

# Алгоритм оценки помехоустойчивости приема сигналов с восьмиуровневой фазовой манипуляцией

Е. В. Волхонская<sup>1</sup>, Е. В. Коротей<sup>2</sup>, К. В. Власова<sup>3</sup>, М. В. Рушко<sup>4</sup>

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»

<sup>1</sup>volkhonskaya\_e@mail.ru, <sup>2</sup>eugeniy\_korotey@mail.ru, <sup>3</sup>p\_ksenia@mail.ru, <sup>4</sup>margarita\_rushko@inbox.ru

**Аннотация.** Исследование помехоустойчивости приема радиосигналов с фазовой манипуляцией является актуальной задачей ввиду широкого применения последних в спутниковых системах навигации и связи, таких как Iridium, Globalstar, GPS, Глонасс, Inmarsat, Turaya, Beidou, а также в стандартах протоколов локальных сетей и цифрового телевидения. Целью данной работы является разработка и реализация алгоритма оценки коэффициента битовых ошибок при приеме радиосигналов с восьмиуровневой фазовой манипуляцией, реализованный в среде MATLAB+Simulink. В работе на основе критерия идеального наблюдателя построена схема оптимального приемника радиосигналов с восьмиуровневой фазовой манипуляцией, отличающаяся от известных алгоритмом принятия решения о типе переданного бита. Предложенная схема оптимального приемника вошла в состав виртуальной лабораторной установки по исследованию коэффициента битовых ошибок при приеме 8-PSK радиосигналов. В результате модельных исследований предложенного алгоритма получены модельные зависимости для трех значений скорости передачи информации коэффициента битовых ошибок от отношения сигнал/шум на входе квадратурного демодулятора и произведено их сравнение с теоретической зависимостью. Сравнительный анализ полученных результатов свидетельствует о возможности адекватной оценки помехоустойчивости приема 8-PSK радиосигналов при применении предложенного решающего устройства.

**Ключевые слова:** цифровая обработка сигналов; фазовая манипуляция; коэффициент битовых ошибок; ОСШ, помехоустойчивость

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время состояние и перспективы развития информационных технологий характеризуются становлением и широким практическим использованием техники цифровой обработки сигналов как одной из самых быстро развивающихся и динамичных технологий в системах передачи дискретной информации, в том числе в системах морской подвижной спутниковой службы (МПСС) [1].

Работа выполнена в соответствии с техническим заданием на НИР в рамках выполнения государственного задания на НИОКР, регистрационный номер АААА-А16-116041410168-3, по теме: «Разработка программного комплекса по оценке качества цифрового канала связи морской подвижной службы при финансовой поддержке Роскомрыболовства РФ».

На сегодняшний день цифровые радиосигналы с PSK манипуляцией широко применяются при организации спутникового канала связи в составе МПСС [2] и других спутниковых систем различного назначения, в частности, при организации таких систем связи и навигации как Iridium, Globalstar, GPS, Глонасс, Inmarsat, Turaya, Beidou и т.д. [3,4], в стандартах протоколов локальных сетей IEEE 802 [5], а также в стандартах цифрового телевидения DVB [6].

Традиционно помехоустойчивость приема цифровых радиосигналов оценивают такими взаимосвязанными показателями, как коэффициент битовых ошибок (Bit Error Rate, BER) и отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума (аналог отношения сигнал/шум (ОСШ) для цифровых систем связи). По мнению авторов статьи актуальной является научно-практическая задача проведения сравнительного анализа помехоустойчивости перспективных цифровых демодуляторов и демодуляторов в составе сертифицированного оборудования систем МПСС на стадии разработки новых схемотехнических решений и проектирования.

Одним из возможных решений сформулированной научно-практической задачи является проведение модельных исследований помехоустойчивости приема цифровых радиосигналов на основе теории оптимального приема.

