

УДК: 621.396

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА КАНАЛА СВЯЗИ ПРИ ПРИЕМЕ
РАДИОСИГНАЛОВ КАМ-8 С РАЗЛИЧНЫМИ ФОРМАМИ СОЗВЕЗДИЙ
НА ФОНЕ АДДИТИВНОГО ГАУССОВА ШУМА

Е. В. Волхонская, Д. Н. Лысонь

COMPARATIVE ANALYSIS OF COMMUNICATION CHANNEL QUALITY
USING 8-QAM RADIOSIGNALS WITH DIFFERENT SIGNAL
CONSTELLATIONS AGAINST ADDITIVE GAUSSIAN WHITE NOISE

E. V. Volkhonskaya, D. N. Lyson

В настоящей работе приведены разработанные и реализованные в программном коде в среде MathCad алгоритмы формирования радиосигнала с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ-8), узкополосного белого гауссова шума и процесса прохождения аддитивной смеси радиосигнала КАМ-8 и белого гауссова шума через основные блоки устройства, осуществляющего квадратурный прием, и оценки вероятности битовой ошибки (BER). Представлены характеристики узкополосного белого гауссова шума: гистограмма нормированного модельного шума, гистограмма приведенной начальной фазы, нормированная спектральная плотность, гистограмма огибающей и автокорреляционная функция нормированного модельного шума. Показаны сигнальные созвездия КАМ-8 на комплексной плоскости на выходе квадратурного детектора для различных значений отношения сигнал/шум после расчета среднего значения посылки в принятой кодовой последовательности. Произведены расчеты вероятности битовой ошибки для радиосигналов КАМ-8 с различными формами сигнальных созвездий: прямоугольной, квадратной и крестообразной для отношений сигнал/шум от -3 до 14 дБ. Проведен анализ полученных модельных кривых, на основании которого были определены КАМ-8-модулированные сигналы с наиболее эффективными сигнальными созвездиями. Изменения зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум носят нелинейный характер. Вероятности битовой ошибки при приеме КАМ-8 с прямоугольным и квадратным сигнальными созвездиями практически совпадают при любом отношении сигнал/шум в канале передачи информации. Прямоугольное и квадратное сигнальные созвездия обеспечивают допустимый уровень вероятности битовой ошибки в радиорелейном канале передачи 0,02-0,05 при отношении сигнал/шум на 3 дБ меньшем, чем крестообразное созвездие.

квадратурная амплитудная модуляция, КАМ-8, вероятность битовой ошибки, MathCad

Algorithms of radio signals with quadrature amplitude modulation (QAM-8) shaping, algorithms of the narrowband white Gaussian noise shaping and algorithms of QAM-8 radio signal and Gaussian noise additive mix passing process via main units of

the quadrature receiver and estimates of bit error ratio (BER) developed and implemented in MathCad are reported in this paper. Characteristics of narrowband white Gaussian noise: histogram of the normalized model noise, histogram of the reduced initial phase, model noise of normalized spectral density, histogram of noise envelope and autocorrelation function of the normalized model noise are presented here. The article presents the 8-QAM signal constellations on the complex plane at the output of the quadrature detector for different signal to noise ratio after the calculation of the signal average value in the received code sequence. Calculations of BER are made for QAM-8 radio signal with different constellation diagram: rectangular, square and crosswise for signal to noise ratio between -3 and 14 dB. The analysis of the received model curves showed the 8-QAM signals with the most effective signal constellations. The changes of the relationship between bit error rate and signal to noise ratio are not linear. BER for 8-QAM signals with rectangular and square constellations are practically the same at all the SNR in the communication channel. Using 8-QAM signals with rectangular or square constellation provides acceptable BER in radio relay channels, which is about 0,02-0,05, for the SNR, 3dB less than the using 8-QAM with the crosswise constellation.

quadrature amplitude modulation, QAM-8, bit error ratio (BER), MathCad

Неполнота существующего теоретического описания помехоустойчивости приема радиосигналов с цифровыми видами модуляции приводит к необходимости проведения исследований качества канала связи.

В ряде литературных источников [1, 2] в предметной области исследований приводятся отдельные аналитические выражения по оценке вероятности битовой ошибки (BER) для M-позиционных КАМ-сигналов:

$$M = 2^k, \quad (1)$$

где k – четное или плотная верхняя граница BER для M-позиционных КАМ-сигналов, где k – нечетное.

