

## Новый класс цифровых радиоэлектронных динамических систем

В.В. Афанасьев<sup>1</sup>, С.С. Логинов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева

<sup>2</sup>АО «НПО «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко»

**Аннотация:** Рассмотрен новый класс цифровых нелинейных радиоэлектронных динамических систем с модулированным шагом временной сетки. Проведен анализ основных статистических характеристик радиоэлектронных динамических систем. Получены оценки интервалов корреляции сигналов нелинейных систем, а также их распределения вероятностей, аппроксимированные смесью распределений Гаусса.

**Ключевые слова:** динамический хаос, радиоэлектронная динамическая система, статистическая характеристика, управляемый хаос, хаотическая динамика вариация шага.

Нелинейные системы с динамическим хаосом описывают явления в различных областях физики, техники и радиоэлектроники [1-3]. Одним из приложений нелинейных систем с хаотической динамикой является формирование псевдослучайных сигналов с требуемыми статистическими характеристиками в системах связи, запреградной радиолокации [4], радиомодемах для локальных сетей связи [5], моделирования и криптографии. Управление статистическими характеристиками псевдослучайных сигналов нелинейных систем с динамическим хаосом является одним из важнейших направлений, расширяющих возможность их практического применения [6].

В настоящее время широко и разносторонне исследованы радиоэлектронные системы с хаотической динамикой Лоренца

$$\dot{X} = -\sigma(X - Y), \dot{Y} = rX - Y - XZ, \dot{Z} = -bZ - XY, \quad (1)$$

Чуа,

$$\dot{X} = \alpha(Y - h(X)), \dot{Y} = X - Y + Z, \dot{Z} = -\beta Y, \quad (2)$$

Анищенко-Астахова,

$$\dot{X} = mX + Y - XZ, \dot{Y} = -X, \dot{Z} = -gZ + X^2 1(X), \quad (3),$$

Дмитриева-Кислова

$$T\dot{X} + X = MZ \exp(-Z^2), \dot{Y} = X - Z, \dot{Z} = Y - Z / Q \quad (4).$$

В приведенных уравнениях (1)-(4)  $X, Y, Z$  – пространственные переменные нелинейных систем с динамическим хаосом;  $r, \sigma, b$  – параметры системы Лоренца;  $\alpha, \beta$  – параметры системы Чуа,  $h(X)$  – кусочно – линейная аппроксимация нелинейности системы Чуа;  $m, g$  – параметры системы Анищенко-Астахова,  $1(X)$  – ступенчатая функция Хэвисайда;  $T, M, Q$  – параметры системы Дмитриева-Кислова [1,7,8].

Дифференциальные уравнения, описывающие динамику нелинейных систем с динамическим хаосом (1)-(4), представимы в векторной форме

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = F(\vec{X}, \vec{A}), \quad (5)$$

где  $\vec{X}$  – вектор координат систем;  $\vec{A}$  – вектор параметров систем.

Динамические системы (2)-(4) являются моделями ряда радиоэлектронных схем с хаотической динамикой, система (1) получена в области метеорологии, но может быть реализована в виде радиоэлектронной схемы. Практическая реализация динамических систем (1)-(4) на основе элементов аналоговой электроники сопряжена с проблемой воспроизводимости сигналов на передающем и приемном конце канала связи, что существенно ограничивает применение подобных сигналов, особенно в части обработки в приемниках и вызывает необходимость разработки цифровых радиоэлектронных динамических систем (РДС). Совершенствование и снижение стоимости цифровой элементной базы делает актуальной реализацию формирователей многоуровневых хаотических сигналов на основе алгоритмов численного решения систем дифференциальных уравнений, описывающих РДС методами и процедурами Эйлера, Рунге-Кутта и модификаций методов Рунге-Кутта [7].

В задачах математического моделирования динамических систем, описываемых уравнениями (1)-(4), основное внимание уделялось вопросам корректности моделирования и адекватности моделей исходным системам и явлениям [8]. Напротив, в случае решения задач формирования псевдослучайных сигналов на основе нелинейных систем с динамическим хаосом важными, прежде всего, являются статистические характеристики формируемых сигналов и требования к вычислительным ресурсам. Наиболее простым в практической реализации является метод численного решения дифференциальных уравнений Эйлера, который позволяет минимизировать вычислительные затраты в процессе формирования сигналов в сравнении с упомянутыми методами Рунге-Кутты.

