

Научная статья

УДК 621.396

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.33>

Формирователи псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца в средствах повышения эффективности функционирования систем передачи информации с OFDM

Ю. Р. Буткевич[✉], М. Ю. Зуев, С. С. Логинов, О. А. Сивинцева

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ,
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10
bytkevic@mail.ru[✉]

Аннотация. Представлены результаты моделирования системы передачи информации, использующей метод мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) и скремблированием формируемых сигналов. Для скремблирования используется формирователь псевдослучайных сигналов, построенный на основе системы Лоренца, подверженной квазирезонансным воздействиям. Приведены результаты влияния глубины модуляции параметров временной сетки динамической системы Лоренца на статистические характеристики псевдослучайных сигналов. Рассмотрено влияние глубины модуляции параметров временной сетки дискретно-нелинейной системы Лоренца на параметры энергетической эффективности и защищённости информации систем связи с OFDM для различных значений интервала выборки двоичных символов при формировании псевдослучайных сигналов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем передачи информации с OFDM в части статистического моделирования и генерации псевдослучайных сигналов.

Ключевые слова: псевдослучайный сигнал; OFDM; скремблирование сигналов; система Лоренца; статистические характеристики; глубина модуляции

Введение. Совершенствование радиосистем передачи информации с ортогональным частотным разделением каналов является одной из наиболее важных задач радиотехники. Всё большую актуальность приобретают вопросы повышения энергетической эффективности и информационной безопасности малогабаритных портативных устройств, а также вопросы снижения энергопотребления таких устройств.

Благодаря своей высокой спектральной эффективности большую популярность приобрели системы связи с ортогональным частотным разделением каналов. Однако такие системы связи обладают низкой энергетической эффективностью,

обусловленной высоким отношением пиковой мощности к средней мощности сигнала, называемым пик-фактором (PAPR). Высокий пик-фактор влечёт за собой необходимость применения выходного усилителя мощности с большим динамическим диапазоном, который имеет большое энергопотребление.

Известно достаточно большое количество методов снижения пик-фактора, таких как: амплитудное ограничение, кодирование, вероятностные методы, техника адаптивного предискажения, DFT-Spreading, инжектирование поднесущих и др. [1–6].

Метод амплитудного ограничения основывается на ограничении амплитуды

© Буткевич Ю. Р., Зуев М. Ю., Логинов С. С., Сивинцева О. А., 2022.

Для цитирования: Буткевич Ю. Р., Зуев М. Ю., Логинов С. С., Сивинцева О. А. Формирователи псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца в средствах повышения эффективности функционирования систем передачи информации с OFDM // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 1 (53). С. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.33>

сигнала до определённого уровня. Преимуществом данного метода является простота реализации, но при его использовании высока вероятность появления внутрисполосных и внеполосных помех, а также нарушения ортогональности между поднесущими. Данный метод включает в себя метод отсечения и фильтрации, метод оконного преобразования пиков и др. [1–3].

Метод блочного кодирования связан с выбором таких ключевых слов, которые уменьшают пик-фактор передаваемого сигнала. К недостаткам такого метода относятся: низкая скорость передачи данных, высокая сложность поиска лучших кодов и необходимость хранения больших таблиц для кодирования и декодирования [4–5].

Вероятностный метод заключается в скремблировании блоков входных данных символов OFDM и передаче одного из них с минимальным пик-фактором. Данный метод не подвержен влиянию внеполосного излучения, однако он не может гарантировать пик-фактор ниже указанного уровня. Вероятностный метод включает в себя такие алгоритмы, как: SLM (Selective Mapping), PTS (Partial Transmit Sequence), TR (Tone Reservation).

Метод адаптивного предсказания заключается в компенсировании нелинейного эффекта усилителя мощности в системах с OFDM. Он основывается на автоматическом изменении входного созвездия сигнала путём использования обратной связи [6].

Метод DFT-Spreading связан с использованием прямого дискретного преобразования Фурье, эквивалентного расширению спектра сигнала.

В данной работе используется вероятностный метод, заключающийся в скремблировании информации с известной псевдослучайной последовательностью. В качестве таких последовательностей могут быть рассмотрены М-последовательности, последовательности Голда, коды Касами, а также псевдослу-

чайные последовательности (ПСП), полученные на основе динамического хаоса. Однако М-последовательности, а также коды Голда, формируемые на их основе, имеют низкую скрытность, вследствие чего структура формирующих их линейных регистров с обратными связями может быть раскрыта по небольшому числу разведанных символов кода [7]. Динамический хаос характеризуется сложным и непредсказуемым поведением в простых по своей структуре системах дифференциальных уравнений [8–9]. Данные эффекты динамического хаоса могут быть использованы для формирования ПСП.

Цель работы – определение взаимосвязи статистических характеристик псевдослучайных сигналов, полученных на основе системы Лоренца, подверженной квазирезонансным воздействиям, с энергетической эффективностью и защищённостью информации систем связи с OFDM.

Описание структурной модели исследуемой OFDM-системы. В данной работе исследуется система связи на основе OFDM со скремблированием информации с помощью преобразования Арнольда, коэффициентами которого являются компоненты псевдослучайной последовательности:

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & y \\ x & xy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \end{bmatrix} \bmod(N), \quad (1)$$

где x, y – компоненты псевдослучайных последовательностей, I и Q – действительная и мнимая составляющие передаваемого сигнала, I' и Q' – скремблированные символы, $N = \sqrt{N_c}$, где N_c – количество элементов созвездия.

