

**М. В. Рушко**

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПО ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ЦИФРОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ МОРСКОЙ ПОДВИЖНОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ

Представлены результаты исследования, в ходе которого были собраны лабораторные установки с целью измерения вероятности приема ошибочных бит для радиосигналов BPSK, QPSK, 8PSK, DBPSK, QAM-4,8,16,64 для различных отношений сигнал / шум в среде моделирования MATLAB + Simulink.

Результаты исследований и созданная виртуальная лабораторная установка нашли применение при сравнительной оценке помехоустойчивости канала радиосвязи с использованием стандартных и перспективных запатентованных систем передачи информации в рамках морской подвижной спутниковой службы при приеме радиосигналов с различными видами модуляции.

*The paper presents the results of a study in which laboratory facilities were assembled to measure the probability of receiving erroneous bits for BPSK, QPSK, 8PSK, DBPSK, QAM-4,8,16,64 radio signals for various SNRs in the MATLAB + Simulink simulation environment.*

*The research results and the developed virtual laboratory setup have found application in a comparative assessment of the noise immunity of a radio channel using standard and advanced patented information transmission systems within the marine mobile satellite service when receiving radio signals with various types of shift keying.*

**Ключевые слова:** фазовая модуляция, квадратурная амплитудная модуляция, сигнальное созвездие, помехоустойчивость, радиосигнал, ОСШ.

**Keywords:** phase shift keying, quadrature amplitude shift keying, signal constellation, noise stability, radio signal, SNR.

На сегодняшний день сигналы с фазовой и квадратурной амплитудной модуляциями широко применяются в системах морской подвижной спутниковой службы (МПСС) [1; 3–5] и наборе стандартов Wi-Fi и цифрового телевизионного вещания DVB, представленных в таблице.

### Типы сигналов PSK и QAM, применяемые в МПСС и телевизионном вещании

Система передачи информации/ стандарта	Модуляции
DVB-S	QPSK, 8-PSK, QAM-16
DVB-S2	QPSK, 8-PSK, 16-APSK или 32-APSK
DVB-SH	QPSK, 8-PSK, 16-APSK
DVB-C	QAM-16, QAM-32, QAM-64, QAM-128 или QAM-256
DVB-C2	QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256, QAM-1024, QAM-4096
DVB-T	QAM-16 или QAM-64 (или QPSK) совместно с COFDM
DVB-T2	QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256 совместно с OFDM



Окончание табл.

Система передачи информации/стандарта	Модуляции
DVB-H	OFDM
Inmarsat	QPSK, BPSK, QAM-16
MSAT	QPSK
Globalstar	QPSK
Iridium	QPSK, DBPSK
Глонасс	BPSK
GSM	BPSK
Thuraya	QPSK
Beidou	QPSK
Sirius	QAM-16

В системах передачи дискретных сообщений принято использовать вероятность коэффициента битовой ошибки BER (Bit Error Rate) в качестве критерия оценки помехоустойчивости системы [5].

Как считает автор статьи, научно-практическая задача проведения сравнительного анализа помехоустойчивости приема сигналов с фазовой и квадратурной амплитудной модуляциями является актуальной по причине все более широкого использования сигналов с этими типами модуляции в современных спутниковых системах. В рамках судовой спутниковой связи ИМО уже одобрила применение системы *Iridium* и рассматривает китайскую спутниковую систему *BeiDou* для предоставления услуг ГМССБ. Обе эти системы работают с сигналами фазовой модуляции [2].

Решением представленной задачи является проведение модельных исследований помехоустойчивости приема сигналов с модуляциями PSK (BPSK, QPSK, DBPSK, 8PSK) и QAM на основе положений теории оптимального приема.

### Исходные параметры

Во время модельных исследований были проведены измерения вероятности коэффициента битовой ошибки при различных скоростях передачи информации: 400, 800 и 1600 Бод.

Для каждой скорости передачи информации измерения проводились при отношении сигнал / шум (ОСШ), варьирующемся от -15 дБ до 10 дБ. В свою очередь, для каждого ОСШ было проведено 70–130 измерений. Известно, что при моделировании процессов демодуляции и модуляции сигнала выбор какого-то определенного значения несущей частоты не имеет значения, поэтому последняя выбиралась из соображений минимального допустимого времени моделирования машины. Для сигналов с фазовой модуляцией в качестве несущей частоты была выбрана частота, равная второй промежуточной частоте типовой судовой аппаратуры 456 кГц; для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией несущая частота и частота опорных колебаний были выбраны равными 100 кГц при скорости передачи информации 4000 Бод. Получаемый качественный результат при выборе заниженных несущей



щих частот получается таким же, как и при выборе реальных частот, но машинное время моделирования значительно сокращается. Из аналогичных соображений были занижены скорости передачи информации.