При использовании процедуры численного интегрирования дифференциальных уравнений Эйлера систему (5) можно представить в следующем виде

$$\vec{X}_{i+1} = \vec{X}_i + \Delta t F(\vec{X}_i, \vec{A}) \quad , \quad (6)$$

где  $\vec{X}_i$  - вектор координат системы в текущий момент времени,  $\vec{X}_{i+1}$  - вектор координат системы в последующий момент времени,  $\Delta t$  - значение шага численного интегрирования в отсутствие модуляции. С увеличением  $\Delta t$  возрастает погрешность интегрирования, но одновременно увеличивается интенсивность шумов дискретизации, и как результат – возрастает стохастизация в РДС, требуемая при построении формирователей псевдослучайных сигналов. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на оценку допустимого «загрубления» процедур численного интегрирования дифференциальных уравнений за счет увеличения шага численного интегрирования и его влияния на статистические характеристики формируемых сигналов.

Следует отметить, что, шаг временной сетки  $\Delta t$  цифровых РДС наряду с вектором собственных параметров систем  $\vec{A}$ , по нашему мнению, является важным дополнительным параметром, позволяющим стабилизировать регулярные или хаотические моды РДС, необходимые в целом ряде радиотехнических и телекоммуникационных приложений. Практически важным является разработка методов построения цифровых радиоэлектронных динамических систем и устройств с обоснованным выбором и управлением параметрами временной сетки.

Целью работы является синтез нового класса нелинейных радиоэлектронных динамических систем с варьируемым шагом временной сетки и анализ влияния вариации параметров временной сетки на вероятностные и спектрально-корреляционные характеристики формируемых псевдослучайных сигналов.

Характеристики сигналов, формируемых на основе нелинейных систем с динамическим хаосом, существенно зависят от величины шага временной сетки  $\Delta t$ . С целью привязки шага численного интегрирования к параметрам систем его оценка изменения шага временной сетки проведена на основе нормированного параметра  $K = T_1 / \Delta t$ , где  $T_1$  – период квазирезонансных колебаний в окрестности состояний равновесия динамических систем, оцениваемый аналитически или по численно по реализациям сигналов.

Влияние параметра временной сетки  $K$  на динамику систем (1)-(4) делает необходимым определение количественной взаимосвязи параметров временной дискретизации со статистическими характеристиками сигналов, формируемых на основе РДС. В работе оценены корреляционные функции реализаций псевдослучайных сигналов, формируемых системами (1)-(4) при вариации параметра  $K$ . Характер изменения нормированных автокорреляционных функций (АКФ) сигналов, формируемых системами (1)-(4) оценен по нормированным интервалам  $\tau(\theta) / \tau_0(\theta)$  до первого

---

пересечения корреляционными функциями, уровней  $\theta=0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ ;  $\tau(\theta)$  при  $\theta=1/e$  соответствует интервалу корреляции, по истечению которого происходит падение корреляционной функции в  $e$  раз по сравнению с максимальным значением, в случае  $\theta=0$  соответствует интервалу корреляции, определяемому по первому пресечению корреляционной функцией нулевого уровня, (рис. 1);  $\tau_0(\theta)$  - интервалы корреляции при  $K=200$ , выбранном в диапазоне значений  $K$ , определенном по полученным аналитическим оценкам.