В целях снижения пик-фактора и повышения энтропии для скремблирования формируемых сигналов в исследуемой модели системы связи с OFDM используется генератор псевдослучайных сигналов – двоичных последовательностей, построенный на основе системы Лоренца, подверженной квазирезонансным воздей-

ствиям. ПСП формируются путём численного решения дифференциальных уравнений динамической системы Лоренца, подверженной квазирезонансным воздействиям, методом Эйлера [10–15]:

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i + t_i(-\sigma X_i + \sigma Y_i); \\ Y_{i+1} = Y_i + t_i(rX_i - Y_i - X_i Z_i); \\ Z_{i+1} = Z_i + t_i(-bZ_i + X_i Y_i), \end{cases} \quad (2)$$

где X, Y, Z – пространственные переменные нелинейных систем с динамическим хаосом; r – число Рэля, σ – число Прандтля, b – геометрический параметр динамической системы; $t_i = \Delta t(1 + m f_{i-1})$; f_{i-1} – временная функция управляющего воз-

действия $f_{i-1} = \operatorname{sgn}\left(\frac{|X_i|}{X^*} \pm a\right)$; Δt – начальная

величина шага, $a = \frac{X}{X_{01}}$, m – параметр глу-

бины модуляции.

На рис. 1 приведены реализации сигналов X, Y, Z системы Лоренца, работающей в условиях квазирезонансных воздействий при параметре глубины модуляции $m = 7$.

На рис. 1, а, б, в приведён вид сигналов, формируемых генератором Лоренца, работающего в условиях квазирезонансных воздействий, на рис. 1, г – вид аттрактора динамической системы.

На рис. 2 приведена структурная схема модели исследуемой OFDM-системы.

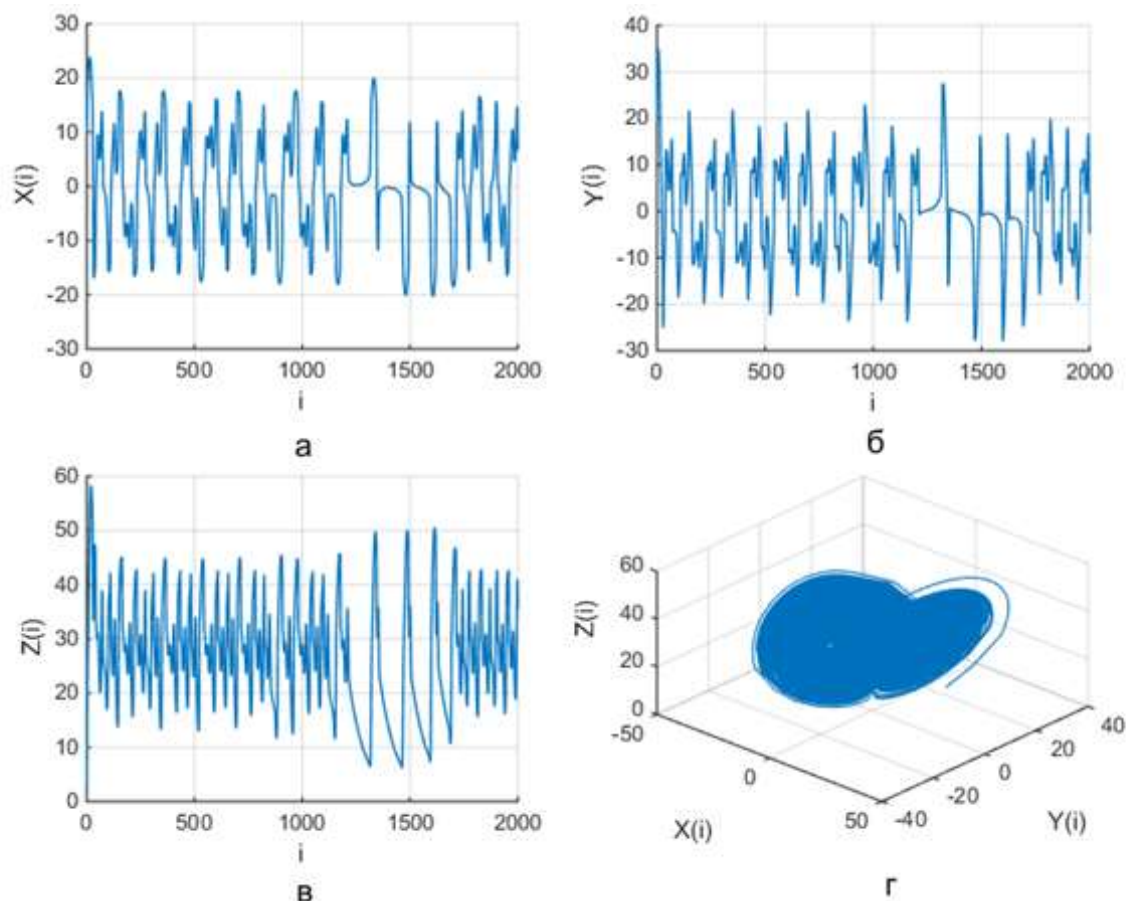


Рис. 1. Реализации сигналов и аттрактор системы Лоренца, работающей в условиях квазирезонансных воздействий

Fig. 1. Realization of signals and attractor of the Lorenz system operating under conditions of quasi-resonant influences

