

Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, М. В. Рушко

МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ СОЗВЕЗДИЯ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА РАДИОСИГНАЛА QAM-8 В СРЕДЕ MATLAB

Исследование сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией представляется актуальной задачей в связи с широким их применением при организации систем спутникового телевизионного вещания, а также канала связи спутниковой системы связи ИНМАРСАТ и спутника Sirius.

В работе представлены результаты исследования, в ходе которого была собрана лабораторная установка для измерения вероятности приема ошибочных бит для радиосигнала QAM-8 в зависимости от типа сигнального созвездия для различных отношений сигнал / шум в среде моделирования MathLAB + Simulink.

Результаты исследования, а также разработанная лабораторная установка найдут применение при сравнительной оценке помехоустойчивости канала радиосвязи с использованием стандартных и перспективных запатентованных систем передачи информации в рамках морской подвижной службы при приеме радиосигналов с QAM-модуляцией.

The study of signals with quadrature-amplitude modulation is an urgent task due to their wide application in the satellite television broadcasting systems, as well as for the communication channel of the INMARSAT satellite communication system and the Sirius satellite.

The paper presents the results of a study, when an experimental facility was assembled to assess the probability of receiving bit error for a QAM-8 radio signal, depending on the type of signal constellation for different SNRs in the MathLAB + Simulink simulation environment.

The results of the research, as well as the developed experimental facility, will be used in the comparative assessment of noise stability of the radio communication channel using standard and prospective patented information transmission systems within the maritime mobile service when receiving radio signals with QAM modulation.

Ключевые слова: квадратурно-амплитудная модуляция, сигнальное созвездие, помехоустойчивость, радиосигнал, ОСШ.

Keywords: quadrature amplitude modulation, signal constellation, noise stability, radio signal, SNR.

Цифровая обработка сигналов на сегодняшний день является одной из самых мощных технологий, охватывающих науку и технику [1]. Революционные изменения затрагивают широчайший круг областей, в том числе коммуникации и телевизионное вещание, что создает благоприятное поле для исследований и создания новых методов и алгоритмов обработки цифровой информации.

В настоящее время сигналы с квадратурно-амплитудной модуляцией находят широкое применение при организации систем спутникового телевизионного вещания, что иллюстрирует таблица 1, а также канала связи спутниковой системы связи ИНМАРСАТ (16-QAM) [2] и спутника Sirius (16-QAM) [3].



Таблица 1

Типы радиосигналов в стандартах телевизионного вещания

Стандарт	Расшифровка	Тип модуляции
DVB-S	Спутниковые сервисы (Satellite Services) – передача компрессированного видео и аудио, а также дополнительной информации через спутник	QPSK, 8-PSK, QAM-16
DVB-S2	Спутниковое вещание второго поколения (Satellite 2nd Generation) – дополняет DVB-S возможностью использовать дополнительные типы модуляции с увеличением пропускной способности канала связи в несколько раз, а также иными усовершенствованиями	QPSK, 8-PSK, 16-APSK или 32-APSK
DVB-SH	Спутниковое портативное вещание (Satellite Handheld) – спутниковое / наземное вещание с возможностью мобильного приема; обеспечивает возможность совместного использования спутниковых и наземных систем связи (так называемые гибридные сети)	QPSK, 8-PSK, 16-APSK
DVB-C	Кабельное вещание (Cable) – передача компрессированного видео и аудио, а также дополнительной информации через кабельные сети	QAM-16, QAM-32, QAM-64, QAM-128 или QAM-256
DVB-C2	Кабельное вещание второго поколения (Cable 2nd Generation) – цифровое кабельное телевидение второго поколения	QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256, QAM-1024, QAM-4096
DVB-T	Наземное эфирное вещание (Terrestrial) – передача компрессированного видео и аудио, а также дополнительной информации через сети наземного эфирного телевидения (стационарный прием)	QAM-16 или QAM-64 (или QPSK) совместно с COFDM
DVB-T2	Наземное эфирное вещание второго поколения (Terrestrial 2nd Generation) – стандарт DVB-T с использованием новых режимов модуляции и канального кодирования, увеличивающих пропускную способность канала связи по сравнению с DVB-T в два раза	QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256 совместно с OFDM
DVB-H	Мобильное вещание (Handheld) – стандарт DVB-T только для подвижного приема	OFDM
DVB-IPDC	Передача данных через межсетевой протокол (IP Datacast) – способ представления информации для мобильного телевидения DVB-H (в общем случае – для передачи по сетям IP)	–
DVB 3D-TV	Трехмерное вещание (3D Television) – передача 3D видеоконтента в цифровом эфирном (DVB-T, DVB-T2), спутниковом (DVB-S, DVB-S2) и кабельном (DVB-C, DVB-C2) телевидении	–



QAM-модуляция используется для передачи цифровых сигналов и предусматривает дискретное изменение состояния сегмента несущей одновременно по фазе и амплитуде. Известно, что чем выше уровень модуляции, тем большими скоростными возможностями и меньшей помехоустойчивостью она обладает. QAM-модуляция более чувствительна к нелинейным искажениям и шумам радиотракта, чем QPSK и 8PSK, что неблагоприятно для ее использования в каналах спутниковой связи.

