным является применение хаотических последовательностей и хаотических сигналов, как сигналов с большой размерностью (базой), для организации расширения спектра и накопления. Например, в [30] рассматриваются кодовые последовательности из УКИ на базе хаотических последовательностей в сочетании с ПМ модуляцией. В [31] анализируется возможность использования дискретных хаотических последовательностей для расширения спектра в CDMA. В [32] также рассматривается использование СШП УКИ, из которых составляются последовательности  $+1$  и  $-1$ , которые генерируются логистическим отображением, в том числе для отбеливания спектра сигнала. В [33] предлагаются расширяющие последовательности, получаемые на базе пространственно-временных отображений с хаосом. В [34] рассматриваются хаотические расширяющие последовательности в комбинации с преобразованием Фурье. В работах [35–37] развивается подход к синтезу импульсных хаотических сигналов, допускающих когерентный прием без знания копии сигнала в приемнике.

Хаотические последовательности и хаотические отображения используются как средство для синтеза дискретных последовательностей с заданными авто- и кросскорреляционными свойствами. Например, в [40] предлагается метод генерации таких последовательностей. В [39] предлагается метод формирования хаотических последовательностей, который устраняет периодичность при использовании хаотических отображений из-за конечной машинной точности. В [38] рассматривается задача синтеза последовательностей на базе логистического отображения и последовательности Фибоначчи для устранения периодичности в сигналах, генерируемых цифровыми системами. В [41] описывается способ генерации псевдослучайных хаотических последовательностей на базе ПЛИС. В [43] ставится и решается задача по синтезу расширяющих последовательностей, превосходящих по своим характеристикам последовательности Голда. В [42] улучшают статистические свойства дискретных последовательностей, полученных на базе логистического отображения с хаосом. В [44] предлагается метод синтеза расширяющих последовательностей на основе хаотических отображений для спутниковой навигационной системы.

В ряде работ исследуются аспекты оптимального обнаружения хаотических последовательностей за счет накопления. В [48] рассматривается задача восстановления хаотического отображения, используемого для хаотической ПМ, при помощи фильтра Калмана. В [45] предлагается способ

формирования хаотических последовательностей, которые по критерию достоверности их обнаружения в канале с шумом должны быть лучше, чем последовательности Голда. В [46] анализируют вопросы обнаружения дискретных хаотических последовательностей и устанавливаются критерии их обнаружения. В [47] исследуются вопросы слепого обнаружения хаотического сигнала при помощи нейронной сети.

Помимо цифровых методов генерации фрагментов хаотических сигналов, описанных выше, ведутся также работы по созданию методов аналогового формирования. Например, в [52] предлагается метод формирования последовательности импульсов с хаотическими интервалами между ними, для чего применяется система Лоренца. В [50] предлагается генератор гауссовых импульсов в виде микросхемы для СШП импульсных радиосистем. В [51] описывается генератор последовательности хаотических радиоимпульсов при помощи клистрона, а в [49] те же авторы описывают генератор хаотического СШП сигнала в СВЧ диапазоне на основе ЛБВ с пиковой мощностью 22,5 Вт.

Наконец, нельзя не упомянуть о возможных и перспективных приложениях хаотических последовательностей для задач пространственного разделения сигналов и диаграммообразования в перспективных беспроводных системах. В [53] обсуждаются радары на основе *MIMO* (*multiple input multiple output*) с большим расстоянием между антеннами. В [54] ставится задача по формированию узких диаграмм направленности (функции неопределенности) для радаров на хаотических сигналах. В [55] обсуждается проблема направленной передачи информации за счет пространственно-частотного разделения, достигаемого при помощи хаотических последовательностей.

В упомянутых работах речь идет о синтезе хаотических сигналов при помощи цифровых систем. Вместе с тем за кадром остаются возможности по синтезу хаотических сигналов при помощи аналоговых систем, аналоговых генераторов. С инженерно-практической точки зрения это более удобно, так как отпадает необходимость в переносе цифрового сигнала на радиочастоту.

Применение аналоговых способов генерации хаотических колебаний наталкивается на принципиальную трудность, связанную с чувствительностью хаотических колебаний к начальным условиям, что препятствует управляемому (предсказуемому) формированию хаотических сигналов заданной формы и их повторению как одним и тем же генератором хаотических колебаний, так и разными экземплярами генераторов. Обзор показывает, что тематика воспроизводимости хаотических аналоговых сигналов практически не анализировалась. Вместе с тем это насущная

техническая проблема и принципиальная задача, если ставить вопросы о когерентных методах обработки хаотических сигналов, в которых в том или ином виде участвуют аналоговые источники хаотических колебаний.

Новизна настоящей работы в том, что ставится и решается задача создания источников хаотических колебаний на основе аналоговых генераторов хаоса, которые, во-первых, могут генерировать хаотические сигналы разнообразной формы непосредственно в СВЧ диапазоне; во-вторых, эту форму можно повторять и воспроизводить различными образцами генераторов.

Ранее было показано [56—58], что в определенных пределах возможно воспроизведение начального участка хаотического сигнала при формировании хаотических радиоимпульсов, которые используются в прямохаотической схеме передачи информации в микроволновом диапазоне частот (*DCC*) [59, 60]. Прямохаотические средства беспроводной передачи информации используются в персональных и локальных беспроводных сенсорных сетях [14, 61—65], в активных сенсорных сетях. В данной работе эти результаты стали основой для дальнейшего развития способов формирования хаотических радиоимпульсов, управляемых по форме и допускающих повторение формы импульсов.

Цель данной работы — показать, что при помощи аналогового генератора, формирующего СШП хаотический сигнал, можно решать задачи по формированию аналоговых импульсных сигналов различной формы, которые генерируются одним и тем же источником хаоса, и которые могут повторяться по форме от импульса к импульсу. Показывается, что можно воспроизводить импульсы одной и той же формы разными экземплярами конструктивно идентичных генераторов хаотических сигналов.

В статье описывается структура генератора хаоса, показывается, что в данной модели имеют место хаотические колебания. Приводится описание макета, состоящего из четырех различных экземпляров генераторов, на которых показывается возможность генерации близких по форме хаотических радиоимпульсов как в численной модели, так и в экспериментальном макете.

## 2. Структура генератора

Механизм и способ формирования близких по форме хаотических радиоимпульсов исследовался на базе схмотехнической модели генератора (использовалась при численном моделировании), и экспериментального макетирования. В макете были реализованы четыре экземпляра конструктивно идентичных генераторов. Экспериментальное подтверждение

возможности формирования и воспроизведения импульсов разной формы дает возможность оценить в полном объеме влияние факторов, которые будут влиять на форму хаотических колебаний из-за чувствительности траекторий к начальным условиям в хаотическом режиме генерации. Влияние таких факторов сложно учесть путем численного моделирования.

Рассматриваемый здесь генератор относится к семейству моделей одностранзисторных генераторов, теоретические и экспериментальные подходы к созданию которых разрабатывались в течение ряда лет. Отправной точкой был осциллятор Колпитца, существование хаотических режимов в котором было показано в [66].

Генератор, рассматриваемый в данной работе, появился в результате цикла работ [67—69], в которых были созданы источники хаотических колебаний, пригодные для практических инженерных приложений, которые обеспечивают хаотические колебания в требуемой полосе частот с широкими зонами хаотических мод в пространстве параметров, чем обеспечивается устойчивая генерация хаотических колебаний в условиях разброса номиналов радиодеталей и нестабильности электропитания в реальных технических системах.

Отличие предложенного в настоящей работе генератора от схемы Колпитца заключается, во-первых, в дополнении его частотно-избирательной системой, которая формирует СШП хаотические колебания в предписанном частотном диапазоне, во-вторых, в переходе к одному питанию, при помощи которого осуществляется управление режимом работы генератора (Рис. 1).

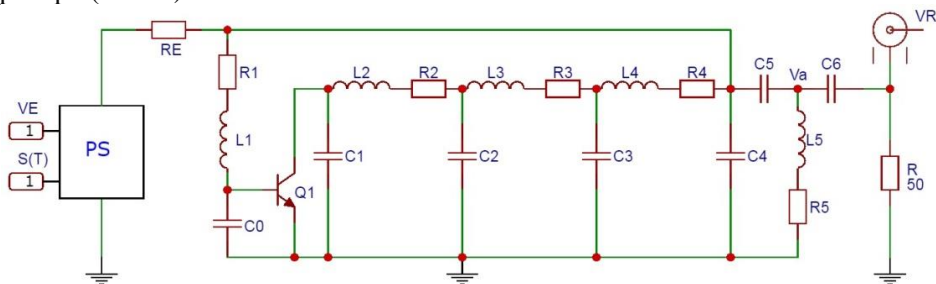


Рис. 1. Схема генератора хаотических колебаний:  $PS$  – модулятор питания,  $V_E$  – амплитуда питания,  $s(t)$  последовательность видеоимпульсов,  $V_R$  – сигнал на выходе генератора.

