

УДК 621.376.6

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЙ И ШУМОВ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛОВ КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ

С. Ю. Яценко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

МАИ

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2016 г., после доработки – 18 мая 2016 г.

Аннотация. В статье рассмотрены искажения и шумы, имеющие место в передатчике и приемнике цифровых систем передачи информации, а также источники их возникновения. Исследовано влияние искажений и шумов на помехоустойчивость приема сигналов квадратурной амплитудной модуляции. Выявлено, что помехоустойчивость приема сигналов квадратурной амплитудной модуляции зависит главным образом от фазового рассогласования, величина которого определяется фазовыми нелинейными искажениями, возникающими в основном в усилителе мощности передатчика, установившейся фазовой ошибкой системы восстановления когерентной несущей и фазовыми шумами генераторов. Для решения поставленной задачи использованы общепринятые методы анализа, а также методы статистического имитационного моделирования в программной среде MATLAB/Simulink.

Ключевые слова: квадратурная амплитудная модуляция, вероятность ошибочного приема, нелинейные и межсимвольные искажения, нарушение ортогональности квадратурных компонент сигнала, фазовое рассогласование.

Abstract. In this paper distortions and noises, which take place in digital radio system, and their appearance causes are reviewed and discussed. It is evaluated the impact of distortions and noises on QAM radio performance. It is derived that first of all the QAM performance is depend on phase offset, which is summered by Amplitude Modulation/Phase modulation distortions, generally appearing in transmitter power amplifier, carrier recovery system phase offset and generators

phase noise. Conventional analysis techniques and MATLAB/Simulink statistical simulation are used to solve the objective of this article.

Keywords: Quadrature Amplitude Modulation, Bit Error Rate, Nonlinear Distortions, Intersymbol Interference, In-phase/Quadrature Imbalance, Phase Offset.

Введение

В настоящее время во многих беспроводных цифровых системах передачи информации (ЦСПИ) используются сигналы квадратурной амплитудной модуляции QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Широкое применение сигналов обусловлено их высокой спектральной эффективностью. При этом рост объемов передаваемой информации требует применения сигналов QAM больших размерностей. Одновременно возрастают требования и к качеству передачи информации, которое для ЦСПИ определяется вероятностью ошибочного приема BER (*Bit Error Rate*). В некоторых приложениях беспроводных ЦСПИ требование по BER может составлять порядка 10^{-12} (с учетом прямой коррекции ошибок FEC – *Forward Error Correction*), что приближает их по качеству передачи к волоконно-оптическим системам.

Чувствительность сигналов QAM к искажениям и шумам обуславливает сложность оптимизации системы по критерию «качество передачи информации (BER) – стоимость – энергопотребление». Стандартный подход к проектированию линейных трактов передатчика и приемника ЦСПИ нацелен на минимизацию уровня искажений и шумов, что зачастую вступает в противоречие с требованиями уменьшения энергопотребления, массогабаритных характеристик и стоимости системы. Альтернативный подход, известный как парадигма «грязного радио» [1], заключается в том, чтобы принять определенный верхний уровень искажений и компенсировать их с помощью цифровой обработки сигналов, при этом поддерживая потребляемую мощность, массогабаритные характеристики и стоимость ЦСПИ на низком уровне.

В любом случае на этапе проектирования важно знать степень влияния искажений и шумов на помехоустойчивость приема сигналов QAM. Далее рассмотрены основные искажения сигнала и проведен анализ их влияния на помехоустойчивость приема.

Цель работы – оценить влияние искажений и шумов на помехоустойчивость приема сигналов QAM.

1. Нелинейные искажения

Основным источником такого рода искажений является нелинейность вольт-амперных характеристик активных приборов, применяемых в усилителях линейных трактов передатчиков и приемников ЦСПИ. К нелинейным искажениям относятся компрессионные и фазовые искажения сигнала, а также искажения типа интермодуляции третьего порядка.

Компрессионные искажения, именуемые часто в зарубежной литературе как искажения типа *AM/AM (Amplitude Modulation / Amplitude Modulation)*, в большей степени проявляют себя при больших значениях мощности входного сигнала. При этом активный прибор начинает входить в режим насыщения, в результате чего выходной ток слабо зависит от уровня входного сигнала. Компрессионные искажения оказывают существенное влияние на помехоустойчивость приема сигналов QAM [2]. Для минимизации их влияния линейные тракты передатчика и приемника проектируются, как правило, таким образом, чтобы величина компрессии не превышала 0,1–0,15 дБ [3].

