

# Моделирование хаотической системы связи с квадратурной фазовой модуляцией в среде Labview

Александр Макаров, Иван Бабкин, Георгий Колев,  
Олег Баязитов, Максим Гальченко, Екатерина Копец

*Кафедра систем автоматизированного проектирования  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

lessrolimp@yandex.ru, iababkin@etu.ru, gyukolev@etu.ru,  
oobayazitov@etu.ru, magalchenko@etu.ru, eekopets@etu.ru

**Аннотация.** В данной работе представлено численное моделирование хаотической системы связи с квадратурной фазовой модуляцией в среде Labview. Для оценки надежности и эффективности системы используются такие ключевые метрики, как частота битовых ошибок, отношение сигнал/шум и спектр мощности. Результаты показывают, что схема квадратурной хаотической модуляции с фазовым сдвигом обеспечивает достаточную безопасность и малое число ошибок в средах с низким отношением сигнал/шум. В исследовании подчеркивается потенциал систем связи, основанных на хаосе, для безопасной передачи данных с высокой степенью целостности и предоставляется масштабируемая платформа моделирования для дальнейшей оптимизации и тестирования.

**Ключевые слова:** хаос, хаотическая модуляция сигнала, хаотическая система связи, метод CD, система Лоренца, LabVIEW

## I. ВВЕДЕНИЕ

В эпоху, когда безопасность и эффективность систем связи имеют первостепенное значение, исследование передовых методов модуляции, повышающих целостность и конфиденциальность данных, стало критически важным направлением. Системы связи, основанные на хаосе, благодаря своей непредсказуемости и шумоподобным характеристикам хаотических сигналов стали перспективным направлением для решения проблем безопасности при передаче данных [1]. Среди этих инноваций выделяется подход Quadrature Chaos Phase-Shift Keying (QCPSK), объединяющий надежность хаотических носителей со спектральной эффективностью квадратурной модуляции [2]. Использование двух хаотических сигналов со сдвигом фазы в квадратуре на 90 градусов направлено на повышение скорости передачи данных при сохранении преимуществ безопасности, присущих системам, основанным на хаосе.

Традиционная модуляция фазовой манипуляции (PSK) широко известна своей эффективностью в полосе пропускания, но ее уязвимость к прослушиванию требует дополнительных мер безопасности [3]. Модуляция на основе хаоса решает эту проблему путем кодирования информации сигналами с высокой

зависимостью от начальных условий, что затрудняет декодирование перехваченных сигналов [4]. Тем не менее, интеграция хаоса в PSK создает проблемы, особенно в синхронизации между передатчиком и приемником, что имеет решающее значение для точной демодуляции [5].

Проектирование и оптимизация таких систем требуют тщательного численного моделирования перед реализацией на оборудовании. Моделирование позволяет исследователям анализировать показатели производительности, такие как частота битовых ошибок (BER), точность синхронизации и спектральная эффективность, при различных условиях канала, тем самым снижая затраты и время на разработку [6]. LabVIEW, графическая среда программирования, известная своей универсальностью в обработке сигналов и визуализации данных в режиме реального времени, предлагает идеальную платформу для моделирования сложных систем связи. Его модульная архитектура облегчает итеративное тестирование компонентов QCPSK, от хаотической генерации сигналов до алгоритмов демодуляции, предоставляя при этом интуитивно понятные инструменты для визуализации поведения системы.

В этом исследовании представлено проектирование и численное моделирование системы связи QCPSK с использованием LabVIEW, с акцентом на рабочий процесс ее реализации и оценку производительности

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### A. Система Лоренца как основа хаотичной системы коммуникации

Всем известная система Лоренца описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma(y - x) \\ \dot{y} &= x(r - z) - y \\ \dot{z} &= xy - bz\end{aligned}\quad (1)$$

В данном исследовании мы используем классический набор параметров:  $\sigma = 10$ ,  $r = 28$ ,  $b = 8/3$ . Мы используем решатель ОДУ, основанный на полуявном

