

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОИЧНЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ
СИГНАЛОВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ ДМИТРИЕВА-КИСЛОВА
И АНИЩЕНКО-АСТАХОВА**

Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е.

Рассматриваются формователи двоичных псевдослучайных сигналов на основе нелинейных систем Дмитриева-Кислова (ДК) и Анищенко-Астахова (АА) с динамическим хаосом. Исследованы авто- и взаимокорреляционные функции и вероятностные характеристики двоичных псевдослучайных последовательностей, формируемые на основе указанных систем, подверженных квазирезонансным воздействиям.

Ключевые слова: динамический хаос, псевдослучайный сигнал, статистические характеристики.

Нелинейные системы с динамическим хаосом используются в качестве формователей сигналов для систем широкополосной связи. Наряду с принципиально новыми подходами к формированию сигналов на основе нелинейного подмешивания, сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов системы с динамическим хаосом могут применяться в качестве формователей двоичных псевдослучайных последовательностей [1]. В [2-3] были рассмотрены двоичные последовательности, формируемые на основе систем Лоренца и Чуа. Наряду с данными системами в настоящее время широко исследованы системы ДК и АА, описывающие поведение радиоэлектронных схем с хаотической динамикой. Рассмотрение последовательностей, сформированных на основе данных систем, позволит уточнить их место в ряду иных известных последовательностей.

Автокорреляционные функции (АКФ) являются одними из наиболее информативных характеристик псевдослучайных сигналов. Снижение интервалов корреляции АКФ двоичных псевдослучайных сигналов является важной задачей для систем широкополосной связи и криптографических систем. Исследования показали, что улучшение характеристик формователей сигналов на основе нелинейных систем с динамическим хаосом возможно за счет введения квазирезонансных управляющих воздействий на параметры систем и параметры временной дискретизации [3].

Целью работы является анализ статистических характеристик двоичных псевдослучайных сигналов, сформированных на основе нелинейных систем ДК и АА с динамическим хаосом в условиях квазирезонансных воздействий на параметры временной дискретизации.

В качестве объекта исследования в работе выбраны системы АА:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= mX + Y - XZ, \dot{Y} = -X; \\ \dot{Z} &= -gZ + X^2 I(X), \end{aligned} \quad (1)$$

и ДК:

$$\begin{aligned} T\dot{X} + X &= MZ \exp(-Z^2); \\ \dot{Y} &= X - Z, \dot{Z} = Y - Z/Q, \end{aligned} \quad (2)$$

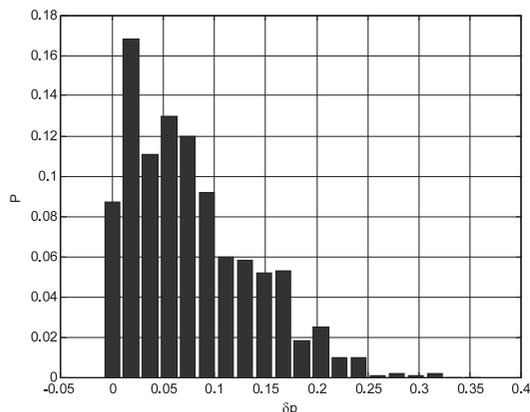
описывающие поведение ряда радиоэлектронных схем с хаотической динамикой. В (1)-(2) X, Y, Z – пространственные переменные нелинейных систем с динамическим хаосом; m, g – параметры системы АА, $I(X)$ – ступенчатая функция Хэвисайда; T, M, Q – параметры системы ДК [1].

Формирование двоичных псевдослучайных последовательностей на основе систем (1), (2) проводилось по методике [2] путем сравнения исходных реализаций с пороговым уровнем, равным медиане сигналов X, Y, Z . Период сравнения выбирался близким интервалу корреляции исходного хаотического сигнала. В процессе формирования сигналов использованы значения параметров систем АА $m=1, g=0,6$ и ДК $T=2, M=7, Q=10$. Параметр численного интегрирования систем (1)-(2) K , определяющий отношение периода квазирезонансных колебаний к шагу численного интегрирования систем, выбирался не менее $K=500$.

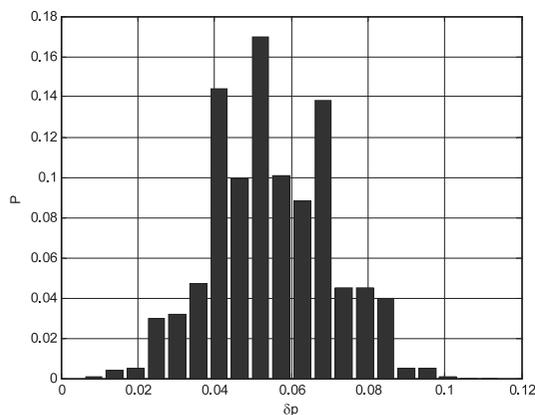
Погрешности по равновероятности появления в двоичных последовательностях символов «0» и «1» являются одними из наиболее часто рассматриваемых их характеристик. В работе получены оценки погрешности, равные разности вероятностей появления символа «1» и символа «0».