Fig. 1. Scheme of the chaotic oscillation generator:  $PS$  is the power supply modulator,  $V_E$  is the power supply amplitude,  $S(T)$  is the sequence of video pulses,  $V_R$  is the generator output signal

Согласно методу [56—58], СШП хаотические радиоимпульсы в таком генераторе формируются путем включения и выключения питания ( $V_E$ ) в заданные интервалы времени. Питание включается и выключается

внешним видеосигналом  $s(t)$ . Режим работы генератора в моменты включения питания определяется амплитудой видеоимпульсов  $V_E$ . С точки зрения радиотехники возбуждение колебаний происходит, когда за счет подачи питания открывается переход база — эмиттер транзистора, если амплитуды  $V_E$  для этого достаточно.

Состояние покоя генератора эквивалентно стационарным токам и напряжениям, установившимся в системе на рис. 1 под действием постоянного напряжения питания  $V_E$ : токи через индуктивности равны нулю, разность потенциалов в точке  $A$  и на нагрузке  $R$  равны нулю, напряжения на емкостях  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  складывается в результате деления напряжения питания  $V_E$  сопротивлениями  $R_E, R_1...R_4$ .

Динамика системы исследовалась для значений параметров  $L_1 = 55$  нН;  $L_2 = 110$  нН;  $L_3 = 47$  нН;  $L_4 = 12$  нН;  $L_5 = 33$  нН;  $C_0 = 0.4$  пФ;  $C_1 = 1.5$  пФ;  $C_2 = 10$  пФ;  $C_3 = 15$  пФ;  $C_4 = 15$  пФ;  $C_5 = 5$  пФ;  $C_6 = 10$  пФ;  $R_E = 150$  Ом;  $R = 50$  Ом;  $R_1 = 25$  Ом;  $R_2 = 25$  Ом;  $R_3 = 25$  Ом;  $R_4 = 25$  Ом;  $R_5 = 25$  Ом;  $\beta = 200$ , для которых имеют место режимы хаотических колебаний в широкой области значений напряжения питания  $V_E$  (рис. 2).

Данная модель генератора стала основой, на базе которой был разработан описываемый ниже экспериментальный макет.

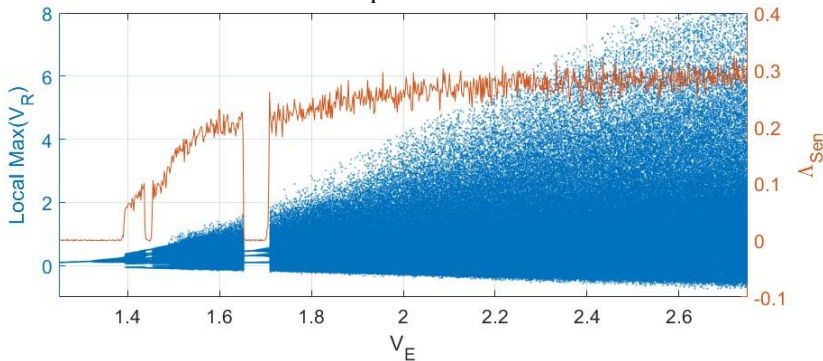


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма (синий, левая шкала) и старший показатель Ляпунова (красный, правая шкала) системы на рис. 1 от напряжения питания  $V_E$ .

Fig. 2. Bifurcation diagram (blue, left scale) and the leading Lyapunov exponent (red, right scale) of the system in Fig. 1 from supply voltage  $V_E$

### 3. Экспериментальный макет

Экспериментальная проверка концепции, излагаемая в статье, проводилась путем сравнения хаотических колебаний, формируемых четырьмя различными экземплярами генераторов хаотических колебаний, выполненных на единой печатной плате из однотипных радиоэлементов (Рис. 3).

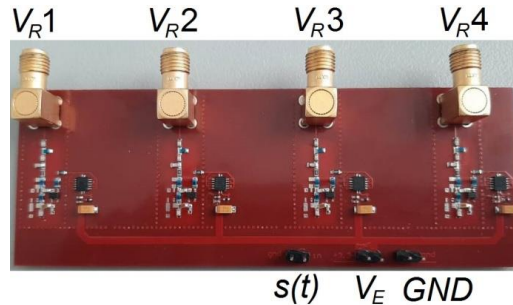


Рис. 3. Внешний вид макета из четырех однотипных генераторов хаоса (Рис. 1):

$s(t)$  — вход для управляющего сигнала,  $V_E$  — вход для подачи общего для всех генератора питания,  $GND$  земля,  $V_R^{(1)}$ ,  $V_R^{(2)}$ ,  $V_R^{(3)}$ ,  $V_R^{(4)}$  — СВЧ выходы генераторов.

Fig. 3. Appearance of a layout of four identical chaos generators (Fig. 1):  $s(t)$  – input for a control signal,  $V_E$  – input for supplying a common power generator for all,  $GND$  ground,  $V_R^{(1)}$ ,  $V_R^{(2)}$ ,  $V_R^{(3)}$ ,  $V_R^{(4)}$  – microwave outputs of generators

Точность подбора номиналов составляла 2 %. Использовались радиоэлементы общего назначения, доступные в свободной продаже. Топология генераторов была идентичной.

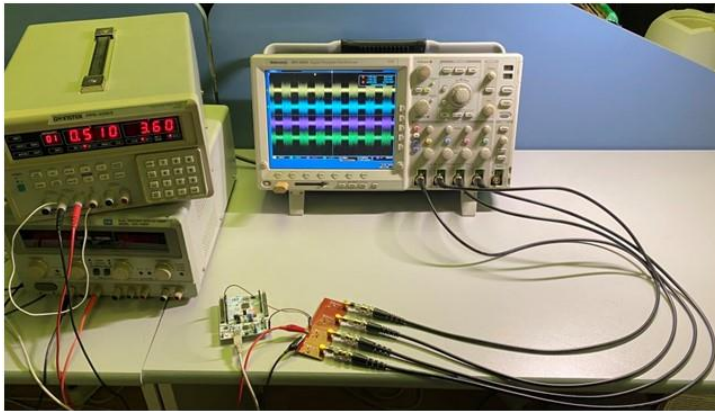
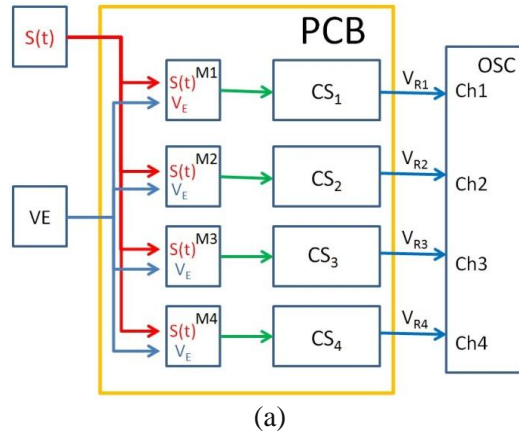
Принципиальная электрическая схема каждого генератора соответствует Рис. 1. В макете отсутствуют пассивные сопротивления индуктивностей в виде отдельных радиоэлементов ( $R_1 = 0 \text{ Ohm}$ ,  $R_2 = 0 \text{ Ohm}$ ,  $R_3 = 0 \text{ Ohm}$ ,  $R_4 = 0 \text{ Ohm}$ ,  $R_5 = 0 \text{ Ohm}$ ). В численной модели эти сопротивления необходимы для имитации диссипации энергии, которые неизбежно присутствуют в реальном устройстве, и которую невозможно учесть в полном объеме в рамках математической модели на уровне законов Кирхгофа. В макете сопротивления в виде отдельных элементов не нужны, так как у индуктивностей имеется самостоятельное пассивное сопротивление, и имеется естественная диссипация и нелинейность реального транзистора, которая обеспечивает ограниченность амплитуды колебаний.

Экспериментальная проверка возможности формирования близких по форме хаотических радиоимпульсов и их воспроизведения разными экземплярами генератора осуществлялась на стенде (Рис. 4) в соответствии со схемой на Рис. 4а.

Подача питания на генераторы хаотических колебаний реализована через общий для всех генераторов вход питания  $V_E$ , от которого питание подводится на каждый генератор в отдельности. Длина проводников питания, соединяющих общий для всех генераторов вход по питанию со входом питания каждого генератора в отдельности, была выбрана равной для обеспечения совпадения момента времени включения генераторов. Постоянное питание с напряжением  $V_E$ , подаваемое от стабилизированного источника



питания, модулировалось ключами  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  и  $M_4$  под управлением модулирующего сигнала  $S(t)$  так, что подача питания  $V_E$  на генератор осуществляется, если  $s(t) = 0$ , и питание на генератор не подается, если  $s(t) = 1$ .



