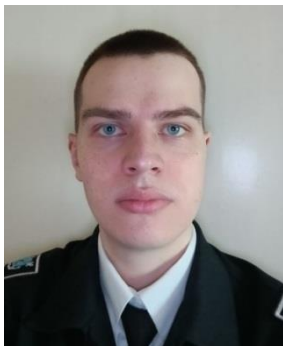


ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА
BPSK И QPSK СИГНАЛОВ ПРИ МОДУЛЯЦИИ
РАЗЛИЧНЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ



Н. С. Аистов, курсант 5-го курса
E-mail: Nick-Stork@yandex.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Е. В. Волхонская, докт. техн. наук, доц.
E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

В статье приводится сравнительная оценка результатов экспериментального исследования помехоустойчивости цифровых форматов радиосигналов двухуровневой (BPSK) и четырехуровневой (QPSK) фазовой манипуляции, тестирование которых проводилось с помощью передачи фиксированных тестовых последовательностей. На основании полученных результатов выявлено, что тип тестового сигнала незначительно влияет на выигрыш в ОСШ сигнала BPSK перед сигналом QPSK.

***Ключевые слова:** помехоустойчивость, многоуровневая фазовая манипуляция, отношение сигнал/шум в канале передачи, вероятность ошибки на символ, фиксированная тестовая последовательность, бинарный цифровой канал.*

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые форматы сигналов BPSK и QPSK широко используются в цифровых системах передачи информации [1–4]. В современных телекоммуникационных системах для передачи цифровой информации сети радиодоступа состоят из радиоканалов, в которых передаются сигналы с цифровыми форматами модуляции. Оконечное оборудование радиоканалов формирует на передающей стороне и обрабатывает на приёмной стороне двоичные сигналы. В связи с этим можно считать, что сети радиодоступа имеют в своём составе цифровые бинарные каналы. Оценка качества функционирования цифровых систем передачи (ЦСП) проводится экспериментально и сводится к измерению ряда параметров: время готовности канала, число ошибочных блоков, время, свободное от ошибок и т. д. Однако основным параметром для оценки качества связи выступает коэффициент битовых ошибок (КБО).

Существуют два типа измерений помехоустойчивости цифрового бинарного канала: с отключением и без отключения канала. Измерения с отключением цифрового канала производят в отсутствие передачи цифрового трафика, в то время как измерение без отключения подразумевает его передачу [5, 6].

В практике для тестирования степени влияния параметров радиоканала используются два типа тестовых последовательностей: псевдослучайные последовательности (ПСП) [7, 8] и фиксированные последовательности. Фиксированные последовательности строятся на чередовании определённых комбинаций битовых посылок. Широко используемыми комбинациями являются: передача всех единиц; передача всех нулей; 1 единица на 3 бита; 1 единица

на 4 бита; 3 единицы на 24 бита; меандровая последовательность и т. д. Кроме этого фиксированные тестовые последовательности могут быть сгенерированы произвольно.

Анализ вышеприведенных научно-технических источников показал, что определенного рода тестовые последовательности, такие как «все единицы» или «все нули», являются стрессовыми и используются для расширенного тестирования канала. Информация о применении фиксированных тестовых последовательностей в виде произвольных кодовых слов отсутствует.

Таким образом, модельные исследования помехоустойчивости радиосигналов с модуляцией по фазе фиксированными тестовыми последовательностями как стандартного типа, так и произвольного на имитационной модели канала, выполненной на базе лабораторного стенда «Энергия_лаб», представляются актуальными, и в дальнейшем полученные результаты могут найти применение для оценки характеристик реальных радиоканалов.

ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются двухуровневый и четырёхуровневый фазоманипулированные сигналы с передачей фиксированных тестовых последовательностей, предмет исследования – их помехоустойчивость.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формулировка цели исследования: выявление влияния типа модулирующей тестовой последовательности на помехоустойчивость фазоманипулированных сигналов. В соответствии с формулировкой проводились исследования помехоустойчивости передачи двух форматов фазоманипулированных сигналов на фоне белого гауссова шума. При этом решены следующие задачи:

1. Провести экспериментальное исследование с использованием стендового оборудования коэффициента битовых ошибок сигналов BPSK и QPSK при передаче фиксированных тестовых последовательностей различного типа.
2. Обработать экспериментальные данные и оценить влияние типов тестовых последовательностей на помехоустойчивость сигналов BPSK и QPSK.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно общепринятой практике основным критерием оценки помехоустойчивости двухуровневых (BPSK) и многоуровневых сигналов (QPSK) является вероятность ошибки на символ, которую можно вычислить как отношение символьных ошибок, возникших при передаче сигнала в радиоканале к общей длине сигнала [9]. ОСШ в цифровом канале определяется отношением энергии бита к спектральной плотности средней мощности шума.

