



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КВАДРАТУРНОЙ МОДУЛЯЦИИ QAM

А. А. Антоненко, курсант 4-го курса,

e-mail: an_stasik@list.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

«Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота»

Е. В. Волхонская, докт. техн. наук, доц.,

e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

«Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота»

В статье приведены результаты экспериментального исследования помехоустойчивости радиосигналов с квадратурной амплитудной модуляцией при наличии в канале передачи белого шума. Сравнительный анализ экспериментальной оценки вероятности ошибки на символ от отношения сигнал/шум в канале и теоретической зависимости имеет достаточную сходимость результатов. В ходе исследования выявлено, что требуемое отношение сигнал/шум в канале для качественной передачи информации посредством 16-QAM варьирует в зависимости от энергии битовой комбинации, предназначенной к передаче.

Ключевые слова: квадратурная амплитудная модуляция, помехоустойчивость, вероятность ошибки на символ, КБО, ОСШ, канал связи

ВВЕДЕНИЕ

В современных цифровых системах передачи информации (ЦСПИ) широко применяются многоуровневые форматы радиосигналов, например такие как: QAM и M-PSK, а также их различные модификации.

Область применения сигнала с квадратурной амплитудной манипуляцией (QAM сигнала) охватывает кабельные модемы, устройства стандарта цифрового телевидения DVB-C, цифровое радиовещание СВЧ диапазона, цифровые телекоммуникационные системы стандарта 802.11 WI-FI [1]. Данный цифровой формат используют в целях передачи больших потоков информации. Однако чем выше уровень модуляции, тем большими скоростными возможностями и меньшей помехоустойчивостью она обладает [2]. Поэтому в силу худшей помехоустойчивости цифрового формата такой способ передачи требует большего отношения сигнал/шум в канале по сравнению с двухуровневыми манипулированными сигналами.

Традиционно QAM сигнал представляется через ВЧ квадратурные составляющие в виде, где ω – несущая частота радиосигнала, $I(t)$ и $Q(t)$ – синфазная и квадратурная составляющие модулирующего сигнала, и может быть сформирован стандартным универсальным квадратурным модулятором, представленным на рисунке 1:

$$s(t) = I(t) \cos(\omega t) - Q(t) \sin(\omega t). \quad (1.1)$$

Входными сигналами на перемножителях являются низкочастотные квадратурные составляющие и несущие гармонические колебания, сдвинутые друг относительно друга в

верхней и нижней ветвях схемы на 90° . Выходные с перемножителей сигналы подаются на сумматор, на выходе которого формируется радиосигнал заданного цифрового формата [3].

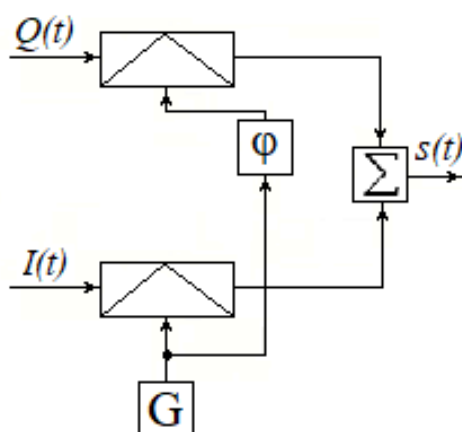


Рисунок 1 – Универсальный квадратурный модулятор

Модуль и аргумент комплексной огибающей радиосигнала определяют длину и угол поворота ее векторного представления на комплексной плоскости, образованной осями I и Q. На рисунке 2 представлены варианты так называемых сигнальных созвездий для M-QAM сигналов.