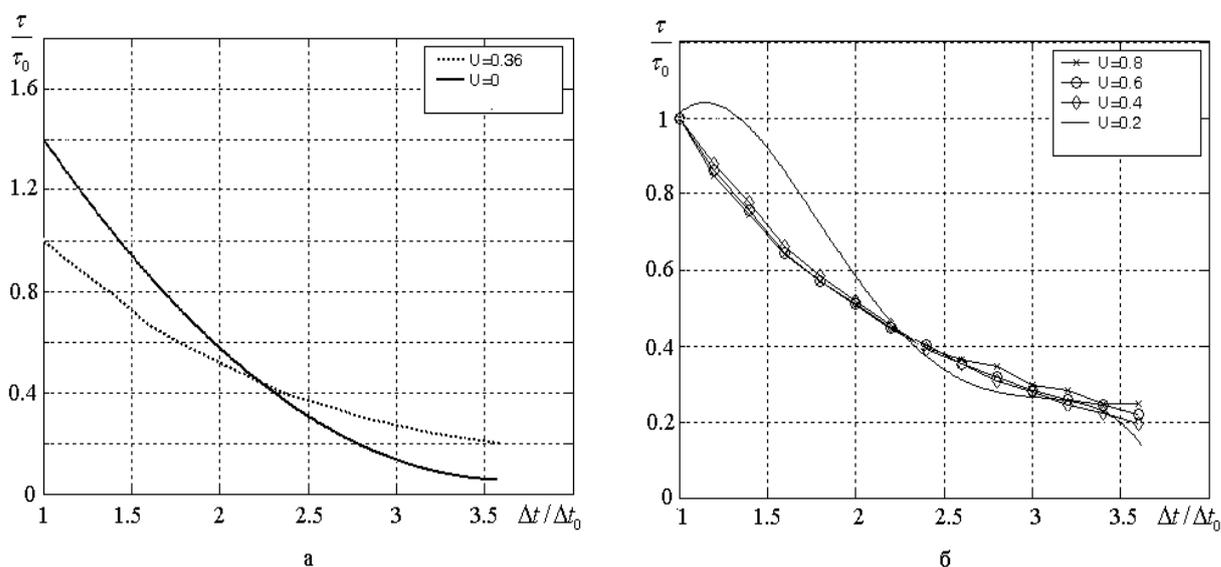


Рис. 1. – Зависимости интервалов корреляции реализаций  $X$  системы (1): а –  $\tau(e)/\tau_0(e)$  и  $\tau(0)/\tau_0(0)$ , б –  $\tau(0.8)/\tau_0(0.8)$ ,  $\tau(0.6)/\tau_0(0.6)$ ,  $\tau(0.4)/\tau_0(0.4)$ ,  $\tau(0.2)/\tau_0(0.2)$

Из зависимостей рис. 1а следует, что при увеличении шага временной сетки возрастает степень стохастизации, в результате чего сокращаются интервалы корреляции сигналов системы (1). Вариация параметра временной сетки, как следует из рис. 1б, приводит к сужению главного лепестка корреляционной функции.

По гистограммам реализаций сигналов  $X, Y, Z$  систем (1)-(4) определено влияние параметров временной сетки на распределение вероятностей

реализаций сигналов, формируемых на основе систем с динамическим хаосом. Установлена негауссовость сигналов исследуемых РДС. Проведена аппроксимация плотностей вероятностей сигналов РДС смесями распределений Гаусса, представленными в виде

$$w(x) = \sum_{i=1}^N q_i \Gamma(x, m_i, \sigma_i), \quad (8)$$

где  $\Gamma(x, m_i, \sigma_i)$  – плотности вероятностей распределений Гаусса со средними значениями компонент  $m_i$  и среднеквадратическими значениями  $\sigma_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ ;

$q_i$  – вероятности компонент, при чем  $\sum_{i=1}^N q_i = 1$ .

Проведен анализ влияния параметра временной дискретизации  $K$  на момент времени  $L$  установления устойчивых распределений, для которых веса компонент  $q_i$  относительно асимптотического значения отклоняются не более чем на 5% (рис. 2).

