

УДК 621.391.072

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ РЕТРАНСЛИРОВАННОЙ ПОМЕХИ

Нгуен Ван Зунг

МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, Москва, просп. Вернадского, д. 78

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2019 г., после доработки – 6 марта 2019 г.

Аннотация. Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ), известные в зарубежной литературе как MPSK (multiple phase shift keying), обладают рядом свойств, определяющих перспективность их использования в цифровых системах связи широкого назначения. Рассматриваемые сигналы являются базовыми для ряда принятых протоколов беспроводных сетей: IEEE 802.11, сотовых сетей CDMA, цифрового спутникового телевидения DVB-S и DVB-S2/S2X. В таких радиосистемах на входе приемника наряду с шумовой помехой могут присутствовать и другие виды помех, как непреднамеренных, так и преднамеренных. Одной из часто встречающихся является ретранслированная помеха, например, такая помеха возникает при радиопередаче в городской среде с высокой плотностью застройки. Опасное влияние ретранслированной помехи на качество приема информации подтверждено рядом исследований [1-8]. Полученные результаты показывают, что прием сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией весьма сильно подвержен влиянию ретранслированной помехи и с увеличением позиционности сигналов М-ФМ это влияние усиливается. Установлено, что, если для шумовой помехи помехоустойчивость побитового приема 2-ФМ и 4-ФМ одинакова, то в присутствии ретранслированной помехи приемник 4-ФМ начинает существенно проигрывать.

Ключевые слова: многопозиционная фазовая манипуляция, ретранслированная помеха, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки.

Abstract. Signals with multiple phase shift keying have a number of properties that determine the promise of their use in multi-purpose digital communication systems. The signals considered are basic for a number of adopted wireless network protocols: IEEE 802.11, cellular CDMA networks, digital satellite television DVB-S and DVB-S2 / S2X. In such radio systems, at the receiver input, along with noise interference, there may be other types of interference, both unintentional and intentional. One of the most common is a retranslated interference, for example, such interference occurs during radio transmission in an urban environment with a high density of building. The dangerous effect of the retranslated interference on the quality of information reception is confirmed by a number of studies. The results show that the reception of signals with multiple phase shift keying is very strongly influenced by the retranslated interference and with the increase in the position of the MPSK signals, this influence is enhanced. It has been established that if the noise immunity of the bit reception of BPSK and QPSK is the same for noise interference, then in the presence of a relayed interference, the QPSK receiver starts to lose significantly.

Keywords: multiple phase shift keying, retranslated interference, noise immunity, bit error rate.

1. Введение

В настоящее время, стремительное развитие телекоммуникационных технологий диктует все новые требования по скоростям передачи информации и помехоустойчивости приема в условиях ограниченной полосы пропускания канала связи. В этой связи важно правильно выбрать вид используемого сигнала, удовлетворяющего этим требованиям. К числу таковых относятся сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ или MPSK в иностранной литературе).

Характеристики помехоустойчивости приема сигналов М-ФМ на фоне белого гауссовского шума достаточно хорошо изучены [9-11]. Исследования [9] показали, что минимально достижимая вероятность ошибки при оптимальной когерентной обработке такого сигнала определяется выражением:

$$P_M \approx 2Q\left(\sqrt{2k\gamma_b} \sin \frac{\pi}{M}\right), \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt,$$

где $\gamma_b = E_b / N_0$ – отношение сигнал/шум, пересчитанное на один бит информации, $k = \log_2 M$. Формула имеет точное значение для сигнала 2-ФМ и 4-ФМ.

2. Методика анализа помехоустойчивости приема сигналов М-ФМ

Сигнал М-ФМ на тактовом интервале, равном длительности канального символа T_s , несущего информацию о k информационных битах, может принимать одно из M возможных значений:

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_c), \quad \varphi_i = \frac{i2\pi}{M}, \quad t \in (0, T_s], \quad i = 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

где $A_0 = \sqrt{2E_s / T_s}$ – амплитуда сигнала; $E_s = kE_b$ – энергия канального символа, E_b – энергия, приходящаяся на один бит информации, ω_0 – несущая частота; φ_c – начальное фазовое смещение сигнального созвездия сигнала, которое для простоты дальнейшего изложения и упрощения расчетов можно положить равным нулю.

В процессе распространения сигналов из-за влияния земной поверхности и местных предметов на входе приемного устройства, кроме полезного сигнала (1) и шума, присутствует и ретранслированная помеха – отраженный сигнал (рис. 1).