### А. Математическая модель канального сигнала

8-PSK радиосигнал может быть описан выражением (1):

$$a(t) = A_1(t)\cos(\omega_0 t + \varphi) - A_2(t)\sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (1)$$

где  $A_1(t)$  и  $A_2(t)$  – синфазная и квадратурная составляющие.

Значения квадратур:  $A_1(t) = \{\pm 1, 307; \pm 0, 541\}$  и  $A_2(t) = \{\pm 0, 541; \pm 1, 307\}$  [7] одного из возможных сигнальных созвездий были использованы в качестве исходных данных при задании пороговых уровней оптимального приемника.

Модель аддитивного белого гауссова шума на входе квадратурного демодулятора реализована на основе преобразования Бокса-Мюллера [8] и была представлена в

рамках XVI и XIX международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь RLNC».

### В. Алгоритм оценки BER

В составе виртуальной лабораторной установки использовались универсальные квадратурные модулятор и демодулятор [14] и канал с аддитивным белым гауссовым шумом. В качестве тестовой последовательности была использована последовательность «одна 1 на два бита» [9].

Ключевым вопросом настоящей работы является разработка алгоритма оценки коэффициента битовых ошибок при приеме радиосигналов с восьмиуровневой фазовой манипуляцией (8-PSK) и его реализация в среде MATLAB+Simulink.

На рис. 1 представлена структурная схема блока «Измеритель BER».

Четыре идентичных блока «Интегратор» предназначены для интегрирования с синхронным разрядом по окончании каждой посылки демодулированного сигнала и вспомогательных постоянных сигналов, отвечающих за пороговые уровни, задаваемые блоками «Константа 1,2,3». Пороговые уровни, равные  $\{0; \pm 0,924\}$ , определяют механизм соотнесения реального значения квадратурных составляющих 8-PSK радиосигнала с сигнальными точками созвездия и располагаются посередине между теоретическими значениями, принимаемыми квадратурами.

Демодулированный сигнал приходит с задержкой по времени из-за наличия инерционных элементов в приемнике, например, фильтров. Блоки «ЛЗ 1,2,3» выполняют функцию синхронизации сигналов.

ТАБЛИЦА 1 ТАБЛИЦА 1 СООТВЕТСТВИЕ УРОВНЕЙ КВАДРАТУРНОГО СИГНАЛА И ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ

1	$b_{\text{вых}} > U_{\text{пор1}}$	1,307
2	$b_{\text{вых}} \in [U_{\text{пор2}}, U_{\text{пор1}}]$	0,541
3	$b_{\text{вых}} \in [U_{\text{пор3}}, U_{\text{пор2}}]$	- 0,541
4	$b_{\text{вых}} < U_{\text{пор3}}$	- 1,307

Блоки «Сумматор 1,2,3» предназначены для определения знака разности между результатом интегрирования

демодулированного сигнала и результатами интегрирования пороговых уровней. В табл. 2 представлено соответствие уровней квадратурного сигнала и знака разности указанных сигналов.

ТАБЛИЦА 2 СООТВЕТСТВИЕ УРОВНЕЙ КВАДРАТУРНОГО СИГНАЛА И ЗНАКА РАЗНОСТНЫХ СИГНАЛОВ

$S - S_1$	$> 0$	$< 0$	$< 0$	$< 0$
$S - S_2$	$> 0$	$> 0$	$< 0$	$< 0$
$S - S_3$	$> 0$	$> 0$	$> 0$	$< 0$
$b_{\text{вых}}$	<b>1,307</b>	<b>0,541</b>	<b>-0,541</b>	<b>-1,307</b>

В табл. 2 введены следующие обозначения:  $S$  – результат интегрирования демодулированного сигнала;  $S_{1,2,3}$  – результаты интегрирования пороговых уровней  $U_{\text{пор1,2,3}}$ .

Ошибка в принятом символе отсутствует, если знак разностей  $S - S_1$ ,  $S - S_2$ ,  $S - S_3$  совпадает для исходного модулирующего и демодулированного сигналов.