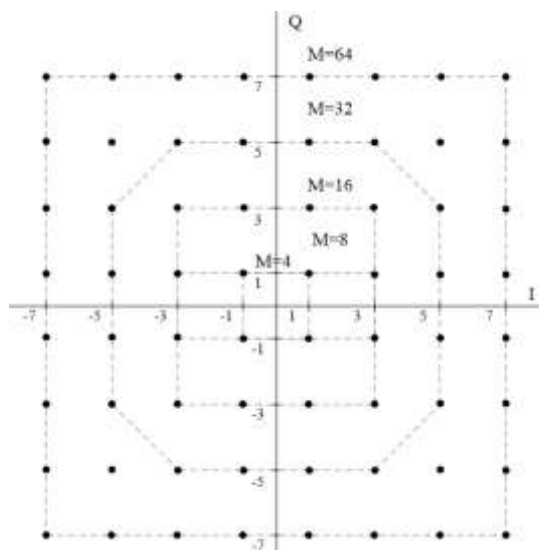


Рисунок 2 – Сигнальные созвездия M-QAM сигналов

Каждая точка сигнального созвездия определяет собой каналный символ, которым кодируется k бит информации, причем $k = \log_2 M$. Так, для 16-QAM одним каналным символом кодируются 4 бита передаваемой информации.

Передача радиосигнала в цифровом канале всегда осуществляется на фоне различного рода шумов и помех. В таких условиях каналные символы поражаются ошибками, когда один каналный символ может перейти в другой вследствие изменения амплитудного или фазового уровней, ему назначенных. Теоретическая оценка помехоустойчивости метода QAM модуляции на фоне аддитивного белого гауссова шума при осуществлении оптимального когерентного приема сводится к расчету зависимости вероятности ошибки на символ от отношения сигнал/шум в канале по выражению вида [3]:

$$P = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3k}{M-1} \frac{\varepsilon_{cp}}{N_0}} \right), \quad (1.2)$$

где $\frac{\varepsilon_{cp}}{N_0}$ – среднее ОСШ на символ. Тогда вероятность ошибки на символ для M-позиционной QAM при четных k равна:

$$P_M = \frac{1-(1-P)^2}{4}. \quad (1.3)$$

Несмотря на то, что теоретические подходы в оценке помехоустойчивости многоуровневых форматов сигналов известны и широко представлены в различных научно-технических источниках, вопросы экспериментальной оценки характеристик помехоустойчивости не теряют своей актуальности до сих пор, особенно в рамках тестирования готовности бинарного канала с применением фиксированных тестовых последовательностей [4].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является 16-QAM сигнал на фоне аддитивного белого гауссова шума, предметом исследования – его помехоустойчивость.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является сравнительный анализ экспериментальной оценки помехоустойчивости 16-QAM сигнала с известной теоретической зависимостью. Для достижения цели требуется решение следующих задач:

1. Анализ теоретического материала.
2. Описание функциональных возможностей учебного стенда; выбор контрольно-измерительной аппаратуры.
3. Экспериментальное исследование помехоустойчивости цифрового формата сигнала амплитудно-фазовой модуляции QAM.
4. Обработка экспериментальных данных и анализ полученных результатов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовательская работа по оценке помехоустойчивости 16-QAM сигнала произведена на лабораторном стенде, который состоит из следующих модулей:

- модуль «Однофазный источник питания», предназначен для ввода однофазного напряжения питания, защиты от коротких замыканий в элементах стенда и подачи напряжения питания к отдельным модулям стенда;

- модуль «Модуль связи (Источники питания)», применяется с целью сбора и передачи информации данных на компьютер, дистанционного управления модулями и низковольтного питания микропроцессорных систем управления;

- модуль «Кодирование и модуляция информации в системах связи», имитирует процессы реальной линии связи и фиксирует параметры сигнала, а также осуществляет передачу 8-битной последовательности в шестнадцатеричном формате.

Модуль «Кодирование и модуляция информации в системах связи» состоит из четырех блоков: питания, управления, индикации и основной блок. В состав последнего блока входит ПЛИС Altera Cyclone III. С помощью этой микросхемы программно реализованы следующие устройства: кодек, генератор шума, счетчики количества переданных и полученных байт, количества ошибочно принятых бит, а также устройства ввода и вывода информации из блока. Помимо ПЛИС блок также содержит буферные повторители, выполненные на операционном усилителе (ОУ), и узлы: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

Блок работает следующим образом: по заданным исходным данным, поступившим с блока управления, с помощью программы ПЛИС формируется исходная последовательность бит и происходит ее кодирование в соответствии с выбранным типом модуляции. Кодированный сигнал с выхода ПЛИС поступает на буферный повторитель, предназначенный

для уменьшения влияния последующих цепей на выход ПЛИС. Затем сигнал поступает на один из входов сумматора, выполненного на ОУ. На второй вход сумматора поступает сигнал помехи, сгенерированный программно и преобразованный с помощью ЦАП.