В свою очередь компрессионные искажения являются причиной еще одного типа нелинейных искажений – *фазовых искажений* (в зарубежной литературе именуемых *AM/PM distortion – Amplitude Modulation/Phase Modulation*). В результате компрессии выходного сигнала в его спектре появляется постоянная составляющая, что приводит к смещению рабочей точки активного прибора. Это выражается в появлении фазового рассогласования между входным и выходным сигналами. Следует отметить, что при уровне мощности входного сигнала, обеспечивающем компрессию в 0,1–0,15 дБ,

фазовое рассогласование может составлять несколько градусов [4]. При этом вероятность ошибочного приема в значительной степени определяется именно фазовым рассогласованием, обусловленным нелинейностью активного прибора. Для примера, на рис. 1 представлены результаты моделирования в программной среде MATLAB/Simulink влияния нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигнала 64QAM.

Сплошной линией показана «кривая потенциальной помехоустойчивости», маркерами – результаты имитационного моделирования при наличии компрессионных искажений (величина компрессии составляет 0,15 дБ) и фазового рассогласования (3°). Здесь и далее в канале присутствует нормальный белый шум с нулевым средним и функцией корреляции $B(\tau) = (N_0/2)\delta(\tau)$ где N_0 – спектральная плотность мощности. Решение в демодуляторе принимается по критерию максимума функции апостериорной вероятности [3].

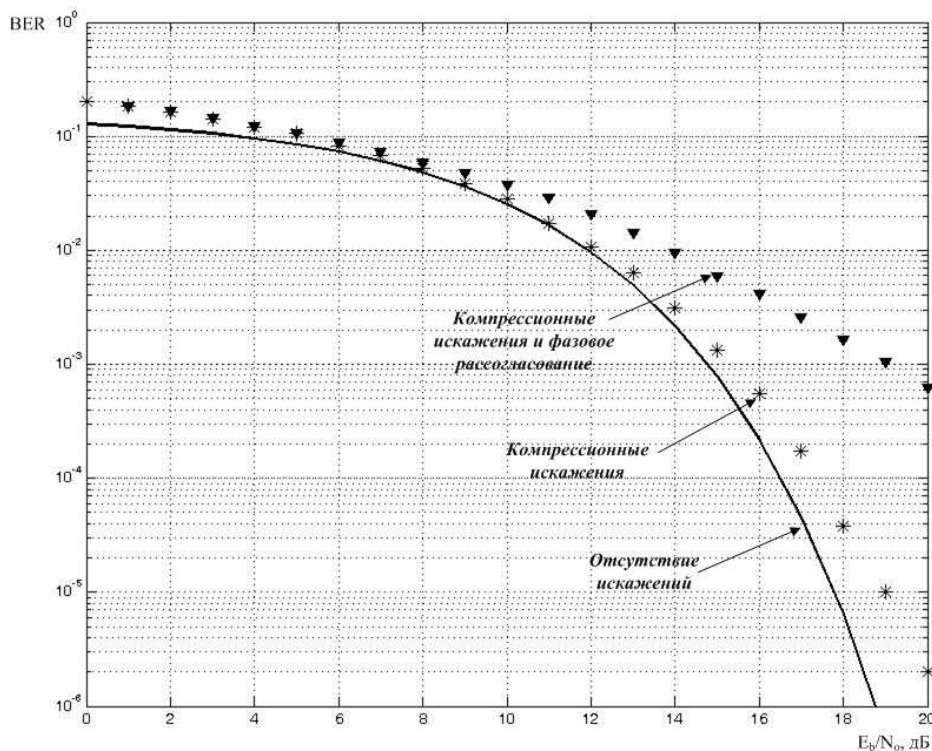


Рис. 1. Зависимости вероятности ошибочного приема сигнала 64QAM от отношения битовой энергии сигнала к спектральной плотности мощности шумов E_b/N_0 (далее сигнал/шум) с учетом компрессионных и фазовых искажений

Для описания компрессионных и фазовых искажений предложены различные модели нелинейных устройств (НУ). При моделировании использовались результаты, полученные в работах [2, 3]. Следует отметить, что использование различных моделей НУ (Салеха, Горбани и др) дает аналогичный результат по степени влияния на помехоустойчивость приема при указанных ограничениях: сигналы QAM в большей степени чувствительны к фазовым искажениям, особенно при увеличении их размерности.

