

МНОГОМЕРНЫЕ НЕГАРМОНИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ В ДИАГНОСТИКЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ С ДИНАМИЧЕСКИМ ХАОСОМ

Афанасьев В.В., Логинов С.С.

Рассматриваются многомерные негармонические спектры сигналов формирователей псевдослучайных сигналов на основе нелинейных систем с динамическим хаосом. Выполнен анализ аддитивных шумов и квазирезонансных воздействий на спектральные характеристики сигналов систем Лоренца и Чуа.

Ключевые слова: негармонический спектральный анализ, динамический хаос, квазирезонансные воздействия

При формировании сигналов с воспроизводимыми статистическими характеристиками на основе нелинейных систем с динамическим хаосом актуальным является решение задачи перевода нелинейных систем с динамическим хаосом из режима с преобладанием регулярной моды в режим с преобладанием хаотической моды путем введения внешних управляющих воздействий на параметры систем. Одним из широко используемых видов управляющих воздействий на параметры нелинейных систем и параметры временной дискретизации являются квазирезонансные воздействия [1].

Нелинейные системы с динамическим хаосом характеризуются наличием как регулярных, так и хаотических мод поведения. Реальные физические системы, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями, находятся в условиях действия комплекса шумов и флуктуаций, которые могут существенно изменить спектрально-корреляционные и вероятностные характеристики порождаемых системами сигналов [1-2]. Применение стабилизирующих воздействий на параметры систем обеспечивают необходимую модовую структуру, которая может изменяться при действии комплекса шумов и помех в реальной помеховой обстановке. Оперативная диагностика состава текущих мод рассматриваемого класса систем, с прогнозированием его изменений во времени, позволяет прогнозировать отказы, связанные с недопустимым изменением состава текущих мод систем. Актуальной является решение задачи диагностики нелинейных систем с хаотической динамикой в условиях действия комплекса шумов и флуктуаций по порождаемым ими сигналам.

В настоящее время наиболее широко исследованы нелинейные системы с хаотической динамикой Лоренца

$$\begin{aligned} \dot{X} &= -\sigma(X - Y); \dot{Y} = rX - Y - XZ; \\ \dot{Z} &= -bZ - XY; \end{aligned} \quad (1)$$

и Чуа

$$\begin{aligned} \dot{X} &= a(Y - h(X)); \dot{Y} = X - Y + Z; \\ \dot{Z} &= -\beta Y. \end{aligned} \quad (2)$$

Формирователи сигналов на их основе реализованы в виде специализированных интегральных радиоэлектронных схем, в которых неизбежно возникновение шумов и флуктуаций. В системах уравнений (1)-(2) X ; Y ; Z – пространственные переменные нелинейных систем с динамическим хаосом; r ; σ ; b – параметры системы Лоренца; a ; β – параметры системы Чуа, $h(X)$ – кусочно-линейная аппроксимация нелинейности системы Чуа [3]. В оперативной диагностике формирователей сигналов на основе эффектов динамического хаоса целесообразно совместное применение гармонического и негармонического обобщенного спектрального анализа формируемых сигналов [5-6]. Цель работы – диагностика управляемых квазирезонансными воздействиями формирователей сигналов на базе систем Лоренца и Чуа, в условиях действия комплекса аддитивных шумов, при помощи негармонического спектрального анализа сигналов.

Негармонический спектральный анализ фрактальных сигналов нелинейных радиоэлектронных систем с гармоническим спектром вида $1/f^\beta$ проводится путем разложения временных реализаций сигналов по базису дробно-степенных функций времени, адекватного анализируемым сигналам [5-6]:

$$M(t) = \sum_k \left[A_k \left(\frac{t - t_k}{\tau_k} \right)^{\alpha_k} + B_k \right]. \quad (3)$$

На основе представления (3) в работе получены негармонические спектры:

$$\begin{aligned} W((X, Y, Z)/(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}), \alpha); \\ W((X, Y, Z)/(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}), \tau/T); W(\alpha, \tau/T), \end{aligned}$$

где $(X, Y, Z)/(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i})$ – нормированные к значениям в состоянии равновесия амплитуды переменных систем Лоренца $i = 1$, Чуа $i = 2$; α – параметры дробно-степенных зависимостей; τ/T – длительности дробно-степенных импульсов, нормированные к периоду квазирезонансных колебаний T исследуемых систем.