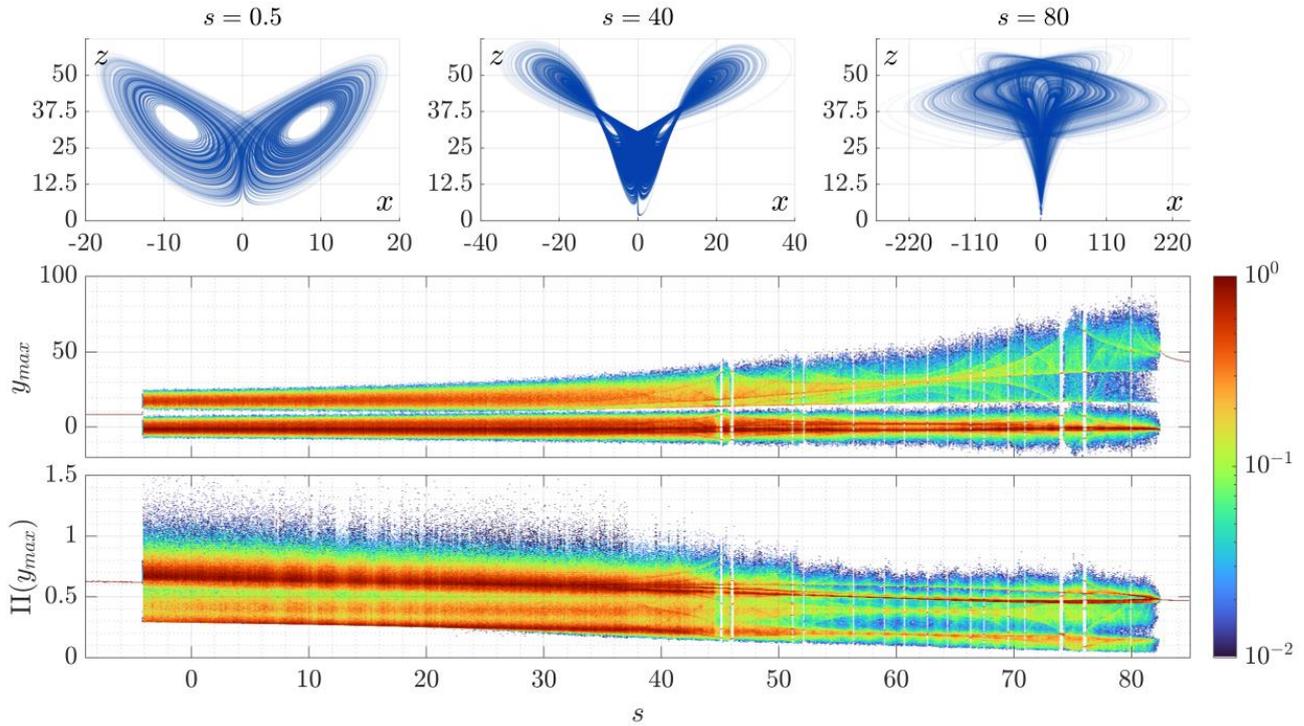


Рис. 1. Диаграммы 1D-бифуркации на основе цветной плотности распределения значений для системы Лоренца при варьировании параметра  $s$ . На верхних панелях рисунка изображены фазовые портреты системы Лоренца с различными значениями  $s$ . На средней панели представлена классическая диаграмма 1D-бифуркации, полученная путем анализа локальных максимумов переменной  $y$ . На нижней панели представлена диаграмма 1D-бифуркации, полученная путем анализа межпиковых интервалов ( $\Pi$ ) локальных максимумов переменной  $y$ .

$$\begin{aligned}
 x_{n+s} &= x_n + h_1(\sigma(y_n - x_n)) \\
 y_{n+s} &= y_n + h_1(x_{n+s}(r - z_n) - y_n) \\
 z_{n+s} &= z_n + h_1(x_{n+s}y_{n+s} - bz_n) \\
 z_{n+1} &= \frac{(z_{n+s} + h_2x_{n+s}y_{n+s})}{1+h_2b} \\
 y_{n+1} &= \frac{y_{n+s} + h_2(x_{n+s}(r - z_{n+1}) - y)}{1+h_2} \\
 x_{n+1} &= \frac{x_{n+s} + h_2\sigma y_{n+1}}{1+h_2\sigma}
 \end{aligned} \quad (3)$$