Еще один тип нелинейных искажений – *интермодуляционные искажения*, возникающие в результате взаимодействия на нелинейности активного прибора двух гармонических колебаний, отличающихся по частоте. В результате на выходе усилителя появляется сопровождающая сигнал помеха, источником которой являются искажения сигнала типа интермодуляции третьего порядка. Продукты нелинейных искажений образуют сплошной спектр, при этом часть мощности помехи попадает непосредственно в полосу частот спектра основного сигнала, т.е. не может быть далее устранена методами частотной фильтрации [3].

Оценка влияния комбинационных искажений, возникающих при воздействии на НУ двух и более несущих колебаний соседних радиоканалов рассмотрена в ряде работ, в частности, в [5]. В данной статье рассматриваются интермодуляционные искажения третьего порядка, возникающие при прохождении через НУ сигнала QAM с шириной спектра ΔF .

При проектировании линейных трактов передатчика и приемника таким образом, чтобы выполнялось условие минимизации компрессионных искажений, мощность продуктов интермодуляции также невелика. На рис. 2 представлены результаты имитационного моделирования помехоустойчивости приема сигналов 64QAM и 256QAM.

В литературе предлагаются различные варианты оценки зависимости мощности продуктов интермодуляции 3-го порядка от мощности сигнала на входе усилителя. Например, в работе [6] мощность помехи определяется через AM/AM и AM/PM характеристики НУ. В настоящее время для расчета

мощности продуктов интермодуляции 3-го порядка широко используется методика, предложенная компанией *Hewlett Packard*. В паспортных данных на усилительные элементы приводится мощностное значение точки IP3, позволяющее рассчитать мощность продуктов таких искажений при заданной мощности усиливаемого сигнала. При моделировании предполагалось, что продукты интермодуляционных искажений находятся в полосе $3\Delta F$, спектральная плотность мощности интермодуляционных искажений равномерна в полосе $3\Delta F$, а искажения могут быть представлены моделью нормального белого шума и представляют собой аддитивную помеху.

Уровень компрессии выходного сигнала не превышает 0,1 дБ.

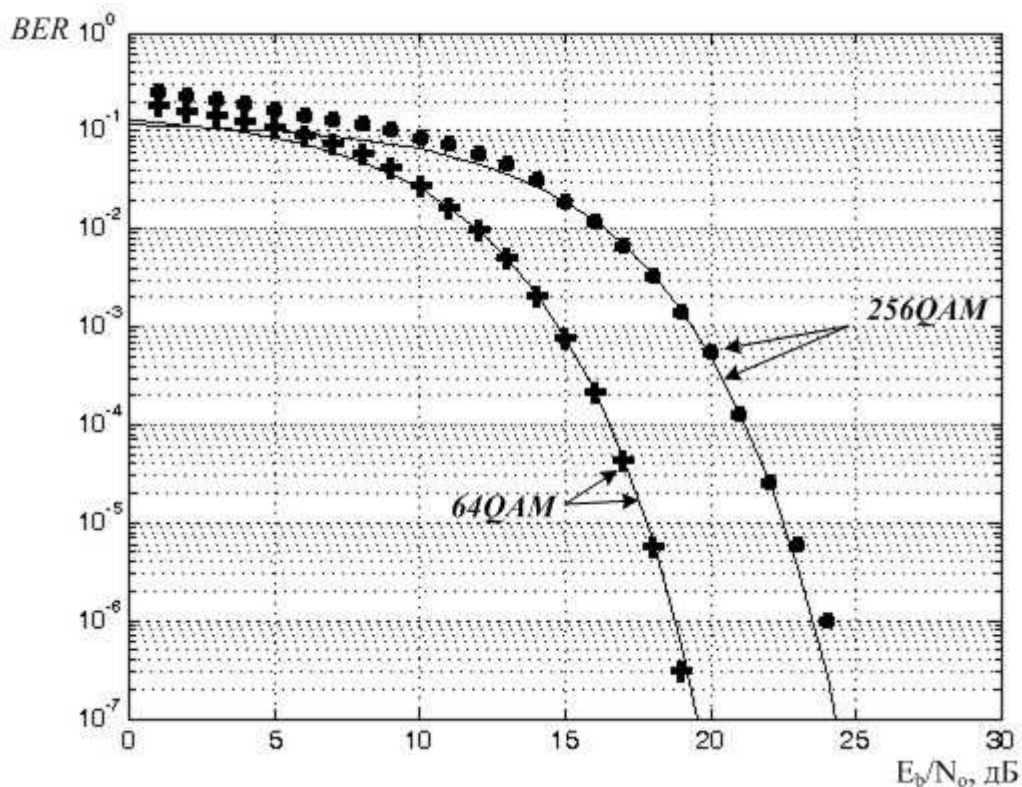


Рис. 2. Зависимости вероятности ошибочного приема сигналов 64QAM и 256QAM от отношения сигнал/шум с учетом интермодуляционных искажений

