



## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

Н. С. Аистов, курсант 4-го курса,

e-mail: Nick-Stork@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»,

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

Е. В. Волхонская, д-р техн. наук, доцент,

e-mail: volkhonskaya\_e@mail.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»,

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

В статье приводится сравнительная оценка результатов экспериментального исследования помехоустойчивости цифровых форматов радиосигналов двухуровневой (BPSK) и четырехуровневой (QPSK) фазовой манипуляции по разработанной производителями методике проведения измерений вероятности ошибки на символ [1]. Полученные результаты с достаточной степенью сходимости совпадают с теоретической оценкой помехоустойчивости методов кодирования информации.

***Ключевые слова:** помехоустойчивость, многоуровневая фазовая манипуляция, отношение сигнал/шум в канале передачи, вероятность ошибки на символ*

### ВВЕДЕНИЕ

Цифровые форматы радиосигналов BPSK и QPSK находят широкое применение в цифровых системах передачи информации, а именно в геостационарной системе спутниковой связи стандарта Инмарсат С, являющейся неотъемлемой частью Глобальной морской системы связи при бедствии (ГМССБ), в глобальной спутниковой сети широкополосного доступа Global Xpress [2], в низкоорбитальной системе спутниковой связи Иридиум [3], в прямом канале системы сотовой связи стандарта CDMA [4] и т. д. Передача информации в цифровых каналах указанных систем ведется на фоне различного рода шумов и помех. В ряде научных технических источников указано, что в зависимости от типа цифровой модуляции требуемое отношение сигнал/шум (ОСШ) в канале, при котором обеспечивается эффективная передача речи или данных, различно [5]. Так, при передаче посредством BPSK это отношение составляет 6,00 дБ, QPSK – 6,42 дБ, 8PSK – 11,00 дБ, 16APSK – 13,00 дБ, 32APSK – 16,05 дБ. Данные ОСШ обеспечивают требуемую вероятность ошибки на символ при передаче речи –  $BER=10^{-3}$  или передаче данных –  $BER=10^{-6}$ . В настоящее время вопросам оценки помехоустойчивости приема радиосигналов цифровых форматов посвящено большое количество научных статей, трудов, монографий отечественных и зарубежных авторов [6, 7, 8]. В связи с этим экспериментальная оценка помехоустойчивости цифровых форматов фазовой манипуляции и сравнительная оценка помехоустойчивости данных методов представляются актуальными научными задачами.

## **ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объектом исследования являются двухуровневый и четырехуровневый фазоманипулированные сигналы, предмет исследования – их помехоустойчивость.

## **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Цель работы – исследование зависимости вероятности ошибки на символ от ОСШ в цифровом канале передачи на базе стенда «Кодирование и модуляция информации в системах связи» [9]. Цель достигалась поэтапным решением следующих задач:

1. Исследование функциональных возможностей стенда.
2. Экспериментальное исследование помехоустойчивости цифровых форматов сигналов BPSK и QPSK.
3. Обработка экспериментальных данных и сравнительный анализ полученных результатов.

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для многоуровневых сигналов при оценке помехоустойчивости вместо коэффициента битовых ошибок производят измерение вероятности ошибки на символ различными методами (Карнаков). Связано это с различием бит, которые кодируются одним символом в сигнале BPSK или QPSK. При этом под вероятностью ошибки на символ понимают отношение числа ошибочно принятых символов бинарной последовательности к общему числу принятых символов [10]. Под ОСШ в цифровом канале передачи понимают отношение энергии бита к спектральной плотности средней мощности шума.

Оценка помехоустойчивости сводится к измерению зависимости коэффициента битовых ошибок (КБО) в канале от ОСШ и пересчету КБО в вероятность символьной ошибки.

Экспериментальное исследование проводилось на стенде «Кодирование и модуляция информации в системах связи», состоящем из следующих функциональных блоков: передающий блок; блок источника помех; сумматор, имитирующий линию связи; приемный блок и блок индикации. В передающем блоке программно реализуются функции кодера и модулятора BPSK и QPSK сигналов. Передаваемое число может быть сгенерировано случайным образом либо введено с клавиатуры. Оно переводится в восьмибитовую комбинацию, передаваемую в цикле. В модуляторе данный цифровой сигнал кодируется соответствующими уровнями фазы несущего колебания. Источник помех формирует сигнал типа «белый шум» с регулируемым уровнем эффективного напряжения. В сумматоре формируется аддитивная смесь полезного сигнала и шума. На приемной стороне происходит процесс демодуляции/декодирования, результаты которого отражаются в блоке индикации.