(b)

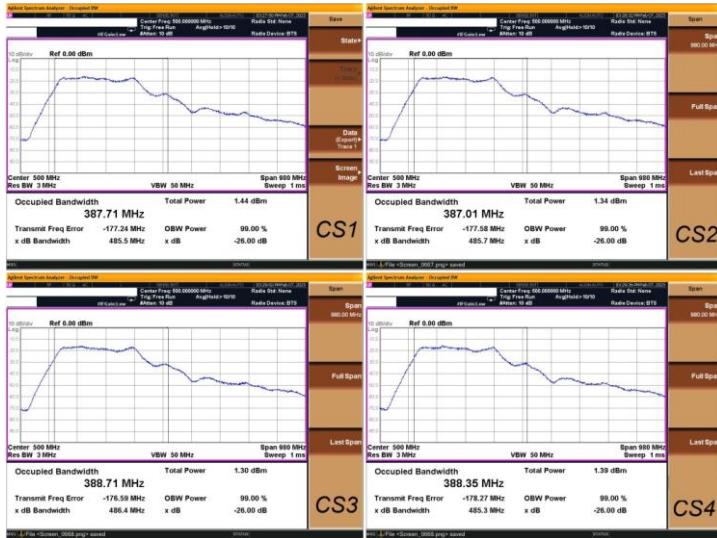
Рис. 4. а — Схема стенда:  $S(t)$  модулирующий сигнал,  $V_E$  — напряжение питания,  $M_1...M_4$  — модуляторы питания,  $CS_1...CS_2$  — генераторы хаоса,  $V_R^{(1)}, V_R^{(2)}, V_R^{(3)}, V_R^{(4)}$  — выходной сигнал генераторов,  $OSC$  — 4-канальный осциллограф; б — фото экспериментального стенда.

Fig. 4. a — Bench layout:  $S(t)$  modulating signal,  $V_E$  — supply voltage,  $M_1...M_4$  — power supply modulators,  $CS_1...CS_2$  — chaos generators,  $V_R^{(1)}, V_R^{(2)}, V_R^{(3)}, V_R^{(4)}$  — generator output signal,  $OSC$  — 4-channel oscilloscope; б — photo of the experimental stand

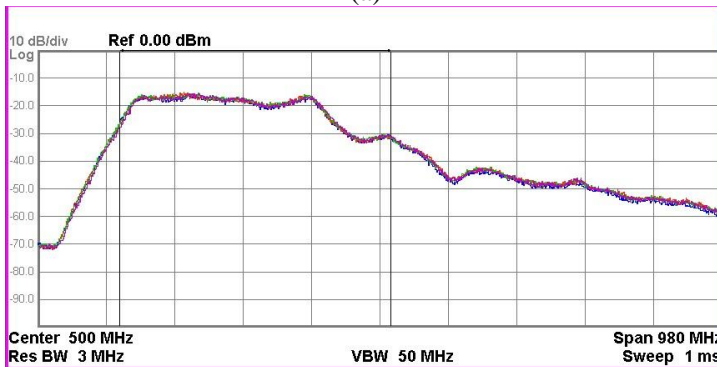
Варьирование напряжения питания  $V_E$  дает возможность варьировать режим колебаний генератора. Выходы  $V_R^{(1)}, V_R^{(2)}, V_R^{(3)}, V_R^{(4)}$  от каждого генератора соединялись коаксиальным кабелем с 4-х канальным осциллографом.

#### 4. Режим постоянной генерации

При постоянной подаче питания генераторы работают в непрерывном режиме и формируют хаотический сигнал со спектром мощности, изображенным на Рис. 5. Мощность сигнала каждого генератора составляет 1,4 мВт при напряжении питания 3,6 В и потребляемом токе 50 мА.



(a)



(b)

Рис. 5. а – спектры мощности генераторов  $CS_1$ ,  $CS_2$ ,  $CS_3$ ,  $CS_4$  для напряжения питания  $V_E = 3.6$  В (спектроанализатор Agilent 9444N); б – те же спектры мощности генераторов в сравнении друг с другом: желтый –  $CS_1$ , зеленый –  $CS_2$ , красный –  $CS_3$ , синий –  $CS_4$ .

Fig. 5. а – power spectra of generators  $CS_1$ ,  $CS_2$ ,  $CS_3$ ,  $CS_4$  for supply voltage  $V_E = 3.6$  V (spectrum analyzer Agilent 9444N); б – the same power spectra of the generators in comparison with each other: yellow –  $CS_1$ , green –  $CS_2$ , red –  $CS_3$ , blue –  $CS_4$

Сравнение спектров мощности сигналов от генераторов (Рис. 5а) показывает, что они с высокой степенью точности совпадают (Рис. 5б), что свидетельствует о хорошей повторяемости генераторов.

## 5. Формирование близких по форме хаотических радиоимпульсов

Ниже приводятся результаты по формированию близких по форме хаотических радиоимпульсов в экспериментальном макете. Механизм и способ формирования близких по форме импульсов, которые рассматриваются в данной работе, основан на модуляции питания генератора видеосигналом [56—58].

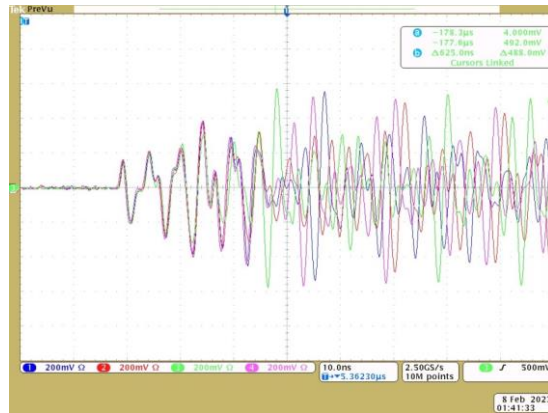
В случае воздействия видеоимпульсами, которые скачкообразно включают и выключают питание, генератор скачкообразно переводится из режима «покоя» в режим хаотической генерации. В режиме «покоя» динамическая система находится в устойчивом положении равновесия. При скачкообразном переводе системы из состояния покоя в режим генерации колебания каждый раз будут развиваться приблизительно с одних и тех начальных условий, благодаря этому будет обеспечиваться воспроизводимость сигнала на начальном участке колебаний. Отсюда следует, что система будет генерировать хаотические радиоимпульсы, начальные участки у которых будут близки друг другу.

Расчеты показывают, что такая ситуация имеет место и для рассматриваемого в данной работе генератора. В случае коротких модулирующих импульсов и достаточно больших межимпульсных интервалов, на длительности которых система имеет возможность релаксировать к устойчивому положению равновесия (состоянию покоя), система будет стартовать по приходу очередного модулирующего импульса с одних и тех же начальных условий. В результате чего в системе на рис. 1 будут воспроизводиться начальные участки импульсов.

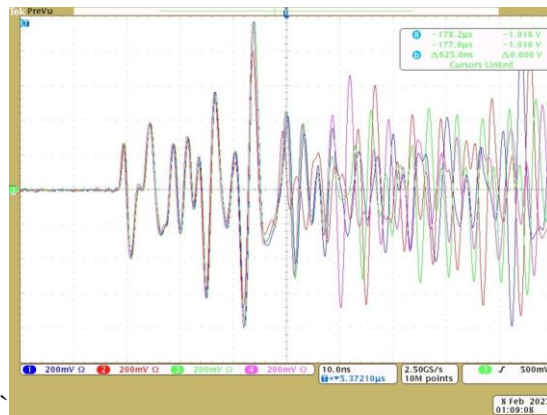
Демонстрация возможности по формированию близких по форме хаотических радиоимпульсов и их сравнение проводилось для значений напряжения питания генераторов  $V_E = 2,2$  В и  $V_E = 3,6$  В. Изображение экрана осциллографа с сигналами  $V_R^{(1)}$ ,  $V_R^{(2)}$ ,  $V_R^{(3)}$ ,  $V_R^{(4)}$  от генераторов  $CS_1$ ,  $CS_2$ ,  $CS_3$ ,  $CS_4$  представлены на Рис. 6. На них изображены начальные участки одного из импульсов от каждого из четырех генераторов.

Для установления степени повторяемости формы начального участка хаотических радиоимпульсов, формируемых конкретным генератором, проводилось прямое сравнение этих участков (использовалась возможность осциллографа оцифровывать сигналы с частотой оцифровки 2,5 ГГц.). Из сигнала (последовательности хаотических радиоимпульсов), формируемо-

го каждым генератором, выделялись фрагменты с начальными участками импульсов, и эти фрагменты накладывались друг на друга.



(a)



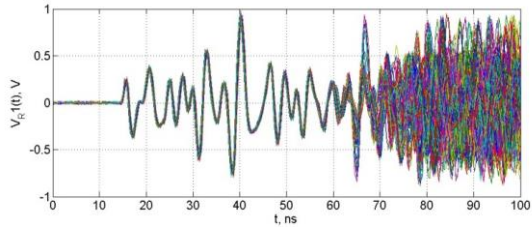
(b)

Рис. 6. Снимки экрана осциллографа с реализациями начальных участков хаотических радиоимпульсов от четырех различных генераторов для напряжения питания генераторов (a)  $V_E = 2,2$  В и (b)  $V_E = 3,6$  В.

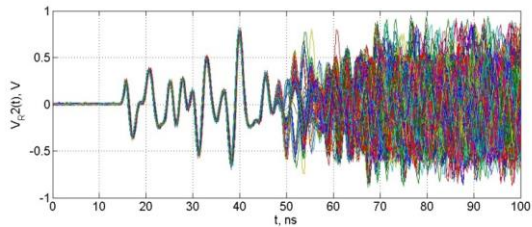
Fig. 6. Screen shots of the oscilloscope with realizations of the initial sections of chaotic radio pulses from four different generators for the generator supply voltage (a)  $V_E = 2.2$  V and (b)  $V_E = 3.6$  V

Результаты сравнения показаны на Рис. 7, на котором приведены реализации 1000 импульсов от каждого генератора, совмещенные по времени их начала для  $V_E = 3,6$  В. Имеется возможность убедиться, что начальные формы импульсов совпадают как в сигнале от одного генератора, так и в сигналах, формируемых разными экземплярами генераторов. Длительность совпадающих участков составляет около  $\sim 35$  нс.