Модельные исследования вероятности битовой ошибки сигналов с цифровой модуляцией на фоне интенсивных шумов являются актуальной задачей, так как позволяют без привлечения дорогостоящего оборудования симитировать работу в канале передачи информации в сложной помеховой обстановке и произвести сравнительную оценку помехоустойчивости цифровых сигналов с различными видами манипуляции.

Задача исследования качества канала передачи информации может быть решена двумя путями: первый – применением дорогостоящих анализаторов вероятности битовой ошибки, и второй – проведением модельных исследований, имитирующих функционирование канала передачи информации в сложной помеховой обстановке [3, 4].

Результирующий сигнал квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) $S(t)$ может быть представлен соотношением:

$$S(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t), \quad (2)$$

где $I(t)$ и $Q(t)$ – модулирующие колебания; f_0 – несущая частота.

Этот же сигнал также может быть представлен в комплексном виде:

$$S(t) = I(t) + j \cdot Q(t) = A_m(t) \cdot \exp(j(2\pi f_0 t + \varphi_m(t))), \quad (3)$$

где $A_m(t) = \sqrt{I_m^2(t) + Q_m^2(t)}$ – огибающая модулированного сигнала;
 $\varphi_m(t) = \arctg\left(\frac{Q_m(t)}{I_m(t)}\right)$ – начальная фаза модулированного сигнала; $m = 1 \dots 8$ [1].

Так как квадратурная и синфазная составляющие принимают дискретные значения, то концы векторов модулированного колебания образуют прямоугольную сетку на комплексной плоскости [5]. В проводимых исследованиях сравнивалась помехоустойчивость КАМ-8-модулированных сигналов с различными формами сигнальных созвездий: прямоугольной, квадратной и крестообразной. Сигнальные созвездия каждой формы приведены на рис. 1.