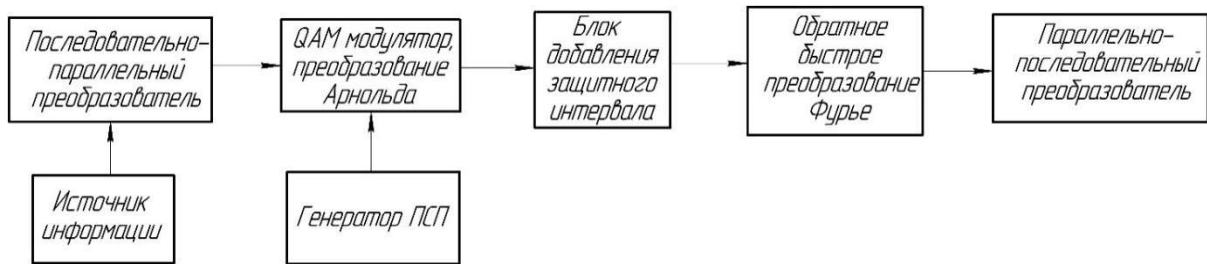


Рис. 2. Структурная схема модели исследуемой OFDM-системы

Fig. 2. Block scheme of the model of the studied OFDM system

В соответствии с рис. 2 в источнике информации формируется сообщение в виде битового потока, после чего оно передаётся в последовательно-параллельный преобразователь. Далее сообщение поступает в QAM-модулятор, осуществляющий формирование символов QAM-16. После QAM-модуляции сообщение скремблируется с помощью преобразования Арнольда (1), коэффициентами которого являются компоненты псевдослучайной последовательности, формируемой на основе сигналов динамической системы Лоренца (2), подверженной квазирезонансным воздействиям. Компоненты псевдослучайной последовательности используются для генерации случайных целых чисел, которые затем используются в качестве управляющих параметров преобразования Арнольда $x(k,r)$ и $y(k,r)$.

Для того, чтобы избежать межсимвольной интерференции, вводится защитный интервал. После добавления защитного интервала производится обратное быстрое преобразование Фурье. Длина одного OFDM-символа составляет 256 QAM-символов. Затем параллельные потоки комплексных составляющих сигналов преобразуются в один последовательный поток.

В данной работе для определения взаимосвязи статистических характеристик псевдослучайных последовательностей, полученных на основе системы Лоренца, подверженной квазирезонансным воздействиям, с энергетической эффективностью и защищённостью информации систем

связи с OFDM использовался пакет прикладных программ Matlab.

Влияние глубины модуляции параметра временной сетки на статистические характеристики псевдослучайных сигналов. Отличие исследуемой OFDM-системы от классической OFDM заключается в применении скремблирования QAM-сигналов, которое осуществляется с помощью генератора псевдослучайных сигналов, реализованного на основе системы Лоренца (2).

Для генераторов сигналов на основе модифицированных систем с хаотической динамикой представляется интересным определение взаимосвязи глубины модуляции и интервала выборки двоичной последовательности со статистическими характеристиками полученных сигналов, а также обоснование выбора глубины модуляции и интервала выборки, позволяющего получить ПСП с требуемыми свойствами [16].

Под интервалом выборки подразумевается количество отсчётов, пройденных последовательностью системы Лоренца, по истечении которого происходит выбор (фиксация) следующего бита псевдослучайной последовательности, который выбирается исходя из сравнения с пороговым уровнем [17–19]. Значение порогового уровня удобно выбирать исходя из фазового портрета динамической системы (рис. 1, 2).

Важную роль для систем передачи информации имеют корреляционные функции полученных ПСП, одной из которых является автокорреляционная

функция (АКФ), описываемая следующим выражением:

$$\rho(m) = \frac{1}{\|a\|^2} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} a_i \cdot a_{i-m}^*, \quad (3)$$

где $\rho(m)$ – апериодическая АКФ кодовой последовательности, описывающая схожесть последовательности со своей копией, сдвинутой на m позиций, a_i – i -й отсчёт сигнала.

На рис. 3 представлены зависимости среднего и пикового уровня бокового лепестка АКФ псевдослучайных последовательностей длиной 127 бит от глубины модуляции m дискретно-нелинейной системы Лоренца при различных значениях интервала выборки двоичной последовательности τ .

По графикам видно, что при интервале выборки τ , равном 150 и 200, полученные псевдослучайные последовательности соответствуют «случайным последовательностям» по классификации, представленной в [20]. При этих значениях τ глубина модуляции оказывает незначительное влияние на АКФ. При меньших значениях τ коррелированность отсчётов исходной системы оказывается более высокой, а увеличение глубины квазирезонансной модуляции параметра временной сетки приводит к хаотизации исходной

системы и снижению уровней боковых лепестков формируемых последовательностей.

Оценка эффективности систем связи с OFDM. Для оценки энергетической эффективности в работе используется пик-фактор формируемого сигнала $s(t)$, который вычисляется по следующей формуле [21]:

$$PAPR[s(t)] = \frac{\max(|s(t)|^2)}{E(|s(t)|^2)}, \quad (4)$$

где $E(x)$ – операция усреднения.

Пик-фактор сигнала существенно зависит от передаваемой информации, поэтому представляется интересным для практики его оценка при передаче изображений разной степени зернистости. Например, мелкозернистое изображение можно представить как совокупность точек, сильно различающихся по яркости и цвету. В мелкозернистом изображении цвет пикселя, а следовательно, и значение информационной составляющей передаваемого сигнала, меняется быстро и скачкообразно от пикселя к пикселю, а значит и информационному символу. В ходе эксперимента по оценке энергетической эффективности передавались изображения, представленные на рис. 4.