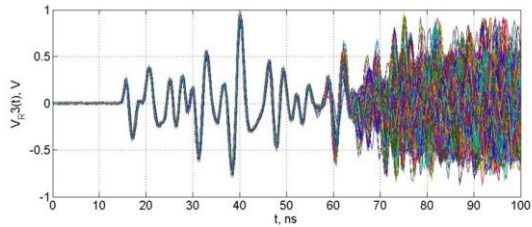
Таким образом, подавая в данном случае на вход питания генератора хаоса видеоимпульсы с длительностью  $\sim 35$  нс, имеется возможность повторять (воспроизводить) форму импульсов и изменять эту форму, меняя амплитуду питающих видеоимпульсов.



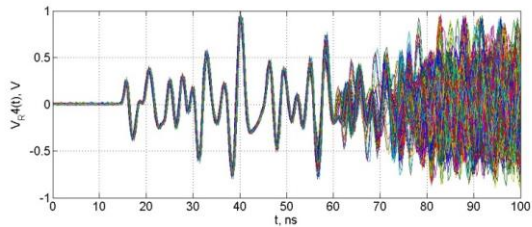
(a)



(b)



(c)



(d)

Рис. 7. Формы начальных участков 1000 импульсов от генераторов CS1 (a), CS2 (b), CS3 (c), CS4 (d), напряжение питания  $V_E = 3,6$  В.

Fig. 7. Shapes of the initial sections of 1000 pulses from generators CS1 (a), CS2 (b), CS3 (c), CS4 (d), supply voltage  $V_E = 3.6$  V

## 6. Управление формой импульсов

Здесь рассматривается подход к управлению формой импульсов, основанный на двух дополняющих друг друга свойствах: возможности воспроизведения близких по форме колебаний на начальном участке импульсов и на экспоненциальной неустойчивости хаотической траектории по отношению к возмущениям. Объединение этих двух качеств позволяет формировать импульсы, имеющие различную форму начального участка импульсов (при различных напряжениях питания генераторов), которая может воспроизводиться от импульса к импульсу (если амплитуда напряжения питания сохраняется от импульса к импульсу).

Формирование одинаковых импульсов с различной формой достигается за счет модуляции питания генератора видеоимпульсами, длительность которых меньше или равна длительности повторяющейся от импульса к импульсу их начальной части. Выбор той или иной амплитуды видеоимпульсов при этом позволяет управлять формой хаотических радиоимпульсов.

В эксперименте на входы питания генераторов подавались видеоимпульсы питания длительностью 28 нс (скважность), с напряжением 3,6 В и 5 В.

В результате были получены импульсы двух разных форм, полностью воспроизводимые от импульса к импульсу, как одним генератором, так и разными экземплярами генераторов (Рис. 8).

## 7. Заключение

Идея применения свойств хаотических динамических систем для формирования сигналов различной формы сохраняет популярность с момента появления в радиотехнике генераторов хаотических колебаний. По сути, основной круг возможных идей по использованию хаотических динамических систем для беспроводной связи был обозначен в самом начале процесса исследований, после вхождения понятий и концепций динамического хаоса в обиход радиотехнических систем. Однако эти идеи так или иначе носили исключительно принципиальный характер, и сравнительно редко доводились до уровня конкретных реализаций (часть из них перечислена во введении), которые могли бы составить практически значимую конкуренцию существующим системам.

Если говорить о хаотических сигналах, генерируемых цифровыми системами, то неизбежно сравнение их характеристик с характеристиками регулярных цифровых сигналов, предназначенных для расширения спектра и для реализации приема с накоплением (функции Уолша, последовательности Голда,  $m$ -последовательности), которые уже хорошо знакомы

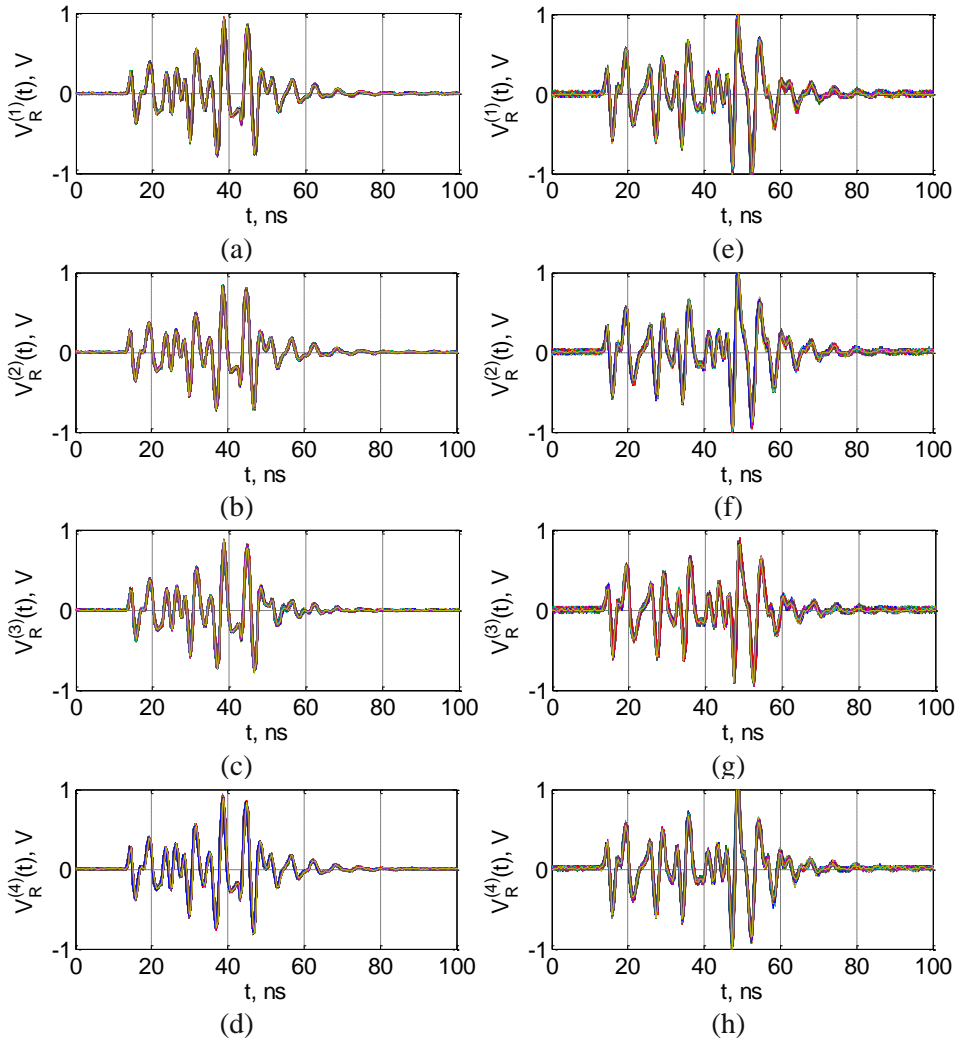


Рис. 8. Радиопульсы, формируемые генераторами хаотических колебаний под управлением видеоимпульсов питания длительностью 28 нс. На а, б, с, д изображены наложенные друг на друга 1000 импульсов от генераторов CS1, CS2, CS3, CS4, соответственно, (амплитуда видеоимпульсов питания  $V_E = 3,6$  В). На рисунках е, ф, г, h — наложенные друг на друга 1000 импульсов от генераторов CS1, CS2, CS3, CS4, соответственно, (амплитуда видеоимпульсов питания  $V_E = 5$  В).

Fig. 8. Radio pulses generated by generators of chaotic oscillations under the control of video power pulses with a duration of 28 ns. Figures a, b, c, d show 1000 pulses superimposed on each other from generators CS1, CS2, CS3, CS4, respectively (amplitude of power video pulses  $V_E = 3.6$  V). Figures e, f, g, h show 1000 pulses superimposed on each other from generators CS1, CS2, CS3, CS4, respectively (amplitude of power video pulses  $V_E = 5$  V)

специалистам, и которые обладают требуемыми сигнальными характеристиками. Поэтому прямое противопоставление цифровых систем генерации хаотических сигналов, традиционным цифровым системам шумоподобных сигналов не всегда в пользу первых.

В этой связи аналоговый способ формирования сигналов с неповторяющейся (нерегулярной) формой в СВЧ диапазоне имеет естественное преимущество перед цифровыми методами генерации, так как такие сигналы не требуют их переноса на радиочастоту. При этом форма этих сигналов зависит только от напряжения питания благодаря чувствительности хаотической траектории к начальным условиям.

Предложенный в статье способ генерации представляет интерес для использования в простых аналоговых устройствах, в которых не целесообразно применять энергозатратную цифровую обработку и цифровой синтез сигналов, но желательно иметь возможность генерации сигнала сложной формы для организации накопления и когерентного приема.