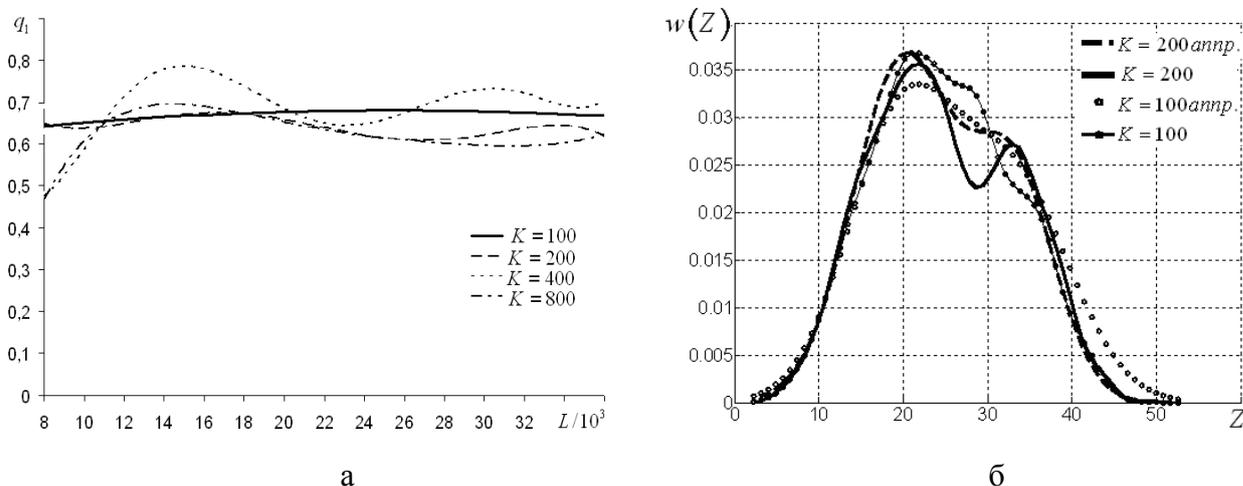


Рис. 2. – Зависимости вероятности компоненты  $q_1$  для сигнала  $Z$  от момента  $L$  при  $K = 100, 200, 400, 800$  (а); гистограммы сигнала  $Z$  системы (1) и их аппроксимации

Показано, что при больших значениях  $K$ , соответствующих меньшим шагам численного интегрирования, зависимости  $q_i(L)$  носят колебательный характер, что требует большего числа компонент аппроксимации (рис. 2а). По рис. 2б видно, что при вариации параметра численного интегрирования  $K$  возможно аппроксимировать распределение вероятностей сигнала  $Z$  системы (1) двухкомпонентной полигауссовой смесью. На основе анализа зависимостей  $q_i(L)$  сигналов  $X, Y, Z$  систем (1)-(4) выработаны рекомендации по выбору  $L$ , при котором величина отклонения  $q_i$  не превышает 5%. Так значению  $K = 100$  соответствует  $L = 10000$ ,  $K = 200$  соответствует  $L = 20000$ ,  $K = 400 - L = 26000$ ,  $K = 800 - L = 36000$ ,  $K = 1000 - L = 48000$ . Аналогичные зависимости могут быть получены и для других систем. Например, для системы (2) значению  $K = 500$  соответствует  $L = 150000$ ,  $K = 2000 - L = 500000$  [7].

Проведенные нами исследования показали, что распределения вероятностей реализаций сигналов  $X, Y, Z$  систем (1)-(4) могут быть аппроксимированы вероятностной смесью не более трех гауссовых распределений. Погрешность аппроксимации распределений гистограмм для сигналов  $X$  и  $Y$  системы (1), сигналов  $Y$  системы (2) составили не более 2-5%. Погрешность для сигналов  $X$  системы (2), (4) несколько выше погрешностей аппроксимации сигналов систем (1) и составляет 10-14%. Для остальных сигналов указанных систем погрешность вероятностей составляет 5-7%.

Квазирезонансные воздействия на параметры нелинейных устройств и систем широко известны в физике. Они позволяют обеспечить стабилизацию параметров и характеристик режимов работы систем с преобладанием одной из возможных мод поведения [9, 10].

Как было отмечено выше, практические приложения динамического хаоса в радиотехнике и электронике делают необходимым улучшение статистических характеристик формируемых РДС сигналов. При этом особенно интересным могло бы стать сокращение интервалов корреляции сигналов. В отличие от большинства применений квазирезонансных воздействий для стабилизации регулярных мод мы сосредоточимся на преобладании моды, отвечающей за хаотическое поведение

Квазирезонансные воздействия на параметры нелинейных систем описываются выражением следующего вида [6]

$$m(t) = m_0(1 + Mf(t)), \quad (9)$$

где  $m(t)$  и  $m_0$  – мгновенное и начальное значения выбранного параметра системы;  $f(t)$  – функция, определяющая форму воздействий;  $M$  – коэффициент, влияющий на глубину модуляции параметра системы.

Вариация параметров систем по выражению (9) может быть реализована в аналоговых и цифровых радиоэлектронных динамических системах. Но существующая проблема воспроизводимости характеристик аналоговых реализаций динамических систем по-прежнему не решена. Это делает необходимым рассмотрение возможности использования цифровых методов формирования сигналов на основе простейших процедур численного интегрирования систем дифференциальных уравнений Эйлера.