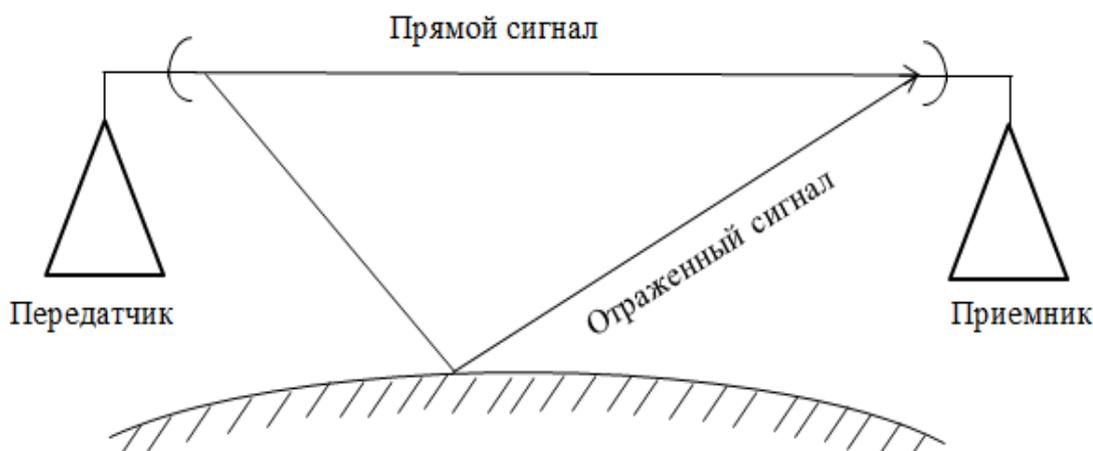


Рис. 1. Отражение электромагнитной волны.

Математическая модель ретранслированной помехи имеет следующий вид:

$$s_{II}(t) = \begin{cases} \mu A_0 \cos(\omega_0(t-\tau) + \varphi_j + \varphi_{II}), & 0 < t \leq \tau; \\ \mu A_0 \cos(\omega_0(t-\tau) + \varphi_i + \varphi_{II}), & \tau < t \leq T_s, \end{cases} \quad (2)$$

где μ – относительная интенсивность ретранслированной помехи;

$\tau < T_s$ – задержка ретранслированной помехи;

$\varphi_j = j2\pi / M$ – информационная составляющая фазы задержанного сигнала М-ФМ;

φ_{II} – случайная начальная фаза помехи.

Представление о временных соотношениях между полезным сигналом М-ФМ и ретранслированной помехой дает рис. 2.



Рис. 2. Временные соотношения между полезным сигналом и ретранслированной помехой.

Корреляционный прием сигнала (1) в присутствии белого гауссовского шума предполагает вычисление интегралов свертки I_i принимаемого колебания $x(t)$ и M опорных сигналов:

$$I_i = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) \cos(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}) dt. \quad (3)$$

Процесс $x(t)$, входящий в (3), имеет вид:

$$x(t) = s_i(t) + s_{II}(t) + n(t). \quad (4)$$

В математической модели ретранслированной помехи, имеются две неизвестные составляющие фазы φ_j и φ_{Π} , которые вначале можно положить фиксированными величинами. Тогда распределения случайных процессов I_i на выходах всех корреляторов демодуляторов можно считать нормальными со следующими параметрами: средние значения $m_0, \dots, m_i, \dots, m_{M-1}$, дисперсии $D_0, \dots, D_i, \dots, D_{M-1}$, взаимные корреляционные моменты M_{0i} . Также нормальное распределение имеют и суммарные процессы $y_i = I_0 - I_i$ на входе устройства сравнения корреляционных интегралов. Их параметры:

$$m_{y_i} = \langle y_i \rangle = \langle I_0 \rangle - \langle I_i \rangle = m_0 - m_i \quad (5)$$

и

$$D_{y_i} = D_0 + D_i - 2M_{0i}. \quad (6)$$

Методика расчетов этих значений, с учетом того, что

$$\langle n(t) \rangle = 0; \langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1); \omega_0 T_s \gg 1$$

подробно изложена в [12,13].