В результате проведенных модельных исследований построены графические зависимости вероятности коэффициента битовых ошибок от отношения сигнал / шум. Также на этих же графиках были построены кривые потенциальной помехоустойчивости, чтобы стало возможным провести сравнительный анализ с «эталоном».

Модельные исследования помехоустойчивости приема сигналов с модуляциями PSK и QAM проводились в среде MATLAB + Simulink.

### Модель шума

При моделировании процессов модуляции и демодуляции необходимо было выбрать модель шума. Выбор пал на аддитивный белый гауссов шум с нулевым математическим ожиданием и регулируемой дисперсией. Модель шума была реализована на основе преобразования Бокса – Мюллера [6] и представлена на XVI и XIX международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь RLNC».

Значения ОСШ, варьирующиеся от -15 дБ до 10 дБ, выбирались исходя из того, чтобы коэффициент вероятности битовой ошибки находился в пределах 0.001–2. Это позволяет как оценить динамику изменения коэффициента вероятности BER при изменении отношения сигнал / шум, так и дать оценку критическим значениям ОСШ, при которых можно достичь допустимую вероятность коэффициента битовой ошибки.

### Алгоритм оценки коэффициента битовых ошибок

Структурная схема виртуальной лабораторной установки по исследованию помехоустойчивости приема радиосигналов с фазовой модуляцией представлена на рисунке 1.

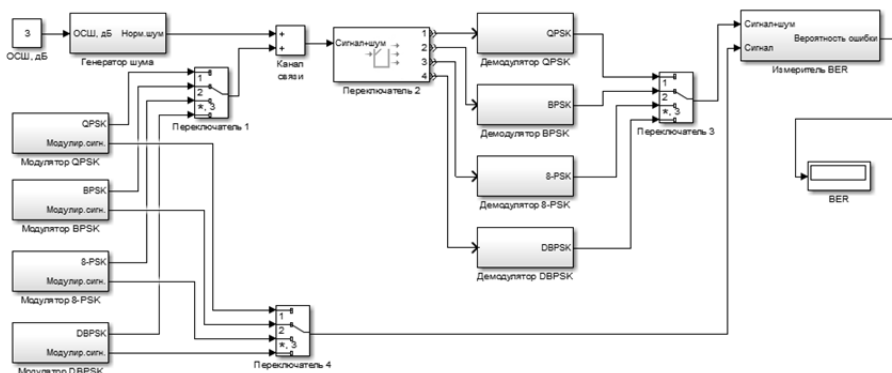


Рис. 1. Структурная схема виртуальной лабораторной установки по исследованию помехоустойчивости приема радиосигналов с фазовой модуляцией

Структурная схема виртуальной лабораторной установки для проведения исследований помехоустойчивости приема радиосигналов с квадратурной амплитудной модуляцией представлена на рисунке 2.

50

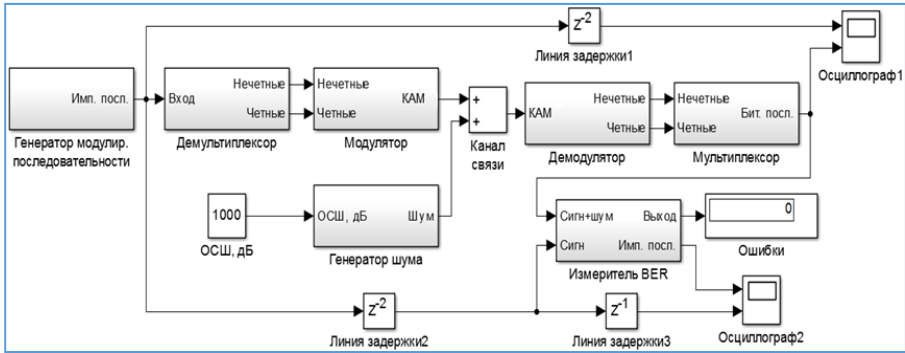


Рис. 2. Структурная схема виртуальной лабораторной установки по исследованию помехоустойчивости приема радиосигналов с QAM-модуляцией

Структурная схема блока «Измеритель BER» для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией представлена на рисунке 3.