На основе процедуры Эйлера численного интегрирования дифференциальных уравнений, радиоэлектронные динамические системы, могут быть записаны в виде рекуррентных выражений [6]:

$$\vec{X}_{i+1} = \vec{X}_i + \Delta t_i F(\vec{X}_i, \vec{A}), \quad (10)$$

с вариацией шага временной сетки  $\Delta t_{i+1} = \Delta t(1 + Mf(\vec{X}_i))$ ,

где  $\vec{X}_i$  - вектор координат системы в текущий момент времени,  $\vec{X}_{i+1}$  - вектор координат системы в последующий момент времени,  $\vec{\Delta t}_{i+1} = \Delta t(1 + Mf(\vec{X}_i))$ ,  $\vec{\Delta t}_{i+1}$  - текущее значение вектора шага численного интегрирования,  $\Delta t$  - значение шага численного интегрирования в отсутствии модуляции,  $M$  - глубина вариации шага численного интегрирования,  $f(\vec{X}_i)$  - функция варьирующего воздействия. Например, на основе системы Лоренца нами синтезирована РДС вида [6]

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i + t_i(-\sigma X_i + \sigma Y_i) \\ Y_{i+1} = Y_i + t_i(rX_i - Y_i - X_i Z_i) \\ Z_{i+1} = Z_i + t_i(-bZ_i + X_i Y_i) \end{cases} \quad (11)$$

где  $t_i = \Delta t(1 + Mf_{i-1})$ ,  $f_{i-1}$  - временная функция управляющего квазирезонансного воздействия,  $f_{i-1} = \operatorname{sgn}\left(\frac{|X_i|}{X^*} \pm a\right)$ ,  $a = X / X_{01}$ ,  $\Delta t$  - начальная величина шага.

Необходимо отметить, что системы записанные в виде (11) становятся фактически дискретно-нелинейными радиоэлектронными динамическими системами, в которых наряду с собственными параметрами исходных систем (1) -(4), появляются новый параметр – шаг численного интегрирования. При чем, в отличие от собственно параметров систем вариация параметров временной сетки влияет на все рекуррентные уравнения систем. Поэтому интересно рассмотреть влияние вариации шага временной сетки в процедуре численного интегрирования цифровых РДС на базовые статистические характеристики систем.

Прежде всего, необходимо определение взаимосвязи глубины вариации  $M$  в выражении (11) со статистическими характеристиками сигналов нелинейных систем с динамическим хаосом. Это позволит обосновать выбор

глубины вариации параметров систем  $M$  для получения сигналов с требуемыми в конкретных приложениях характеристиками.

Необходимо провести анализ влияния квазирезонансной модуляции параметров временной дискретизации на статистические характеристики формируемых сигналов. Во-первых, необходимо исследовать влияние воздействий типа (11) на скорость изменения нормированных АКФ в сравнении с АКФ сигналов исходных систем. Скорости изменения нормированных корреляционных функций оценивались по интервалам корреляции  $\tau(e)$ ,  $\tau(0)$ , а также по уровням 0,8; 0,6; 0,4; 0,2, относительно максимального значения АКФ аналогично тому, как это было сделано выше.

На рис. 3 приведена корреляционная функции сигналов  $X$  системы Лоренца в зависимости от значения  $M$ .

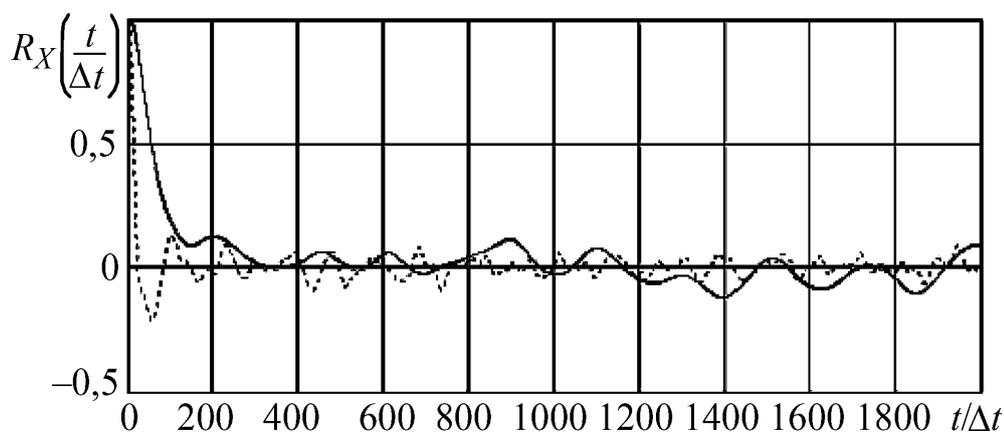


Рис. 3. – Корреляционные функции сигнала  $X$  системы Лоренца при внешних воздействиях вида (11): — —  $M = 0$ ; - - - -  $M = 0,9$