Исходными данными в эксперименте служили: количество переданных байт, равное пятистам тысячам (500 000), эффективное напряжение помехи, изменяющееся в пределах от 0 В до 2.5 В с шагом 0.1 В, случайно генерируемое число в шестнадцатеричной форме представления от 1 до 99.

В качестве регистрируемых данных, снимаемых с блока индикации, – фактическое количество переданных байт; количество ошибочно принятых бит; эффективное напряжение передаваемого сигнала, В; эффективное напряжение помехи, В.

Экспериментальное исследование сводилось к измерению КБО при передаче одной и той же информации посредством BPSK и QPSK при разных ОСШ в линии связи. Серия экспериментальных измерений представлена десятью экспериментами при каждом из четырнадцати значений ОСШ.

Обработка экспериментальных данных проводилась по стандартной процедуре, при этом КБО оценивался выражением:

$$\text{КБО} = \frac{N_{\text{ош}}}{N_{\text{прд}}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{ош}}$  – количество переданных с ошибкой бит,  $N_{\text{прд}}$  – количество переданных бит.

Расчет ОСШ проводился с использованием выражения:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} - 10 \cdot \lg(m), \quad (2)$$

где  $E_b$  – энергия, необходимая для передачи одного бита;  $N_0$  – спектральная плотность мощности белого шума в канале информации;  $S$  – мощность цифрового многоуровневого сигнала;  $N$  – мощность шума в цифровом канале передачи данных;  $m$  – коэффициент маппинга, представляющий собой число бит на символ информации. Для BPSK сигнала коэффициент маппинга равен 1, т. к. данный тип сигнала кодируется 1 битом информации, тогда как сигнал QPSK кодируется 2 битами информации, значит, коэффициент маппинга для него равен 2.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретические кривые зависимостей вероятностей ошибки на символ от отношения сигнал/шум в канале передачи, представленные на рисунке 1, построены по выражениям вида:

$$P1 = Q\left(\sqrt{\frac{2E_6}{N_0}}\right), \quad (3)$$

$$P2 = 2 \cdot Q\left(\sqrt{\frac{2E_6}{N_0}}\right) \cdot \left[1 - \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{2E_6}{N_0}}\right)\right], \quad (4)$$

где  $P1$  и  $P2$  – вероятности ошибки на символ для BPSK и QPSK сигналов;  $\frac{E_6}{N_0}$  – ОСШ в канале

передачи;  $Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – интеграл вероятности ошибки.