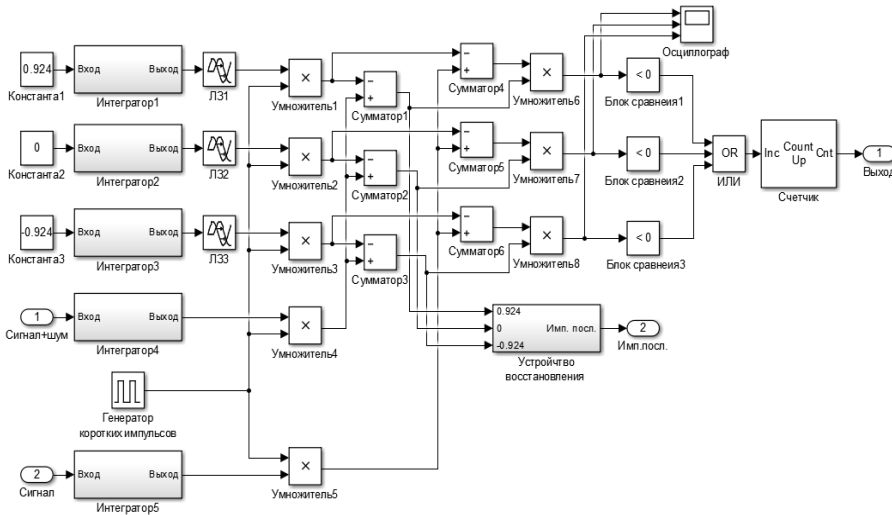


Рис. 3. Структурная схема блока «Измеритель BER»

Генераторы модулирующей последовательности для сигналов с модуляцией QAM-8 разнятся в зависимости от формы созвездия (рис. 4).

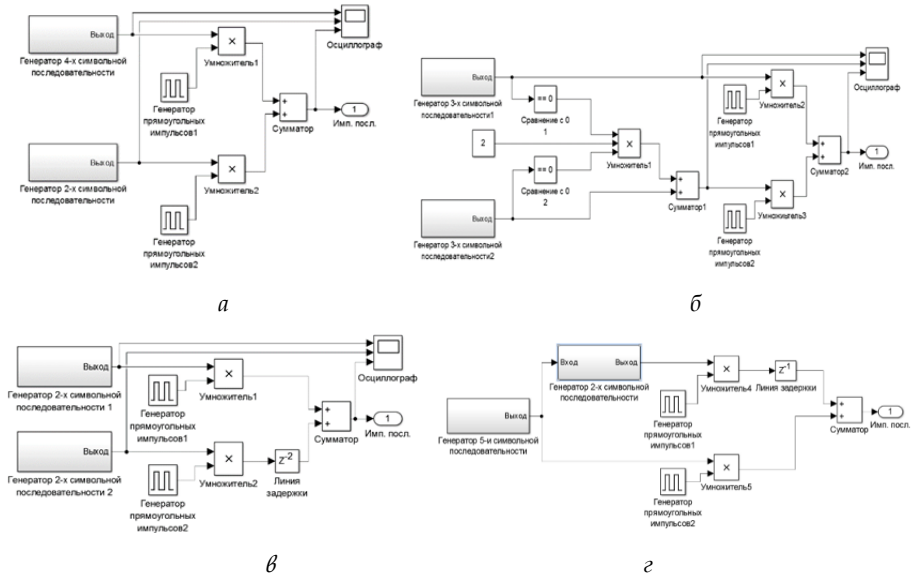


Рис. 4. Генераторы модулирующей последовательности для созвездий сигнала с модуляцией QAM-8:  
 а — для прямоугольного созвездия; б — квадратного созвездия;  
 в — крестообразного созвездия; г — ромбовидного созвездия

### Результаты моделирования

На следующих графиках (рис. 5–8) представлены графические зависимости средних значений коэффициента вероятности BER от отношения сигнал / шум при приеме сигналов с фазовой модуляцией в канале связи. Кривая потенциальной помехоустойчивости, представленная на графических зависимостях для сравнения, рассчитывалась по методике из [7].