диагональном методе второго порядка с переменным коэффициентом симметрии (VSCD). Одной из интересных особенностей метода VSCD является управляемая симметрия между полуявными и диагонально-неявными частями со следующими временными шагами:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= (1 - s) \cdot h, \\
 h_2 &= s \cdot h
 \end{aligned} \quad (2)$$

Этот эффективный решатель ОДУ сочетает в себе высокую численную стабильность неявных методов с высокой производительностью и низкими вычислительными затратами явных методов. Конечно-разностная схема для системы Лоренца, полученная методом VSCD, выглядит следующим образом:

Воспользуемся классическим методом Пекоры–Кэрролла [7] для однонаправленной синхронизации систем Лоренца. В исследованиях [8], [9] авторы показывают, что оптимальной переменной для

синхронизации систем Лоренца является переменная  $y$ . Напишем ОДУ для ведомой системы:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_s &= \sigma(y_s - x_s) \\
 \dot{y}_s &= x_s(r - z_s) - y_s + k(y_m - y_s) \\
 \dot{z}_s &= x_s y_s - bz_s
 \end{aligned} \quad (4)$$

здесь  $k$  – коэффициент синхронизации. Аналогично уравнению 3, получим конечно-разностную схему для ведомой системы:

$$\begin{aligned}
 x_{n+s} &= x_n + h_1(\sigma(-y_n + x_n)) \\
 y_{n+s} &= y_n + h_1((x_{n+s}(r - z_n) - y_n + k\Delta y)) \\
 z_{n+s} &= z_n + h_1(x_{n+s}y_{n+s} - bz_n) \\
 z_{n+1} &= \frac{(z_{n+s} + h_2x_{n+s}y_{n+s})}{1+h_2b} \\
 y_{n+1} &= \frac{y_{n+s} + h_2(x_{n+s}(r - z_{n+1}) + k\Delta y)}{1+h_2} \\
 x_{n+1} &= \frac{x_{n+s} + h_2\sigma y_{n+1}}{1+h_2\sigma} \\
 \Delta y &= (y^* - y_n)
 \end{aligned} \quad (5)$$

где  $y^*$  – вторая переменная ведущей системы.

Исследуем влияние коэффициента симметрии  $s$  на динамику системы Лоренца. На рис. 1 показаны одномерные бифуркационные диаграммы на основе цветной плотности, предложенные в [10], [11] для системы Лоренца с изменяющимся  $s$ . Полученные результаты дают понять, что дискретная модель

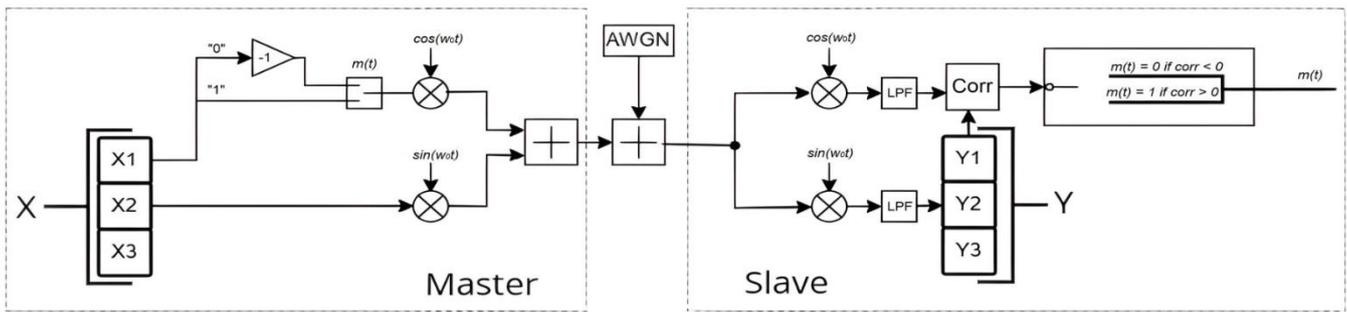


Рис. 2. Блок-схема системы связи QCPSK [2].