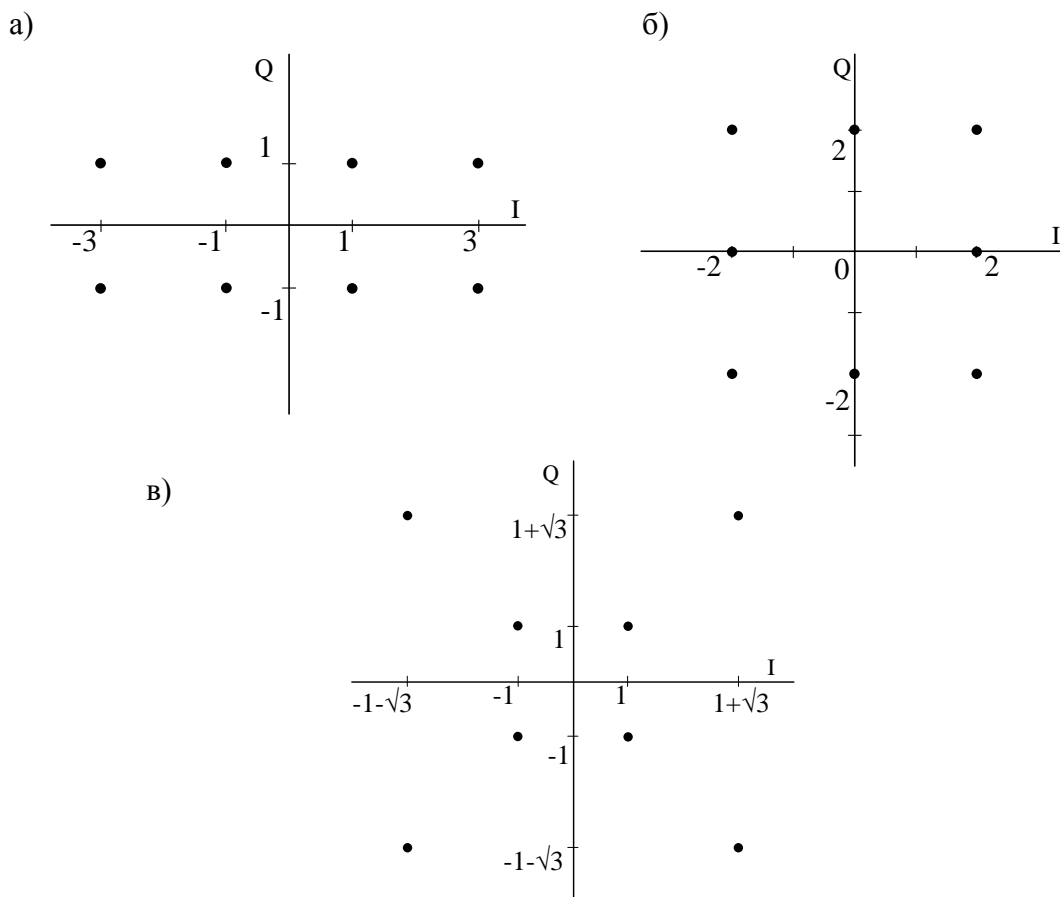


Рис. 1. Сигнальные созвездия КАМ-8: прямоугольное (а), квадратное (б) и крестообразное (в)

Fig. 1. QAM-8 radio signal with different constellation diagram: rectangular (a), square (b) and crosswise (c)

Алгоритм формирования КАМ-8-модулированного сигнала включает в себя следующие этапы:

- формирование случайной информационной последовательности;
- разделение информационной последовательности на четную и нечетную составляющие;
- формирование последовательностей потока четных и нечетных импульсов;
- формирование квадратурных составляющих;

– формирование радиосигнала с амплитудной квадратурной модуляцией.

На этапе формирования информационной последовательности случайным образом перемешиваются между собой соответствующие каждому виду КАМ-8-модулированного сигнала уровни. Полученная случайная последовательность разделяется на синфазную (четную) и квадратурную (нечетную) составляющие, которые перемножаются с несущим колебанием и суммируются. В результате получаем радиосигнал КАМ-8, представленный на рис. 2.

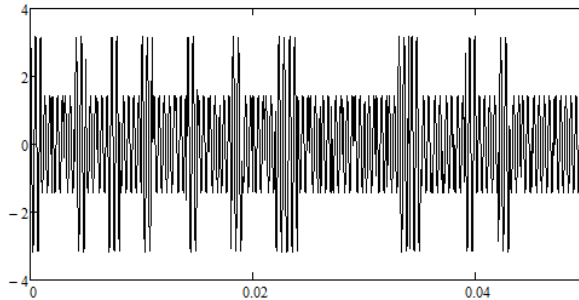


Рис. 2. Радиосигнал КАМ-8 прямоугольной формы во временной области: по оси абсцисс отложено время в с, а по оси ординат – мгновенные значения радиосигнала в В

Fig. 2. QAM-8 radio signal with rectangular constellation diagram: x-axis is time in seconds, y-axis is radiosignal instant values

В данных модельных исследованиях на сигнал оказывает влияние узкополосный белый гауссов шум, к которому предъявляются следующие требования:

- гауссова плотность вероятности должна иметь нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию;
- начальная фаза имеет равномерный закон распределенная;
- огибающая распределена по закону Релея;
- спектральная плотность средней мощности распределена по гауссовому закону;
- автокорреляционная функция (АКФ) имеет экспоненциально-косинусоидальный вид [6, 7].

Для получения узкополосного шума с перечисленными характеристиками в рамках данного исследования производилось моделирование широкополосного белого гауссова шума, затем полученный шум пропускался через усилитель промежуточной частоты (УПЧ). На выходе формировался узкополосный шум, соответствующий предъявленным требованиям. На рис. 3-7 представлены характеристики полученного узкополосного гауссова шума.

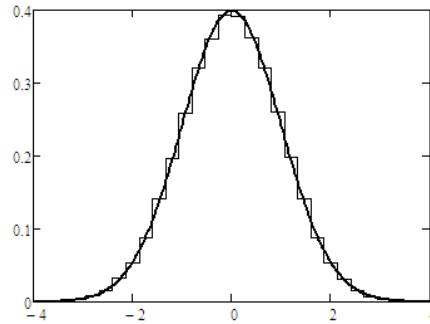


Рис. 3. Гистограмма нормированного модельного шума и нормальный закон распределения (жирная линия) при $m = 0, \sigma^2 = 1$: по оси абсцисс отложены мгновенные значения шума в В, а по оси ординат – плотность относительных частот, В⁻¹
 Fig. 3. The histogram of the normalized model noise and normal distribution (thick line) for $m = 0, \sigma^2 = 1$: x-axis is noise instant values in V, y-axis is the density of the relative frequencies in V⁻¹