Одним из широко используемых видов управляющих воздействий на параметры нелинейных систем и параметры временной дискретизации являются квазирезонансные воздействия вида [4; 7]

$$m(t) = m_0(1 + Mf(t)), \quad (4)$$

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.

Воздействия вида (4) на параметр временной дискретизации систем позволяют стабилизировать хаотическую моду нелинейных систем с динамическим хаосом, необходимую при формировании псевдослучайных сигналов. В этом случае необходима оперативная диагностика нелинейных радиоэлектронных систем с хаотической динамикой в условиях квазирезонансных воздействий на параметры временной дискретизации.

Энергетическая эффективность управляющих воздействий зависит от их спектральных характеристик [4]. Низкочастотные (НЧ) шумы и флуктуации из области стационарных воздействий $\omega < \Omega$ (Ω – частота квазирезонансных колебаний в системах (1) и (2)) приводят к случайному временному сдвигу спирали траекторий в фазовом пространстве. Эффект воздействия высокочастотных (ВЧ) шумов, принадлежащих области $\omega > \Omega$, зависит от инерционности нелинейных систем [4]. Поэтому важной задачей является оценка влияния спектральных характеристик аддитивных шумовых воздействий на негармонические спектры сигналов нелинейных систем с хаотической динамикой.

По отношению к параметрам систем с динамическим хаосом в работе исследуются следующие шумовые воздействия на параметры систем Лоренца

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \sigma(Y - X) + u_\sigma(t)X_{01}; \\ \dot{Y} &= -XZ + rX - Y + u_r(t)Y_{01}; \\ \dot{Z} &= XY - bZ + u_b(t)Z_{01}, \end{aligned} \quad (5)$$

и Чуа

$$\begin{aligned} \dot{X} &= a(Y - h(X)) + u_\alpha(t)X_{02}; \\ \dot{Y} &= X - Y + Z; \\ \dot{Z} &= -\beta Y + u_z(t)Z_{02}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $u_\sigma(t)$; $u_r(t)$; $u_b(t)$ – определяют закон аддитивных воздействий по отношению к значениям X_{01} ; Y_{01} ; Z_{01} в состоянии равновесия системы (1); $u_\alpha(t)$; $u_\beta(t)$ – определяют закон аддитивных воздействий по отношению к значениям X_{02} ; Y_{02} ; Z_{02} в состоянии равновесия системы (2).

На рис. 1-2 приведены негармонические спектры сигналов X ; Y системы Лоренца в условиях квазирезонансных воздействий на параметр временной дискретизации.

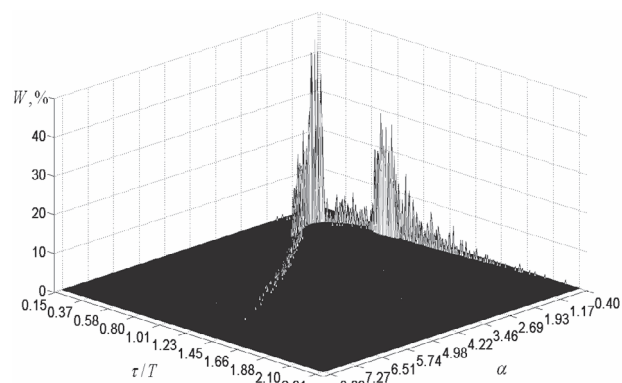


Рис. 1. Негармонический спектр сигнала системы Лоренца при воздействиях вида (4) с $M = 0,2$

