

5. E.R. Mardanshin, V.V. Afanasiev. Transformation of Phase-Shift Keying Signals by Functional Rejection Filters // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), IEEE, Novosibirsk, Russia, 2018.

Афанасьев Вадим Владимирович, д.т.н., проф., профессор каф. Электронных и квантовых средств передачи информации, , ivans8585@mail.ru

Давыдов Владислав Гусманович, магистр каф. Электронных и квантовых средств передачи информации, 11.04.01 Радиотехника, vgdavyd@mail.ru.

Львов Дмитрий Алексеевич, магистр каф. Электронных и квантовых средств передачи информации, 11.04.01 Радиотехника, dalvov@mail.ru.

УДК 621.37

## **ГЕНЕРАТОРЫ МАСКИРУЮЩИХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ МНОГОЛЕПЕСТКОВЫХ ДИСКРЕТНО-НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ ЛОРЕНЦА, SPROTTA И JERK**

В. В. Афанасьев, Д.А. Львов, Р.Р. Раупов  
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань

Шумовое маскирование является одним из эффективных средств повышения конфиденциальности радиосвязи. Перспективно применение генераторов маскирующих псевдослучайных сигналов на основе многолепестковых нелинейных динамических систем с хаотической динамикой [1], среди которых следует выделить широко применяемые многолепестковые системы Лоренца, SprottA, Jerk. Формирование сигналов на основе указанных дискретно-нелинейных систем с динамическим хаосом обычно выполняется путем численного решения методом Эйлера систем нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику систем. При этом статистические характеристики генерируемых псевдослучайных сигналов существенно зависят от выбора шага численного интегрирования, определяемого параметрами временной дискретизации.

Цель работы – обоснование выбора базовых параметров генераторов псевдослучайных сигналов дискретно-нелинейных многолепестковых систем Лоренца, SprottA, Jerk, при изменении параметров временной дискретизации.

При некорректном выборе интервала временной дискретизации система с динамическим хаосом может перейти в регулярный режим работы, либо может произойти срыв генерации сигналов. Выбор интервала дискретизации определяет быстродействие работы генераторов маскирующих псевдослучайных сигналов, а также самой системы конфиденциальной связи. Интервал дискретизации, с одной стороны, следует выбирать минимальным для уменьшения погрешности численного решения дискретно-нелинейной многолепестковой системы, с другой стороны – с

увеличением интервала дискретизации повышается быстродействие при сохранении тактовой частоты. Поэтому, необходимо определить оптимальный диапазон изменения интервала дискретизации, при котором обеспечивается приемлемая точность при максимальном быстродействии.

В работе получены оценки статистических характеристик сигналов, генерируемых на основе четырех-лепестковой модифицированной системы Лоренца при вариации в диапазоне от  $10^{-5}$  до 0.4 коэффициента  $h$ , определяемого отношением интервала временной дискретизации, к периоду квазирезонансной частоты порождающей многолепестковой системы Лоренца. Исследованы автокорреляционные функции и спектры формируемых сигналов, установлено, что нормированное текущее среднее реализаций сигналов изменяется от 20 до 30, а дисперсия варьируется от 60 до 190. При значениях  $h$  около 0.05, в дискретно-нелинейной четырёх-лепестковой модифицированной системе Лоренца возникают срывы генерации. На основе анализа полученных оценок определен рекомендуемый диапазон изменения  $h = 0.005...0.01$ .

Многолепестковая система SprottA описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = -x + yz - af(x), \quad \dot{z} = 1 - y^2, \quad (1)$$

где  $x, y, z$  - переменные системы;  $a$  - управляющий параметр системы, функция  $f(x) = \sin(2\pi bx)$  определяет количество мультиспиралей в фазовом пространстве исследуемой динамической системы [2].