3. Вывод формул

В результате проведенных расчетов получены следующие выражения:

$$m_0 = \frac{2E_s}{N_0} \left[1 + \frac{\mu\tau}{T_s} \cos(\psi + \varphi_j) + \left(1 - \frac{\tau}{T_s}\right) \mu \cos \psi \right], \quad (7)$$

$$m_i = \frac{2E_s}{N_0} \left[\cos \varphi_i + \frac{\mu\tau}{T_s} \cos(\psi + \varphi_j - \varphi_i) + \left(1 - \frac{\tau}{T_s}\right) \mu \cos(\psi - \varphi_i) \right], \quad (8)$$

$$m_{y_i} = \frac{2E_s}{N_0} \left\{ \left(1 - \cos \frac{i2\pi}{M}\right) - 2\mu \sin \frac{i\pi}{M} \left[\frac{2\tau}{T_s} \cos(\psi + (j-i) \frac{\pi}{M}) \sin \frac{j\pi}{M} + \sin(\psi - \frac{i\pi}{M}) \right] \right\}, \quad (9)$$

$$M_{0i} = \frac{2E_s}{N_0} \cos \varphi_i, \quad (10)$$

$$D_0 = \frac{2E_s}{N_0}; D_i = \frac{2E_s}{N_0}; D_{y_i} = \frac{4E_s}{N_0} (1 - \cos \varphi_i), \quad (11)$$

Здесь использовано обозначение $\psi = -\omega_0\tau + \varphi_{II}$ и для простоты расчетов полагается, что $\varphi_0=0$.

Определим вероятности битовой ошибки следующим образом.

Вероятность правильного приема любого j -го канального символа P_{sj} находится при условии $I_j > \{I_i\}; i \neq j; i, j=1, \dots, M-1$, а именно

$$P_{sj} = \prod_{\substack{i=0 \\ j \neq i}}^{M-1} p(I_j > I_i) \Big|_j,$$

где $p(I_j > I_i) \Big|_j$ – вероятность того, что выходное значение j -го коррелятора больше выходного значения любого другого i -го коррелятора при условии, что передавался j -й символ.

С учетом симметрии сигнального созвездия и равенства всех априорных вероятностей канальных символов, можно определить общую вероятность правильного приема P_s как вероятность правильного приема для одного символа, например, с индексом «0»:

$$P_s = \prod_{i=1}^{M-1} p(I_0 > I_i) \Big|_0. \quad (12)$$

Вероятность ошибочного приема канального символа, соответственно, равна:

$$P_{es} = 1 - P_s, \quad (13)$$

а вероятность битовой ошибки P_{eb} при достаточно большом отношении сигнал/шум с учетом кодирования Грея [9]:

$$P_{eb} = P_{es} / \log_2 M. \quad (14)$$

Условные по параметру φ_j и ψ вероятности, входящие в (12), могут быть вычислены по формуле:

$$p_i(I_0 > I_i) \Big|_0 = 1 - Q\left(\frac{m_{0-i}(\varphi_j, \psi)}{\sqrt{D_{0-i}}}\right),$$

и в итоге можно определить условную вероятность битовой ошибки (14).

Для получения безусловной вероятности ошибки приема канального

символа (13) и битовой ошибки (14) необходимо провести усреднение полученных результатов $P_{es}(\varphi_j, \psi)$ и $P_{eb}(\varphi_j, \psi)$ по случайным величинам φ_j и ψ . Осуществить аналитически вычисление интегралов

$$P_{es} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} P_{es}(\varphi_j, \psi) \right] d\psi \quad \text{и} \quad P_{eb} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} P_{eb}(\varphi_j, \psi) \right] d\psi$$

и вывести точную формулу для вероятностей ошибок не удается, поэтому для получения окончательных результатов можно воспользоваться численным усреднением.

4. Результаты расчетов

Ниже приведены результаты расчетов помехоустойчивости приема сигнала М-ФМ при наличии ретранслированной помехи.

При численном усреднении учтено, что погрешность вычисления ошибки на порядок меньше минимальной представленной вероятности битовой ошибки.