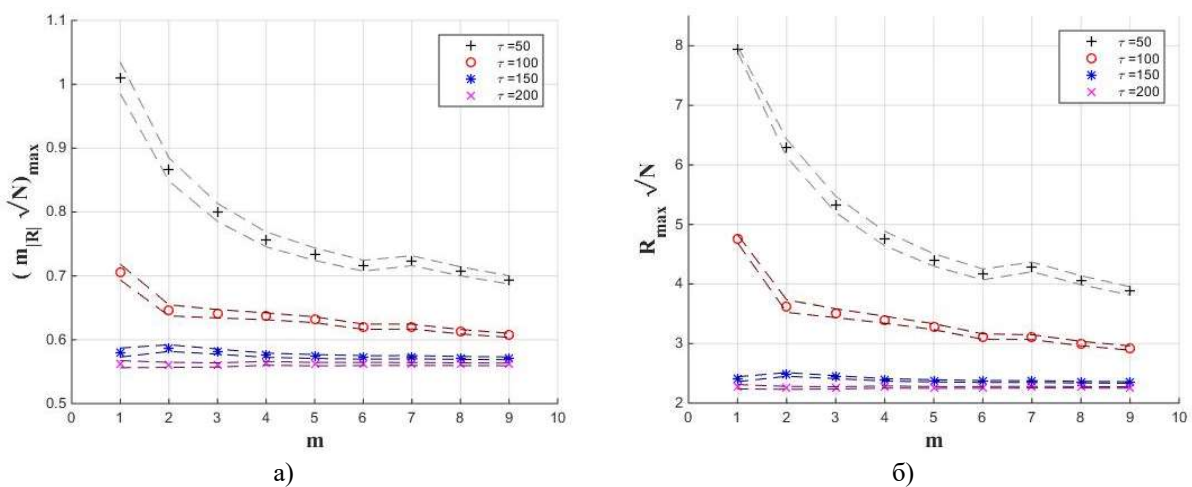


Рис. 3. Зависимости среднего (а) и пикового (б) уровня бокового лепестка АКФ от глубины модуляции при различных значениях интервала выборки системы Лоренца
Fig. 3. Dependences of the average (a) and peak (b) level of the ACF sidelobe on the modulation depth for different values of the sampling interval of the Lorenz system

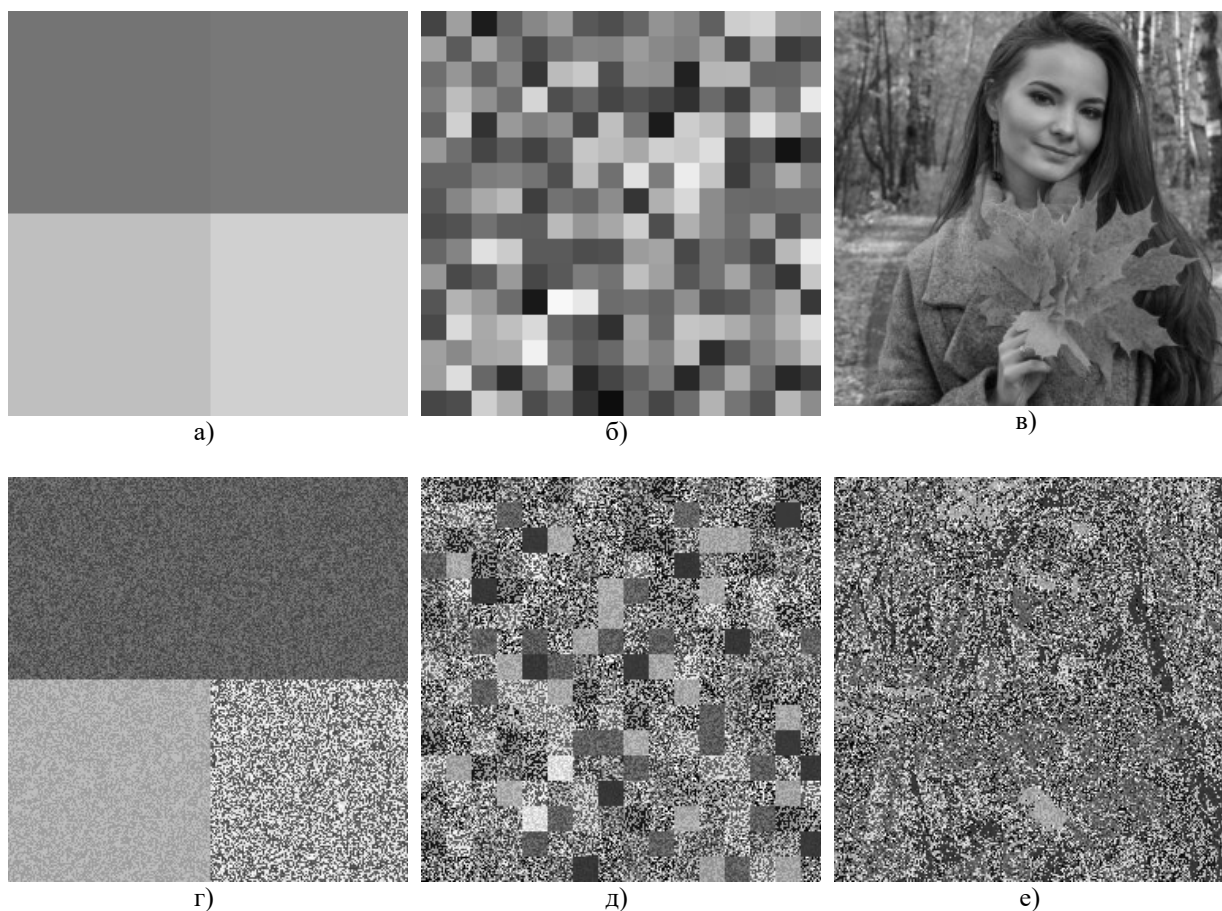


Рис. 4. Передаваемые изображения (а, б, в) и изображения после скремблирования (г, д, е)
 Fig. 4. Transmitted images (a, b, c) and images after scrambling (d, e, f)

На рис. 4, а приведено изображение клетки размером 128 пикселей (крупнозернистое изображение), на рис. 4, б – изображение клетки размером 16 пикселей (мелкозернистое изображение), рис. 4, в – изображение девушки, 4, г – скремблированное изображение клетки размером 128 пикселей, 4, д – скремблированное изображение клетки размером 16 пикселей, 4, е – скремблированное изображение девушки.

В табл. 1 представлены зависимости пик-фактора скремблированного сигнала от глубины модуляции m при различных значениях интервала выборки τ системы Лоренца.

Из представленных в табл. 1 результатов видно, что при передаче крупнозернистой клетки пик-фактор больше на 2–3 дБ, чем при передаче мелкозернистой

клетки, и на 6 дБ больше, чем при передаче изображения девушки. Таким образом, чем чаще меняется информация, тем меньше пик-фактор формируемого сигнала.