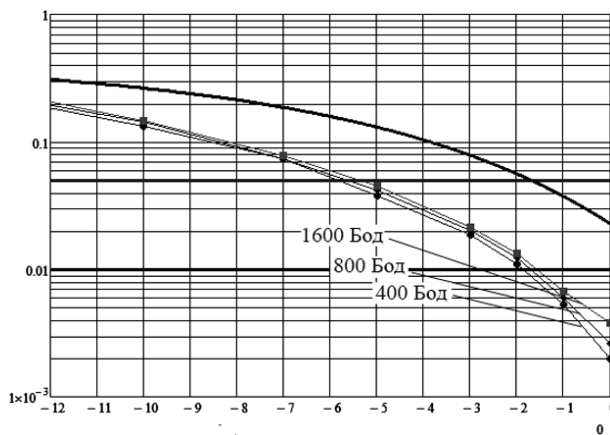


Рис. 5. Зависимость вероятности коэффициента битовой ошибки при приеме BPSK-радиосигнала от ОСШ в канале связи: по оси абсцисс отложены значения ОСШ в дБ, по оси ординат — средние значения вероятности битовой ошибки в логарифмическом масштабе

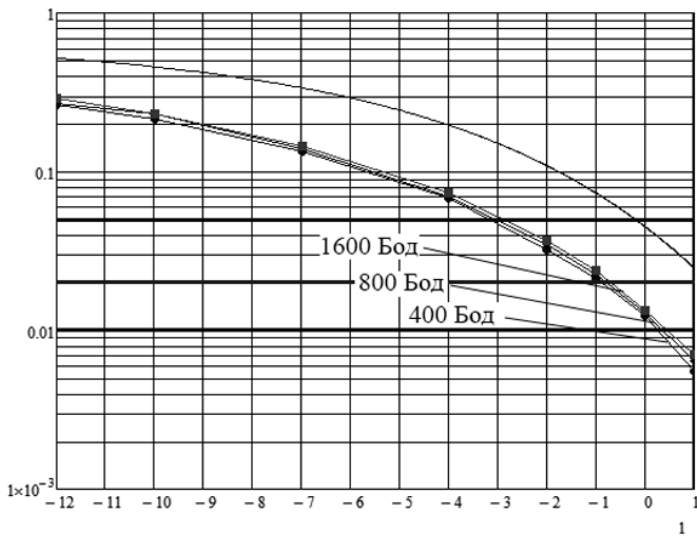


Рис. 6. Зависимость вероятности коэффициента битовой ошибки при приеме QPSK-радиосигнала от ОСШ в канале связи: по оси абсцисс отложены значения ОСШ в дБ, по оси ординат — средние значения вероятности битовой ошибки в логарифмическом масштабе

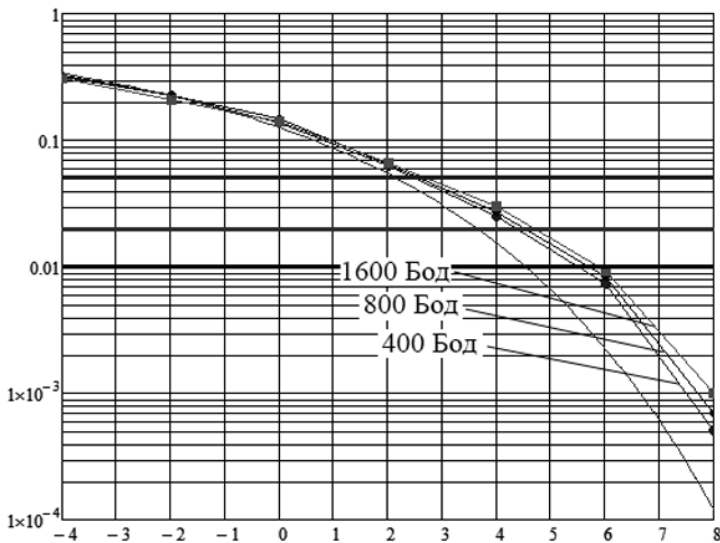


Рис. 7. Зависимость вероятности коэффициента битовой ошибки при приеме 8PSK-радиосигнала от ОСШ в канале связи: по оси абсцисс отложены значения ОСШ в дБ, по оси ординат — средние значения вероятности битовой ошибки в логарифмическом масштабе