Для вычисления аналогичных разностей  $S' - S_1$ ,  $S' - S_2$ ,  $S' - S_3$  по отношению к исходному модулирующему сигналу применены блоки: «Интегратор 5», «Умножитель 5», «Сумматор 4», «Сумматор 5», «Сумматор 6».

Блоки «Умножитель 6,7,8», в которых попарно перемножаются соответствующие результаты вычисления разностей  $S' - S_1$  и  $S - S_1$ ,  $S' - S_2$  и  $S - S_2$ ,  $S' - S_3$  и  $S - S_3$  для исходного модулирующего и демодулированного сигналов. Если результат перемножения больше нуля, то знаки разностей совпадают, в противном случае – не совпадают и имеет место ошибка в передаче бита.

Элементы схемы «Блок сравнения 1,2,3» предназначены для определения знака каждого из данных произведений (результат на выходе блока «0» если произведение больше нуля и «1» – если меньше нуля). Блок «ИЛИ» объединяет их выходы. Если на входах блока «ИЛИ» есть хотя бы одна «1», то и на его выходе будет «1», а, значит, будет зафиксирована ошибка. Блок «Счетчик» подсчитывает число таких ошибок.

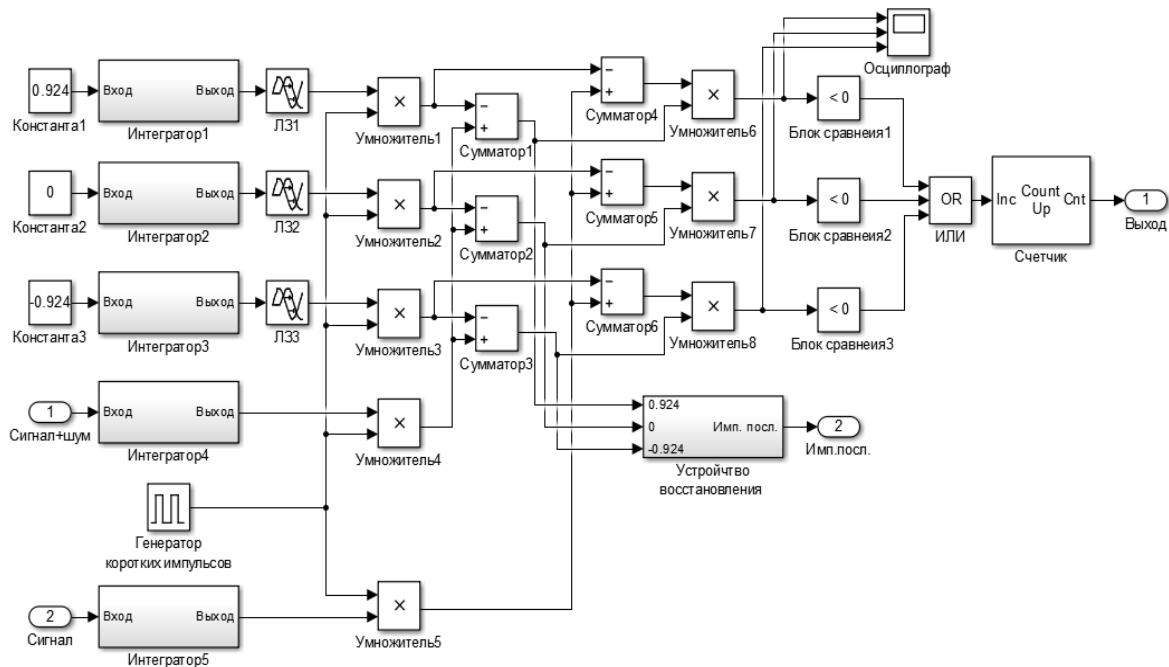


Рис. 1. Структурная схема блока «Измеритель BER»

Блок «Устройство восстановления» служит для восстановления формы принятого сигнала в соответствии с решением о типе бита на интервале, соответствующем длительности посылки. Он имеет три входа, на которые подаются разности  $S - S_1$ ,  $S - S_2$ ,  $S - S_3$ . Алгоритм работы данного блока определен табл. 2.