На выходе сумматора формируется аддитивная смесь полезного сигнала и помехи, которая через буферный повторитель поступает на вход АЦП. С выхода АЦП сигнал поступает на вход ПЛИС, выполняется программное декодирование сигнала и производится анализ принятой информации. Затем результаты анализа с ПЛИС отправляются в блок индикации и отображаются на передней панели модуля.

Помимо перечисленных модулей в процессе выполнения использовано контрольно-измерительное оборудование для контроля и исследования параметров передаваемого сигнала в линии связи.

Экспериментальное исследование проводилось поэтапно. На подготовительном этапе исследованы функциональные возможности стенда в части генерации заданного цифрового формата радиосигнала и белого шума с регулируемой дисперсией, а также объема получаемых статистических данных. На основном этапе произведена серия экспериментальных измерений коэффициента битовой ошибки в имитируемом бинарном цифровом канале передачи при разных отношениях сигнал/шум с пересчетом в вероятность ошибки на символ.

Исследование функциональных возможностей стенда осуществлялось следующим образом: после подачи питания на модуль «Кодирование и модуляция информации в системах связи» стенда к нему подключался двухканальный осциллограф, первый канал – ко входу синхросигнала в передающем блоке, а второй канал – к линии связи (к выходу сумматора) (рис. 3). Внешний вид передней панели модуля «Кодирование и модуляция информации в системах связи» приведен на рисунке 4.



Рисунок 3 – Лабораторная установка в сборе

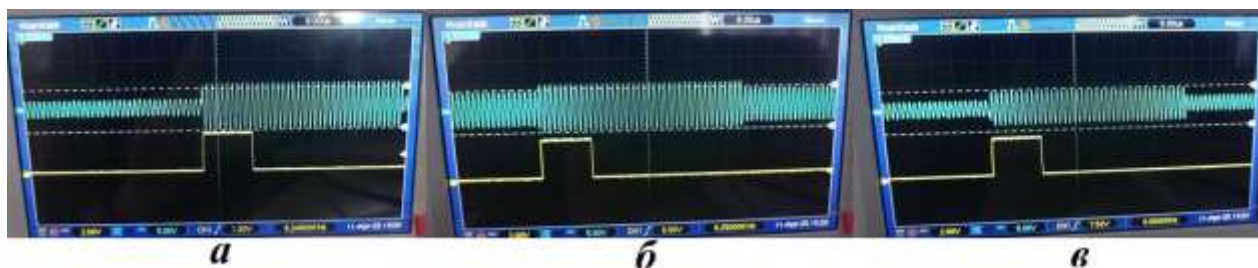


Рисунок 4 – Схема передней панели модуля «Кодирование и модуляция информации в системах связи»

На передающем блоке модуля была активирована функция генерации 16-QAM сигнала, затем с помощью кнопки «Случайная последовательность» сгенерированы 3 числа для проведения эксперимента «03», «43», «94», выставлен минимальный уровень шума в блоке «Источник помехи». Далее производилась передача данных; управление началом и концом передачи сообщений производилось кнопками в передающем блоке вручную. Информация о количестве переданных байт, количестве ошибочно принятых бит, эффективном уровне напряжения сигнала и шума отражалась в блоке индикации.

Об исправной работе модуля сигнализируют индикаторы «передача» и «прием», а также цифрами отображались переданная и принятая последовательности. Временная реализация аддитивной смеси сигнала и шума фиксировалась на осциллографе.