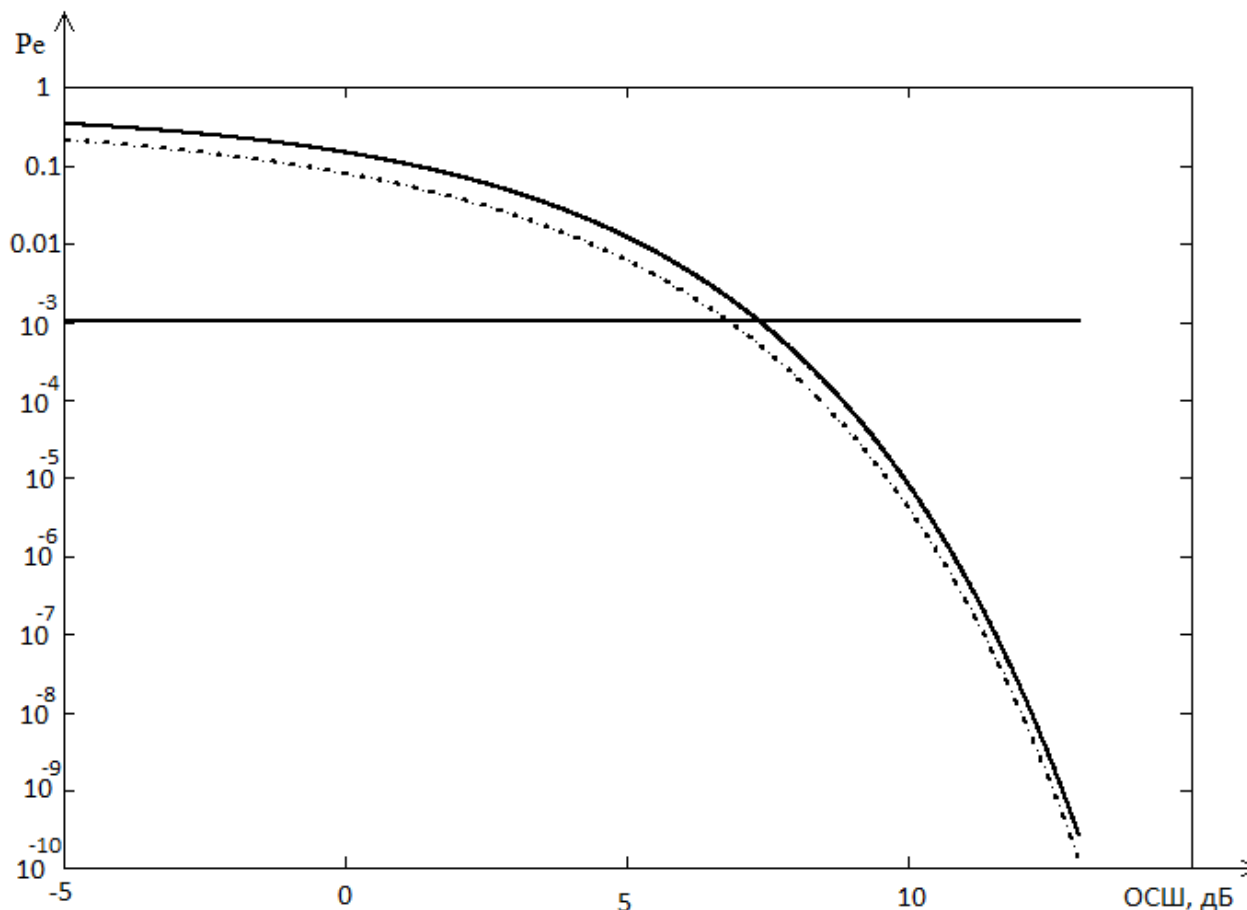


Рисунок 1 – Теоретические кривые вероятностей ошибки на символ. Сплошной линией обозначена теоретическая кривая QPSK; штрихпунктирной линией – теоретическая кривая BPSK

Анализ теоретических кривых вероятности ошибки на символ показывает, что сигнал BPSK обладает более высокой помехоустойчивостью, по сравнению с сигналом QPSK, т. к. для достижения требуемой величины вероятности ошибки на символ (в  $10^{-3}$  – для передачи речи) необходимое отношение сигнал/шум в канале связи меньше на 0.66 дБ, чем для сигнала QPSK. Связано это с тем, что 1 бит информации в сигнале BPSK кодируется одним символом, в то время как в сигнале QPSK 2 бита информации кодируются 1 символом; поражение любого бита из этих двух ведет к символьной ошибке.

На рисунках 2 и 3 представлены графические зависимости экспериментальной и теоретической оценок вероятности ошибки на символ для BPSK и QPSK сигналов соответственно. Анализ приведенных данных показывает, что: экспериментальные кривые для сигналов BPSK и QPSK с достаточной степенью сходимости совпадают с теоретическими кривыми, при этом минимально необходимое ОСШ в канале для эффективной передачи речи составляет 6.4 дБ для BPSK и 7.34 дБ для QPSK. Выигрыш в ОСШ при использовании цифрового формата сигнала BPSK перед QPSK составляет порядка 1 дБ, что соответствует известным теоретическим положениям.