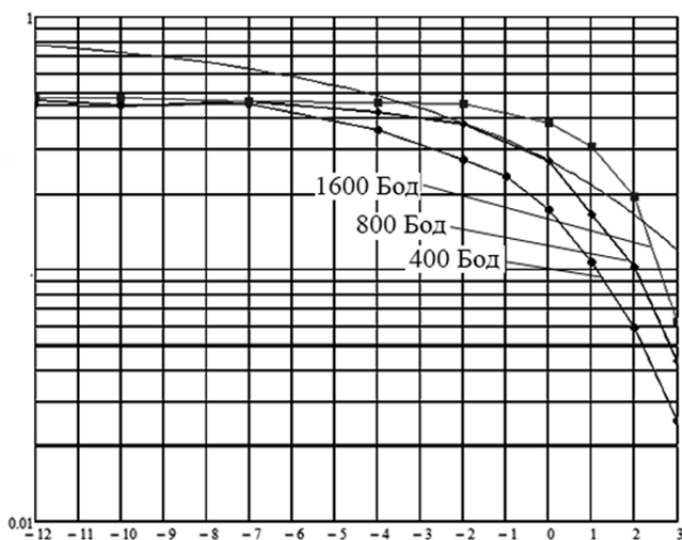


Рис. 8. Зависимость вероятности коэффициента битовой ошибки при приеме DBPSK-радиосигнала от ОСШ в канале связи: по оси абсцисс отложены значения ОСШ в дБ, по оси ординат — средние значения вероятности битовой ошибки в логарифмическом масштабе

Анализ построенных графических зависимостей коэффициента вероятности битовой ошибки от отношения сигнал / шум для сигналов с модуляцией QAM-4,16,64, представленных на рисунке 9, позволяет заключить следующее:

- коэффициент вероятности битовой ошибки зависит от отношения сигнал / шум нелинейно. Графические зависимости, построенные по результатам модельных исследований, практически повторяют по форме теоретические графики. Разницу можно объяснить недостаточной выборкой данных;

- графическая зависимость коэффициента вероятности BER для сигнала с модуляцией QAM-4 лежит левее теоретической. То есть можно предположить, что результат модельного исследования получается лучше, чем это теоретически возможно, однако этот факт объясняется недостаточностью объема выборки данных и влиянием статистических свойств источника;

- зависимость коэффициента вероятности BER от отношения сигнал / шум для сигнала с модуляцией QAM-64 оказался хуже теоретического. Данный факт также объясняется недостаточной выборкой данных;

- чтобы достичь одинакового значения коэффициента вероятности BER, необходимо большее отношение сигнал / шум при увеличении числа уровней модуляции. При ухудшении отношения сигнал / шум адаптивные системы связи переходят на режим работы с меньшим числом уровней модуляции, по мере улучшения ОСШ происходит обратный переход.

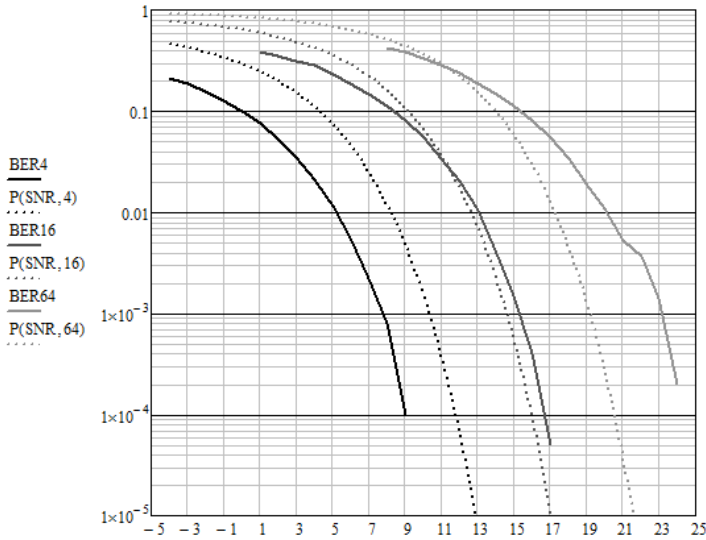


Рис. 9. Графические зависимости вероятности битовой ошибки для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией: QAM-4,16,64 (сплошные линии) и теоретические кривые, соответствующие данным сигналам (пунктирные линии)

В результате анализа построенных графических зависимостей для сигналов с модуляцией QAM-8 для различных созвездий стало возможным сделать вывод, что наилучшей помехоустойчивостью обладают квадратное (BER2) и прямоугольное (BER1) созвездия соответственно. Чуть хуже оказываются крестообразное и ромбовидное созвездия.