Для проверки параметров формируемого 16-QAM сигнала были выбраны 3 числа с комбинацией разных уровней амплитуд: число «07» – высокий / низкий; число «89» – высокий / средний; число «BD» – средний / низкий. На основе осциллограмм, представленных на рисунке 5, можно сделать вывод о том, что стенд генерирует цифровой формат радиосигнала с тремя уровнями амплитуд, характерных для 16-QAM.



а – число «07»; б – число «89»; в – число «BD»

Рисунок 5 – Осциллограммы бинарных последовательностей передаваемых чисел

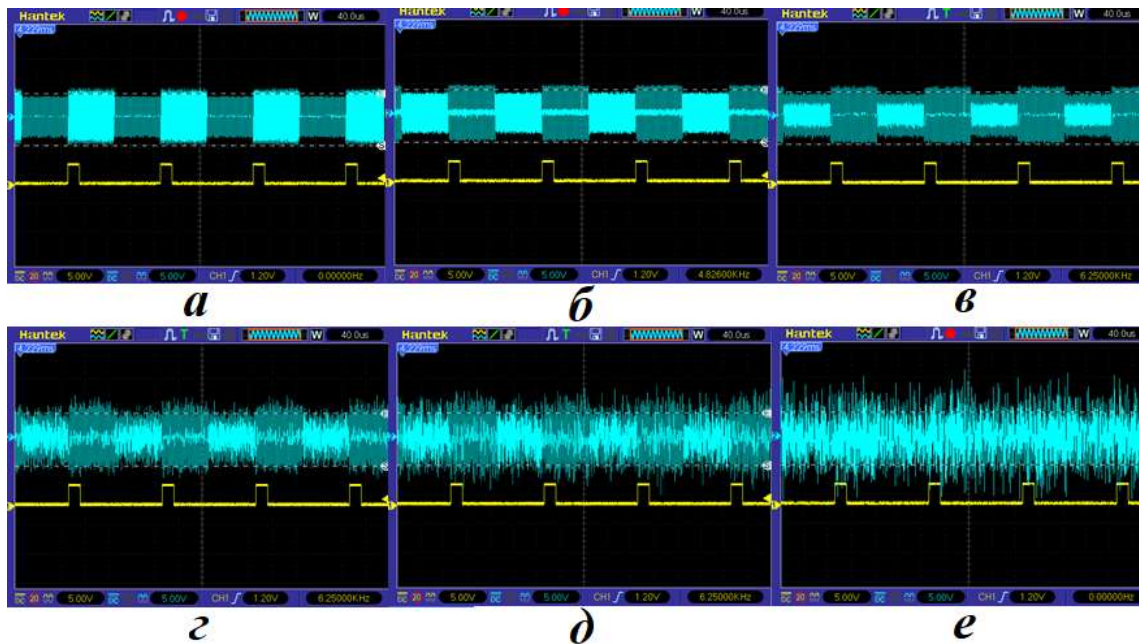
В таблице представлены результаты оценки коэффициентов пропорциональности между измеренными и теоретически рассчитанными уровнями амплитуд огибающей сигнала 16-QAM.

Таблица – Сравнение коэффициентов пропорциональности

	Высокий/низкий	Высокий/средний	Средний/низкий
Теория	3,00	1,34	2,2
Эксперимент	2,89	1,32	2,1

Сравнение экспериментальных данных с известными теоретическими значениями свидетельствует о соответствии сгенерированного радиосигнала требованиям к его параметрам.

С целью проверки наличия влияния шума на параметры передаваемого 16-QAM сигнала было проведено тестирование аддитивной смеси полезного сигнала и шума в линии связи. Результаты эксперимента приведены на рисунке 6.



а – на входе сумматора; б – на выходе сумматора при уровне шума 0 В; в – на выходе сумматора при уровне шума 0,05 В; г – на выходе сумматора при уровне шума 1,13 В; д – на выходе сумматора при уровне шума 2,06 В; е – на выходе сумматора при уровне шума 2,5 В

Рисунок 6 – Временная реализация аддитивной смеси полезного сигнала и шума при передаче по каналу числа «03»

Анализируя полученные осциллограммы, можно увидеть, что увеличение уровня шума в канале ведет к существенному искажению амплитудных уровней передаваемого 16-QAM сигнала. Следовательно, можно предположить, что с ростом дисперсии шума в канале и уменьшением отношения сигнал/шум возрастет количество пораженных ошибками канальных символов.