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) [4]. По мнению авторов статьи, актуальной является научно-практическая задача сравнительного анализа помехоустойчивости приема QAM-радиосигнала в зависимости от типа сигнального созвездия, так как подобных исследований по этой теме не проводилось.

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

1. Модель радиосигнала QAM-8

QAM-радиосигнал в общем виде описывается выражением (1):

$$a(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) - Q(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad (1)$$

где $I(t)$ – синфазная составляющая комплексной огибающей радиосигнала, а $Q(t)$ – ее квадратурная составляющая [5].

В зависимости от количества пар значений, которые могут принимать синфазная и квадратурная составляющие, различают QAM-8, QAM-16, QAM-64 и т. д.

Множество таких пар значений отображается точками на комплексной плоскости, для которых значение синфазной составляющей описывает вещественную часть комплексного числа, а значение квадратурной составляющей – мнимую часть. Подобное представление радиосигнала на комплексной плоскости называется сигнальным созвездием. На рисунке 1 представлены разновидности сигнальных созвездий радиосигнала QAM-8.

На данный момент число кодируемых информационных бит на одном символьном интервале может достигать 8–12, а число позиций сигнала (то есть возможных комбинаций единиц и нулей) в сигнальном пространстве – от 256 до 4096. Чем выше порядок QAM-модуляции, тем сложнее становится структура формирователя такого радиосигнала, собранного на основе отдельных блоков, и тем сильнее уменьшается наглядность процессов модуляции и демодуляции. Помимо этого, усложняются контроль параметров такого радиосигнала и оценка вероятности битовой ошибки при его приеме. Поэтому в качестве исследуемого материала был выбран радиосигнал QAM-8. Преимуществом такого выбора также является многообразие возможных форм сигнального созвездия QAM-8, представленных на рисунке 1.

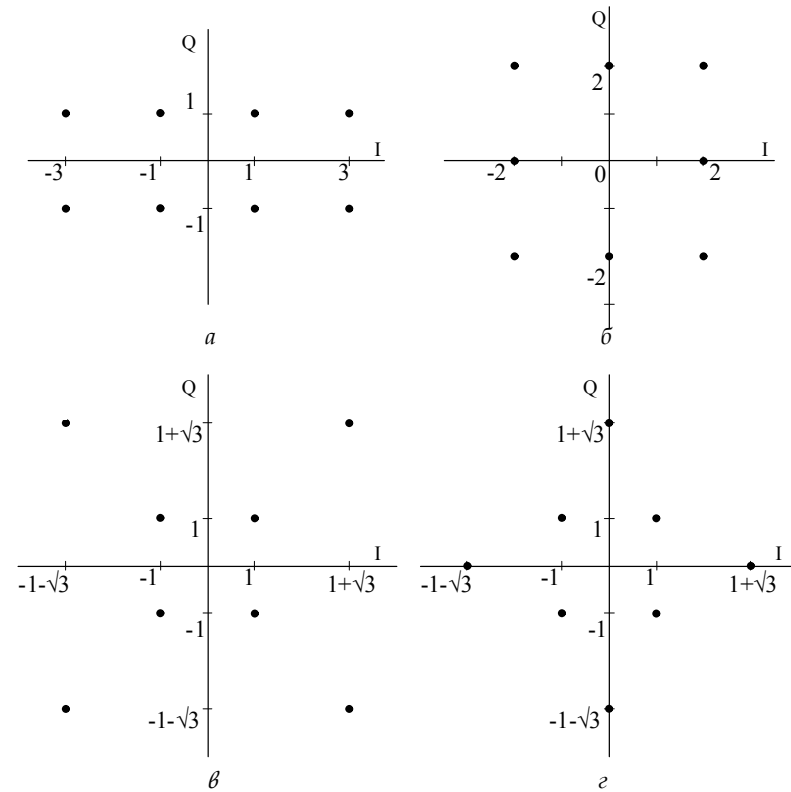


Рис. 1. Сигнальные созвездия радиосигналов QAM-8:
а – прямоугольное; б – квадратное; в – крестообразное; з – ромбовидное