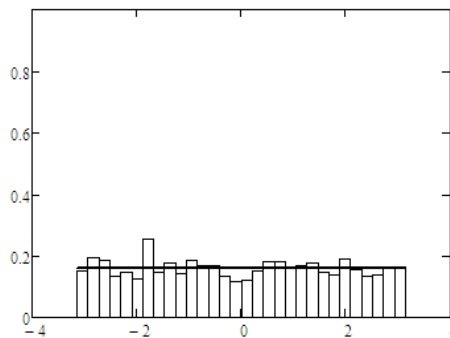


Рис. 4. Гистограмма приведенной начальной фазы и ее теоретический равномерный закон распределения (жирная линия): по оси абсцисс отложены значения приведенной начальной фазы шума в рад, а по оси ординат – плотности относительных частот, рад⁻¹
 Fig. 4. The histogram of the reduced initial phase and its theoretical uniform distribution (thick line): x-axis is noise reduced initial phase values in rad, y-axis is the density of the relative frequencies in rad⁻¹

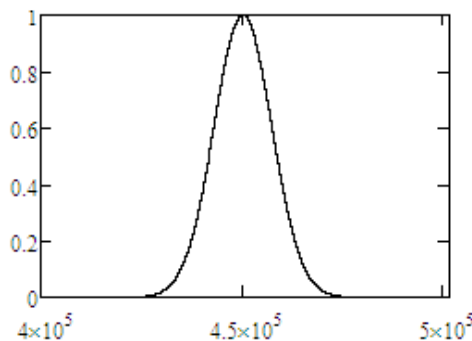


Рис. 5. Нормированная спектральная плотность модельного шума: по оси абсцисс отложены значения циклической частоты в Гц, а по оси ординат – плотность относительных частот, Гц⁻¹
 Fig. 5. The model noise normalized spectral density: x-axis is cyclic frequency values in Hz, y-axis is the density of the relative frequencies in Hz⁻¹

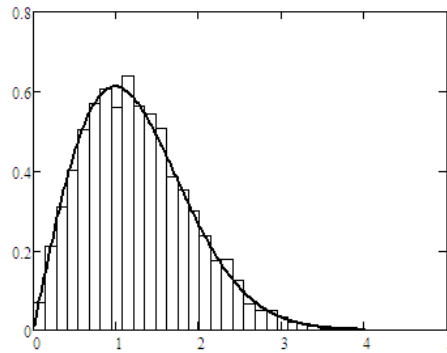


Рис. 6. Гистограмма огибающей шума и распределение Релея (жирная линия): по оси абсцисс отложены мгновенные значения огибающей шума в В, а по оси ординат – плотности относительных частот, В⁻¹

Fig 6. The histogram of noise envelope and Rayleigh distribution (thick line): x-axis is noise envelope instant values in V, y-axis is the density of the relative frequencies in V⁻¹

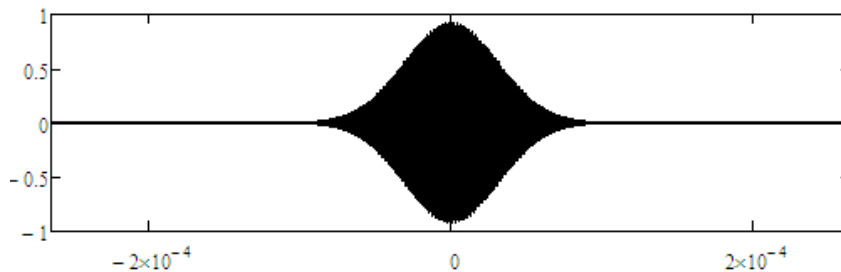


Рис. 7. График АКФ нормированного модельного шума: по оси абсцисс отложены значения временного сдвига в с, по оси ординат – мгновенные значения АКФ шума в В²·с

Fig. 7. The autocorrelation function of the normalized model noise: x-axis is time shift values in seconds, y-axis is the autocorrelation function instant values in V²·s

Демодуляция аддитивной смеси сигнала КАМ-8 и узкополосного гауссова шума включает в себя следующие этапы:

- формирование опорных колебаний;
- перемножение опорных колебаний с принятым сигналом;
- прохождение полученного произведения через фильтр нижних частот;
- расчет средних значений сигнала в посылке;
- применение решающего устройства по принципу квантователя;
- получение выходной информационной последовательности;
- подсчет числа ошибок.