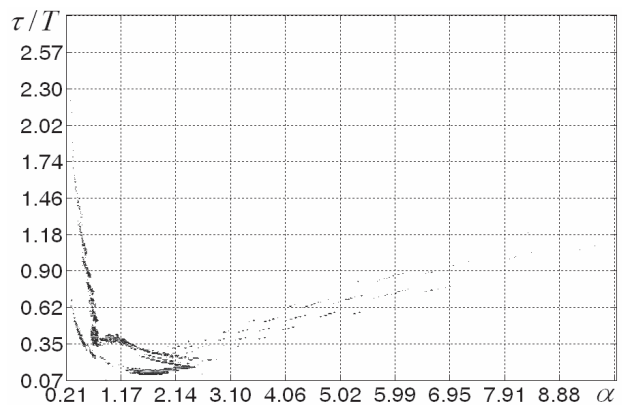


Рис. 2. Негармонический спектр сигнала системы (1) при воздействиях вида (4) с $M = 0,8$

На рис. 2, в отличие от рис. 1, приведено сечение негармонического спектра. Из рис. 1-2 видно, что при увеличении глубины модуляции M происходит «размывание» характерных регулярных образований в спектрах сигналов нелинейной системы Лоренца. Кроме того, в негармонических спектрах разрушаются регулярные образования, существовавшие в спектрах систем

в отсутствие управляющих воздействий на параметр временной дискретизации. Это говорит о дополнительной стохастизации системы и существенном изменении структуры генерируемых ей колебаний.

С целью оценки влияния интенсивности низкочастотных шумов на характеристики сигналов системы (1) были оценены негармонические спектры при вариации интенсивностей шумов

$$\sigma_A/(X_{01}), \sigma_A/(Y_{01}), \sigma_A/(Z_{01}) \in [10^{-5}, 10^{-1}],$$

где σ_A – среднеквадратическое значение шума. Реализации высокочастотных шумов $u(t)$ с равномерным законом распределения были получены с помощью генераторов псевдослучайных чисел с использованием пакетов MathCad и MATLAB. Низкочастотные шумы формировались путем цифровой фильтрации реализаций ВЧ-шумов. Частота среза фильтров выбиралась менее частоты квазирезонансных колебаний $F_c < 1/(3...5)T_1$ систем Лоренца и Чуа. Как показал анализ реализаций сигналов в условиях воздействий ВЧ-аддитивных шумов, они незначительно влияют на структуру негармонических спектров. Поэтому основное внимание в работе было уделено анализу влияния НЧ-шумов.

На рис. 3 приведены негармонические спектры сигналов X, Y, Z системы Лоренца в условиях аддитивных НЧ-воздействий вида (3) при фиксированном значении отношения среднеквадратического значения шумов к координатам точек равновесия систем равном $\sigma_A/(X_{01}) = \sigma_A/(Y_{01}) = \sigma_A/(Z_{01}) = 4 \cdot 10^{-3}$.

Из рис. 3 видно, что при аддитивных шумовых воздействиях вида (3) происходит «размывание» негармонических спектров сигналов $X; Y; Z$. Однако, в отличие от спектров на рис. 1-2, характерные регулярные образования на спектрах рис. 3 близки по форме к образованиям, полученным в [3] при отсутствии внешних воздействий и шумов. Диапазоны изменения параметров $\tau/T, \alpha$ практически не изменяются по сравнению с негармоническими спектрами в отсутствие шумов. Происходит лишь «расширение» спектральных линий.