Из рис. 3 следует, что квазирезонансные воздействия типа (11) при увеличении глубины вариации  $M$  могут привести к значительному сокращению интервалов корреляции сигналов, формируемых на основе системы Лоренца. Аналогичные результаты были получены и для систем (2) -(3), модифицированных в соответствии с выражением (11). В табл. 1

приведены интервалы корреляции по двум критериям для систем (2) -(4), в зависимости от глубины вариации  $M$ .

Таблица 1

Интервалы корреляции для систем с варьируемым шагом временной сетки

M	Система Чуа		Система Анищенко–Астахова		Система Дмитриева–Кислова	
	$\frac{\tau(e)}{\tau_0(e)}$	$\frac{\tau(0)}{\tau_0(0)}$	$\frac{\tau(e)}{\tau_0(e)}$	$\frac{\tau(0)}{\tau_0(0)}$	$\frac{\tau(e)}{\tau_0(e)}$	$\frac{\tau(0)}{\tau_0(0)}$
0,3	0,66 - 0,97	0,42 - 0,63	0,68 - 0,90	0,72 - 0,86	0,95 - 0,86	0,72 - 0,60
0,5	0,08 - 0,24	0,3 - 0,35	0,18 - 0,45	0,34 - 0,66	0,15 - 0,34	0,44 - 0,75
0,75	0,07 - 0,23	0,25 - 0,38	0,17 - 0,34	0,45 - 0,50	0,17 - 0,27	0,14 - 0,46
0,9	0,04 - 0,87	0,20 - 0,40	0,16 - 0,31	0,42 - 0,49	0,13 - 0,90	0,12 - 0,18

Из таблицы видно, что при увеличении глубины вариации параметров временной дискретизации систем, происходит сокращение интервалов корреляции сигналов. При глубине модуляции  $M \geq 0,5$  интервалы корреляции сокращаются для систем (2)-(4) с меньшей скоростью, поэтому значительное увеличение глубины вариации для сокращения интервалов корреляции по выбранным критериям не требуется. Таким образом, квазирезонансная модуляция параметров временной сетки нелинейных радиоэлектронных динамических систем позволяет сократить интервалы корреляции сигналов, порождаемых данными системами. При этом необходимо подчеркнуть, что при выборе в предлагаемых РДС глубины модуляции более единицы возникают принципиально новые возможности в управлении характеристиками формируемых сигналов.

Изменение исходных систем при помощи квазирезонансных воздействий на параметры временной сетки интервалы корреляции сигналов, формируемых на основе модифицированных систем Лоренца, сокращаются до 20 раз, Чуа, Анищенко – Астахова, Дмитриева – Кислова – до 5-10 раз по

сравнению с исходными системами без вариации параметров временной сетки.

С целью выявления особенностей вероятностного описания сигналов нелинейных динамических систем с варьируемыми параметрами временной сетки выполнены оценки плотностей распределения реализаций сигналов систем Лоренца, Чуа, Анищенко – Астахова в зависимости от глубины воздействий типа (11), произведем их аппроксимации смесями распределений Гаусса аналогично тому, как это было сделано выше. На рис. 4 приведены сглаженные гистограммы распределений вероятностей системы Лоренца при вариации глубины вариации  $M$ .

Из рис. 4а видно, что импульсные воздействия на параметр временной дискретизации вызывают изменения в законе распределения сигнала  $X$ . Наиболее вероятными становятся значения вблизи точки  $X = 0$ . Это связано с увеличением числа взаимных переходов между состояниями равновесия за фиксированный интервал времени. При увеличении  $M$  вероятность значений  $X$ , близких к координатам точек равновесия, снижается. Огибающие сигналов носят более изрезанный характер. Для аппроксимации распределения вероятностей сигнала  $Z$  (рис. 4б) потребовалось большее число компонент, чем было выше для систем без воздействий, – три. Погрешность аппроксимации при увеличении глубины модуляции растет до 20 % при  $M = 0,75$ . Дальнейшее увеличение глубины модуляции делает необходимым применение большего числа компонент.