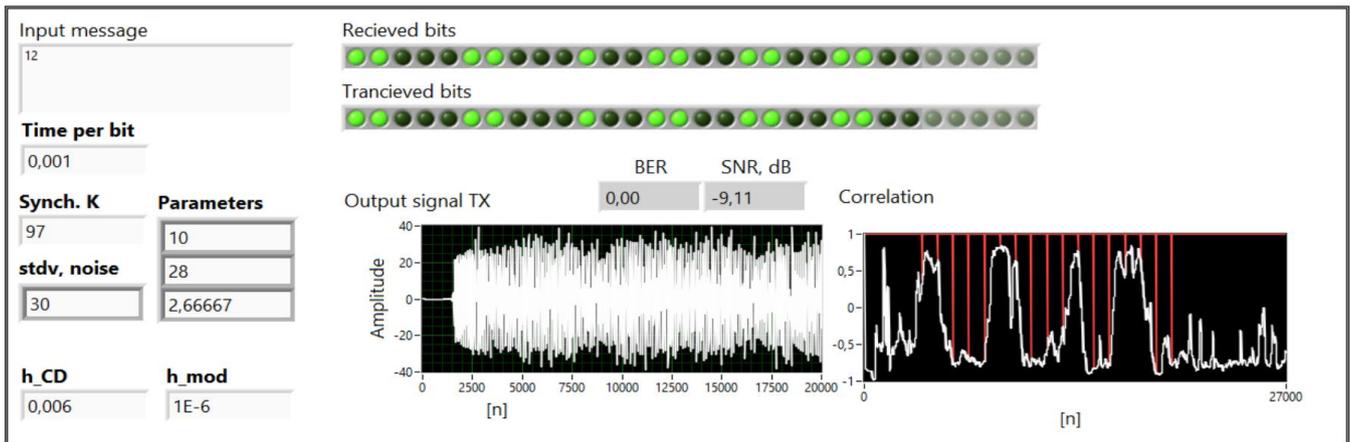


Рис. 3. Передняя панель виртуального инструмента для управления параметрами моделирования

на основе системы Лоренца сохраняет хаотическое поведение практически во всем диапазоне величины  $s$ .

### В. Хаотическая коммуникация на основе QCPSK

Принцип модуляции QCPSK, описанный в исследовании [2], основан на использовании хаотических осцилляторов для достижения безопасной и эффективной передачи данных. Структурная схема модуляции QCPSK представлена на рис. 2. Такая хаотическая система связи подразумевает синхронизацию между ведущей и ведомой системами. Передатчик кодирует двоичные данные путем фазового сдвига хаотического сигнала, где биты «1» и «0» представлены исходным и инвертированным сигналом от первой переменной исходной хаотической системы. Эти закодированные сигналы передаются через квадратурную составляющую несущей частоты, в то время как синфазная составляющая несет сигнал синхронизации, полученный от второй переменной мастер системы. На приемнике сигнал синхронизации изменяет вторую переменную состояния в ведомом осцилляторе, заставляя его повторять хаотическое поведение системы передатчика. Для принятого сигнала рассчитывается корреляция с сигналом от первой переменной состояния ведомой системы для фиксированного временного окна. Положительный коэффициент корреляции обозначает «1», в то время как отрицательное значение означает «0». Такая синхронизация на основе подстановки и квадратурная модуляция обеспечивают передачу данных и надежную синхронизацию даже в аддитивных каналах белого

гауссова шума. Оценка производительности системы хаотической связи QCPSK оценивается в разделе III.

### С. Модель LabView

Для того, чтобы получать достоверные данные, максимально приближенные к реальным, было принято решение использовать возможности интеграции инструментов Multisim в LabVIEW. Для этого мы создаем электрическую цепь для генератора  $\sin$  и  $\cos$  на основе моста Вина (рис. 4) и фильтров нижних частот в Multisim 14.3.