На рис. 4 приведены негармонические спектры сигналов X, Y, Z системы Лоренца в условиях аддитивных низкочастотных воздействий вида (3) при

$$\sigma_A/(X_{01}) = \sigma_A/(Y_{01}) = \sigma_A/(Z_{01}) = 4 \cdot 10^{-2}.$$

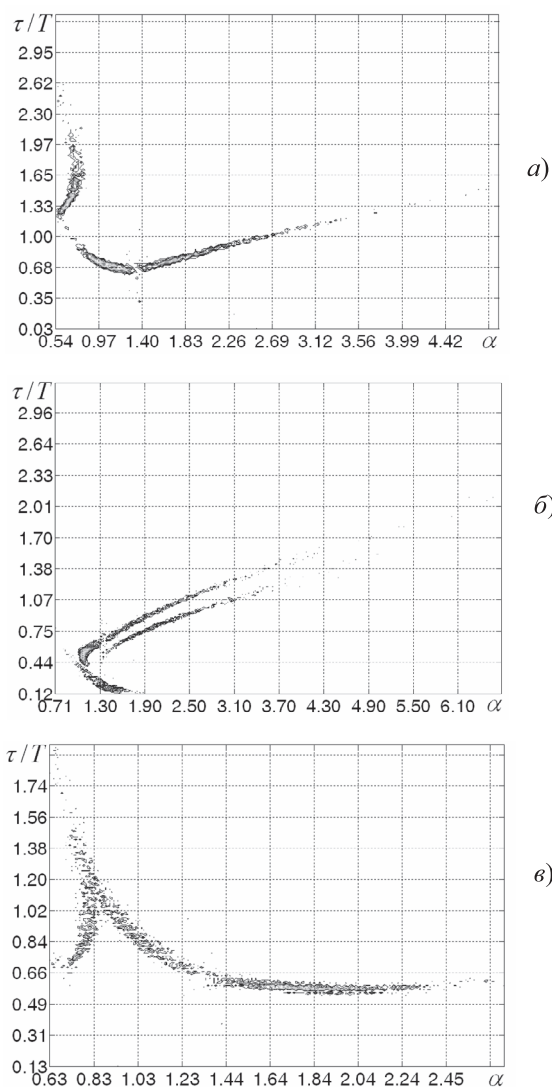


Рис. 3. Негармонические спектры сигналов системы (1) при аддитивных воздействиях вида (5) для сигналов: а) X ; б) Y ; в) Z

Принципиальным отличием спектров, приведенных на рис. 4, по сравнению с рис. 3 является то, что наблюдается дальнейшее «размывание» спектральных линий и разрушение характерных спектров сигналов системы (1). На рис. 4а основная часть спектральных линий сосредоточена в пределах $0,3 \leq \tau/T \leq 0,9$ и $0,7 \leq \alpha \leq 2,3$. В отличие от этого на рис. 3а спектр сосредоточен в пределах более узких линий, но в более широком диапазоне значений параметров $0,55 \leq \tau/T \leq 2,0$ и $0,54 \leq \alpha \leq 3,2$. В негармоническом спектре сигнала Y при увеличении интенсивности шума (см. рис. 4б) происходит также разрушение двух характерных спектральных линий. В результате этого параметры спектров меняются в пределах $0,05 \leq \tau/T \leq 1$ и $0,95 \leq \alpha \leq 2,0$, что также существенно отличается от пределов изменения при относительно низких интенсивностях шума (см. рис. 3б) $0,12 \leq \tau/T \leq 1,4$ и $0,9 \leq \alpha \leq 3,1$.