Частота несущего колебания при формировании QAM-радиосигнала и частота опорных колебаний при его демодуляции была выбрана равной 100 кГц. Такой выбор не соответствует реальным значениям несущих частот сигналов цифрового телевидения, но позволяет повысить скорость выполнения операций в среде Simulink ввиду сокращения объема выборки обрабатываемых данных на одном и том же временном интервале. При этом суть процессов модуляции и демодуляции и получаемый при этом качественный результат остаются такими же, как и при выборе реальной несущей частоты. По аналогичным соображениям занижена скорость передачи информации (табл. 2).

Таблица 2

Параметры модели QAM-радиосигнала

Тип радиосигнала	QAM-8
Виды созвездий	Прямоугольное, квадратное, крестообразное, ромбовидное
Скорость передачи информации, Бод	4000



2. Модель шума

Модель аддитивного белого гауссова шума на входе квадратурного демодулятора была реализована на основе преобразования Бокса – Мюллера [6] и представлена в рамках XVI и XIX международных научно-технических конференций «Радиолокация, навигация, связь RLNC».

Модель шума, представляющая собой псевдослучайную числовую последовательность, формируется на основе линейного конгруэнтного метода, в свою очередь формирующего равномерно распределенную случайную величину с последующим нелинейным преобразованием законов распределения пар таких случайных величин и их перемножением. В данной работе были выбраны соотношения сигнал / шум $-5...10$ дБ, чтобы вероятность битовой ошибки в среднем лежала в пределах от 0,001 до 0,2 и позволяла, с одной стороны, оценить динамику изменения данного показателя при изменении значения ОСШ, а с другой – оценить критические (минимальные) значения ОСШ, при которых достигается допустимая вероятность битовой ошибки.

27

3. Алгоритм оценки BER

В составе виртуальной лабораторной установки, представленной на рисунке 2, использовались «Генератор модулирующей последовательности», «Демультимплексор», «Модулятор», «Генератор шума», «Демодулятор», «Мультимплексор» и «Измеритель BER».

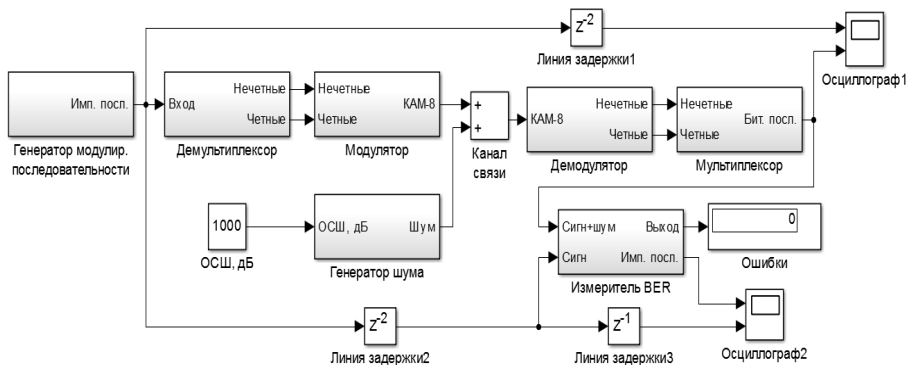


Рис. 2. Схема виртуальной лабораторной установки по исследованию процессов формирования и приема радиосигнала QAM-8

4. Анализ результатов исследования

Анализ полученных зависимостей вероятности битовой ошибки от ОСШ позволяет заключить, что радиосигнал QAM-8 с квадратным созвездием обладает наилучшей помехоустойчивостью, а с ромбовидным созвездием – наихудшей. Так, одно и то же значение вероятности би-



товой ошибки 0,02 достигается при значении ОСШ, равном 5,22 дБ для квадратного созвездия, 6,57 дБ – для прямоугольного созвездия, 8,61 дБ – для крестообразного созвездия и 9,38 дБ – для ромбовидного созвездия (рис. 3).