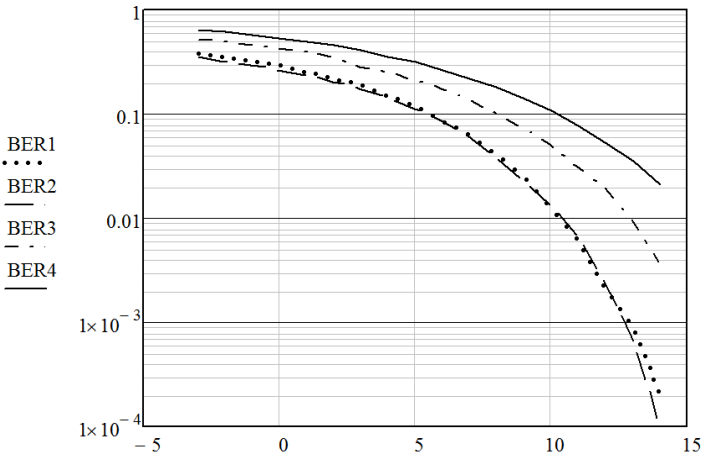


Рис. 10. Графические зависимости вероятности коэффициента битовой ошибки от отношения сигнал / шум для различных видов сигнальных созвездий QAM-8 (по оси абсцисс отложены значения отношения сигнал / шум в дБ, по оси ординат — вероятность битовой ошибки): BER1 — для прямоугольного, BER2 — для квадратного, BER3 — для крестообразного, BER4 — ромбовидного сигнальных созвездий



Анализ проведенных модельных исследований помехоустойчивости приема сигналов с фазовой и квадратурной амплитудной модуляцией подтверждает теоретические положения о взаимосвязи коэффициента вероятности BER, отношения сигнал / шум и скорости передачи информации. Построенные графические зависимости для сигналов с фазовой модуляцией показывают, что наилучшей помехоустойчивостью обладает сигнал с BPSK, далее следуют сигналы с QPSK, 8PSK и DBPSK соответственно.

Проведенные модельные исследования также подтверждают адекватность теоретических положений о помехоустойчивости радиосигналов с фазовой и квадратурной амплитудной модуляциями [7; 8]. Результаты исследований нашли применение при сравнительной оценке помехоустойчивости канала радиосвязи с использованием стандартных и перспективных запатентованных систем передачи информации в рамках морской подвижной службы при приеме фазоманипулированных сигналов и сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией.

### Список литературы

1. Основные технические характеристики абонентских станций спутниковой связи системы подвижной спутниковой связи ИНМАРСАТ : прилож. №2 к решению ГКРЧ от 23 авг. 2010 г. №10-08-08. М., 2010. URL: <http://www.minsvyaz.ru/ru/documents/3975/> (дата обращения: 16.04.2019).
2. ИМО одобрил новые сервисы аварийной связи от Inmarsat и Iridium // Телеспутник : [сайт]. 28.05.2018. URL: <https://www.telesputnik.ru/materials/tekhnika-i-tekhnologii/news/mezhdunarodnaya-morskaya-organizatsiya-odobrila-pouyu-servis-inmarsat-fleet-safety/> (дата обращения: 19.02.2019).
3. Сигналы с двоичной фазовой манипуляцией (BPSK). Дифференциальная BPSK (DBPSK) // DISPLIB.org. Теория и практика цифровой обработки сигналов : [сайт]. URL: <http://www.dsplib.ru/content/bpsk/bpsk.html> (дата обращения: 24.02.2019).
4. Маркелов М.А. Новые сигналы GNSS и перспективы их использования в бортовом оборудовании ГА // Интернавигация. 2008. №8. URL: [http://www.atminst.ru/up\\_files/markeldoklad.pdf](http://www.atminst.ru/up_files/markeldoklad.pdf) (дата обращения: 05.04.2019).
5. Ответы на вопросы. Рубрика для кабельщиков // Теле-Спутник. 2001. №8 (70). С. 58.
6. Волхонская Е.В., Коротей Е.В., Рушко М.В. Алгоритм оценки вероятности битовой ошибки для систем с восьмиуровневой фазовой манипуляцией // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 2, №4 (38). С. 212–216.
7. Прокис Дж. Цифровая связь. М., 2000.
8. Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) // DISPLIB.org. Теория и практика цифровой обработки сигналов : [сайт]. URL: <http://www.dsplib.ru/content/qpsk/qpsk.html> (дата обращения: 24.02.2019).

### Об авторе

Маргарита Владимировна Рушко – асп., Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, Россия.  
E-mail: [margarita\\_rushko@inbox.ru](mailto:margarita_rushko@inbox.ru)

### The author

Margarita V. Rushko, PhD Student, Baltic State Academy of Fishing Fleet, Russia.  
E-mail: [margarita\\_rushko@inbox.ru](mailto:margarita_rushko@inbox.ru)