Экспериментальные исследования помехоустойчивости сигналов сводились к измерению коэффициента битовых ошибок при различных отношениях сигнал/шум в радиоканале с последующим пересчётом их в вероятность символьной ошибки. В качестве оборудования для снятия экспериментальных данных использован стенд «Кодирование и модуляция информации в системах связи» [10]. На первом этапе работы сгенерированы циклическим повторением восьми битовых кодовых комбинаций четыре фиксированные тестовые последовательности, одна из которых является стандартной (меандр), другие три последовательности содержат две единицы на 8 бит и три единицы на 8 бит и являются произвольными.

В таблице 1 представлено соответствие передаваемых кодовых слов в шестнадцатеричной системе счисления и вариантов кодовых комбинаций.

Таблица 1 – Соответствие передаваемых кодовых слов и сгенерированных тестовых последовательностей

Кодовые слова в шестнадцатеричной системе счисления	Вариант кодовой комбинации
43	01000011
03	00000011
94	10010100
55	01010101

На втором этапе эксперимента произведено измерение числа ошибочно принятых бит при общем количестве передаваемых бит порядка четырёх миллионов. ОСШ в канале варьировало за счёт изменения дисперсии шума и представлено 14 численными значениями. При каждом ОСШ произведено 10 измерений КБО.

На третьем этапе работы проведена обработка статистических экспериментальных данных по стандартной методике, включающей в себя: усреднение статистических данных при каждом значении ОСШ, расчет среднеквадратического отклонения, оценку доверительных интервалов.

Расчёт КБО производился по формуле:

$$\text{КБО} = \frac{N_{\text{ош}}}{N_{\text{прд}}},$$

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

Расчёт ОСШ в цифровом канале передачи производился по формуле:

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

где S и N являются мощностями полезного сигнала и белого гауссова шума соответственно; m – коэффициент маппинга, принимающий значение либо 1, либо 2 для BPSK или QPSK сигналов соответственно.

Теоретические зависимости вероятности ошибки на символ для сигналов BPSK и QPSK рассчитаны по формулам [9]:

$$P1 = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \text{ и } P2 = 2 \cdot Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \cdot \left[1 - \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)\right],$$

где $P1$ и $P2$ – вероятность символьной ошибки; $Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – интеграл вероятности ошибки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунках 1–5 приведено графическое представление зависимостей КБО от ОСШ в канале для BPSK и QPSK сигналов при модуляции различными тестовыми последовательностями.

В качестве нормы на КБО принята величина вероятности битовой ошибки, равная 10^{-3} , характерная для передачи в каналах речевых сообщений.

Анализ построенных теоретических зависимостей вероятности битовой ошибки с пересчетом в вероятность символьной ошибки для двухуровневого и четырехуровневого фазоманипулированных сигналов (рисунок 1) позволяет оценить выигрыш BPSK перед QPSK величиной в 0,5 дБ, при условии, что модуляция их фазы произведена меандром.

Экспериментальные зависимости КБО для сигналов BPSK и QPSK (рисунки 2–5) носят нелинейный характер и с достаточной степенью сходимости совпадают с теоретическими кривыми.