Для систем (2) -(4) аппроксимация распределений вероятностей смесью трех компонент распределений Гаусса возможна до значений  $M=0.3...0.5$ . Дальнейшее увеличение глубины модуляции потребовала увеличения числа аппроксимирующих компонент до 5 – 7 из-за разреженного вида распределений.

---

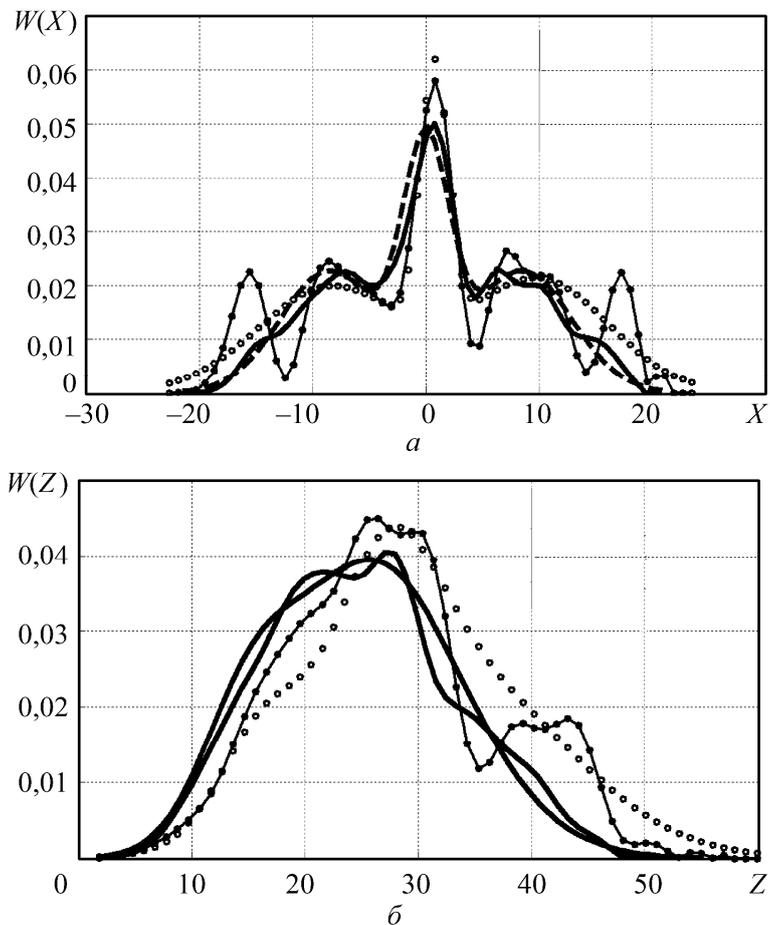


Рис. 4. – Сглаженные гистограммы распределений вероятностей системы Лоренца при вариации глубины модуляции  $M$  (сплошные линии) и их аппроксимации (пунктирные линии) сигналов: а –  $X$ ; б –  $Z$  (– – –  $M = 0,3$  аппр.; — — —  $M = 0,3$ ;  $\circ$  –  $M = 0,75$  аппр.;  $\circ$  –  $M = 0,75$ )

Таким образом, мы показали, что введение вариации параметров временной сетки в зависимости от текущей динамики системы открывает возможности синтеза на основе известных динамических систем новых видов дискретно-нелинейных радиоэлектронных динамических систем с хаотической динамикой, которые могут быть использованы для формирования псевдослучайных сигналов с управляемыми статистическими характеристиками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе систем Лоренца, Чуа, Анищенко-Астахова, Дмитриева-Кислова синтезирован новый класс дискретно-нелинейных радиоэлектронных динамических систем с варьируемым шагом временной сетки. Показано, что в предлагаемых системах возможно статическое управление статистическими характеристиками радиоэлектронных динамических систем за счет выбора параметра временной сетки и динамическое управление за счет квазирезонансной вариации параметров временной сетки.

Установлена количественная взаимосвязь параметров временной сетки сигналов нелинейных систем с динамическим хаосом со статистическими характеристиками порождаемых ими сигналов. Определена связь параметра временной сетки с распределениями вероятностей реализаций сигналов на основе систем Лоренца, Чуа, Анищенко-Астахова и Дмитриева-Кислова. Показано, что негауссовы распределения вероятностей сигналов систем с динамическим хаосом без квазирезонансной вариации параметров временной сетки возможно аппроксимировать полигауссовой смесью с числом компонент не более трех.