Из полученных результатов видно, что наличие интермодуляционных искажений практически не ухудшает помехоустойчивость приема.

Таким образом, при проектировании линейных трактов передатчика и приемника ЦСПИ с точки зрения обеспечения минимального уровня компрессионных искажений, мощность продуктов интермодуляции третьего

порядка также невелика, а вероятность ошибочного приема определяется главным образом фазовым рассогласованием выходного и входного сигналов.

Следует отметить, что наибольший вклад в нелинейные искажения вносят усилитель мощности передатчика и первый смеситель приемника ЦСПИ. При этом в беспроводной ЦСПИ выбор усилителя мощности в значительной степени определяет стоимость всей системы передачи информации.

2. Нарушение ортогональности квадратурных компонент сигнала

Помеха, обусловленная нарушением ортогональности, является характерной для квадратурных сигналов и проявляется в большей мере в приемниках прямого преобразования и приемниках с низкой промежуточной частотой, основанных на аналоговой квадратурной обработке сигнала. В идеальном случае фазовый сдвиг между опорными колебаниями должен составлять 90° . При практической реализации имеет место небольшое рассогласование, которое может достигать нескольких градусов. В результате появляется корреляция между квадратурными компонентами QAM-сигнала, приводящая к дополнительной аддитивной шумовой помехе в каждом канале после перемножения в синхронном детекторе демодулятора. В табл. 1 и на рис. 3 приведены результаты имитационного моделирования помехоустойчивости приема сигналов QAM при нарушении ортогональности.

Таблица 1.

Фазовое рассогласование, град.	Эквивалентное ухудшение отношения сигнал/шум, дБ, для вероятности ошибочного приема BER 10^{-4}			
	16QAM	64QAM	256QAM	1024QAM
1	0,0	0,0	0,0	1,2
2	0,0	0,0	0,4	4,6
3	0,2	0,6	1,4	—
5	0,5	2,0	2,8	—
7	1,0	3,4	7,2	—

Фазовое рассогласование, град.	Эквивалентное ухудшение отношения сигнал/шум, дБ, для вероятности ошибочного приема BER 10^{-4}			
	16QAM	64QAM	256QAM	1024QAM
9	1,5	5,6	—	—
11	2,2	8,2	—	—