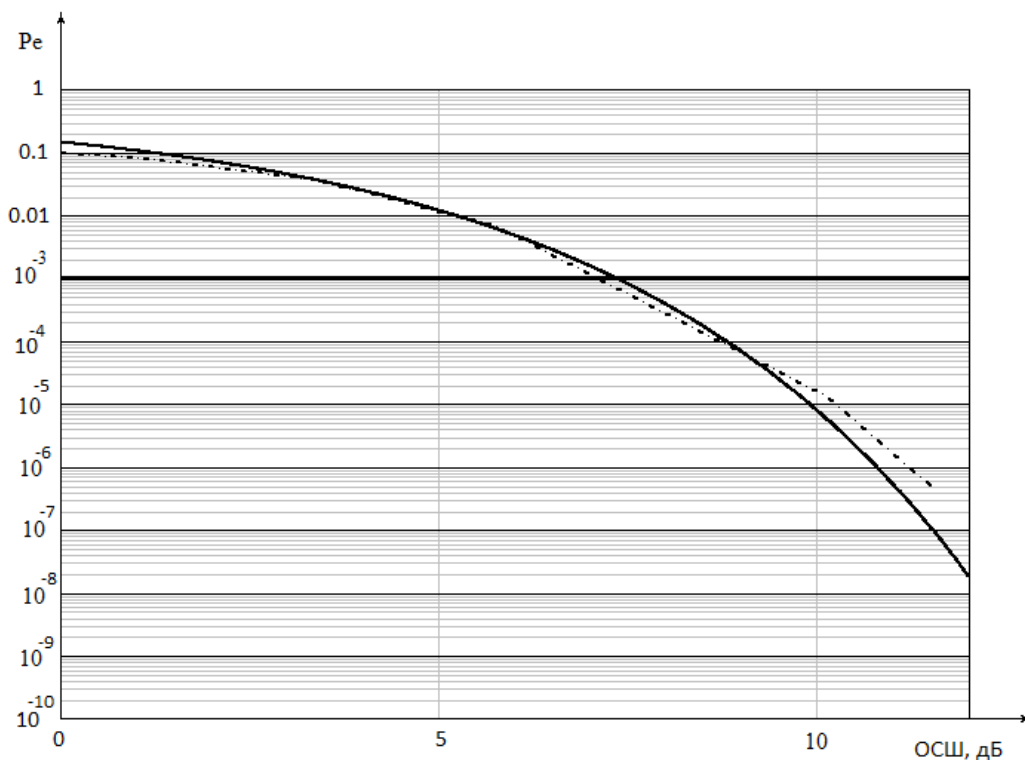


Рисунок 2 – Результаты экспериментальной и теоретической оценок помехоустойчивости BPSK сигнала. Штрихпунктирной линией обозначена теоретическая кривая, сплошным цветом – экспериментальная кривая

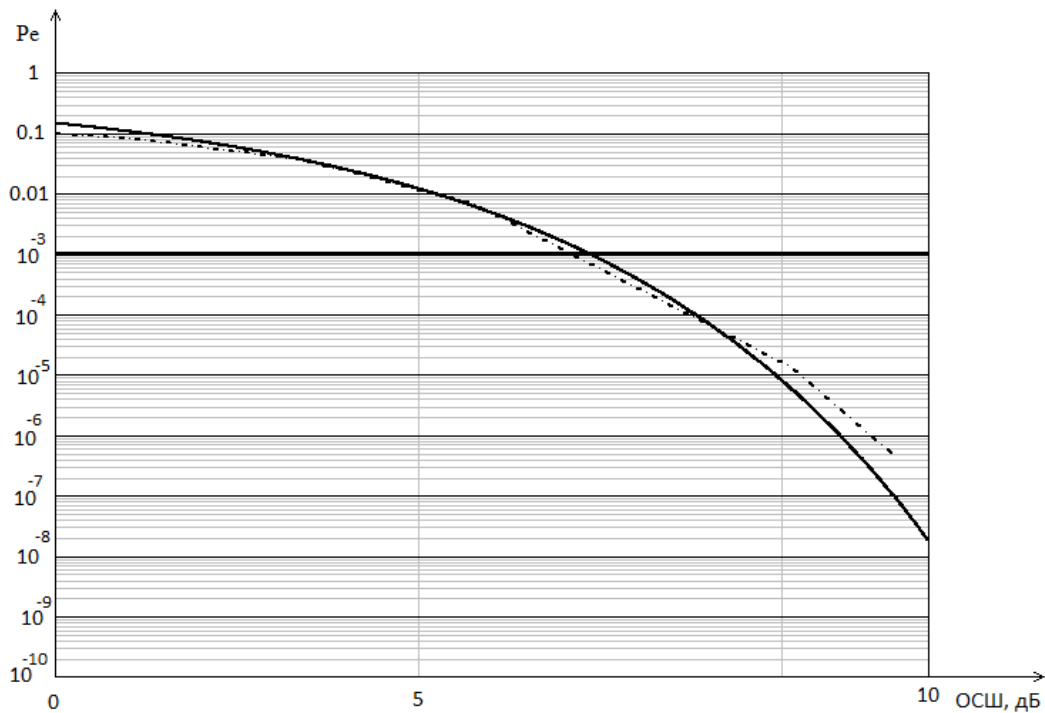


Рисунок 3 – Результаты экспериментальной и теоретической оценок помехоустойчивости QPSK сигнала. Сплошной линией обозначена теоретическая кривая, штрихпунктирной линией – экспериментальная кривая