Экспериментальное исследование помехоустойчивости 16-QAM сигнала заключалось в измерении коэффициента битовой ошибки (КБО) в зависимости от ОСШ в канале. С этой целью для каждого из передаваемых чисел генерировалась 8-битная комбинация, которая передавалась в канал в цикле. При каждом уровне шума проводилась серия из 10 экспериментов по оценке количества ошибочных бит в принятом сообщении при общем количестве переданных байт порядка 500 000. Затем осуществлялась стандартная процедура обработки экспериментальных данных: расчет КБО по выражению (1.4), расчет отношения энергии бита к дисперсии шума по формуле (1.5), расчет СКО и доверительных интервалов.

$$\text{КБО} = \frac{N_{\text{ош}}}{N_{\text{прд}}}, \quad (1.4)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} - 10\lg(k), \quad (1.5)$$

где $N_{\text{ош}}$ – количество ошибочно принятых бит; $N_{\text{прд}}$ – количество переданных бит; S – средняя мощность сигнала; N – мощность шума в канале передачи данных (дисперсия); k – коэффициент маппинга, представляющий собой число бит на символ информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результатом обработки экспериментальных данных являются экспериментальные кривые вероятности ошибки на символ и теоретическая кривая, построенная в соответствии с выражением (1.2), в зависимости от отношения сигнал/шум в канале.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы: экспериментальные кривые, равно как и теоретическая кривая, носят нелинейный характер.

Экспериментальные кривые близки по форме к теоретической и лежат несколько выше нее. Это объясняется недостаточным объемом выборки статистических экспериментальных данных.

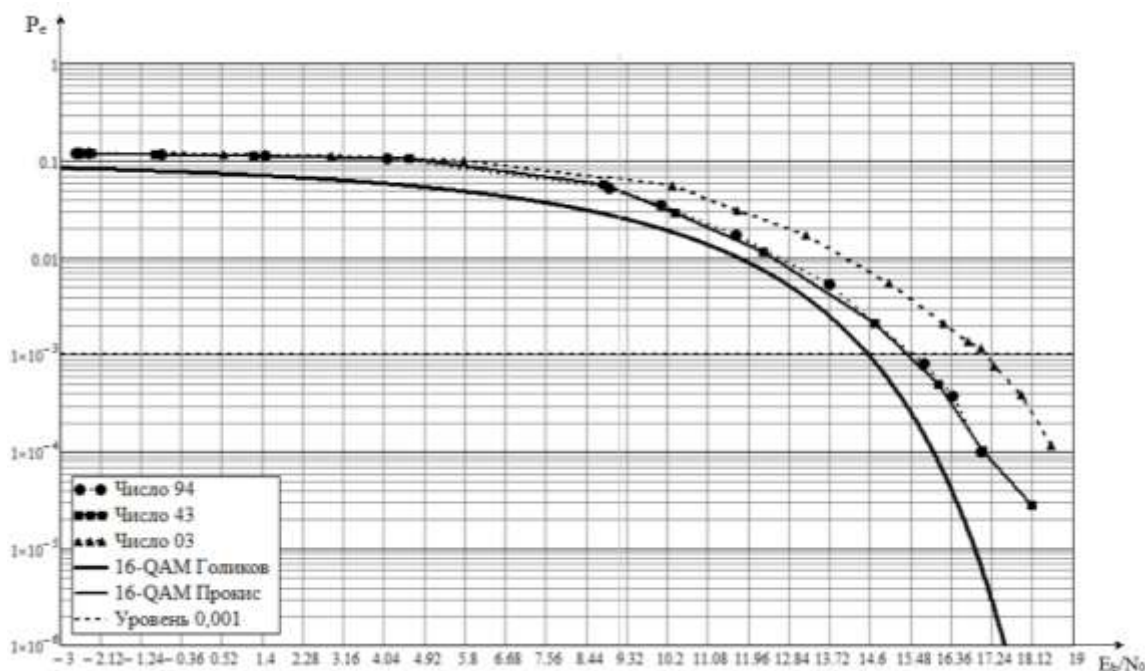


Рисунок 7 – Графические зависимости вероятности символьной ошибки от ОСШ в канале