Частота несущего колебания считается известной (когерентный прием). После перемножения сигналов и выделения низкочастотной информационной составляющей определяется среднее значение всех посылок в исходной последовательности. К каждому из этих значений применяется решающее устройство по принципу квантователя: выбираются пороговые уровни (средние значения между возможными уровнями квадратурной или синфазной составляющих сигнала КАМ-8). В зависимости от относительного расположения значения сигнала на выходе канала квадратурного приемника между данными уровнями определяется, к какому уровню квантования относится данная посылка.

На рис. 8 пунктиром показаны пороговые уровни для прямоугольного, квадратного и крестообразного созвездий КАМ-8.

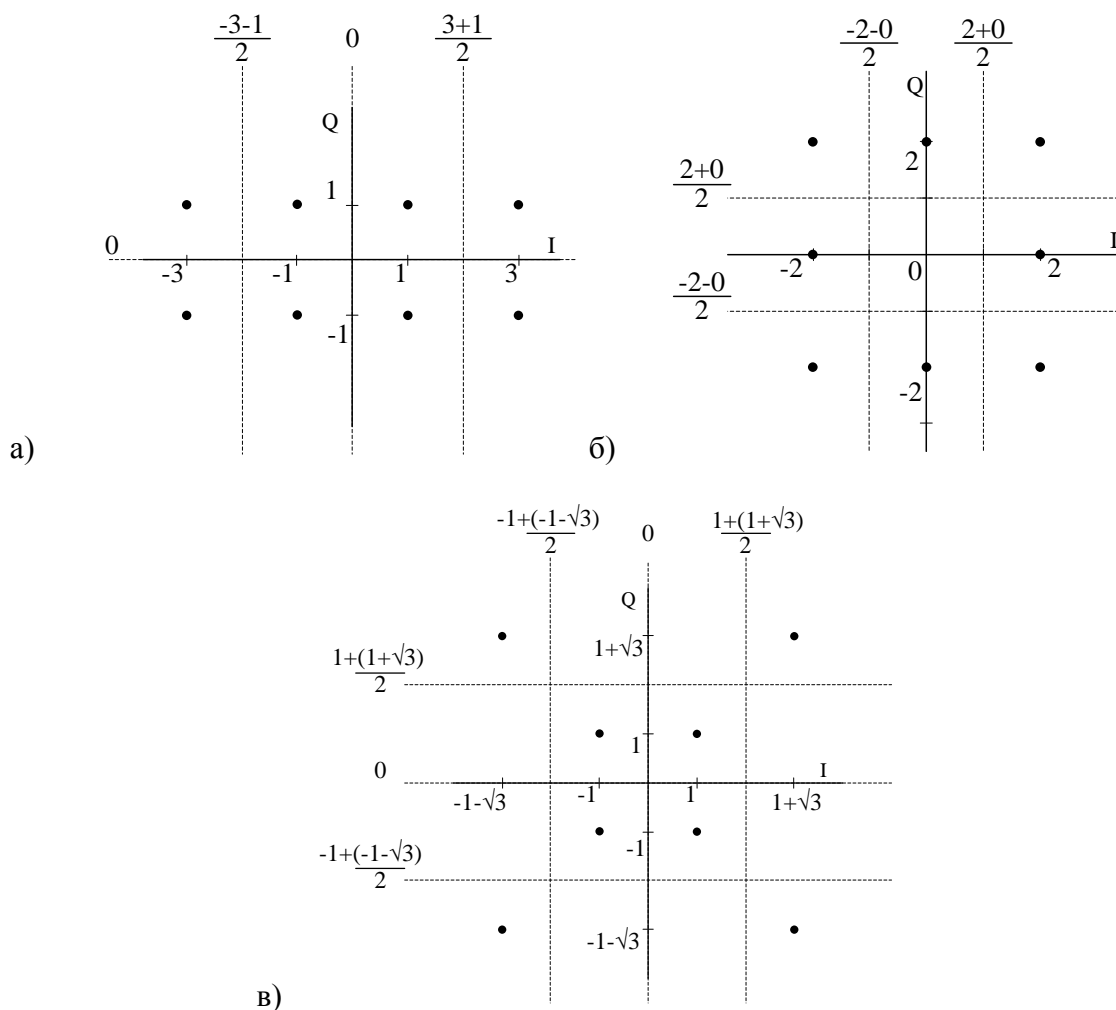


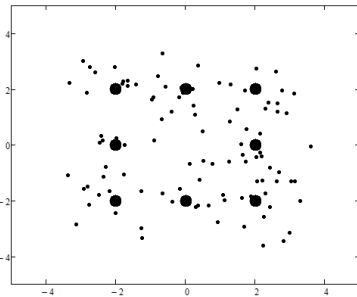
Рис. 8. Пороговые уровни для прямоугольного (а), квадратного (б) и крестообразного созвездий (в) сигнала КАМ-8
 Fig. 8. Threshold levels for QAM-8 radio signals with rectangular (a), square (b) and crosswise (v) constellation diagrams

Полученные после квантования синфазная и квадратурная составляющие преобразуются в единую последовательность, которая посимвольно сравнивается с исходной. Вероятность битовой ошибки рассчитывалась как отношение количества ошибочно принятых бит в кодовой последовательности к общему числу переданных бит.

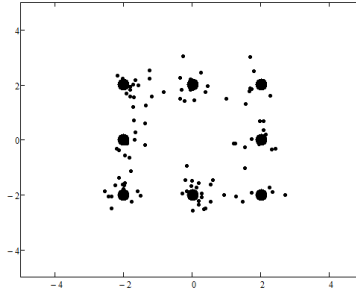