В качестве результатов исследования функциональных возможностей стенда следует отметить, что: 1) посредством стенда можно проводить экспериментальные измерения КБО и вероятности ошибки на символ для обоих типов цифровых форматов радиосигналов BPSK и QPSK на фоне аддитивного белого гауссова шума; 2) за счет большого объема выборки статистических данных, измеряемых на стенде, возможно достижение экспериментальных величин КБО или вероятности битовой ошибки на уровне  $10^{-6}$ , что соответствует норме для данных параметров при передаче данных в беспроводных цифровых каналах; 3) в качестве функционального недостатка, присущего стенду, следует отметить генерацию только тестовых последовательностей, циклически повторяющихся во времени, и отсутствие возможности генерации цифрового информационного сигнала, имитирующего речевое сообщение на выходе кодера речи.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментальное исследование помехоустойчивости BPSK и QPSK сигналов при передаче в них одной и той же информации показало выигрыш, равный 1 дБ, в ОСШ BPSK перед QPSK сигналом при заданной ошибке вероятности на символ –  $10^{-3}$ . Результаты проведенного тестирования лабораторного стенда как имитатора беспроводного цифрового канала передачи данных имеют достаточную сходимость с известными теоретическими положениями, что открывает возможность его дальнейшего использования для модельного исследования качества функционирования радиоканала при передаче фиксированных тестовых последовательностей на имитаторе без использования дорогостоящего контрольно-измерительного оборудования. Получаемые при этом результаты могут быть использованы на стадии прогнозирования работы реальных радиоканалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплект лабораторного оборудования «Кодирование и модуляция информации в системах связи»: Руководство для выполнения базовых экспериментов / ООО «ЭнергияЛаб». – Воронеж, 2021.
2. Макаренко, С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Inmarsat / С. И. Макаренко. – Системы управления, связи и безопасности. – № 4. – 2018.
3. Макаренко, С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium [Электронный ресурс] / С. И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности: научный рецензируемый сетевой электронный журнал. – 2018. – № 4. – URL: <https://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf> (дата обращения: 26.04.2023).
4. Берлин, А. И. Цифровые сотовые системы связи / А. И. Берлин. – М. : Эко-Трендз, 2007. – 296 с. : ил.
5. Голиков, А. М. Кодирование в радиоэлектронных системах передачи информации: Сборник компьютерных лабораторных работ, практических занятий и заданий на самостоятельную работу. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018. – 333 с.
6. Волхонская, Е. В. Модельное исследование помехоустойчивости приема радиосигналов с QPSK, BPSK, 8PSK И DBPSK / Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, К. В. Власова, М. В. Рущко // Известия КГТУ. – 2017. – № 46.
7. Суржиков, В. Ф. Физическое исследование помехоустойчивости фазоманипулированных сигналов в каналах СВЧ связи / В. Ф. Суржиков, А. В. Компанийцев // Международный научный журнал «Мир науки, культуры, образования». – 2022. – № 2 (93).
8. Desai, J. A. S. N. Effect of Noise on BER of BPSK, QPSK, DPSK, and QAM Modulation Techniques / J. A. Desai // Kulkarni: International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI).|– July 2016. – Vol. III. – Issue VII | ISSN 2321–2705.
9. Комплект лабораторного оборудования «Кодирование и модуляция информации в системах связи»; Описание лабораторного оборудования / ООО «ЭнергияЛаб»; Воронеж, 2021.
10. Прокис, Джон. Цифровая связь / пер. с англ.; под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с. : ил.

## STUDY OF THE FEATURES OF INFORMATION TRANSMISSION BY THE PHASE MODULATION METHOD

N. S. Aistov, 4th year cadet,  
e-mail: Nick-Stork@yandex.ru  
Kaliningrad State Technical University

E. V. Volkhonskaya, DSc in Engineering, associate professor,  
e-mail: volkhonskaya\_e@mail.ru  
Kaliningrad State Technical University

The article presents a comparative evaluation of the results of an experimental study of the noise immunity of digital formats of radio signals of two-level (BPSK) and four-level (QPSK) manipulations according to the developed method for measuring the error probability per symbol. The obtained results agree with the theoretical estimation of the noise immunity of information encoding methods with sufficient collectability.

**Keywords:** noise immunity, multilevel phase shift keying, signal-to-noise ratio in the transmission channel, bit error probability per symbol