Вначале была исследована зависимость вероятности битовой ошибки от начальной фазы ретранслированной помехи. Полученные графики приведены на рис. 3. Видно, что из-за суперпозиции прямой и задержанной посылок с разными фазами условия приема полезного сигнала могут как существенно ухудшаться, так и несколько улучшаться. В среднем это все же приводит к увеличению вероятности ошибки, что наглядно демонстрируют графики на рис. 4-8. На них показаны зависимости усредненной по начальной фазе помехи вероятности битовой ошибки P_{eb} от относительной задержки помехи τ/T_s для разных интенсивностей помехи при отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 13$ дБ. Увеличение вероятности ошибки в областях $\tau/T_s=0$ и $\tau/T_s=1$ объясняется тем, что при усреднении по начальной фазе помехи доля “опасных” ситуаций, когда сигнал и помеха противофазны и велика степень снижения сигнала за счет суперпозиции колебаний, выше, чем для $\tau/T_s=0.5$.

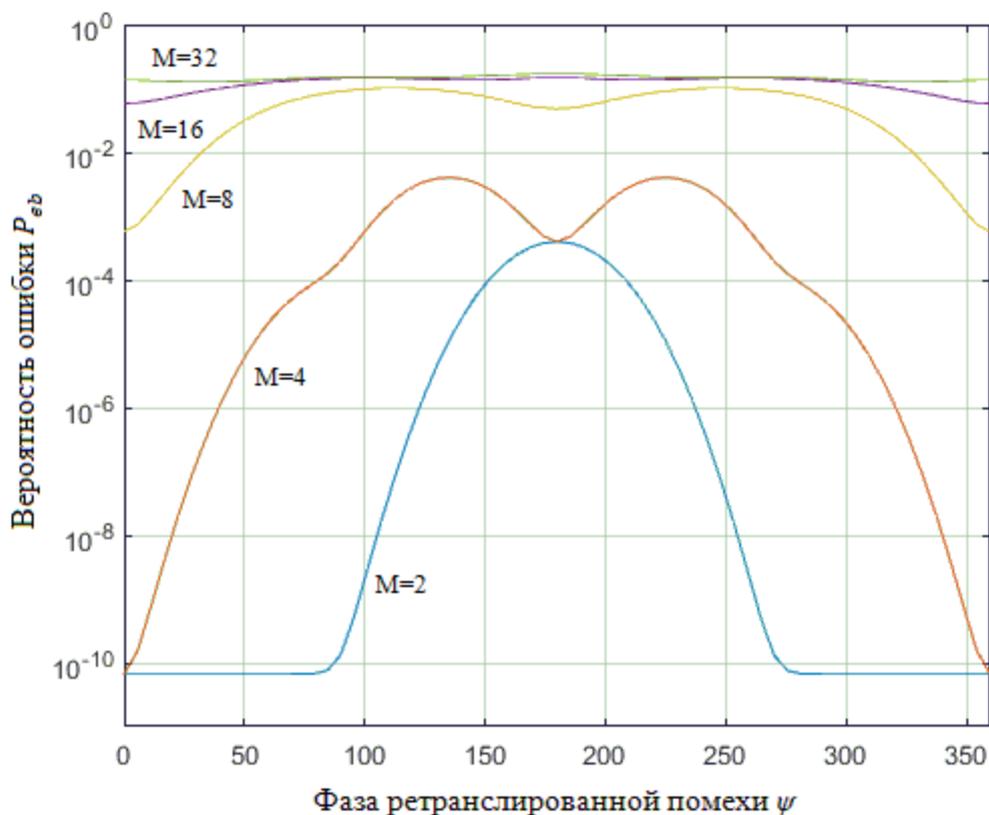


Рис.3. Зависимость вероятности ошибки P_{eb} от фазы ретранслированной помехи ψ при $\tau/T_s=0.5$ и $\mu=0.5$