Сигнальные созвездия КАМ-8 на выходе квадратурного детектора представляют собой облака точек, сгруппированные вокруг узлов сетки. По мере ухудшения отношения сигнал/шум точки рассредоточиваются. Когда облака точек, относящиеся к одному узлу сетки, перекрываются с близлежащими, возникают ошибки. При неудовлетворительном отношении сигнал/шум все точки смешиваются и визуально невозможно определить, к какому именно узлу они относятся.

На рис. 9 представлены сигнальные созвездия КАМ-8 квадратной формы при отношениях сигнал шум 5, 10 и 14 дБ, для которых вероятности битовой ошибки составляют $1,1 \cdot 10^{-1}$, $1,3 \cdot 10^{-2}$ и $1,0 \cdot 10^{-4}$ соответственно.

а)



б)



в)

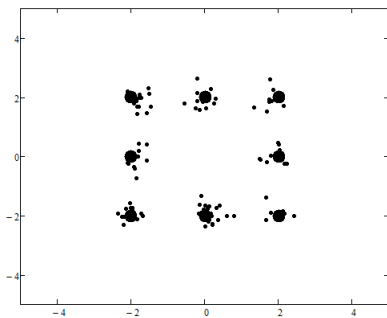


Рис. 9. Сигнальные созвездия КАМ-8 квадратной формы при отношениях сигнал/шум 5(а), 10(б) и 14(в) дБ: жирными точками обозначены узлы сетки созвездия, а малыми точками – облака
Fig. 9. QAM-8 radio signal with square constellation diagram for different SNR: 5dB (a), 10dB (b), 14db (c): thick dots designate constellation grid nodes, small dots designate signal clouds

На рис. 10 приведены результаты модельных исследований зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для различных видов сигнальных созвездий КАМ-8: прямоугольного, квадратного, крестообразного.

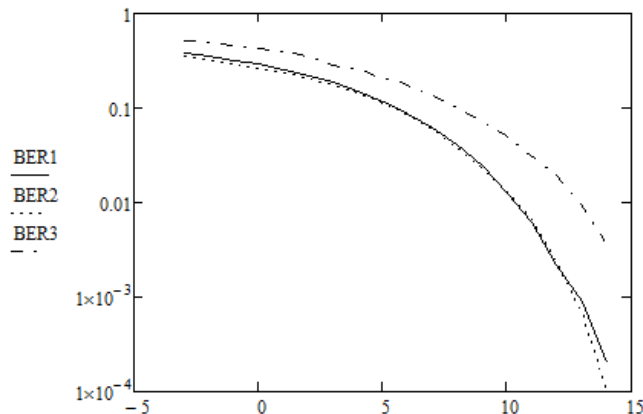


Рис. 10. Графические зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для различных видов сигнальных созвездий: BER1 – для прямоугольного, BER2 – для квадратного, BER3 – для крестообразного сигнальных созвездий: по оси абсцисс отложены значения отношения сигнал/шум в дБ, по оси ординат – вероятность битовой ошибки