Кроме того, выявлено, что наилучшие показатели пик-фактора, а значит и энергетической эффективности, достигаются при интервалах выборки системы Лоренца 150 и 200, а глубина модуляции параметра временной сетки не оказывает влияния на пик-фактор при таких τ .

Применение блока скремблирования обеспечивает снижение пик-фактора по сравнению с исходным представлением сигнала. Так, для крупнозернистой клетки пик-фактор снизился на 8–11 дБ, для мелкозернистой клетки – на 6–8 дБ, для изображения девушки пик-фактор снизился на 8 дБ.

Таблица 1. Зависимость PAPR от m для разных значений τ Table 1. Dependence of PAPR on m for different values of τ

Крупнозернистое изображение									
τ	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$
50	15,8390	14,1974	13,5631	14,0249	14,3865	14,7637	15,6648	14,2848	13,6523
100	14,2674	14,1989	14,7983	14,6334	14,5504	14,0443	13,9549	14,0293	14,1741
150	13,7290	14,2708	14,0521	13,6900	13,5809	13,6839	14,3562	13,6535	14,1070
200	13,7292	13,7987	13,7711	13,9610	13,8718	13,9954	13,8557	13,8906	13,8593
Мелкозернистое изображение									
τ	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$
50	12,4118	11,4887	11,0677	10,9551	10,9694	11,0522	11,3932	10,9788	11,0590
100	11,5211	10,9320	11,0333	10,9853	10,9797	10,9341	11,2522	10,9553	10,9486
150	11,0034	10,9077	10,8901	10,8740	10,9466	11,0255	11,01432	11,0059	10,9517
200	10,9489	10,9018	10,8981	10,8823	10,9212	10,9576	11,0213	10,9514	10,9693
Изображение девушки									
τ	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$
50	8,1365	8,0762	8,0637	8,0475	8,0569	8,0687	8,1115	8,0359	8,0367
100	8,0798	8,0522	8,0631	8,0465	8,0488	8,0376	8,0375	8,0412	8,0402
150	8,0348	8,0371	8,0372	8,0303	8,0496	8,0310	8,0481	8,0377	8,0415
200	8,0370	8,0326	8,0316	8,0406	8,0484	8,0445	8,0338	8,0295	8,0431

Для оценки защищённости информации в работе рассматривается энтропия, являющаяся мерой неопределённости информации. Выделяют общую и локальную энтропии, которые оцениваются на основе следующих выражений [22]:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^m p(x_i) \cdot \log(p(x_i)), \quad (5)$$

$$H(X) = -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(e_{i,j}) \log(p(e_{i,j})), \quad (6)$$

где $(e_{i,j})(x)$ – конкретное значение яркости пикселя, вероятность события $(p(e_{i,j}))$ определяется подсчётом количества вхождений этого значения по всему фрагменту изображения размером $m \times n$ и делением на количество пикселей во фрагменте.

Зависимости общей и локальной энтропии передаваемой информации от глубины модуляции m при различных значениях интервала выборки τ псевдослучайной последовательности на основе системы Лоренца приведены в табл. 2.

Из представленных в табл. 2 результатов следует, что при передаче крупнозернистой клетки общая и локальная энтропии меньше на 0,5, чем при передаче мелкозернистой клетки, и меньше на 2, чем при передаче изображения девушки.

Кроме того, выявлено, что наилучшие показатели качества защиты информации достигаются при интервале выборки системы Лоренца более 150, а глубина модуляции параметра временной сетки не оказывает существенного влияния на пик-фактор при таких τ .

Применение блока скремблирования обеспечивает повышение энтропии передаваемой информации по сравнению с энтропией исходной информации. Так, для крупнозернистой клетки общая энтропия увеличилась на 4, а локальная на 3 – 4, для мелкозернистой клетки общая энтропия увеличилась на 1, а локальная на 3, для изображения девушки общая энтропия увеличилась на 0,5, а локальная – на 1.

Таблица 2. Зависимость энтропии от m для разных значений τ Table 2. Dependence of entropy on m for different values of τ

Крупнозернистое изображение									
τ	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$
Общая энтропия									
50	5,3125	5,7173	5,8447	5,8743	5,8781	5,8133	5,6400	5,8696	5,8661
100	5,6974	5,9073	5,8861	5,9062	5,8960	5,8855	5,7940	5,9029	5,8771
150	5,8302	5,9437	5,9643	5,9864	5,9542	5,8783	5,8214	5,9073	5,8794
200	5,9110	5,9809	5,9790	5,9681	5,9494	5,8814	5,8430	5,9074	5,8870
Локальная энтропия									
50	4,5795	5,2678	5,4854	5,5549	5,5400	5,4104	5,1715	5,4800	5,4235
100	5,2380	5,5915	5,4968	5,4857	5,4947	5,4615	5,2998	5,5143	5,4712
150	5,4805	5,5567	5,5871	5,6041	5,5623	5,4696	5,4077	5,5011	5,4815
200	5,5286	5,6004	5,6063	5,6312	5,5682	5,4729	5,4008	5,5087	5,4887
Мелкозернистое изображение									
τ	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$
Общая энтропия									
50	7,8264	7,8894	7,9098	7,9119	7,9076	7,8969	7,8747	7,9041	7,9008
100	7,8866	7,9091	7,8984	7,8994	7,9010	7,9026	7,8907	7,9053	7,9027
150	7,9015	7,9069	7,9082	7,9107	7,9087	7,9023	7,8995	7,9052	7,9038
200	7,9071	7,9103	7,9103	7,9107	7,9086	7,9049	7,8994	7,9054	7,9043
Локальная энтропия									
50	5,4862	5,8698	5,9515	5,9499	5,9266	5,8401	5,6748	5,9074	5,9115
100	5,8368	5,9427	5,8879	5,9020	5,9103	5,9048	5,8557	5,9314	5,9042
150	5,9209	5,9461	5,9693	5,9956	5,9855	5,9253	5,8740	5,9508	5,9122
200	5,9499	5,9913	5,9893	5,9987	5,9719	5,9144	5,8912	5,9413	5,9344
Для изображения девушки									
τ	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$
Общая энтропия									
50	7,8852	7,9299	7,9469	7,9478	7,9419	7,9318	7,9111	7,9364	7,9386
100	7,9299	7,9443	7,9291	7,9262	7,9303	7,9368	7,9343	7,9409	7,9377
150	7,9445	7,9359	7,9378	7,9419	7,9420	7,9412	7,9379	7,9420	7,9398
200	7,9427	7,9413	7,9427	7,9425	7,9418	7,9414	7,9385	7,9408	7,9418
Локальная энтропия									
50	7,4728	7,5786	7,6146	7,6095	7,5888	7,5484	7,4821	7,5657	7,5806
100	7,5764	7,5973	7,5442	7,5361	7,5457	7,5645	7,5712	7,5764	7,5701
150	7,6036	7,5694	7,5793	7,5910	7,5886	7,5868	7,5687	7,5886	7,5739
200	7,5895	7,5823	7,5939	7,5908	7,5907	7,5824	7,5785	7,5811	7,5851