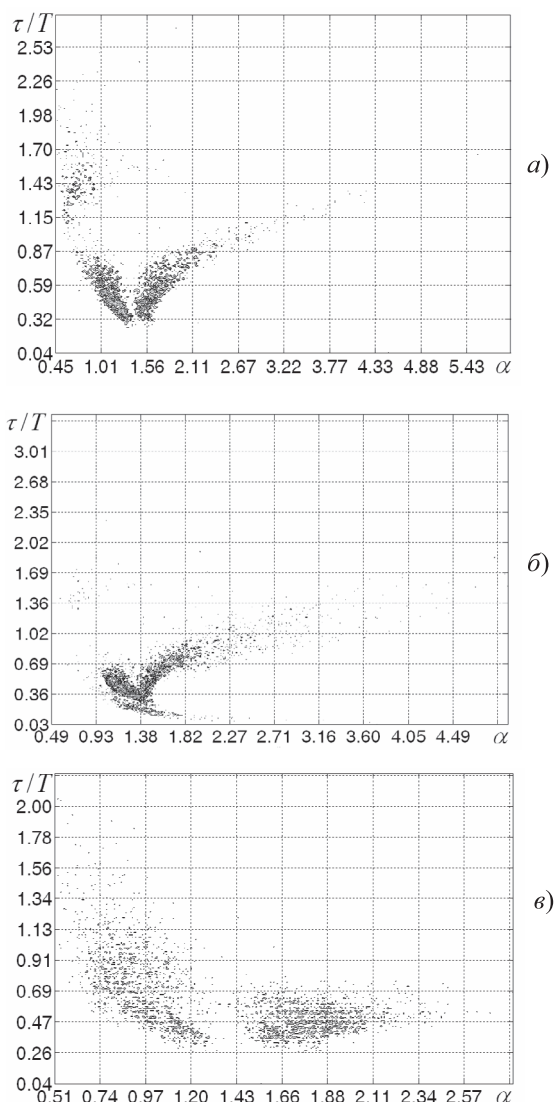


Рис. 4. Негармонические спектры сигналов системы Лоренца при аддитивных шумах вида (5) для сигналов: а) X ; б) Y ; в) Z

На рис. 5 приведены негармонические спектры сигналов X системы Чуа в условиях аддитивных низкочастотных воздействий вида (4) при фиксированном значении отношения среднеквадратического значения шумов к координатам точек равновесия системы (2) $\sigma_d / (X_{02})$. В отличие от спектров сигналов системы Лоренца, приведенных на рис. 3-4, в спектрах сигнала X системы Чуа при воздействии низкочастотных шумов не происходит «размывание» спектра с сохранением характерных спектральных линий. В спектрах системы Чуа при вариации уровня шумов происходит разрушение первоначальных распределений с значительным изменением вида спектров. Аналогичные изменения происходят и со спектрами сигналов Y, Z системы Чуа.

Сравнение рис. 1-2 и рис. 3-4 показывает, что спектры сигналов системы Лоренца в случае ква-

зирезонансных воздействий и низкочастотных шумов имеют принципиальные различия. При квазирезонансных воздействиях происходит быстрое «разрушение» структуры первоначального спектра при увеличении глубины модуляции. В спектрах сигналов в случае низкочастотных шумов при относительно больших вариациях интенсивности воздействий сохраняется структура спектра без воздействий.

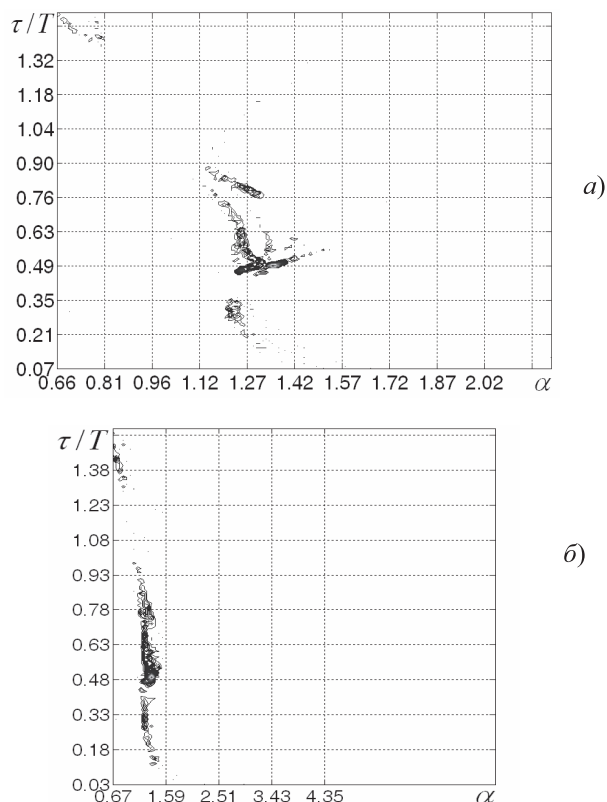


Рис. 5. Негармонические спектры сигналов системы Чуа для аддитивных воздействиях вида (4): а) для сигнала X при $\sigma_d / (X_{02}) = 10^{-3}$; б) для сигнала Y при $\sigma_d / (Y_{02}) = 4 \cdot 10^{-3}$