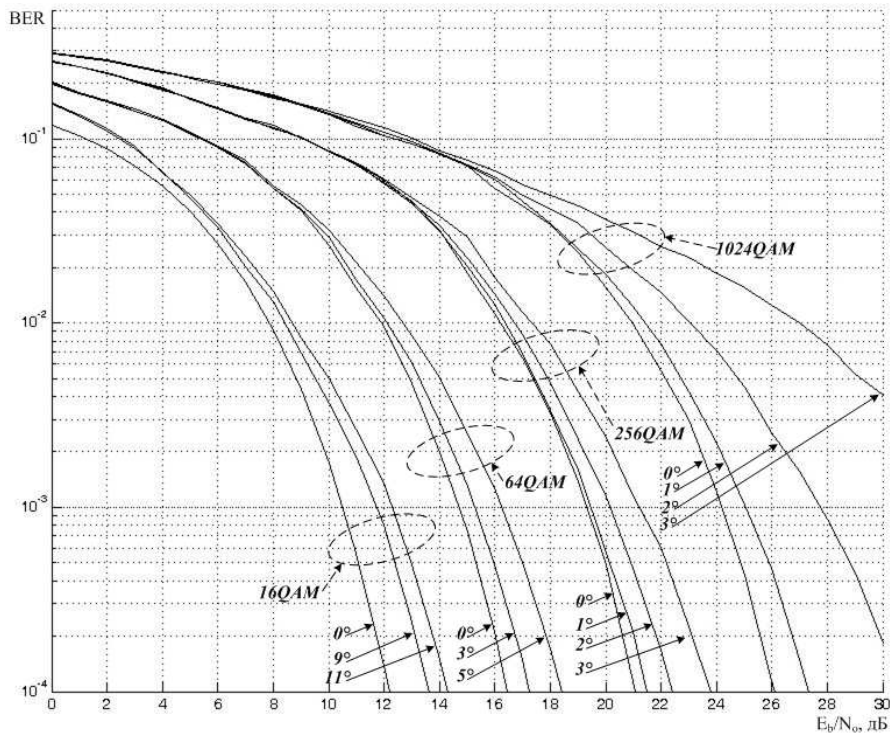


Рис. 3. Зависимости вероятности ошибочного приема от отношения сигнал/шум с учетом нарушения ортогональности квадратурных компонент сигналов QAM

Современная элементная база позволяет добиться, чтобы нарушение ортогональности квадратурных компонент сигнала не превышало $0,5^{\circ}$ – 2° [1]. При таком уровне рассогласования помехоустойчивость приема сигналов 16QAM, 64QAM и 256QAM в основном определяется уровнем аддитивного белого шума. При проектировании ЦСПИ, использующих сигналы QAM большой размерности, нарушение ортогональности необходимо учитывать.

3. Межсимвольные искажения

Межсимвольные искажения (МСИ) в большей степени влияют на помехоустойчивость приема в системах с временным разделением каналов. Их

возникновение обусловлено двумя причинами: применением в модуляторе передатчика фильтрации спектра формируемого сигнала в соответствии с регламентированными частотными шаблонами и многолучевым распространением.

В первом случае искажения сознательно вносятся проектировщиком ЦСПИ с целью обеспечения электромагнитной совместимости различных радиосистем, работающих на соседних участках частотного диапазона. Использование свойства спектров Найквиста (нулевые межсимвольные искажения) и техники «приема дискретного сообщения в целом» позволяет минимизировать влияние МСИ, обусловленных «обкаткой» спектра сигнала. Выбор оптимальных параметров фильтра нижних частот цифрового модулятора, обеспечивающего отсутствие МСИ, приведен, например, в работе [7].

Следует отметить, что «жесткая обкатка» спектра сигнала в формирующем фильтре модулятора (root raised cosine filter) приводит к возникновению всплесков мощности при переходе от одного внешнего символа созвездия сигнала QAM к другому (рис. 4) и соответственно увеличению результирующего пик-фактора сигнала.

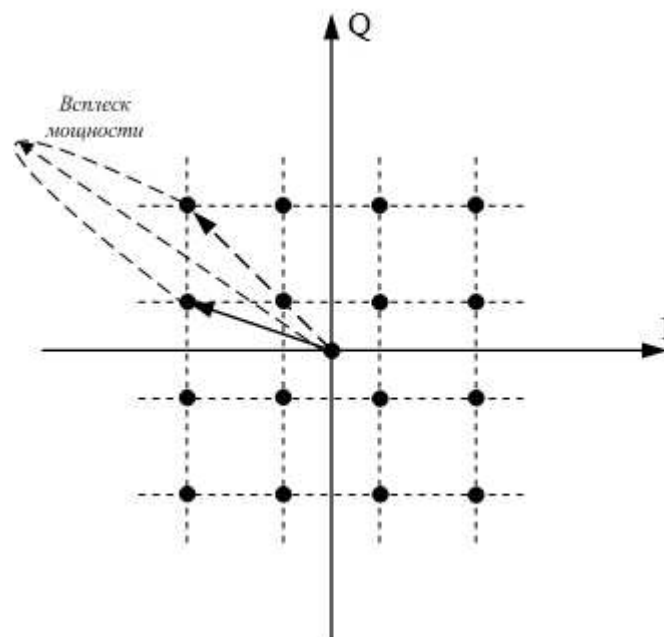


Рис. 4. Всплеск мощности, вызванный «обкаткой» спектра сигнала 16QAM

Анализ этого явления выходит за рамки данной статьи. Отметим, что величина всплеска является функцией от коэффициента скругления спектра формирующего фильтра модулятора. При этом энергетические потери могут быть оценены теоретически [8].