В свою очередь возможность воспроизведения формы сигналов непосредственно в СВЧ диапазоне создает предпосылки для разработки прямо-передающих систем, основанных на когерентном сложении сигналов в точке приема (за счет когерентного во времени излучения) и на их когерентной обработке приемником. Идея когерентного сложения сигналов находит все больше конкретных примеров реализации при создании беспроводных систем различного назначения. Управление формой сигнала через единственный параметр (питание) фактически дает возможность реализации когерентного излучения от нескольких источников хаотических колебаний, которые управляются цифровым образом. Это, в свою очередь, открывает некоторые возможности по формированию заданной диаграммы направленности излучения в задачах направленной передачи информации при помощи хаотических сигналов. Полученные в этой работе результаты позволяют сделать основанный на экспериментальных данных вывод, что когерентная обработка (излучение и прием) также принципиально доступна для СШП сигналов, полученных при помощи хаотических автоколебательных систем.

Генераторы хаоса могут играть роль универсальных источников, при помощи которых можно получать СШП сигналы СВЧ диапазона различной формы. При этом немаловажным фактом является то, такие сигналы формируются сразу в требуемом диапазоне частот, без необходимости дополнительных операций по их переносу в требуемый частотный диапазон. Это крайне полезно при создании источников колебаний сложной формы не только в СВЧ диапазоне, но также в мм- и ТГц диапазоне частот, где основные принципы формирования хаотических колебаний сохраняются.



В итоге, в работе показана практическая возможность управляемого формирования СШП колебаний при помощи генераторов хаотических колебаний за счет использования фундаментального свойства хаотических динамических систем — неустойчивости хаотических траекторий. Предложенный метод позволяет формировать колебания разной формы естественным для радиотехники образом: путем варьирования напряжения питания генератора хаоса. Предложен и экспериментально продемонстрирован способ воспроизведения близких по форме хаотических радиоимпульсов. Это качество открывает возможность применения хаотических генераторов для создания методов когерентного излучения и приема хаотических радиоимпульсов.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет средств гранта РФФИ 23-29-00297, <https://rscf.ru/project/23-29-00297/>

### Список литературы

1. Liuqing Y., Giannakis G. B. Ultra-wideband communications : An idea whose time has come // *IEEE Signal Process. Mag.* 2004. Т. 6. С. 26—54.
2. Niemelä V., Haapola J., Hämäläinen M., Iinatti J. An Ultra Wideband Survey : Global Regulations and Impulse Radio Research Based on Standards // *IEEE Communications Surveys Tutorials.* 2017. Т. 19, № 2. С. 874—890.
3. Breed G. A summary of FCC rules for ultra wideband communications // *High Freq. Electron.* 2005. Т. 4, № 1. С. 42—44.
4. Mandke K., Nam H., Yerramneni L., Zuniga C., Rappaport T. The Evolution of Ultra Wide Band Radio for Wireless Personal Area Network // *High Freq. Electron.* 2003. № 5. С. 22—32.
5. IEEE 802.15 WPAN High Rate Alternative PHY Task Group 3a (TG3a). Available online: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html> (accessed on 24 January 2023).
6. IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011); IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Press : New York City, NY, USA, 2016. 709 c.
7. IEEE Std 802.15.6-2012; IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.6: Wire-less Body Area Networks. IEEE Press : New York City, NY, USA, 2012. 271 c.
8. IEEE Std 802.15.4z-2020 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2020); IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks—Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. IEEE Press : New York City, NY, USA, 2020. 174 c.
9. Stocker M. et al. On the Performance of IEEE 802.15. 4z-Compliant Ultra-Wideband Devices // 2022 Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Systems and Internet of Things (CPS-IoTBench). IEEE, 2022. С. 28—33.
10. Chen H. et al. A 4-to-9 GHz IEEE 802.15. 4z-Compliant UWB Digital Transmitter with Reconfigurable Pulse-Shaping in 28nm CMOS // 2022 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). IEEE, 2022. С. 99—102.

11. Apple U1 TMKA75 Ultra Wideband (UWB) Chip Analysis.  
Available online: <https://www.techinsights.com/blog/apple-u1-tmka75-ultra-wideband-uwb-chip-analysis> (accessed on 24 January 2023).
12. What Is Ultra-Wideband, and How Does It Work?  
Available online: <https://www.smartprix.com/bytes/phones-with-uwb-ultrawideband-connectivity/> (accessed on 24 January 2023).
13. Tam W. M., Lau F. C. M., Tse C. K. *Digital Communications With Chaos : Multiple Access Techniques and Performance Evaluation*. Oxford, U.K. : Elsevier Science, 2010. 258 с.
14. Messaadi M. et al. GoF Based Chaotic On-Off Keying: A New Non-Coherent Modulation for Direct Chaotic Communication // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2021. Т. 66, Suppl 2. С. S194—S200.
15. *Chaotic Signals in Digital Communications*, 1<sup>st</sup> ed.; Eisenkraft M., Attux R., Suyama R., Eds.; Boca Raton : CRC Press, 2014.
16. Kaddoum G. Wireless chaos-based communication systems : A comprehensive survey // *IEEE Access*. 2016. Т. 4. С. 2621—2648.
17. Quyen N. X., Van Yem V., Hoang T. M. Chaotic modulation based on the combination of CPM and CPWM // *Proceedings of the Joint INDS'11 & ISTET'11*. IEEE, 2011. С. 1—6.
18. Munirathinam R. et al. Chaotic Non-Coherent Pulse Position Modulation Based Ultra-Wideband Communication System // *2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. IEEE, 2021. С. 1—6.
19. Onunkwo U., Li Y. On the optimum pulse-position modulation index for ultra-wideband communication // *Proceedings of the IEEE 6<sup>th</sup> Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies : Frontiers of Mobile and Wireless Communication*. IEEE, 2004. Т. 1. С. 77—80.
20. Chien T. I. et al. Design of multiple-accessing chaotic digital communication system based on Interleaved Chaotic Differential Peaks Keying (I-CDPK) // *2008 6<sup>th</sup> International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*. IEEE, 2008. С. 638—642.
21. Hong Y. P., Jin S. Y., Song H. Y. Coded N-ary PPM UWB impulse radio with chaotic time hopping and polarity randomization // *2007 3<sup>rd</sup> International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications*. IEEE, 2007. С. 252—256.
22. Yao Z. J. et al. Non-crosstalk real-time ultrasonic range system with optimized chaotic pulse position-width modulation excitation // *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*. IEEE, 2008. С. 729—732.
23. Zhang L. et al. A new pulse modulation method for underwater acoustic communication combined with multiple pulse characteristics // *2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*. IEEE, 2018. С. 1—6.
24. Yang H., Jiang G. P. Delay-variable synchronized chaotic pulse position modulation for ultra-wide bandwidth communication // *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*. IEEE, 2006. Т. 4. С. 2692—2694.
25. Rulkov N. F. et al. Digital communication using chaotic-pulse-position modulation // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 2001. Т. 48, № 12. С. 1436—1444.
26. Quyen N. X. et al. Digital communication using MxN-ary chaotic pulse width-position modulation // *The 2012 International Conference on Advanced Technologies for Communications*. IEEE, 2012. С. 362—366.
27. Zhu Q., Zou C., Jia Z. Performance Analysis of Ultra Wideband Communication System with Time-Hopping M-ary Biorthogonal Pulse Position Modulation // *2006 First International Conference on Communications and Networking in China*. IEEE, 2006. С. 1—6.