В силу ограничений функциональных возможностей стенда за норму BER (вероятности битовой ошибки) принимается 10^{-3} . В рамках исследования считается, что канал готов к работе, если КБО меньше данной нормы. Для двух передаваемых чисел («94» и «43») требуемое ОСШ в канале составляет порядка 15,5 дБ, а для третьего числа – 17 дБ. Данное различие можно объяснить тем, что при переводе в двоичную последовательность в последнем числе количество единиц меньше, чем в двух других: $94_{16} \rightarrow 10010100_2$; $43_{16} \rightarrow 01000011_2$; $03_{16} \rightarrow 00000011_2$. Следовательно, энергия данного сигнала меньше и ОСШ при фиксированном уровне шума ниже, а число битовых ошибок больше. Данный факт может быть положен в основу дальнейших исследований на стенде при формировании в канале передачи фиксированных тестовых последовательностей и оценке качества его функционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе эксперимента было определено необходимое ОСШ для передачи информации в бинарном цифровом канале с заданным качеством.

Полученные результаты позволяют заключить следующее: сравнительная оценка результатов экспериментального измерения вероятности символьной ошибки на имитационной модели цифрового канала связи с известными теоретическими положениями свидетельствует об их достаточной сходимости. Выявленное ухудшение помехоустойчивости 16-QAM сигнала при передаче определенного рода бинарной комбинации дает возможность использовать последнюю в качестве тестовой последовательности при оценке готовности реального радиоканала к работе. В качестве направлений дальнейших исследований предлагается экспериментальное измерение на имитационной модели канала вероятности ошибки на символ при передаче известных тестовых последовательностей, применяемых в ЦСПИ, и сравнительный анализ полученных результатов с приведенными в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка программного комплекса по оценке качества цифрового канала связи морской подвижной службы [Текст]: отчет о НИОКР (промежуточный); рук. Волхонская Е. В.; исполн. : Рушко М. В. [и др.]. – Калининград, 2018. – 124 с. – Библиогр. :

с. 99. – БГАРФ/2018-1.12/ГБ.

2. Волхонская, Е. В. Модельная оценка влияния формы созвездия на помехоустойчивость приема радиосигнала qam-8 в среде Matlab [Электронный ресурс] / Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, М. В. Рушко // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта : электронный научный журнал. – 2018. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelnaya-otsenka-vliyaniya-formy-sozvezdiya-na-pomehoustoychivost-priema-radiosignala-qam-8-v-srede-matlab/viewer> (дата обращения: 21.06.2023).

3. Прокис, Д. Цифровая связь / Д. Прокис; пер. с англ.; под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с. : ил.

4. Канаков, В. А. Новые технологии измерения в цифровых каналах передачи информации : Учеб. метод. пособие / В. А. Канаков. – Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2006. – 91 с.

STUDY OF THE FEATURES OF QAM QUADRATURE MODULATION

A. A. Antonenko, 4th year cadet,
e-mail: an_stasik@list.ru
Kaliningrad State Technical University
Baltic Fishing Fleet State Academy

E. V. Volkhonskaya, DSc in Engineering, associate professor,
e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru
Kaliningrad State Technical University
Baltic Fishing Fleet State Academy

The article presents the results of an experimental study of the noise immunity of radio signals with quadrature amplitude modulation in the presence of white noise in the transmission channel. A comparative analysis of the experimental estimate of the error probability per symbol on the signal-to-noise ratio in the channel and the theoretical dependence has sufficient convergence of results. The study revealed that the required signal-to-noise ratio in the channel for high-quality information transmission via 16-QAM varies depending on the energy of the bit pattern intended for transmission.

Keywords: *quadrature amplitude modulation, noise immunity, error probability per character, BER, SNR, communication channel*