Данный блок содержит три идентичных блока коррекции длительности импульсов и решающее устройство. Необходимость в корректировке длительности вызвана тем, что результаты интегрирования на выходе соответствующих блоков подвергались стробированию.

Блок «Решающее устройство» принимает решение о типе «посылки» и работает в соответствии с функцией (2):

$$x_{\text{вых}} = 0,766(x_{\text{ex1}} + x_{\text{ex3}}) + 1,082x_{\text{ex2}} - 1,307 \quad (2)$$

Возможные значения входных логических сигналов и выходного сигнала в соответствии с (2) приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. СООТВЕТСТВИЕ УРОВНЕЙ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНОГО СИГНАЛОВ БЛОКА «РЕШАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО»

Вход «0,924»	1	0	0	0
Вход «0»	1	1	0	0
Вход «-0,924»	1	1	1	0
Выход	1,307	0,541	-0,541	-1,307

Блоки «Генератор импульсов» и «Умножитель» в составе блока «Устройство восстановления» (рис. 3) позволяют исключить из рассмотрения интервал времени  $[0, t_{\text{посылки}}]$  не содержащий информации, так как в результате обработки и наличия блоков «ЛЗ» сигнал смещен во времени в сторону запаздывания на  $t_{\text{посылки}}$ .

На рис. 2 представлены осциллограммы модулирующего сигнала и сигналов на выходе оптимального приемника при низком (3 дБ) и высоком ОСШ (10 дБ). Анализ приведенных осциллограмм показывает, что при низком ОСШ сигнал на выходе приемника содержит многочисленные битовые ошибки, а при высоком ОСШ полностью повторяет исходный модулирующий сигнал, что подтверждает известное теоретическое положение о коэффициенте битовых ошибок меньшем 0,001 при входном ОСШ свыше 9 дБ для квадратурных демодуляторов [10]. Таким образом построенную модель оптимального приемника можно считать адекватной.

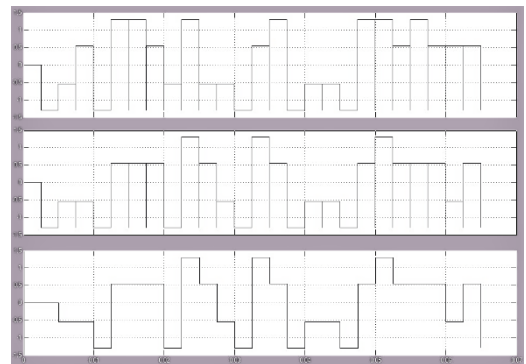


Рис. 2. Осциллограммы модулирующего сигнала (нижний рисунок), сигнала с выхода блока «Измеритель BER» при высоком ОСШ (средний рисунок) и при низком ОСШ (верхний рисунок)

### С. Результаты модельных исследований

На собранной виртуальной лабораторной установке были проведены модельные измерения коэффициента битовых ошибок в зависимости от ОСШ на входе модельного

оптимального приемника. Объем полученной выборки статистических данных составил 10000 бит на каждом из семи значений ОСШ в диапазоне от -4 до 8 дБ. На рис. 3 приведены графические зависимости коэффициента битовых ошибок от ОСШ при трех значениях скорости передачи информации, характерных для системы Инмарсат и теоретической кривой помехоустойчивости приема фазоманипулированных сигналов.