На рис. 1 приведены распределения последовательностей в зависимости от погрешности по равномерности. Из рис. 1 видно, что погрешности по равномерности для последовательностей двоичных чисел, сформированных на основе системы (1), ниже, чем погрешности для системы (2).

Автокорреляционные функции сигналов характеризуют внутреннюю связность символов в последовательностях. Оценка автокорреляционных функций двоичных последовательностей традиционно сопровождается оценкой максимального уровня боковых лепестков [1].



а)



б)

Рис. 1. Гистограммы последовательностей в зависимости от значения погрешности по равномерности: а) система (1), б) система (2)

Проведенный анализ показал, что для систем (1) и (2) максимальный уровень боковых лепестков АКФ не превышает 0,27. В системе (1) можно отметить наличие последовательностей с уровнем боковых лепестков АКФ от 0,12 до 0,26; но общая доля таких последовательностей в исследуемом массиве не более 5%. Снижение интервалов корреляции двоичных псевдослучай-

ных сигналов является одной из основных задач в формирователях двоичных псевдослучайных сигналов. Одним из видов управляющих воздействий на параметры нелинейных систем и параметры временной дискретизации являются квазирезонансные воздействия вида [4]

$$m(t) = m_0(1 + Mf(t)), \quad (3)$$

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.

С целью исследования влияния глубины модуляции воздействий вида (3) на корреляционные характеристики сигналов систем (1), (2) были получены распределения вероятностей интервалов корреляции для $N = 1000$ реализаций двоичных чисел по 512 бит при вариации глубины модуляции M . Формирование двоичных сигналов на основе систем (1) и (2) выполнено при вариации начальных условий систем. В качестве модулируемого параметра выбран параметр временной дискретизации, показавший высокую эффективность в управлении корреляционными характеристиками хаотических сигналов [3; 5].

В таблице 1 приведено распределение последовательностей, сформированных на основе системы АА, в зависимости от глубины модуляции M по значениям интервалов корреляций.

Таблица 1. Распределение последовательностей, сформированных на основе системы АА

Глубина модуляции M	Доля последовательностей с интервалом корреляции, %		
	3	4	5
0	0	0	100
0,33	0	100	0
0,50	22	78	0
0,67	100	0	0
0,75	100	0	0

Из таблицы 1 видно, что увеличение глубины модуляции приводит к пропорциональному изменению интервалов корреляции. Увеличение глубины модуляции параметра временной дискретизации (1) приводит к сокращению интервала корреляции с 5 (для $M = 0$) до 3 (для $M = 0,75$).

В таблице 2 приведено распределение последовательностей, сформированных на основе сис-

темы ДК, в зависимости от глубины модуляции M по значениям интервалов корреляций.

Таблица 2. Распределение последовательностей, сформированных на основе системы ДК

Глубина модуляции M	Доля последовательностей с интервалом корреляции, %			
	1	2	3	4
0	0	0	83	12
0,05	0	0	86	1
0,13	0	1	90	0
0,20	0	0	100	0
0,29	0	24	43	0

Из таблицы 2 видно, что без квазирезонансных воздействий интервалы корреляции последовательностей на основе системы (1) равны 3. Глубина модуляции параметра временной дискретизации системы (2) M может меняться в меньших пределах по сравнению с системой (1), а также по сравнению с системой Лоренца и Чуа. При $M = 0,29$ среди последовательностей появляются интервалы корреляции 2, но при этом среди последовательностей появляются интервалы корреляции порядка 10. Поэтому дальнейшее увеличение глубины модуляции $M > 0,29$ становится нецелесообразно.

По таблицам 1-2 можно отметить то, что несмотря на применение модуляции параметра временной дискретизации интервалы корреляции последовательностей, сформированных на основе (1)-(2), не достигают интервалов корреляции M -последовательностей. В системе Лоренца при максимальной глубине модуляции $M = 0,8$ половина последовательностей ансамбля может иметь интервал корреляции 1, в системе Чуа практически все последовательности ансамбля обладают интервалом корреляции 1 [6].

Максимальный уровень боковых лепестков АКФ является дополнительной оценкой, характеризующей уровень внутренней связности последовательности. Уровень боковых лепестков АКФ системы (1) существенно не изменяется при изменении глубин модуляции M и не превышает 0,26. В системе (2) при увеличении глубины модуляции происходит увеличение числа последовательностей с меньшими по отношению к последовательностям, полученным от систем без модуляции, интервалам корреляции (см. рис. 2).