28. Tang G. et al. A hybrid spread spectrum communication method based on chaotic sequence // 2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). IEEE, 2021. C. 1—5.
29. Chen Z., Zhang L., Wu Z. NGD Analysis of Turtle-Shape Microstrip Circuit // IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS II-EXPRESS BRIEFS. 2020. T. 67, №. 11. C. 2492—2496.
30. Erkucuk S., Kim D. I. Combined M-ary code shift keying/binary pulse position modulation for ultra wideband communications // IEEE Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. IEEE, 2004. T. 2. C. 804—808.
31. Liu C., Cheng J., Zhang R. An orthogonal mixed chaotic spread spectrum algorithm for satellite communication // 2019 12<sup>th</sup> International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). IEEE, 2019. T. 2. C. 235—240.
32. Manikandan M. S. K. et al. A Novel Pulse Based Ultrawide Band System Using Chaotic Spreading Sequences // 2007 2<sup>nd</sup> International Conference on Communication Systems Software and Middleware. IEEE, 2007. C. 1—5.
33. Kotti A. et al. Asynchronous DS-UWB communication using spatiotemporal chaotic waveforms and sequences // 2009 First International Conference on Communications and Networking. IEEE, 2009. C. 1—5.
34. Yuan G. et al. Enhancing the security of chaotic direct sequence spread spectrum communication through WFRFT // IEEE Communications Letters. 2021. T. 25, № 9. C. 2834—2838.
35. Ren H. P., Bai C. Kong Q., Baptista M. S., Grebogi C. A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication // Physica A. 2017. T. 478. C. 77—92.
36. Ren H. P. et al. Cross correction and chaotic shape-forming filter based quadrature multi-carrier differential chaos shift keying communication // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. T. 70, № 12. C. 12675—12690.
37. Yao J. L. et al. Chaos-based wireless communication resisting multipath effects // Physical Review E. 2017. T. 96, № 3. C. 032226.
38. Song D., Liu J., Wang F. Statistical analysis of chaotic stochastic properties based on the logistic map and Fibonacci sequence // Proceedings of 2013 2<sup>nd</sup> International Conference on Measurement, Information and Control. IEEE, 2013. T. 1. C. 611—614.
39. Zhang J., Cheng J., Li G. Chaotic spread-spectrum sequences using chaotic quantization // 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. IEEE, 2007. C. 40—43.
40. Chengquan A., Tingxian Z. Design of chaotic spread-spectrum sequences with good correlation properties for DS/CDMA // 2003 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2003. T. 3. C. III—III.
41. Velavan P., Santhi M. Design and FPGA realization of MC-CDMA system using pseudo chaotic sequence generator // 2014 International Conference on Communication and Signal Processing. IEEE, 2014. C. 498—502.
42. Xiao L., Xuan G., Wu Y. Research on an improved chaotic spread spectrum sequence // 2018 IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA). IEEE, 2018. C. 420—423.
43. Rastogi U. et al. Optimal chaotic sequences for DS-CDMA using genetic algorithm // 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). IEEE, 2017. C. 900—904.
44. Rui X. U. E., Xiong Y., Cheng Q. A novel ranging code based on improved logistic map chaotic sequences // 2019 21<sup>st</sup> International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2019. C. 11—15.

45. Rao K. D., Raju B. Improved robust multiuser detection in non-Gaussian channels using a new M-estimator and spatiotemporal chaotic spreading sequences // APCCAS 2006-2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. IEEE, 2006. C. 1729—1732.
46. Sedaghatnejad S., Farhang M. Detectability of chaotic direct-sequence spread-spectrum signals // IEEE Wireless Communications Letters. 2015. T. 4, № 6. C. 589—592.
47. Xiao L., Xuan G., Wu Y. Blind estimation of chaotic spread spectrum sequences by neural network // 2018 11<sup>th</sup> International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). IEEE, 2018. C. 1—9.
48. Hounkpevi F. O., Yaz E. E. Chaotic-Pulse-Position Modulation: A third party intrusion scheme using Kalman Filter // 2004 IEEE Electro/Information Technology Conference. IEEE, 2004. C. 20—25.
49. Dmitriev B. S. et al. Ultra wide band UHF chaotic impulse generator // IVESC 2012. IEEE, 2012. C. 91—92.
50. Fierro G. V., Flores-Verdad G. E. A CMOS low complexity gaussian pulse generator for ultra wideband communications // 2009 52<sup>nd</sup> IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems. IEEE, 2009. C. 70—73.
51. Dmitriev B. S. et al. KLYSTRON-Generator of Chaotic Radioimpulses // 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference held Jointly with 2006 IEEE International Vacuum Electron Sources. IEEE, 2006. C. 105—106.
52. Wang Y. et al. Method of chaotic pulse sequence produced by continuous chaotic system // 2008 9<sup>th</sup> International Conference on Signal Processing. IEEE, 2008. C. 1892—1895.
53. Haimovich A. M., Blum R. S., Cimini L. J. MIMO Radar with Widely Separated Antennas // IEEE Signal Process Mag. 2008. T. 25, № 1. C. 116—129.
54. Jemaa Z. B., Belghith S. Chaotic sequences with good correlation properties for MIMO Radar application // 2016 24<sup>th</sup> International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). IEEE, 2016. C. 1—5.
55. Zeng G. et al. Design of a Chaotic Index Modulation Aided Frequency Diverse Array Scheme for Directional Modulation // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023. C. 1—6.
56. Dmitriev A. S., Efremova E. V., Kuz'min L. V. Chaotic pulse trains generated by a dynamical system driven by a periodic signal // Technical physics letters. 2005. T. 31. C. 961—963.
57. Dmitriev, A. S., Efremova E. V., Kuz'min L. V., Atanov N. V. A train of chaotic pulses generated by a dynamic system driven by an external (periodic) force // J. Commun. Technol. Electron. 2006. T. 51. C. 557—567.
58. Dmitriev A., Efremova E., Kuzmin L., Atanov N. Forming pulses in non-autonomous chaotic oscillator // Int. J. Bifurc. Chaos. 2007. T. 17, № 10. C. 3443—3448.
59. Dmitriev A. S., Kyarginsky B. Y., Panas A. I., Starkov S. O. Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band // Int. J. Bifurc. Chaos. 2003. T. 6. C. 1495—1507.
60. Dmitriev A. S., Zakharchenko K. V., Puzikov D. Y. Introduction to the Theory of Direct Chaotic Data Transmission // Journal of communications technology & electronics. 2003. T. 48, № 3. C. 293—302.
61. Andreyev Y. V. et al. Qualitative theory of dynamical systems, chaos and contemporary wireless communications // International journal of bifurcation and chaos. 2005. T. 15. № 11. C. 3639—3651.
62. Dmitriev A. S. et al. Active wireless ultrawideband networks based on chaotic radio pulses // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. T. 62, № 4. C. 380—388.

63. Dmitriev A. S. et al. Self-organizing ultrawideband wireless sensor network // 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINK-HROINFO). IEEE, 2017. С. 1—6.
64. Kuzmin L. V., Grinevich A. V., Ushakov M. D. An experimental investigation of the multipath propagation of chaotic radio pulses in a wireless channel // Technical Physics Letters. 2018. Т. 44. С. 726—729.
65. Kuz'min L. V., Grinevich A. V. Method of blind detection of ultrawideband chaotic radio pulses on the background of interpulse interference // Technical Physics Letters. 2019. Т. 45. С. 831—834.
66. Kennedy M. P. Chaos in the Colpitts oscillator // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1994. Т. 41, № 11. С. 771—774.
67. Dmitriev A. S. et al. Generator of microwave chaotic oscillations based on a self-oscillating system with 2.5 degrees of freedom // Journal of Communications Technology and Electronics. 2007. Т. 52. С. 1137—1145.
68. Dmitriev A. S., Efremova E. V., Rumyantsev N. V. A microwave chaos generator with a flat envelope of the power spectrum in the range of 3–8 GHz // Technical Physics Letters. 2014. Т. 40. С. 48—51.
69. Efremova E. V., Dmitriev A. S. Ultrawideband microwave 3–7 GHz chaotic oscillator implemented as SiGe integrated circuit // Emergent Complexity from Nonlinearity, in Physics, Engineering and the Life Sciences : Proceedings of the XXIII International Conference on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, Como, Italy, 7–11 September 2015. Cham : Springer International Publishing, 2017. С. 71—80.

### Информация об авторах

**Кузьмин Лев Викторович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва. 0000-0003-0466-881X.

**Ефремова Елена Валериевна**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва. 0000-0001-9560-3469.

**Ицков Вадим Викторович**, младший научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва. ORCID 0000-0001-9154-6401.

**Владыка Павел Александрович**, инженер ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва. ORCID 0009-0002-7080-9350.

# An Experiment on the Generation of Microwave Chaotic Radio Pulses with Reproducible Waveform

L. V. Kuzmin, E. V. Efremova, V. V. Itskov, and P. A. Vladyka

*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS  
Mokhovaya str., 11, bldg. 7, Moscow, 125009, Russian Federation  
lvkuzmin@gmail.com*

Received: May 19, 2023  
Peer-reviewed: May 31, 2023  
Accepted: May 31, 2023

**Abstract:** *A method for generating chaotic radio pulses using an analog generator of chaotic oscillations is proposed. The method makes it possible to reproduce the pulse waveform both by the same generator instance and by different instances of structurally identical generators. The pulse waveforms are controlled by the supply voltage of the generator. To prove the concept an experimental test-bed consisting of four identical generators of 100–500 MHz band has been developed. The proposed method can be applied both for coherent reception of chaotic UWB oscillations in the microwave band and for beamforming.*

**Keywords:** *ultra-wide band chaotic radio-pulses, ultra-wide band signals, chaotic signals, coherent emission of chaotic signals.*

**For citation (IEEE):** L. V. Kuzmin, E. V. Efremova, V. V. Itskov, and P. A. Vladyka, “An Experiment on the Generation of Microwave Chaotic Radio Pulses with Reproducible Waveform,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 139–165, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.13. (In Russ.).

## References

- [1] Y. Liuqing and G. B. Giannakis, “Ultra-wideband communications : An idea whose time has come,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 6, pp. 26–54, 2004, doi: 10.1109/MSP.2004.1359140.
- [2] V. Niemelä, J. Haapola, M. Hämäläinen and J. Iinatti, “An Ultra Wideband Survey : Global Regulations and Impulse Radio Research Based on Standards,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 874–890, second-quarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2634593.
- [3] G. Breed, “A summary of FCC rules for ultra wideband communications,” *High Freq. Electron.*, vol. 4, no.1, pp. 42–44, 2005.
- [4] K. Mandke, H. Nam, L. Yerramneni, C. Zuniga, and T. Rappaport, “The Evolution of Ultra Wide Band Radio for Wireless Personal Area Network,” *High Freq. Electron.* No. 5, pp. 22–32, 2003.
- [5] IEEE 802.15 WPAN High Rate Alternative PHY Task Group 3a (TG3a). Available online: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html> (accessed on 24 January 2023).
- [6] IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011); IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Press : New York City, NY, USA, 2016; pp. 1–709.