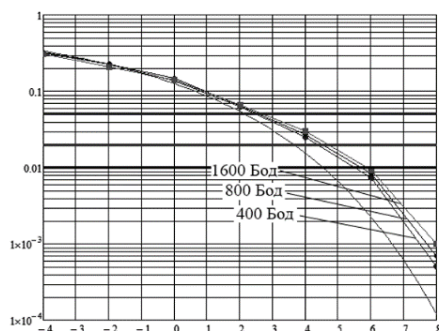


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки при приеме 8PSK радиосигнала от ОСШ в канале связи: по оси абсцисс отложены значения ОСШ в дБ, по оси ординат – средние значения вероятности битовой ошибки в логарифмическом масштабе

Сравнительный анализ полученных модельных результатов с теоретической кривой позволяет сделать вывод о том, что с увеличением скорости передачи при фиксированном ОСШ в канале связи происходит незначительный рост коэффициента битовых ошибок, а модельные кривые повторяют форму теоретической кривой и лежат несколько выше нее в силу ограниченного объема выборки статистических данных.

## II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результатом математического моделирования в среде MATLAB+Simulink является оригинальный алгоритм оценки помехоустойчивости при приеме сигналов с восьмиуровневой фазовой манипуляцией, а его реализация в составе виртуальной лабораторной установки позволяет проводить адекватные модельные измерения коэффициента битовых ошибок для перспективных демо-устройств на стадии их разработки и проектирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зубарев Ю.Б., Витязев В.В., Дворкович В.П. Цифровая обработка сигналов – информатика реального времени [Электронный ресурс]. М.: Российское научно-техническое общество техники, электроники и связи имени С.А. Попова. 1999. URL: <http://www.dsps.ru/elmaterials/artic99-13.pdf> (дата обращения: 10.2017).
- [2] Правила по оборудованию морских судов [Электронный ресурс]. – СПб.: Российский морской регистр судоходства. 2015. Электронный аналог печатного издания, утвержденного 30.09.14.
- [3] Маркелов М.А. Новые сигналы GNSS и перспективы их использования в бортовом оборудовании ГА [Электронный ресурс]. М.: Интернавигация №8. 2008. URL: [http://www.atminst.ru/up\\_files/markeldoklad.pdf](http://www.atminst.ru/up_files/markeldoklad.pdf) (дата обращения: 10.2017).
- [4] Приложение № 2 к решению ГКРЧ от 23 августа 2010 г. № 10-08-08 Основные технические характеристики абонентских станций спутниковой связи системы подвижной спутниковой связи ИНМАРСАТ [Электронный ресурс]. М.: Государственная комиссия по радиочастотам. 2010. URL: <http://www.minsvyaz.ru/ru/documents/3975/> (дата обращения: 09.2017).
- [5] IEEE 802.11 [Электронный ресурс] Национальная библиотека имени Н. Э. Баумана. URL: [http://ru.bmstu.wiki/IEEE\\_802.11](http://ru.bmstu.wiki/IEEE_802.11) (дата обращения: 11.2017).
- [6] Основные особенности стандарта цифрового телевидения DVB-T2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.broadcasting.ru/articles2/Regandstan/osnovnye-osobennosti-standarta-tsifrovogo-televideniya-dvb-t2/> (дата обращения 11.2017).
- [7] Проakis Дж. Цифровая связь /пер. с англ. под ред Д.Д. Кловского. Москва: Радио и связь, 2000. 800 с. [Proakis J.G. Digital Communications. New York: McGraw-Hill, 1995].
- [8] Братулин А.В., Пименов С.Ю., Тинаев В.В. Исследование производительности различных алгоритмов формирования случайных последовательностей с гауссовским законом распределения [Электронный ресурс]. «Наука и образование: новое время» №3, 2017. URL: [https://artculus-info.ru/wp-content/uploads/2017/05/3\\_2017o\\_Bratulin-Pimenov-Tinaev.pdf](https://artculus-info.ru/wp-content/uploads/2017/05/3_2017o_Bratulin-Pimenov-Tinaev.pdf)
- [9] Канаков В.А. Новые технологии измерения в цифровых каналах передачи информации. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащитности и защиты информации». Нижний Новгород, 2006, 91 с.
- [10] Карлов А.М., Волхонская Е.В. Беспороговый прием частотно-манипулированных сигналов: монография. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010. 174 с.