В работе исследовано влияние изменения параметров многолепестковой системы SprottA на её режимы. Для выявления особенностей дискретно-нелинейной многолепестковой системы SprottA, проводилось численное решение системы (1) при вариации  $h$ . Установлено, что хаотический режим наблюдается при выборе управляющего параметра в диапазоне:  $4 \leq a \leq 40$ . Установлено, что управляющий параметр  $a$  определяет количество спиралей в фазовом портрете системы и выбирается около 6.3 для генерирования 3-х лепестков-спиралей, 12.8 – для генерирования 7-ми лепестков-спиралей. Получены оценки типовых значений дисперсий  $D$  и пик-факторов ( $Q$ , Дб) псевдослучайных сигналов  $x, y, z$  исследуемой многолепестковой системы SprottA с хаотической динамикой, при различном числе  $N$  мультиспиралей (Таблица 1).

Таблица 1 – Влияние  $N$  на дисперсии и пик-факторы генерируемых сигналов многолепестковой системы SprottA

| $N$ | $D_x$ | $Q_x$ | $D_y$ | $Q_y$ | $D_z$ | $Q_z$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3   | 0.54  | 7.8   | 0.9   | 9.1   | 0.4   | 7.8   |
| 4   | 0.75  | 8.6   | 0.97  | 8.7   | 0.7   | 9.2   |
| 5   | 1.2   | 8.7   | 0.98  | 10.6  | 1.1   | 7.2   |
| 6   | 1.1   | 6.1   | 1.1   | 9.5   | 1.2   | 5.8   |
| 7   | 0.77  | 5.8   | 0.9   | 10.3  | 1.3   | 6.1   |

Снижение пик-фактора формируемых псевдослучайных сигналов повышает энергетическую эффективность передающей аппаратуры конфиденциальных систем связи на базе эффектов динамического хаоса. Установлено, что при формировании сигналов многолепестковой системы (1), наименьшее значением пик-фактора имеет сигнальная компонента  $x$  при значении управляющего параметра  $a = 12.8$ .

Многолепестковая система Jerk описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений [3]:

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = z, \quad \dot{z} = -x - y - \beta z + f(x), \quad (2)$$

где  $x, y, z$  - переменные системы;  $\beta$  - управляющий параметр системы, функция  $f(x)$  определяет количество мультиспиралей в фазовом пространстве исследуемой динамической системы [3]. Исследованы характеристики сигналов, генерируемых дискретно-нелинейной системой Jerk. Проведен анализ зависимости пик-фактора сигналов системы (2) при вариации управляющего параметра. Полученные оценки значений пик-факторов  $Q$  псевдослучайных сигналов многолепестковой Jerk системы при изменении параметра  $\beta$  приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимости пик-факторов сигналов многолепестковой системы Jerk от значений управляющего параметра

| Пик-фактор | Параметр $\beta$ |      |      |      |      |      |
|------------|------------------|------|------|------|------|------|
|            | 0.4              | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  |
| $Q_x$      | 7.25             | 6.19 | 6.38 | 6.41 | 6.52 | 6.68 |
| $Q_y$      | 10.81            | 9.74 | 8.62 | 8.59 | 7.52 | 7.09 |
| $Q_z$      | 9.90             | 8.99 | 8.14 | 8.20 | 7.29 | 6.9  |

На основе полученных зависимостей установлено, что наименьшим значением пик-фактора (6.19 дБ) обладает компонента  $X$  многолепестковой Jerk системы при значении управляющего параметра  $\beta = 0.5$ .

Список использованных источников

1. А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Н.А. Максимов, А.И. Панас. Генерация хаоса. – Москва: Техносфера, 2012. 424с.
2. XiaoyuHu, ChongxinLiu. Multi-scroll hidden attractors in improved SprottA system / Nonlinear Dynamics Vol. 86, No. 3, 2006. – pp. 10-21.
3. LiuChunxia, YiJie. Research on the multi-scroll chaos generation based on Jerk Mode / Procedia Engineering 29, 2012. – pp. 957-961.

Афанасьев Вадим Владимирович, д.т.н., проф., профессор каф. Электронных и квантовых средств передачи информации, ivans8585@mail.ru  
 Львов Дмитрий Алексеевич, магистр каф. Электронных и квантовых средств передачи информации, 11.04.01 Радиотехника, dalvov@mail.ru.  
 Раупов Руслан Рустемович, магистр каф. Электронных и квантовых средств передачи информации, 11.04.01 Радиотехника, graupov@mail.ru