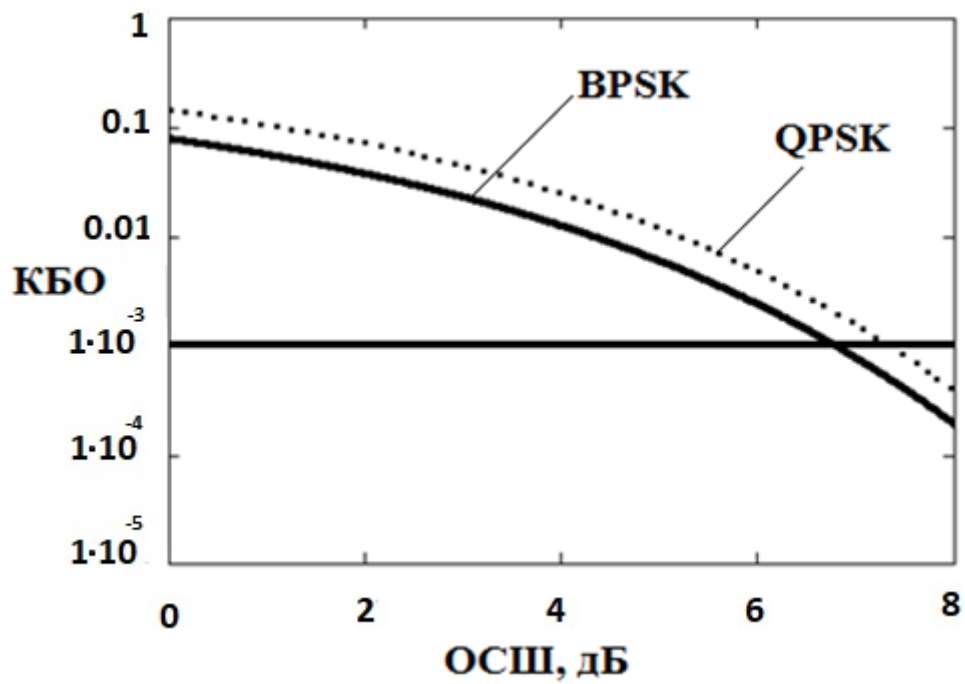


Рисунок 1 – Теоретические зависимости КБО на символ от ОСШ в канале

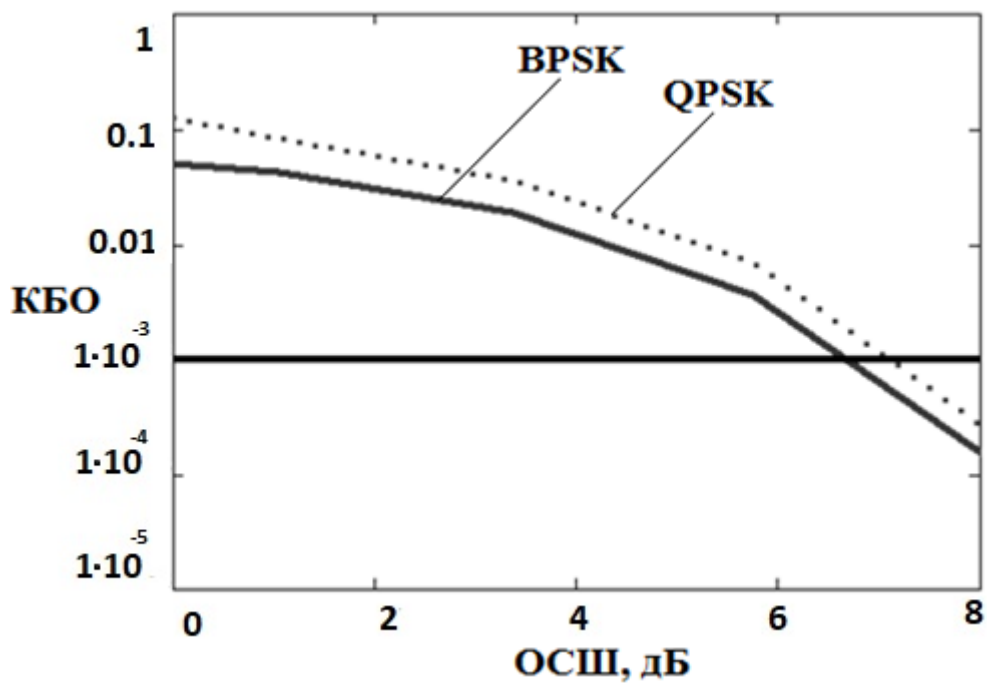


Рисунок 2 – Экспериментальные кривые КБО на символ при передаче фиксированной произвольной тестовой последовательности 01000011 от ОСШ в канале