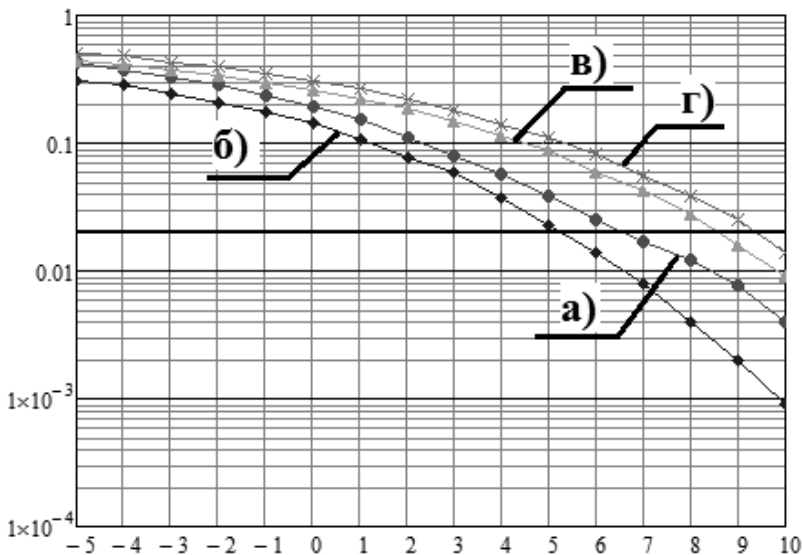


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки при приеме радиосигналов QAM-8 от ОСШ в канале связи, по оси абсцисс отложены значения ОСШ в дБ, по оси ординат – средние значения вероятности битовой ошибки в логарифмическом масштабе:
а – прямоугольное созвездие; б – квадратное созвездие;
в – крестообразное созвездие; г – ромбовидное созвездие

Все созвездия характеризуются одним и тем же минимальным кодовым расстоянием, равным 2, и поэтому различие в помехоустойчивости не связано с кодированием точек сигнального созвездия. Однако при декодировании точек сигнального созвездия, подверженного влиянию шумов, важно количество пороговых уровней. В случае квадратного созвездия таких уровней 2, для прямоугольного и крестообразного созвездий – 3, а для ромбовидного созвездия – 4. Это обуславливает тот факт, что квадратное созвездие характеризуется наилучшей помехозащищенностью, а ромбовидное – наихудшей. Различие в помехоустойчивости прямоугольного и крестообразного созвездий связана с расстоянием между ближайшими пороговыми уровнями: 2 – для прямоугольного и 1,866 – для крестообразного. Меньшее расстояние повышает вероятность перехода от одной точки созвездия к другой под влиянием шумов, а значит, уменьшает помехоустойчивость.

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».



Список литературы

1. Зубарев Ю. Б., Витязев В. В., Дворкович В. П. Цифровая обработка сигналов – информатика реального времени. М., 1999. URL: <http://www.dsps.ru/elmaterials/artic99-13.pdf> (дата обращения: 03.07.2018).
2. Основные технические характеристики абонентских станций спутниковой связи системы подвижной спутниковой связи ИНМАРСАТ : прил. №2 к решению ГКРЧ от 23 авг. 2010 г. №10-08-08 // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации : [официальный сайт]. URL: <http://www.minsvyaz.ru/ru/documents/3975/> (дата обращения: 06.06.2018).
3. Ответы на вопросы. Рубрика для кабельщиков // Теле-Спутник. 2001. №8 (70). С. 58. URL: <http://old.telesputnik.ru/archive/70/article/58.html> (дата обращения: 13.07.2018).
4. 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). URL: <http://morintex.ru/ru-nauchnyj-zhurnal/dlya-chitatelej/biblioteka-zhurnala/2017-2/zhurnal-4-38-tom-2-2017/> (дата обращения: 25.05.2018).
5. Прокис Дж. Цифровая связь : учебник. М., 2000.
6. Братулин А. В., Пименов С. Ю., Тинаев В. В. Исследование производительности различных алгоритмов формирования случайных последовательностей с гауссовским законом распределения // Наука и образование: новое время. 2017. №3. URL: https://artculus-info.ru/wp-content/uploads/2017/05/3_2017o_Bratulin-Pimenov-Tinaev.pdf (дата обращения: 19.06.2018).

Об авторах

Елена Вячеславовна Волхонская — д-р техн. наук, доц., Балтийская государственная академия рыбопромышленного флота, Россия.

E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Евгений Владимирович Коротей — ст. преп., Балтийская государственная академия рыбопромышленного флота, Россия.

E-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Мargarita Владимировна Рушко — асп., Балтийская государственная академия рыбопромышленного флота, Россия.

E-mail: margarita_rushko@inbox.ru

The authors

Prof. Elena V. Volkhonskaya, Baltic Fishing Fleet State Academy, Russia.

E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Evgeny V. Korotey, Assistant Professor, Baltic Fishing Fleet State Academy, Russia.

E-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Margarita V. Rushko, PhD Student, Baltic Fishing Fleet State Academy, Russia.

E-mail: margarita_rushko@inbox.ru