- [7] IEEE Std 802.15.6-2012; IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.6: Wire-less Body Area Networks. IEEE Press: New York City, NY, USA, 2012; pp. 1–271.
- [8] IEEE Std 802.15.4z-2020 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2020); IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks—Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. IEEE Press: New York City, NY, USA, 2020; pp. 1–174.
- [9] M. Stocker, et al. “On the Performance of IEEE 802.15. 4z-Compliant Ultra-Wideband Devices,” *2022 Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Systems and Internet of Things (CPS-IoTBench)*. IEEE, pp. 28—33, 2022.
- [10] H. Chen, et al. “A 4-to-9GHz IEEE 802.15.4z-Compliant UWB Digital Transmitter with Reconfigurable Pulse-Shaping in 28nm CMOS,” in *Proceedings of the 2022 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, Denver, CO, USA, 19–21 June 2022; pp. 99–102.
- [11] Apple U1 TMKA75 Ultra Wideband (UWB) Chip Analysis. Available online: <https://www.techinsights.com/blog/apple-u1-tmka75-ultra-wideband-uwb-chip-analysis> (accessed on 24 January 2023).
- [12] What Is Ultra-Wideband, and How Does It Work? Available online: <https://www.smartprix.com/bytes/phones-with-uwb-ultrawideband-connectivity/> (accessed on 24 January 2023).
- [13] W. M. Tam, F. C. M. Lau, and C. K. Tse, *Digital Communications With Chaos : Multiple Access Techniques and Performance Evaluation*. Oxford, U.K. : Elsevier Science, 2010.
- [14] M. Messaadi et al. “GoF Based Chaotic OnOff Keying: A New Non-Coherent Modulation for Direct Chaotic Communication,” *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 66 (Suppl. 2), pp. S194–S200, 2021.
- [15] *Chaotic Signals in Digital Communications*, 1<sup>st</sup> ed. ; Eisenkraft, M., Attux, R., Suyama, R., Eds. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2014.
- [16] G. Kaddoum, “Wireless Chaos-Based Communication Systems : A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2621–2648, 2016.
- [17] N. X. Quyen, V. Van Yem and T. M. Hoang, “Chaotic modulation based on the combination of CPM and CPWM,” *Proceedings of the Joint INDS'11 ISTET'11*, Klagenfurt am Wörthersee, Austria, pp. 1–6, 2011, doi: 10.1109/INDS.2011.6024801.
- [18] R. Munirathinam, A. Aboltins, D. Pikulins and J. Grizans, “Chaotic Non-Coherent Pulse Position Modulation Based Ultra- Wideband Communication System,” *2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, Riga, Latvia, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1109/MTTW53539.2021.9607075.
- [19] U. Onunkwo and Ye Li, “On the optimum pulse-position modulation index for ultra-wideband communication,” *Proceedings of the IEEE 6<sup>th</sup> Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies : Frontiers of Mobile and Wireless Communication* (IEEE Cat. No.04EX710), Shang-hai, China, vol. 1, pp. 77–80, 2004, doi: 10.1109/CASSET.2004.1322921.
- [20] T. I. Chien, N. Z. Wang, T. L. Liao and S. B. Chang, “Design of multiple-accessing chaotic digital communication system based on Interleaved Chaotic Differential Peaks Keying (I-CDPK),” *2008 6<sup>th</sup> International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Graz, Austria, pp. 638–642, 2008, doi: 10.1109/CSNDSP.2008.4610717.
- [21] Y.-P. Hong, S.-Y. Jin and H.-Y. Song, “Coded N-ary PPM UWB Impulse Radio with Chaotic Time Hopping and Polarity Randomization,” *2007 3<sup>rd</sup> International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications*, Chengdu, China, pp. 252–256, 2007, doi: 10.1109/IWSDA.2007.4408370.

- [22] Z. -J. Yao, Q. -H. Meng, G. -W. Li and P. Lin, "Non-crosstalk real-time ultrasonic range system with optimized chaotic pulse position-width modulation excitation," *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*, Beijing, China, pp. 729–732, 2008, doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0174.
- [23] L. Zhang, J. Wang, J. Tao and S. Liu, "A New Pulse Modulation Method for Underwater Acoustic Communication Combined with Multiple Pulse Characteristics," *2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, Qingdao, China, pp. 1–6, 2018 doi: 10.1109/ICSPCC.2018.8567790.
- [24] H. Yang and G. P. Jiang, "Delay-Variable Synchronized Chaotic Pulse Position Modulation for Ultra-Wide Bandwidth Communication," *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, Guilin, China, pp. 2692–2694, 2006, doi: 10.1109/ICCCAS.2006.285225.
- [25] N. F. Rulkov, M. M. Sushchik, L. S. Tsimring and A. R. Volkovskii, "Digital communication using chaotic-pulse-position modulation," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 48, no. 12, pp. 1436–1444, Dec. 2001, doi: 10.1109/TCSI.2001.972850.
- [26] Nguyen Xuan Quyen, Vu Van Yem, Thang Manh Hoang and K. Kyamaky, "Digital communication using MxN-ary chaotic pulse width-position modulation," *2012 International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Ha Noi, Vietnam, pp. 362–366, 2012, doi: 10.1109/ATC.2012.6404294.
- [27] Q. Zhu, C. Zou and Z. Jia, "Performance Analysis of Ultra Wideband Communication System with Time-Hopping M-ary Biorthogonal Pulse Position Modulation," *2006 First International Conference on Communications and Networking in China*, Beijing, China, pp. 1–6, 2006, doi: 10.1109/CHINACOM.2006.344655.
- [28] G. Tang, L. Zhu, Q. Wu, Q. He and L. Yu, "A Hybrid Spread Spectrum Communication Method Based on Chaotic Sequence," *2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Dubai, United Arab Emirates, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1109/ISNCC52172.2021.9615817.
- [29] Z. Chen, L. Zhang and Z. Wu, "High Data Rate Discrete-Cosine-Spreading Aided M-Ary Differential Chaos Shift Keying Scheme With Low PAPR," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 11, pp. 2492–2496, Nov. 2020, doi: 10.1109/TCSII.2020.2980738.
- [30] S. Erkucuk and Dong In Kim, "Combined M-ary code shift keying/binary pulse position modulation for ultra wideband communications," *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'04*, Dallas, TX, USA, vol. 2, pp. 804–808, 2004, doi: 10.1109/GLOCOM.2004.1378071.
- [31] C. Liu, J. Cheng and R. Zhang, "An orthogonal mixed chaotic spread spectrum algorithm for satellite communication," *2019 12<sup>th</sup> International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, Hangzhou, China, pp. 235–240, 2019, doi: 10.1109/ISCID.2019.10137.
- [32] M. S. K. Manikandan, S. Ravikumar, V. Abhaikumar and S. J. Thiruvengadam, "A Novel Pulse Based Ultrawide Band System Using Chaotic Spreading Sequences," *2007 2<sup>nd</sup> International Conference on Communication Systems Software and Middleware*, Bangalore, India, pp. 1–5, 2007, doi: 10.1109/COMSWA.2007.382453.
- [33] A. Kotti, S. Meherzi, S. Marcos and S. Belghith, "Asynchronous DS-UWB communication using spatiotemporal chaotic waveforms and sequences," *2009 First International Conference on Communications and Networking*, Hammamet, Tunisia, pp. 1–5, 2009, doi: 10.1109/COMNET.2009.5373551.
- [34] G. Yuan, Z. Chen, X. Gao and Y. Zhang, "Enhancing the Security of Chaotic Direct Sequence Spread Spectrum Communication Through WFRFT," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 9, pp. 2834–2838, Sept. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3096388.