На основе полученных данных можно сделать вывод, что при интервалах выборки 150 и 200 глубина модуляции не оказывает существенного влияния на характеристики ПСП и энергоэффективность систем связи с OFDM. Таким образом, для повышения энергетической эффективности и качества защиты информации систем связи с OFDM рекомендуется выбирать интервал выборки псевдослучайных последовательностей 150 и 200, что даёт возможность не учитывать глубину модуляции при построении систем передачи информации на основе системы

Лоренца, подверженной квазирезонансным воздействиям.

Заключение. В работе определена взаимосвязь статистических характеристик псевдослучайных сигналов, полученных на основе системы Лоренца, подверженной квазирезонансным воздействиям, с энергетической эффективностью и защищённостью информации систем связи с OFDM.

Рассмотрено влияние глубины модуляции на автокорреляционные функции при различных значениях интервала выборки отсчётов псевдослучайных сигнала.

лов, формируемых на основе системы Лоренца, подверженной квазирезонансным воздействиям. Выявлено, что при интервале выборки равном 150 и 200 полученные псевдослучайные последовательности соответствуют «случайным последовательностям» по классификации Л.Е. Варакина.

Определено, что для крупнозернистого изображения уменьшение интервала выборки от 200 до 50 приводит к сниже-

нию качества улучшения общей и локальной энтропии по сравнению с исходным изображением на 11 и 18 %, соответственно; для мелкозернистого изображения на 1 и 8,5 %, соответственно. В силу этого рекомендуется выбирать интервал выборки псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца, равный не менее 150, и глубину модуляции параметра временной сетки, равной 5.

Список источников

1. Van Nee, R. and deWild A. Reducing the peak-to-average power ratio of OFDM // VTC '98. 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Pathway to Global Wireless Revolution. 1998. Vol. 3. Pp. 2072-2076. doi: 10.1109/VETEC.1998.686121.
2. Li X. and Cimini L.J. Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM // IEEE Commun. Letter. 1998. Vol. 2, no 20. Pp. 131-133. doi: 10.1109/4234.673657.
3. Slimane S.B. Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals using pulse shaping // IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record, 2000. Vol. 3. Pp. 1412-1416. doi: 10.1109/GLOCOM.2000.891871
4. Jones A. E. and Wilkinson T. A. Combined coding for error control and increased robustness to system nonlinearities in OFDM // Proceedings of Vehicular Technology Conference – VTC. 1996. Vol. 2. Pp. 904-908. doi: 10.1109/VETEC.1996.501442
5. Davis J. A. and Jedwab J. Peak-to-mean power control for OFDM transmission using Golay sequences and ReedMuller codes // Electronics Letters. 1997. Vol. 33, no. 4. Pp. 267268.
6. Jeon, W.G., Chang, K.H., and Cho, Y.S. An adaptive data predistorter for compensation of nonlinear distortion in OFDM systems // IEEE Transactions on Communications. 1997. Vol. 45, no. 10. Pp. 1167-1171. doi: 10.1109/26.634677.
7. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В.И. Борисов, А.Е. Зинчук, А.Е. Лимарев и др.; Под ред. В.И. Борисова. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.
8. Dmitriev A.S., Panas A.I. Dynamic chaos: new information carriers for telecommunication systems. Moscow: Publishing House for Physics and Mathematics Literature, 2002. 252 p.
9. Afanas'ev V.V., Loginov S.S. Pulse random processes in analysis and diagnostics of nonlinear systems with dynamic chaos // Journal of Communications Technology and Electronics. 2013. Vol. 58. no 4. P. 340-346. DOI: 10.7868/S0033849413040013.
10. Information Scrambling by Lorenz System Based Sequences in OFDM / S. S. Loginov, M. Y. Zuev, Y. G. Agacheva et al // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2020. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166047.
11. Зув М. Ю. Комплексное повышение эффективности радиоэлектронных устройств и систем передачи информации с OFDM на основе нелинейных систем с динамическим хаосом // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Vol. 25, no 1. Pp. 55-64. doi: 10.18469/1810-3189.2022.25.1.55-64.
12. Zuev M. Y., Sivintseva O. A. Pseudorandom Sequences Generated by Modified Lorentz System // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2021. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.
13. Loginov S. S., Zuev M. Y. and Agacheva Y. G. A Pseudorandom Signal Generator Based on the Lorentz System Subjected to Quasi-Resonant Action // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2020, Pp. 1-4. doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131530.
14. Zuev M. Y. and Loginov S. S. Generation of pseudo-random signals based on a modified Lorenz system, realized over a Galois finite field // 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2018. Pp. 1-4, doi: 10.1109/SOSG.2018.8350594.
15. Loginov S.S., Afanasiev V.V. Poly-Gaussian models in describing the signals of Lorenz dynamic system. // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2018. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SOSG.2018.8350616.
16. Afanasyev V. V., Zuev M. Yu. Quasi-Resonant Effects on Systems with Dynamic Chaos // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2020. Pp. 1-4. doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131466.
17. Зув М. Ю., Кафаров К. М., Логинов С.С. О взаимосвязи показателей хаотической динамики

и статистических характеристик псевдослучайных сигналов на основе нелинейных систем Лоренца и Чуа // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 2(50). С. 21-29. doi: 10.25686/2306-2819.2021.2.21.