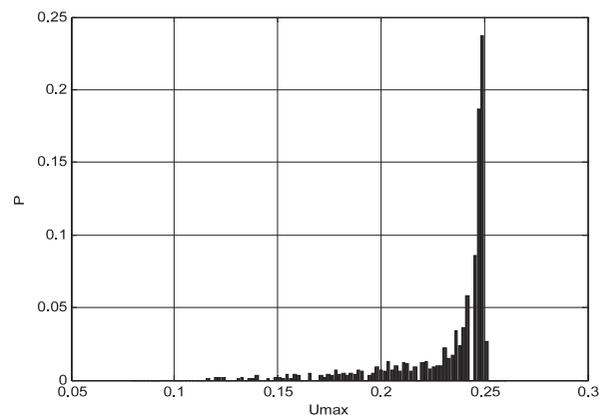


Рис. 2. Гистограммы распределения последовательностей на основе (2) в зависимости от модуля максимального уровня боковых лепестков АКФ $M = 0,05$

Из рис. 2 видно, что при увеличении M до 0,05 доля последовательностей с уровнем боковых лепестков 0,23...0,26 уменьшается более чем на 10%. В системе Лоренца максимальный уровень боковых лепестков равен 0,18; наиболее вероятные значения уровня боковых лепестков АКФ 0,12...0,13. В системе Чуа максимальный уровень боковых лепестков равен 0,22 с наиболее вероятными значениями 0,12...0,14. Уровень боковых лепестков АКФ систем Лоренца и Чуа в условиях квазирезонансных воздействий на параметр временной дискретизации в два раза выше, чем у M -последовательностей. Для систем (1)-(2) этот уровень выше в четыре раза.

Взаимокорреляционные функции двоичных псевдослучайных последовательностей имеют особенно важное значение для систем связи на основе прямого метода расширения спектра. При этом основным параметром, оцениваемым по взаимокорреляционной функции, является максимальный уровень бокового лепестка. Уровень боковых лепестков важен при выборе порога устройств приема систем с кодовым разделением каналов. Проведенный анализ показал, что максимальный уровень боковых лепестков взаимокорреляционных функций не превышает 0,28 для системы (1) и 0,26 для системы (2). Этот уровень практически не изменяется при модуляции параметров временной дискретизации систем, так же как и для систем Лоренца и Чуа [6]. В целом, уровень боковых лепестков ВКФ для всех четырех исследованных систем сопоставим с M -последовательностями. Системы Лоренца и Чуа обладают преимуществом в меньших значениях интервалов корреляции формируемых двоичных последовательностей и большей гибкостью управления этими интервалами в сравнении с системами ДК и АА.

Выводы

Квазирезонансные воздействия на параметры временной дискретизации нелинейных систем ДК и АА с динамическим хаосом являются эффективным средством управления корреляционными характеристиками двоичных псевдослучайных сигналов, сформированных на их основе. Применение квазирезонансных воздействий на параметры временной дискретизации сигналов систем ДК и АА позволяет управлять интервалами корреляции двоичных псевдослучайных последовательностей, сформированных на основе этих систем, и сократить интервалы корреляции двоичных последовательностей в два раза по сравнению с сигналами систем без управляющих воздействий. Изменение глубины модуляции параметров временной дискретизации в системах ДК и АА не приводит к значимым изменениям в уровнях взаимной корреляции двоичных последовательностей, сформированных на их основе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №10-08-00178-а) и ОАО «НПО «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко».

Литература

1. Дмитриев А., Панас А. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. – 252 с.

2. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Статистические характеристики двоичных псевдослучайных сигналов, формируемых на основе систем Лоренца и Чуа // Телекоммуникации. №12, 2010. – С. 30-34.
3. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Формирование псевдослучайных сигналов с управляемыми корреляционными характеристиками на основе систем с динамическим хаосом // ИКТ Т.6, №2, 2008. – С. 19-22.
4. Афанасьев В.В., Польский Ю.Е. Методы анализа, диагностики и управления поведением нелинейных устройств и систем с фрактальными процессами и хаотической динамикой. Казань: Изд. КГТУ им. А.Н. Туполева, 2004. – 219 с.
5. Способ формирования хаотической последовательности псевдослучайных сигналов // Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Патент RU 2 335 842 от 13.11.2006, опубл. 10.10.2008, бюл. №28.
6. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Статистические характеристики двоичных псевдослучайных сигналов, формируемых на основе систем Лоренца и Чуа // Материалы XII МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций ПТиТТ-2011». Казань: Изд. КГТУ им. А.Н. Туполева, 2011. – С. 463-464.

ANISHENKO-ASTAKHOV'S AND DMITRIEV-KISLOV'S SYSTEMS BASED BINARY PSEUDORANDOM CONSEQUENCES STATISTICAL PROPERTIES

Afanasjev V.V., Loginov S.S., Polsky Ju.E.

Anishenko-Astakhov's and Dmitriev-Kislov's nonlinear dynamic systems based binary pseudorandom consequences generators are considered. Auto- and cross-correlation functions and probability properties of the binary pseudorandom consequences are discovered.

Keywords: *dynamic chaos, pseudorandom signal, statistical properties.*

Афанасьев Вадим Владимирович, профессор, д.т.н., профессор Кафедры «Радиоэлектронные и квантовые устройства» (РКУ) Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева (КГТУ). E-mail: vafv@reku.kstu-kai.ru

Логинов Сергей Сергеевич, к.т.н., доцент Кафедры РКУ КГТУ им. А.Н.Туполева. E-mail: sslogin@mail.ru

Польский Юрий Ехилевич, профессор, д.ф.-м.н., профессор Кафедры РКУ КГТУ им. А.Н.Туполева. E-mail: vafv@reku.kstu-kai.ru