МСИ, обусловленные многолучевым распространением передаваемого сигнала, характерны для беспроводных ЦСПИ. Существующие технические решения позволяют достаточно эффективно бороться с такими искажениями. Одно из таких решений заключается в применении ортогонального частотного разделения OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Для уменьшения искажений, обусловленных многолучевым распространением, в передаваемый сигнал добавляются циклический префикс и защитный интервал. Выбором длины префикса можно добиться отсутствия МСИ [9].

4. Фазовое рассогласование

Оценка помехоустойчивости приема сигналов QAM с учетом искажений, рассмотренных выше, проведена при идеальном приеме сигнала – когерентном приеме. На практике реализуется квазикогерентный прием, то есть в демодуляторе совместно осуществляется оценка информационных и неинформационных параметров сигнала (частоты и фазы). Построение квазикогерентных демодуляторов осуществляется по классическим схемам с обратной связью (*feed back*), в основе которых лежит система фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ), и схемам с предсказанием (*feed forward*), в которых петля обратной связи отсутствует. В классических схемах имеет место фазовое рассогласование входного сигнала и формируемого системой восстановления когерентной несущей (СВКН) опорного колебания.

Фазовое рассогласование является случайной величиной, которая при определенных условиях может быть представлена нормальным распределением. При этом систематическая составляющая будет определяться уровнем фазовых нелинейных искажений и установившейся в синхронном режиме работы фазовой ошибкой системы ФАПЧ. В табл. 2 и на рис. 4

приведены результаты моделирования помехоустойчивости приема сигналов QAM при различных значениях систематической составляющей фазового рассогласования.

Таблица 2.

Фазовое рассогласование, град.	Эквивалентное ухудшение отношения сигнал/шум, дБ, для вероятности ошибочного приема BER 10^{-4}			
	16QAM	64QAM	256QAM	1024QAM
0,5	0,1	0,2	0,7	1,1
1	0,2	0,5	1,4	5,9
2	0,5	1,1	3,2	—
4	1,6	5,5	—	—
6	3,0	11,8	—	—

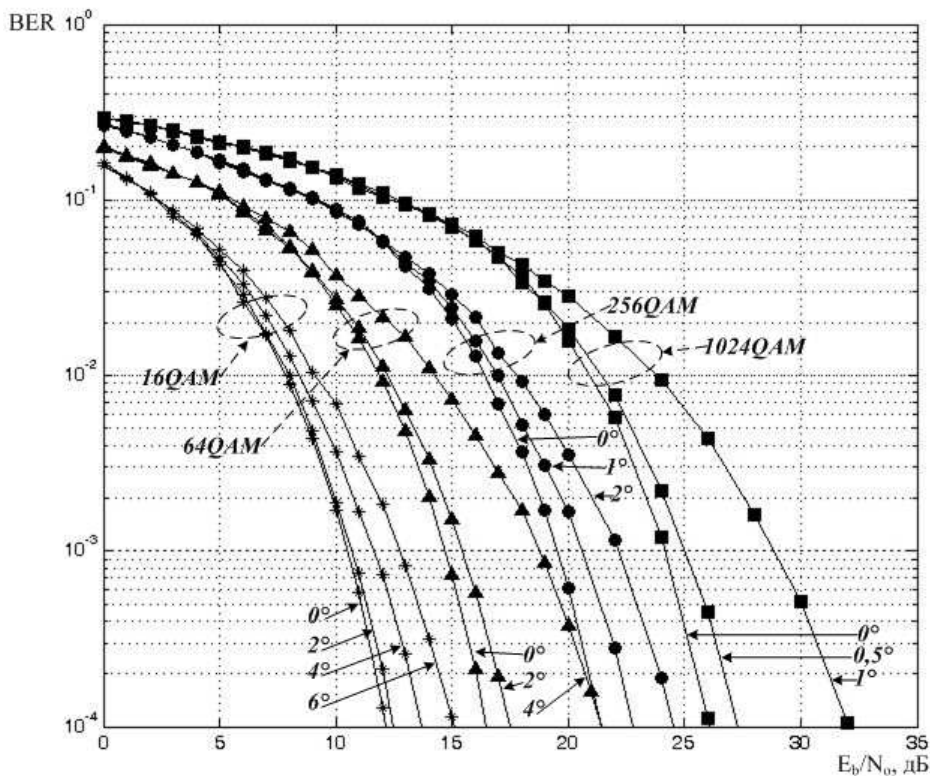


Рис. 5. Зависимости вероятности ошибочного приема от отношения сигнал/шум с учетом систематической составляющей фазового рассогласования

Случайная составляющая фазового рассогласования является следствием фазового шума, то есть флуктуаций фазы генераторов опорных колебаний

передатчика и приемника ЦСПИ, вызванных дробовым и тепловым шумами, шумом, обусловленным флуктуациями напряжения смещения и др., а также воздействием различных помех на СВКН демодулятора. К значительному снижению качества сигнала опорных генераторов могут приводить также ударные и вибрационные воздействия на радиоэлектронное устройство [10].