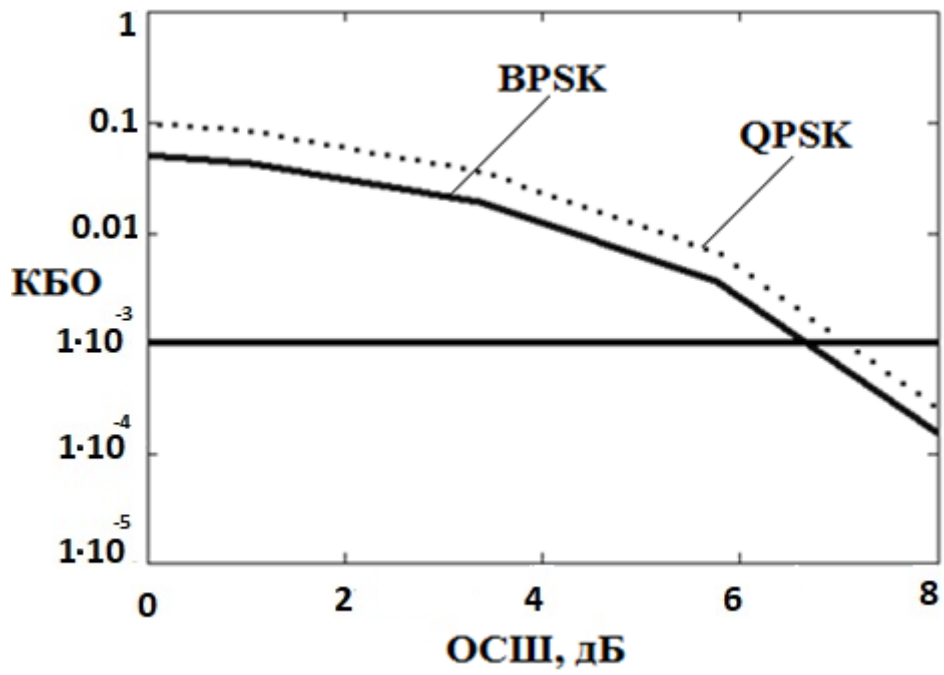


Рисунок 3 – Экспериментальные кривые КБО на символ при передаче фиксированной произвольной тестовой последовательности 00000011 от ОСШ в канале

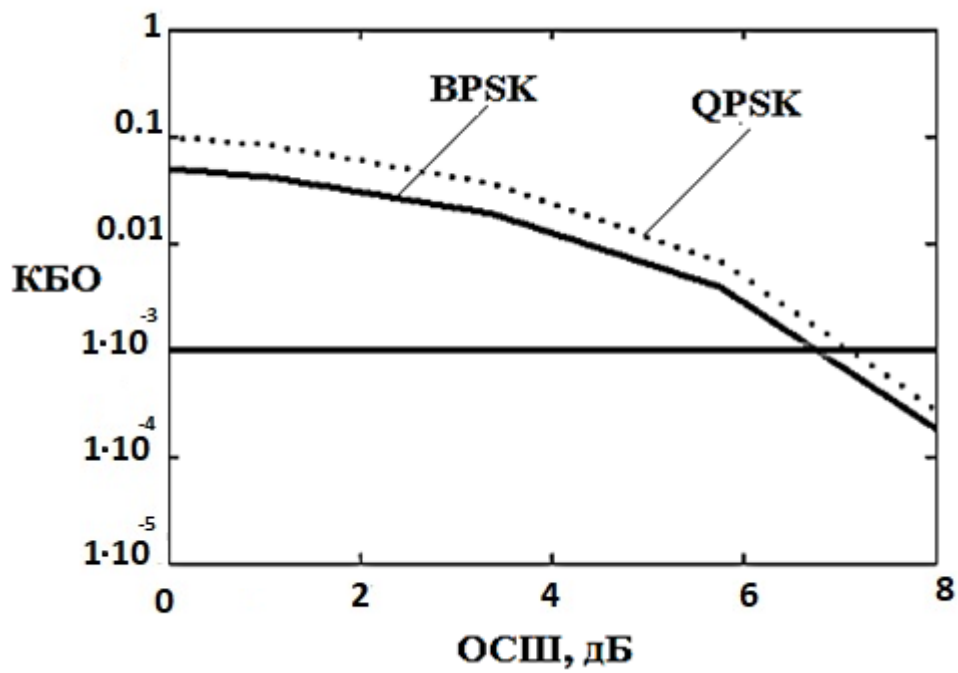


Рисунок 4 – Экспериментальные кривые КБО на символ при передаче фиксированной тестовой последовательности 10010100 от ОСШ в канале