18. Zuev M. Y., Sivintseva O. A., Loginov S. S. Pseudo-Random Signal Generator Based on the Rössler System Implemented Over a Finite Galois Field // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2020. Pp.1-4. doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131522.

19. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Статистические характеристики двоичных псевдослучайных сигналов, формируемых на

основе систем Дмитриева-Кислова и Анищенко-Астахова // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т. 10, № 2. С. 4-7.

20. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.

21. Султанов А.Х., Мешков И.К., Ишимяров А.А. Метод повышения энергетической эффективности систем OFDM, основанный на уменьшении пик-фактора // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 3. С. 25-31.

22. Local Shannon entropy measure with statistical tests for image randomness / Y. Wu, Y.C. Zhou, G. Saveriades et al // Information Sciences. 2013. 222(323). Pp. 323–342. doi:10.1016/j.ins.2012.07.049.

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена после рецензирования 05.03.2022; принята к публикации 10.03.2022

Информация об авторах

БУТКЕВИЧ Юрий Рудольфович – аспирант кафедры электронных и квантовых средств передачи информации, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – динамический хаос, системы связи с ортогональным мультиплексированием. Автор пяти научных публикаций.

ЗУЕВ Максим Юрьевич – аспирант кафедры электронных и квантовых средств передачи информации, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – динамический хаос, радиоэлектронные динамические системы, системы связи с ортогональным мультиплексированием, широкополосные системы связи. Автор 15 научных публикаций.

ЛОГИНОВ Сергей Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронных и квантовых средств передачи информации, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – динамический хаос, радиоэлектронные динамические системы, негармонический спектральный анализ, системы связи с ортогональным мультиплексированием. Автор 50 научных публикаций.

СИВИНЦЕВА Ольга Андреевна – аспирант кафедры электронных и квантовых средств передачи информации, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – динамический хаос, системы связи с ортогональным мультиплексированием. Автор пяти научных публикаций.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 621.396

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.33>**Pseudo-Random Signal Generators Based on the Lorenz System in the Devices for Improving the Efficiency of Information Transmission Systems with OFDM****Yu. R. Butkevich** , **M. Yu. Zuev**, **S. S. Loginov**, **O. A. Sivinceva**

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,

10, K.Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

bytkevic@mail.ru **Keywords:** pseudo-random signal; OFDM; signal scrambling; Lorentz system; statistical characteristics; modulation depth**ABSTRACT**

Introduction. Currently, issues of increasing energy efficiency and information security of small-sized information transmission devices, as well as issues of reducing energy consumption of such devices, are becoming increasingly topical. Digital methods of reducing energy consumption and increasing information security are of interest. **The goal** of this work is to determine the relationship between the statistical characteristics of pseudorandom sequences obtained on the basis of the Lorentz system, subject to quasi-resonant effects, with the energy efficiency and information security of communication systems with OFDM. **The mathematical modeling outcomes.** The analysis of statistical characteristics of pseudorandom signals formed on the basis of the dynamic Lorentz system under quasi-resonant influences was carried out. The characteristics of the energy efficiency and protection of the transmitted information for the communication system with OFDM were evaluated when scrambling the generated signals with pseudorandom signals formed on the basis of the dynamic Lorentz system. **Conclusions.** As a result of the work, the relationship between the statistical characteristics of the generated pseudo-random signals, the peak factor of the generated signals, the total entropy and local entropy is established.

REFERENCES

1. Van Nee, R. and deWild A. Reducing the peak-to-average power ratio of OFDM. *VTC '98. 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Path-way to Global Wireless Revolution*. 1998. Vol. 3. Pp. 2072-2076. doi: 10.1109/VETEC.1998.686121.
2. Li X. and Cimini L.J. Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM. *IEEE Commun. Letter*. 1998. Vol. 2, no 20. Pp. 131–133. doi: 10.1109/4234.673657.
3. Slimane S.B. Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals using pulse shaping. *IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record*, 2000. Vol. 3. Pp. 1412–1416. doi: 10.1109/GLOCOM.2000.891871
4. Jones A. E. and Wilkinson T. A. Combined coding for errorcontrol and increased robustness to system nonlinearities in OFDM. *Proceedings of Vehicular Technology Conference – VTC*. 1996. Vol. 2. Pp. 904-908. doi: 10.1109/VETEC.1996.501442
5. Davis J. A. and Jedwab J. Peak-to-mean power control for OFDM transmission using Golay sequences and ReedMuller codes. *Electronics Letters*. 1997. Vol. 33, no. 4. Pp. 267268.
6. Jeon, W.G., Chang, K.H., and Cho, Y.S. An adaptive data predistorter for compensation of nonlinear distortion in OFDM systems. *IEEE Transactions on Communications*. 1997. Vol. 45, no. 10. Pp. 1167-1171. doi: 10.1109/26.634677.
7. Borisov V.I., Zinchuk A.E., Limarev A.E. et al. Pomehozashhishhennost' sistem radiosvjazi s rashirenijem spektra signalov modul'jaciej nesushhej psevdosluchajnoj posledovatel'nost'ju. Pod red. V.I. Borisova [Noise immunity of radio communication systems with signal spread spectrum modulation by pseudo-random sequence. Under ed. V.I. Borisov]. Moscow, Radio i svjaz', 2003. 640 p. (In Russ.).
8. Dmitriev A.S., Panas A.I. Dynamic chaos: new information carriers for telecommunication systems. Moscow: Publishing House for Physics and Mathematics Literature, 2002. 252 p.
9. Afanas'ev V.V., Loginov S.S. Pulse random processes in analysis and diagnostics of nonlinear systems with dynamic chaos. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2013. Vol. 58. No 4. P. 340-346. DOI: 10.7868/S0033849413040013.
10. Loginov S. S., Zuev M. Y., Agacheva Y. G. et al. Information Scrambling by Lorenz System Based Sequences in OFDM. *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166047.
11. Zuev M. Ju. Kompleksnoe povysenie jeffektivnosti radioelektronnyh ustrojstv i sistem peredachi informacii s OFDM na osnove nelinejnyh sistem s dinamicheskim haosom [Complex improvement of the efficiency of radio electronic devices and information transmission systems with OFDM based on nonlinear systems with dynamic chaos]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio systems]. 2022. Vol. 25. No 1. Pp. 55-64. DOI: 10.18469/1810-3189.2022.25.1.55-64 (In Russ.).
12. Zuev M. Y., Sivintseva O. A. Pseudorandom Sequences Generated by Modified Lorentz System. *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2021. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.