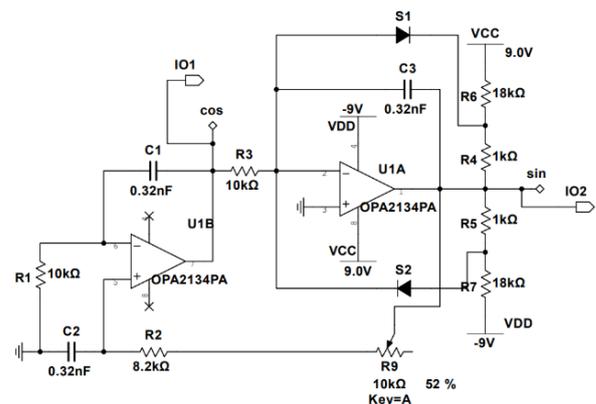


Рис. 4. Генератор Sin & Cos

Все эти схемы интегрированы в LabVIEW 2014 с помощью дополнительного пакета Control & Simulation, в котором реализованы остальные части

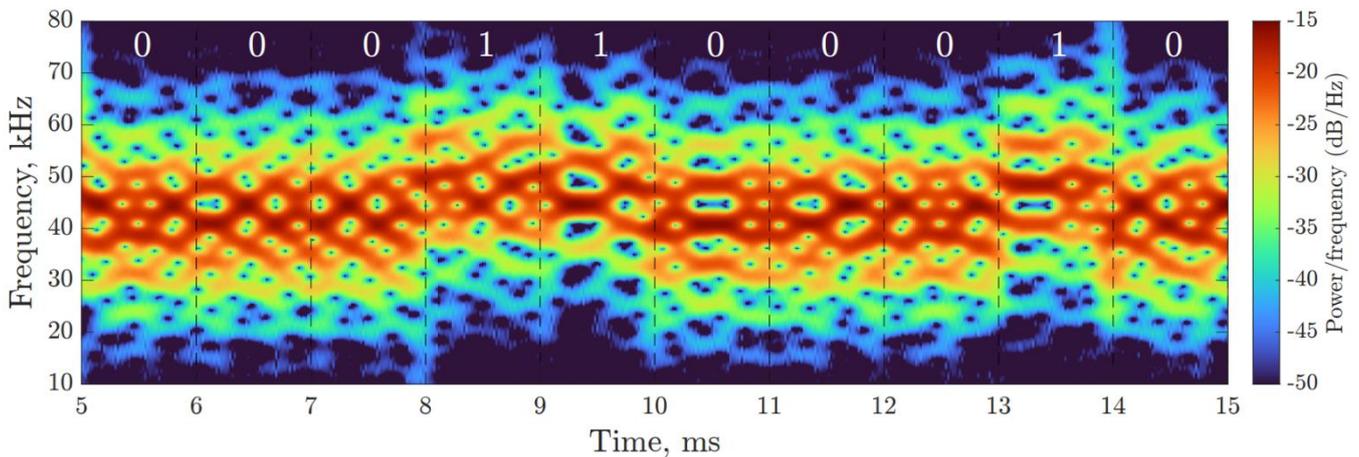


Рис. 5. Спектр мощности сигнала при передаче тестового сообщения [0001100010].

хаотической системы связи. Передняя панель разработанного испытательного стенда показана на рис. 3. В предлагаемом тестовом стенде можно задать передаваемое сообщение, время передачи битов, уровень шума и т.д.

Для оценки фазового сдвига в передаваемом сигнале используется корреляционный анализ. Таким образом, отрицательная корреляция указывает на передачу нулевого бита, а положительная корреляция указывает на передачу единичного бита.

Когда известна битовая длительность сообщения, можно легко разделить весь сигнал на равные блоки и оценить соотношение на каждом из них, полностью восстановив переданное сообщение.

### III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### A. Спектральный анализ

В данной части мы исследуем изменения динамики передаваемого сигнала в процессе модуляции. Время передачи бита  $t_b = 1$  мс. Спектр мощности сигнала при передаче тестового сообщения "0001100010" показан на рис. 5. Анализ спектра мощности передаваемого тестового сообщения позволяет выявить незначительные изменения частоты в течение наблюдаемого временного интервала. Повторяющаяся двоичная последовательность соответствует согласованным спектральным картинкам, в которых переходы между битами (например, 0 к 1 или от 1 к 0) совпадают с небольшими сдвигами в частотной области.