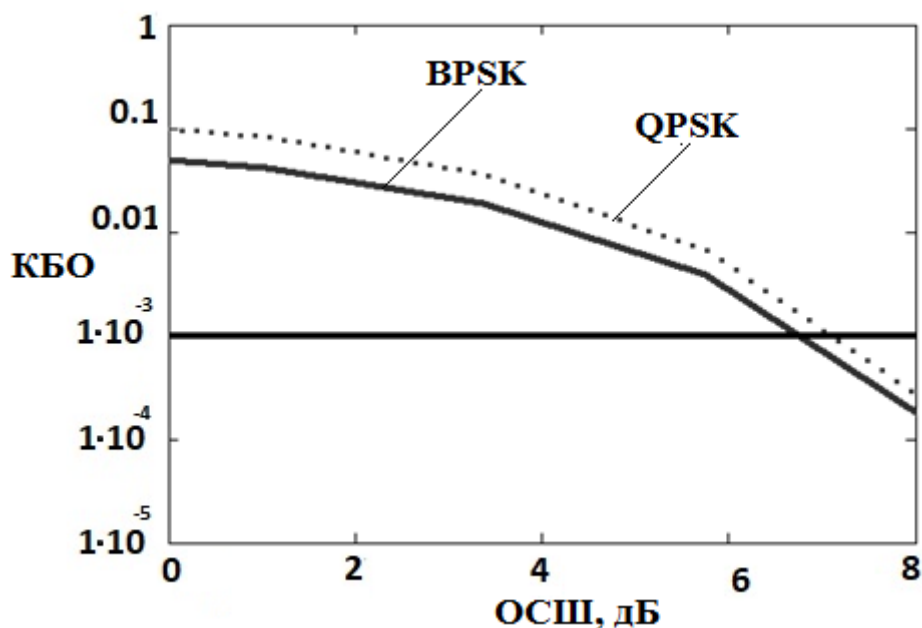


Рисунок 5 – Экспериментальные кривые КБО на символ при передаче фиксированной тестовой последовательности типа меандр 01010101 от ОСШ в канале

В таблице 2 приведены минимальные значения ОСШ для достижения требуемого КБО при передаче речевого сообщения посредством разных цифровых форматов радиосигнала.

Таблица 2 – Минимальные значения ОСШ в канале для достижения требуемого КБО при передаче BPSK и QPSK

Тестовые последовательности	ОСШ для BPSK, дБ	ОСШ для QPSK, дБ	Выигрыш в ОСШ, дБ
01000011	6.6819	7.0473	0.365
00000011	6.6297	7.0212	0.392
10010100	6.7471	7.0995	0.352
01010101	6.7471	7.0473	0.3

Анализируя данные, представленные в таблице 2, можно сделать вывод о том, что тип тестовых последовательностей не существенно влияет на помехоустойчивость передачи как BPSK, так QPSK сигналов. Выигрыш в минимальном ОСШ для цифровых форматов сигналов BPSK перед QPSK в среднем составляет 0,352 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты лучшей помехоустойчивости BPSK перед QPSK можно объяснить тем, что расстояние Хемминга между ближайшими символами BPSK больше, чем для QPSK. Существенное влияние типа тестовых последовательностей на помехоустойчивость как BPSK, так QPSK не выявлено, что можно объяснить тем, что модулирующие последовательности, обладающие различием в энергии, закладываются в изменения фазы, а не амплитуды радиосигнала. Влияние типа тестовой последовательности, на наш взгляд, может сказаться при передаче сигналов с квадратурной амплитудно-фазовой модуляцией (QAM).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаренко, С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Inmarsat / С. И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 4.
2. Макаренко, С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium / С. И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности: научный рецензируемый сетевой электронный журнал. – 2018 – № 4 [Электронный ресурс]. URL: <https://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf> (дата обращения: 26.04.2023).
3. 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).
4. Берлин, А. И. Цифровые сотовые системы связи / А. И. Берлин. – Москва: Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
5. Бакланов, И. Г. Методы измерений в системах связи / И. Г. Бакланов. – Москва: Эко-Трендз, 1999. – 204 с.
6. Бакланов, И. Г. Тестирование и диагностика систем связи / И. Г. Бакланов. – Москва: Эко-Трендз, 2001. – 264 с. – (Инженерная энциклопедия. Технологии электронных коммуникаций (ТЭК)).
7. Рекомендация МСЭ-Т O.150. General requirements for instrumentation for performance measurements on digital transmission equipment (05.96).
8. Рекомендация МСЭ-Т O.151. Error performance measuring equipment operating at the primary rate and above (11.88)
9. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / под ред. Д. Д. Кловского. – Москва: Радио и связь. – 2000. – 800 с.
10. Комплект лабораторного оборудования «Кодирование и модуляция информации в системах связи». Описание лабораторного оборудования / ООО «ЭнергияЛаб». Воронеж, 2021.

STUDY OF INTERFERENCE IMMUNITY OF BPSK AND QPSK SIGNALS RECEPTION WHEN MODULATING VARIOUS INFORMATION SEQUENCES

N. S. Aistov, five-year cadet
E-mail: Nick-Stork@yandex.ru
Kaliningrad State Technical University

E. V. Volkhonskaya, doctor of technical sciences associate professor
E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru
Kaliningrad State Technical University

The article provides a comparative assessment of the results of an experimental study of the noise immunity of digital radio signal formats of two-level (BPSK) and four-level (QPSK) phase shift keying, testing of which was carried out using the transmission of fixed test sequences. Based on the results obtained, it was revealed that the type of test signal does not significantly affect the gain in SNR of the BPSK signal over the QPSK signal.

Key words: noise immunity, multi-level phase shift keying, signal-to-noise ratio in the transmission channel, error probability per symbol, fixed test sequence, binary digital channel.