Анализ влияния различных искажений, сравнение результатов имитационного моделирования помехоустойчивости приема (см. табл. 1 и 2, рис. 1–4) позволяет сделать вывод, что вероятность ошибочного приема в значительной степени определяется фазовым рассогласованием, имеющим место между принимаемым сигналом и формируемым системой ФАПЧ опорным колебанием.

Следует отметить, что при наличии фазового рассогласования имеет место корреляция между квадратурными компонентами QAM-сигнала, приводящая к дополнительной аддитивной шумовой помехе в каждом канале после перемножения в синхронном детекторе демодулятора (аналогичная помехе, имеющей место при нарушении ортогональности сигнала QAM).

В СВКН с предсказанием, помимо ошибки в оценке фазы, имеет место и ошибка определения частоты принимаемого сигнала [11], что значительно сказывается на помехоустойчивости приема сигналов QAM. Тем не менее благодаря ряду преимуществ СВКН с предсказанием получают все большее распространение, особенно в системах с временным разделением каналов.

Наряду с рассмотренными в данной статье существуют и другие источники искажений и шумов. Однако в большинстве случаев их влияние на помехоустойчивость приема сигналов QAM незначительно.

Выводы

Таким образом, помехоустойчивость приема сигналов QAM зависит главным образом от фазового рассогласования, величина которого определяется фазовыми нелинейными искажениями, возникающими в основном в усилителе мощности передатчика, установившейся фазовой

ошибкой СВКН и фазовыми шумами. При этом выбор усилителя мощности передатчика и генераторов опорных колебаний определяют стоимость беспроводной ЦСПИ (до 70%). Поэтому, на этапе проектирования ЦСПИ важно рационально распределить возникающие уровни искажений и шумов по соответствующим источникам для оптимизации системы по критерию «качество передачи информации (BER) – стоимость – энергопотребление».

Литература

1. Marcus Windisch. *Estimation and Compensation of I/Q Imbalance in Broadband Communications Receivers*, zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktoringenieurs, Technische Universität Dresden, 2007, 185 p.
2. Мартиросов В.Е. Влияние нелинейных (компрессионных) искажений на помехоустойчивость приема сигналов QAM // Радиотехника. 2008. № 9. С. 4-11.
3. Мартиросов В.Е. Оптимальный прием дискретных сигналов ЦСПИ. – М.: Радиотехника, 2010. – 208 с.
4. Kent K.Johnson. *Residual BER Prediction*, Agilent Technologies, USA, 2001, 58 p.
5. Немировский М.С. Влияние нелинейности амплитудной характеристики передатчика на основные параметры радиолиний // Радиотехника. 2009. №11. С. 53-60.
6. Шинаков Ю.С. Два способа вычисления мощности неискаженного сигнала на выходе нелинейного устройства с амплитудно-фазовой конверсией // Радиотехника. 2016. №2. С. 66-71.
7. Немировский М.С., Кошурников А.С. Характеристики сигналов с квадратурной АМ с фильтровым сглаживанием манипуляционных изменений параметров // Радиотехника. 2008. №12. С. 40-45.
8. John S. Seybold. Output back-off requirements for root-raised, cosine-filtered digital signals. // Defence Electronics. 2002. №6. URL: <http://defenseelectronicsmag.com/files/archive/rfdesign/images/archive/0602Seybold50.pdf>

9. Там До. Проектирование беспроводных систем цифрового вещания с использованием универсальных ПЛИС // Электронные компоненты. № 4. 2008. С. 64–67.

10. Григорьев И.А., Гуськов Ю.С., Силаев Е.А.. Влияние ударных воздействий, синусоидальной и широкополосной случайной вибрации на фазовые шумы сигнала синтезатора частоты S-диапазона // Радиотехника. 2015.№ 4. С. 99-104.

11. Jingxin Chen. Carrier Recovery in Burst-mode 16-QAM. *A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Department of Electrical Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, 2004, 107 p.*