Выполнен анализ влияния квазирезонансной вариации параметров временной сетки на вероятностные и спектрально-корреляционные характеристики формируемых псевдослучайных сигналов. Показано, что при использовании квазирезонансных воздействий на параметры временной сетки, интервалы корреляции сигналов, формируемых на основе систем Лоренца сокращаются до 20 раз, Чуа, Анищенко-Астахова Дмитриева-Кислова – до 5-10 раз. Определено влияние квазирезонансной вариации параметров временной сетки на число гауссовых компонент, аппроксимирующих распределения вероятностей сигналов радиоэлектронных динамических систем.

---

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты РФФИ №10-08-00178-а, №12-08-97035-р\_поволжье\_а), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (проект №7.814.2012).

### Литература

1. Анищенко, В.С., Астахов В.В. и др. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах / Саратов, 2011. – 535 с.
2. Dmitriev A.S., Hasler M., Panas A.I. / Nonlinear phenomena in complex systems, 2003, vol. 6, no 1, pp. 488-501.
3. Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Колебания, волны, структуры. М.: Физматлит, 2003. 496с.
4. Демьяненко А.В., Топалов Ф.С., Ильин И.В. USB радиомодем. // Инженерный вестник Дона, 2015, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2789](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2789).
5. Кучеренко И.А. Применение сверхширокополосных сигналов с линейной частотной модуляцией в запреградной радиолокации. // Инженерный вестник Дона, 2016, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3545](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3545).
6. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Анализ и синтез нелинейных радиоэлектронных динамических устройств и систем с варьируемым шагом временной сетки – Казань: Изд-во КГТУ, 2013, 220 с.
7. Бабенко, К.И. Основы численного анализа / М.: Наука, 1986. – 744 с.
8. В.В. Афанасьев, Ю.Е. Михайлов, Ю.Е. Польский, А.Ю. Торопов Влияние основных параметров моделирования на ЭВМ на поведение динамических систем со странными аттракторами // Письма в ЖТФ. – 1989. – Т. 21, Вып. 23. – С. 10 – 14.
9. В.В. Афанасьев, С.С. Логинов. Полигауссовы модели в представлении распределений вероятностей сигналов нелинейной системы Лоренца с

динамическим хаосом // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 12. – С. 10 – 14.

10. Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O. Method for transmission information using chaotic signals / Canadian patent 2, 416, 702. Granted and issued 2011/07/19.

### References

1. Anischenko V.S., Astakhov V.V. Nelineynie effecty v haoticheskikh i stochasticheskikh systemah. [Nonlinear effects in a chaotic and stochastic system]. Saratov, 2011. 535 p.

2. Dmitriev A.S., Hasler M., Panas A.I. Basic principle of direct chaotic communications. Nonlinear phenomena in complex systems, 2003, vol. 6, no 1, pp. 488-501.

3. Karlov N.V., Kirichenko N.A. Kolebania, volny, struktury [Fluctuations, Waves, Structures]. Moscow: Phizmathlit, 2003. 496 p.

4. Demyanenko A.V., Topalov F.S., Ilin I.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2789](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2789).

5. Kucherenko I.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3545](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3545).

6. Afanasiev V.V., Loginov S.S., Polskiy Yu.E. Analiz i sintez nelineynyh radioelektronnyh dinamicheskikh ustroystv i system s variyruemim shagom vremennoy setki [Nonlinear systems with dynamic chaos and variation of the time-step. Analysis and synthesis]. Kazan: Izd. KGTU, 2013, 220 p.

7. Babenko K.I. Osnovi chislennogo analiza [The fundamentals of numerical analysis]. Moscow: Nauka, 1986. 744 p.

8. V.V. Afanasiev, Yu.E. Mikhaylov, Yu.E. Polskiy, A.Yu. Applied Physics Letters. 1989. T. 21, Vol. 23. pp. 10 – 14.



9. V.V. Afanasiev, S.S. Loginov Achievements of modern radioelectronics. 2012. 12. pp. 10 – 14.

10. Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O. Method for transmission information using chaotic signals. Canadian patent 2, 416, 702. Granted and issued 2011/07/19