#### B. BER-анализ

Исследуем помехоустойчивость QCPK для различных  $t_b$ . Экспериментальные результаты оценки частоты битовых ошибок (BER) в условиях низкого соотношения сигнал/шум (SNR) представлены на рис. 6.

Результаты показывают, что увеличение  $t_b$  значительно повышает надежность системы, особенно в условиях низкого отношения сигнал/шум. При более высоких уровнях SNR (ближе к 0 дБ) BER экспоненциально уменьшается по всем тестируемым значениям  $t_b$ . Примечательно, что при низком SNR (-10 дБ) только самое большое  $t_b = 2,0$  мс позволяет достичь жизнеспособной BER, в то время как более

короткие интервалы приводят к росту числа ошибок, превышающего пределы применимости.

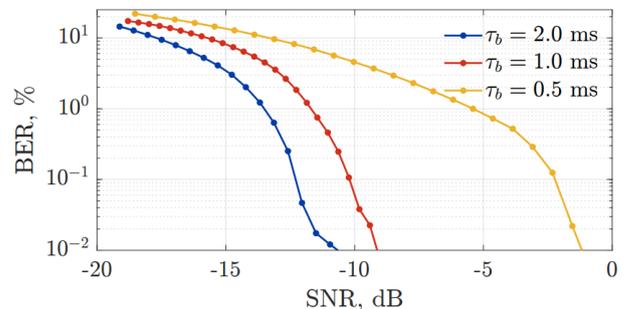


Рис. 6. Зависимости BER и SNR для различных  $t_b$ .

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное моделирование системы связи QCPK в LabVIEW продемонстрировало ее способность достигать достаточной безопасности и высокой помехоустойчивости за счет хаотической модуляции сигнала. Кодирование данных через инверсию хаотического сигнала, генерируемого системой Лоренца, схема обеспечивает безопасную передачу за счет использования непредсказуемости хаотической динамики. Оценка рабочих характеристик при использовании аддитивного белого гауссова шума показала высокую устойчивость к ошибкам, при этом система достигла BER ниже 0,01% при SNR около -10 дБ.

Спектральный анализ подтвердил минимальные частотные искажения при модуляции. Эти результаты подчеркивают потенциал системы QCPK для безопасной, помехоустойчивой связи в сложных условиях. Будущие исследования будут сосредоточены на создании прототипов аппаратного обеспечения и оптимизации хаотических наборов параметров для дальнейшего повышения практической применимости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kaddoum G. Wireless chaos-based communication systems: A comprehensive survey // IEEE access. 2016. Т. 4. С. 2621-2648.
- [2] Babajans R. et al. Impact of the chaotic synchronization's stability on the performance of QCPK communication system // Electronics. 2021. Т. 10. №. 6. С. 640.

- [3] Proakis J. G., Salehi M. Digital communications. – McGraw-hill, 2008.
- [4] Tse C., Lau F. Chaos-based digital communication systems //Operating Principles, Analysis Methods and Performance Evaluation (Springer Verlag, Berlin, 2004). 2003.
- [5] Rybin V. et al. Optimizing the synchronization parameters in adaptive models of Rössler system // 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE, 2021. С. 1-4.
- [6] Haykin S. Communication systems. – John Wiley & Sons, 2008.
- [7] Pecora L. M., Carroll T. L. Synchronization in chaotic systems //Physical review letters. 1990. Т. 64. №. 8. С. 821.
- [8] Rybin V. et al. Optimal synchronization parameters for variable symmetry discrete models of chaotic systems //2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE, 2022. С. 1-5.
- [9] Rybin V. et al. Estimating optimal synchronization parameters for coherent chaotic communication systems in noisy conditions //Chaos Theory and Applications. 2023. Т. 5. №. 3. С. 141-152.
- [10] Moysis L., Lawnik M., Volos C. Density-colored bifurcation diagrams—A complementary tool for chaotic map analysis //International Journal of Bifurcation and Chaos. 2023. Т. 33. №. 15. С. 2330036.
- [11] Kopets E. et al. Fractal tent map with application to surrogate testing //Fractal and Fractional. 2024. Т. 8. №. 6. С. 344.