13. Loginov S. S., Zuev M. Y. and Agacheva Y. G. A Pseudorandom Signal Generator Based on the Lorentz System Subjected to Quasi-Resonant Action. *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems* (WECONF). 2020, Pp. 1-4. doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131530.
14. Zuev M. Y. and Loginov S. S. Generation of pseudo-random signals based on a modified Lorenz system, realized over a Galois finite field. *2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2018. Pp. 1-4, doi: 10.1109/SOSG.2018.8350594.
15. Loginov S.S., Afanasiev V.V. Poly-Gaussian models in describing the signals of Lorenz dynamic system. *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2018. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SOSG.2018.8350616.
16. Afanasyev V. V., Zuev M. Yu. Quasi-Resonant Effects on Systems with Dynamic Chaos. *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems* (WECONF). 2020. Pp. 1-4. doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131466.
17. Zuev M. Ju., Kafarov K. M., Loginov S.S. O vzaimosvjazi pokazatelej haoticheskoy dinamiki i statisticheskikh harakteristik psevdosluchajnyh signalov na osnove nelinejnyh sistem Lorenca i Chua [On the relation between indicators of chaotic dynamics and statistical characteristics of pseudo-random signals based on nonlinear systems of Lorentz and Chua]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya "Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy"* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"]. 2021. No 2(50). P. 21-29. DOI: 10.25686/2306-2819.2021.2.21 (In Russ.).
18. Zuev M. Y., Sivintseva O. A., Loginov S. S. Pseudo-Random Signal Generator Based on the Rössler System Implemented Over a Finite Galois Field. *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems* (WECONF). 2020. Pp.1-4. doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131522.
19. Afanas'ev V.V., Loginov S.S., Pol'skij Ju.E. Statisticheskie harakteristiki dvoichnyh psevdosluchajnyh signalov, formiruemyh na osnove sistem Dmitrieva-Kislova i Anishhenko-Astakhova [Anishhenko-Astakhov's and Dmitriev-Kislov's systems based binary pseudorandom consequences statistical properties]. *Infokommunikacionnye tehnologii* [Infokommunikacionnye tehnologii]. 2012. Vol. 10. No 2. Pp. 4-7.
20. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, Radio i svyaz', 1985. 384 p. (In Russ.).
21. Sultanov A.H., Meshkov I.K., Ishmijarov A.A. Metod povysheniya jenergeticheskoy jeffektivnosti sistem OFDM, osnovannyj na umen'shenii pik-faktora [OFDM system energy efficiency increasing method based on peak-factor decrease]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio systems]. 2018. Vol. 21. No 3. P. 25-31. (In Russ.).
22. Wu Y., Zhou Y.C., Saveriades G. et al Local Shannon entropy measure with statistical tests for image randomness. *Information Sciences*. 2013. 222(323). Pp. 323–342. doi:10.1016/j.ins.2012.07.049.

The article was submitted 15.02.2022; approved after reviewing 05.03.2022; accepted for publication 10.03.2022

For citation: Butkevich Yu. R., Zuev M. Yu., Loginov S. S., Sivinceva O. A. Pseudo-Random Signal Generators Based on the Lorenz System in the Devices for Improving the Efficiency of Information Transmission Systems with OFDM. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No 1 (53). Pp. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.33>

Information about the authors

Jurij R. Butkevich – PhD student at the department of Electronic and Quantum Means of Information Transmission, Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev – KAI. Research interests – dynamic chaos, communication systems with orthogonal multiplexing. The author of 5 scientific publications.

Maksim Ju. Zuev – PhD student at the department of Electronic and Quantum Means of Information Transmission, Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev – KAI. Research interests are dynamic chaos, radioelectronic dynamic systems, communication systems with orthogonal multiplexing, wideband communication systems. The author of 15 scientific publications.

Sergej S. Loginov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the department of Electronic and Quantum Means of Information Transmission, Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev – KAI. Research interests are dynamic chaos, radioelectronic dynamic systems, non-harmonic spectral analysis. The author of 30 scientific publications.

Ol'ga A. Sivinceva – PhD student at the department of Electronic and Quantum Means of Information Transmission, Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev – KAI. Research interests are dynamic chaos, communication systems with orthogonal multiplexing. The author of 5 scientific publications.

Contribution of the authors: All authors made an equivalent contribution to the paper preparation. The authors declare that they have no conflict of interest. All authors read and approved the final manuscript.