Fig. 10. Plots of the bit error rate for 8-QAM signals as a function of SNR per bit for different signal constellations: BER1 – for rectangular constellation, BER2 – for square constellation, BER3 – for crosswise constellation

Анализ полученных модельных кривых показывает, что вероятности битовой ошибки при приеме КАМ-8 с прямоугольным и квадратным сигнальными созвездиями практически совпадают при любом отношении сигнал/шум в канале передачи информации.

Прямоугольное и квадратное сигнальные созвездия обеспечивают допустимый уровень вероятности битовой ошибки в радиорелейном канале передачи 0,02-0,05 при отношении сигнал/шум на 3 дБ меньше, чем крестообразное созвездие.

Таким образом, качество канала связи с использованием КАМ-8 с прямоугольным или квадратным созвездиями оказывается выше, чем с крестообразным созвездием.

Полученные результаты модельных исследований могут стать основой научных и проектных изысканий для оценки работоспособности канала связи в заданной помеховой обстановке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис / пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского. – Москва: Радио и связь, 2000. – 800 с.
2. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. / Б. Скляр. – 2-е изд. испр. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
3. Галкин, В. А. Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособие для вузов / В. А. Галкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2014. – 592 с.
4. Couch, Leon W. Digital and Analog Communication Systems, 8th Edition. Leon W. Couch. – Prentice Hall, Pearson, 2013. – 784p.
5. Феер, К. Беспроводная цифровая связь: Методы модуляции и расширения спектра / пер. с англ. под ред. В. И. Журавлева / К. Феер. – Москва: Радио и связь, 2000. – 520 с.
6. Fuqin Xiong. Digital Modulation Techniques, 8th Edition / Xiong Fuqin. – Boston: Artech House, 2000. – 676p.
7. Боккер, П. Передача данных / пер. с нем. под ред. Д. Д. Кловского / П. Боккер. – Москва: Связь, 1980. – Т. 1. Техника связи в системах телеобработки данных. – 264 с.

REFERENCES

1. Prokis Dzhon. Tsifrovaya svyaz'. Per. s angl. pod redaktsiey D. D. Klovsogo [Digital communication. Translated from English, edited by D. D. Klovskiy]. Moscow, Radio i svyaz' [Radio and communication]. 2000, 800 p.
2. Sklyar Bernard. Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye [Digital communication. Theoretical framework and practical application]. Moscow, Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2003, 1104 p.

3. Galkin V. A. *Tsifrovaya mobil'naya radiosvyaz'. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Digital mobile radio communication. Student's book]. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom, 2014, 592 p.
4. Couch Leon W. *Digital and Analog Communication Systems*, 8th Edition. Leon W. Couch. Prentice Hall, Pearson, 2013, 784 p.
5. Kamilo Feer. *Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. Metody modulyatsii i ras-shireniya spektra* [Wireless digital communication. Modulation and spectrum expansion methods]. Moscow, Radio i svyaz', 2000, 520 p.
6. Fuqin Xiong. *Digital Modulation Techniques*, 8th Edition. Boston: Artech House, 2000, 676 p.
7. Bokker P. *Peredacha dannykh. Tekhnika svyazi v sistemakh teleobrabotki dannykh* [Data communication. Telecommunication in teleprocessing systems]. Per. s nem. pod red. D. D. Klovsogo. Moscow, Svyaz', 1980, vol. 1, 264 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волхонская Елена Вячеславовна – Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»; доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой судовых радиотехнических систем; E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Volkhonskaya Elena Vyacheslavovna – Baltic Fishing Fleet State Academy, FSGEI HPE «Kaliningrad State Technical University»; Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of marine radio systems; E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Лысонь Дарья Николаевна – Балтийский федеральный университет им. И. Канта; магистрант 2-го года обучения; E-mail: d.lyson@ekran39.ru

Lyson Daria Nikolaevna – I. Kant Baltic Federal University; 2nd year undergraduate; E-mail: d.lyson@ekran39.ru