Выводы

1. Негармонический спектральный анализ служит эффективным средством диагностики управляемых формирователей псевдослучайных сигналов на базе систем Лоренца и Чуа.

2. Квазирезонансные воздействия на параметры временной дискретизации систем с динамическим хаосом вызывают разрушение структуры негармонических спектров сигналов систем без управляющих воздействий.

3. Аддитивные низкочастотные шумы в системе Лоренца вызывают размывание негармонических дробно-степенных спектров с сохранением их структуры, при этом степень размывания пропорциональна интенсивности шумов. В сис-

теме Чуа аддитивные низкочастотные шумы вызывают разрушение первоначальной структуры негармонических спектров без воздействий.

4. Анализ многомерных негармонических дробно-степенных спектров управляемых формирователей псевдослучайных сигналов позволяет определить эффективность стабилизирующих воздействий при действии комплекса шумов, и позволяет организовать оперативную диагностику состава текущих мод формирователей псевдослучайных сигналов. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №10-08-00178-а).

Литература

1. 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.
2. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Стрелкова Г.И. Влияние шума на хаотические системы // Флуктуации и шумы в сложных системах живой и неживой природы. Казань: Изд. Минобрнауки РТ, 2008. – С. 45-91.
3. Дмитриев А., Панас А. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. – 252 с.
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, 2004. – 219 с.
5. Афанасьев В.В., Логинов С.С. Диагностика электронных динамических систем на основе негармонических дробностепенных спектров // Флуктуации и шумы в сложных системах живой и неживой природы. Казань: Изд. Минобрнауки РТ, 2008. – С. 311-334.
6. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Ценцевицкий А.А. Дробно-степенные спектры сигналов систем с хаотической динамикой // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. Вып. 4(52), 2008. – С. 42-47.
7. Патент РФ №2335842. Способ формирования хаотической последовательности псевдослучайных сигналов / Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. от 13.11.2006. Опубл. 10.10.2008, бюл. №28.

MULTIDIMENSIONAL NON-HARMONIC SPECTRUMS IN DIAGNOSTICS OF THE CHAOTIC PSEUDORANDOM GENERATORS

Afanasjev V.V., Loginov S.S.

Lorenz and Chua nonlinear dynamic systems based pseudorandom consequences generators are considered. Multidimensional non-harmonic spectrums in diagnostics of the chaotic systems signals are discovered.

Keywords: *non-harmonic analysis, dynamic chaos, quasi-resonance control influences.*

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

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

УДК 621.396

БИСТАТИЧЕСКИЙ РАДИОЛОКАТОР С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ, ПАРАЗИТИРУЮЩИЙ НА СИГНАЛАХ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

Борисенков А.В., Горячкин О.В., Долгополов В.Н., Женгуров Б.Г.

В статье описывается система получения радиолокационного изображения (РЛИ) с использованием в качестве зондирующего сигнала ТВ-вещания по схеме бистатической РСА. Приводится описание основных функциональных и конструкторских особенностей аппаратуры, рассмотрен алгоритм формирования РЛИ. Также приведены результаты, полученные в ходе проведенного натурального эксперимента.

Ключевые слова: радиолокация, радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), многопозиционная РСА, паразит, радиолокационное изображение, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), гауссовский сигнал.

Введение

Последние годы характеризуются развитием новых технологий радиолокации, в основе которых