- [35] Hai-Peng Ren, Chao Bai, Qingju Kong, Murilo S. Baptista, and Celso Grebogi, "A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 478, pp. 77-92, 2017, doi: 10.1016/j.physa.2017.02.036.
- [36] H.-P. Ren, S.-L. Guo, C. Bai and X.-H. Zhao, "Cross Correction and Chaotic Shape-Forming Filter Based Quadrature Multi-Carrier Differential Chaos Shift Keying Communication," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 12, pp. 12675–12690, Dec. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3119176.
- [37] J.-L. Yao, C. Li, H.-P. Ren, and Celso Grebogi, "Chaos-based wireless communication resisting multipath effects," vol. 96, no. 3, Sep. 2017, doi: 10.1103/physreve.96.032226.
- [38] D. Song, J. Liu and Fang Wang, "Statistical analysis of chaotic stochastic properties based on the logistic map and Fibonacci sequence," *Proceedings of 2013 2<sup>nd</sup> International Conference on Measurement, Information and Control*, Harbin, China, pp. 611–614, 2013, , doi: 10.1109/MIC.2013.6758038.
- [39] Jian Zhang, Jian Cheng and Guangxia Li, "Chaotic spread-spectrum sequences using chaotic quantization," *2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, Xiamen, China, pp. 40–43, 2007, doi: 10.1109/ISPACS.2007.4445818.
- [40] An Chengquan and Zhou Tingxian, "Design of chaotic spread-spectrum sequences with good correlation properties for DS/CDMA," *2003 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Bangkok, Thailand, pp. III–III, 2003, doi: 10.1109/ISCAS.2003.1204966.
- [41] P. Velavan and M. Santhi, "Design and FPGA realization of MC-CDMA system using pseudo chaotic sequence generator," *2014 International Conference on Communication and Signal Processing*, Melmaruvathur, India, pp. 498–502, 2014, doi: 10.1109/ICCSP.2014.6949892.
- [42] L. Xiao, G. Xuan and Y. Wu, "Research on an improved chaotic spread spectrum sequence," *2018 IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA)*, Chengdu, China, pp. 420–423, 2018, doi: 10.1109/ICCCBDA.2018.8386553.
- [43] U. Rastogi, S. Anuradha, R. C. Shekar, S. Singh and P. S. H. Rao, "Optimal chaotic sequences for DS-CDMA using genetic algorithm," *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, India, pp. 900–904, 2017, doi: 10.1109/WiSPNET.2017.8299892.
- [44] R. Xue, Y. Xiong and Q. Cheng, "A Novel Ranging Code based on improved Logistic Map Chaotic Sequences," *2019 21<sup>st</sup> International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, PyeongChang, Korea (South), pp. 11–15, 2019, doi: 10.23919/ICACT.2019.8701898.
- [45] K. D. Rao and B. Raju, "Improved Robust Multiuser Detection in Non-Gaussian Channels Using a New M-Estimator and Spatiotemporal Chaotic Spreading Sequences," *APCCAS 2006 – 2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, Singapore, pp. 1729–1732, 2006, doi: 10.1109/APCCAS.2006.342131.
- [46] S. Sedaghatnejad and M. Farhang, "Detectability of Chaotic Direct-Sequence Spread-Spectrum Signals," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 6, pp. 589–592, Dec. 2015, doi: 10.1109/LWC.2015.2469776.
- [47] L. Xiao, G. Xuan and Y. Wu, "Blind Estimation of Chaotic Spread Spectrum Sequences by Neural Network," *2018 11<sup>th</sup> International Congress on Image and Signal Processing, Bio-Medical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, Beijing, China, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1109/CISPBMEI.2018.8633136.
- [48] F. O. Hounkpevi and E. E. Yaz, "Chaotic-Pulse-Position Modulation : A third party intrusion scheme using Kalman Filter," *2004 IEEE Electro/Information Technology Conference*, Milwaukee, WI, USA, pp. 20–25, 2004, doi: 10.1109/EIT.2004.4569361.
- [49] B. S. Dmitriev, J. D. Zharkov, V. N. Skorokhodov and S. A. Sadovnikov, "Ultra wide band UHF chaotic impulse generator," *IVESC 2012*, Monterey, CA, USA, pp. 91–92, 2012, doi: 10.1109/IVESC.2012.6264162.

- [50] G. V. Fierro and G. E. Flores-Verdad, "A CMOS low complexity Gaussian pulse generator for ultra wideband communications," *2009 52<sup>nd</sup> IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Cancun, Mexico, pp. 70–73, 2009, doi: 10.1109/MWSCAS.2009.5236151.
- [51] B. S. Dmitriev, Y. D. Zharkov, V. N. Skorokhodov and A. A. Biryukov, "KLYSTRON – Generator of Chaotic Radioimpulses," *2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference held Jointly with 2006 IEEE International Vacuum Electron Sources*, Monterey, CA, USA, pp. 105–106, 2006, doi: 10.1109/IVELEC.2006.1666206.
- [52] Youwei Wang, Liping Wang, Shuang Yu, Lei Zhang, Dongmei Yan and Yunhua Li, "Method of chaotic pulse sequence produced by continuous chaotic system," *2008 9<sup>th</sup> International Conference on Signal Processing*, Beijing, pp. 1892–1895, 2008, doi: 10.1109/ICOSP.2008.4697511.
- [53] A. M. Haimovich, R. S. Blum and L. J. Cimini, "MIMO Radar with Widely Separated Antennas," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 1, pp. 116–129, 2008, doi: 10.1109/MSP.2008.4408448.
- [54] Z. Ben Jemaa and S. Belghith, "Chaotic sequences with good correlation properties for MIMO radar application," *2016 24<sup>th</sup> International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Split, Croatia, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772127.
- [55] G. Zeng, Y. Liao, J. Wang and Y.-C. Liang, "Design of a Chaotic Index Modulation Aided Frequency Diverse Array Scheme for Directional Modulation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1–6, Jan. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3253926.
- [56] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, L. V. Kuz'min, "Chaotic Pulse Trains Generated by a Dynamical System Driven by a Periodic Signal," *Technical Physics Letters*, vol. 31, no. 11, p. 961–963, 2005, doi: <https://doi.org/10.1134/1.2136965>.
- [57] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, L. V. Kuz'min, and N. V. Atanov, "A train of chaotic pulses generated by a dynamic system driven by an external (periodic) force," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 51, no. 5, pp. 557–567, May 2006, doi: 10.1134/s1064226906050093.
- [58] A. Dmitriev, E. Efremova, L. Kuz'min, and N. Atanov, "Forming pulses in nonautonomous chaotic oscillator," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 17, no. 10, pp. 3443–3448, Oct. 2007, doi: 10.1142/s0218127407019184.
- [59] A. S. Dmitriev, B. Y. Kyarginsky, A. I. Panas, and S. O. Starkov, "Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 13, no. 6, 2003, pp. 1495–1507.
- [60] A. S. Dmitriev, K. V. Zakharchenko, and D. Y. Puzikov, "Introduction to the Theory of Direct Chaotic Data Transmission," *J. Commun. Technol. Electron*, vol. 48, no. 3, pp. 293–302, 2003.
- [61] Yu. V. Andreyev, A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, A. D. Khilinsky, L. V. Kuzmin, "Qualitative theory of dynamical systems, chaos and contemporary communications," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 15, no. 11, 2005, pp. 3639–3651.
- [62] A. S. Dmitriev, M. Yu. Gerasimov, V. V. Itzkov, V. A. Lazarev, M. G. Popov, and A. I. Ryzhov, "Active wireless ultrawideband networks based on chaotic radio pulses," *J. Commun. Technol. Electron*, vol. 62, no. 4, pp. 380–388, 2017.
- [63] A. S. Dmitriev, L. V. Kuzmin, V. A. Lazarev, A. I. Ryzhov, Yu. V. Andreyev, and M. G. Popov, "Self-organizing ultrawideband wireless sensor network," *Proceedings of the Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*, Kazan, Russia, pp. 1–6, 3–4 July 2017.
- [64] L. V. Kuzmin, A. V. Grinevich, and M. D. Ushakov, "An Experimental Investigation of the Multipath Propagation of Chaotic Radio Pulses in a Wireless Channel," *Tech. Phys. Lett*, vol. 44, pp. 726–729, 2018, doi: 10.1134/S1063785018080242.

- [65] L.V. Kuz'min and A. V. Grinevich, "Method of Blind Detection of Ultrawideband Chaotic Radio Pulses on the Background of Interpulse Interference," *Tech. Phys. Lett.*, vol. 45, pp. 831–834, 2019, doi: 10.1134/S1063785019080261.
- [66] M. P. Kennedy, "Chaos in the Colpitts Oscillator," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 41, no. 11, pp. 771–774, 1994.
- [67] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, N. A. Maksimov, and E. V. Grigor'ev, "Generator of microwave chaotic oscillations based on a self-oscillating system with 2.5 degrees of freedom," *J. Commun. Technol. Electron.* vol. 52, no. 10, 2007, pp. 1137–1145, Oct. 2007, doi: 10.1134/s1064226907100105.
- [68] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, and N. V. Rumyantsev, "A microwave chaos generator with a flat envelope of the power spectrum in the range of 3–8 GHz," vol. 40, no. 1, pp. 48–51, Feb. 2014, doi: 10.1134/s1063785014010180.
- [69] E. V. Efremova, and A. S. Dmitriev, "Ultrawideband Microwave 3–7 GHz Chaotic Oscillator Implemented as SiGe Integrated Circuit," in: Mantica, G., Stoop, R., Stramaglia, S. (eds) *Emergent Complexity from Nonlinearity, in Physics, Engineering and the Life Sciences. Springer Proceedings in Physics*, vol. 191, pp. 71–80, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-47810-4\_7.

### Information about the authors

**Lev V. Kuzmin**, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation, Moscow. ORCID 0000-0003-0466-881X.

**Elena V. Efremova**, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation, Moscow. ORCID 0000-0001-9560-3469.

**Vadim V. Itskov**, Junior researcher, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation, Moscow. ORCID 0000-0001-9154-6401.

**Pavel A. Vladyka**, Engineer, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation, Moscow. ORCID 0009-0002-7080-9350.