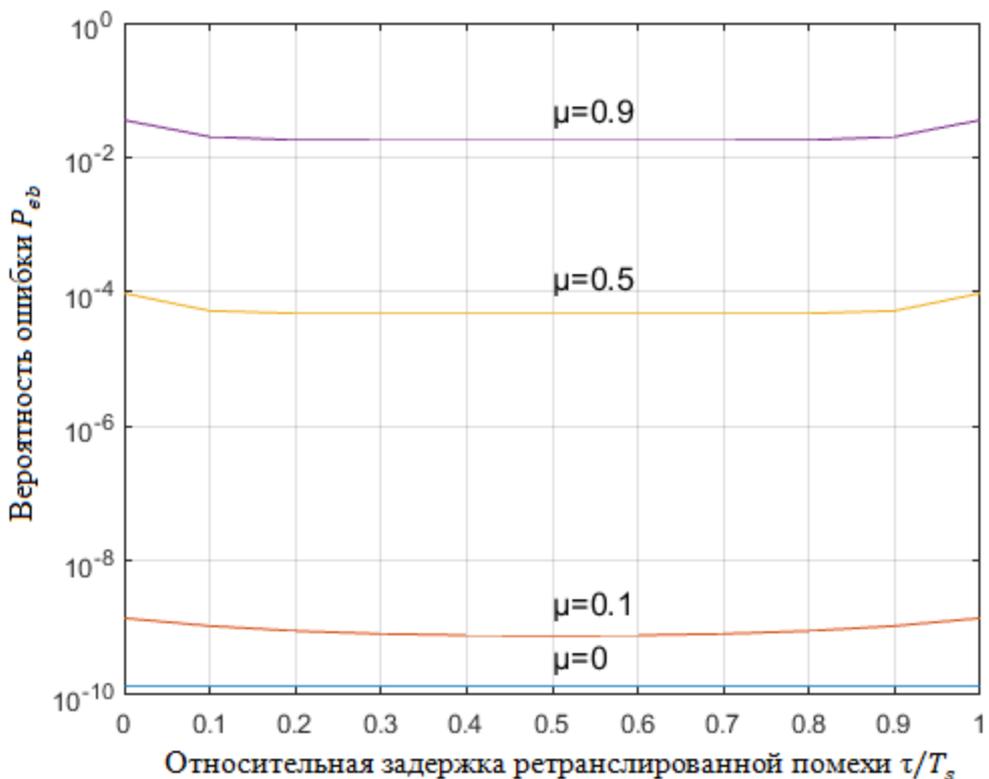


Рис.4. Зависимость усредненной вероятности ошибки P_{eb} от задержки ретранслированной помехи τ/T_s для 2-ФМ

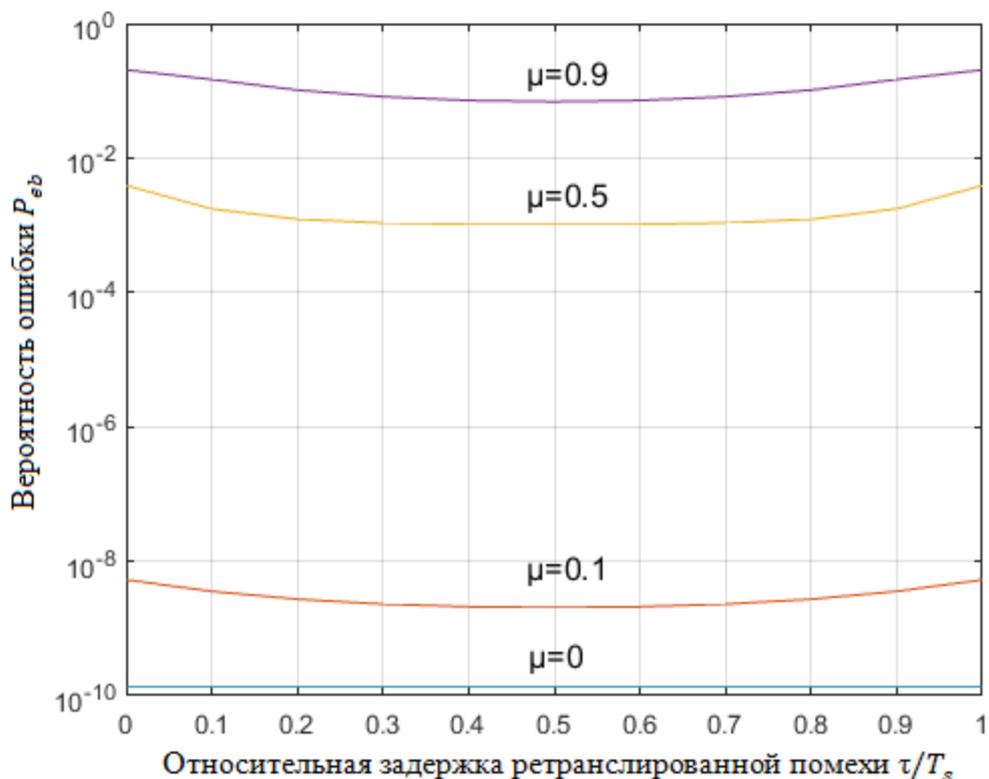


Рис.5. Зависимость усредненной вероятности ошибки P_{eb} от задержки ретранслированной помехи τ/T_s для 4-ФМ

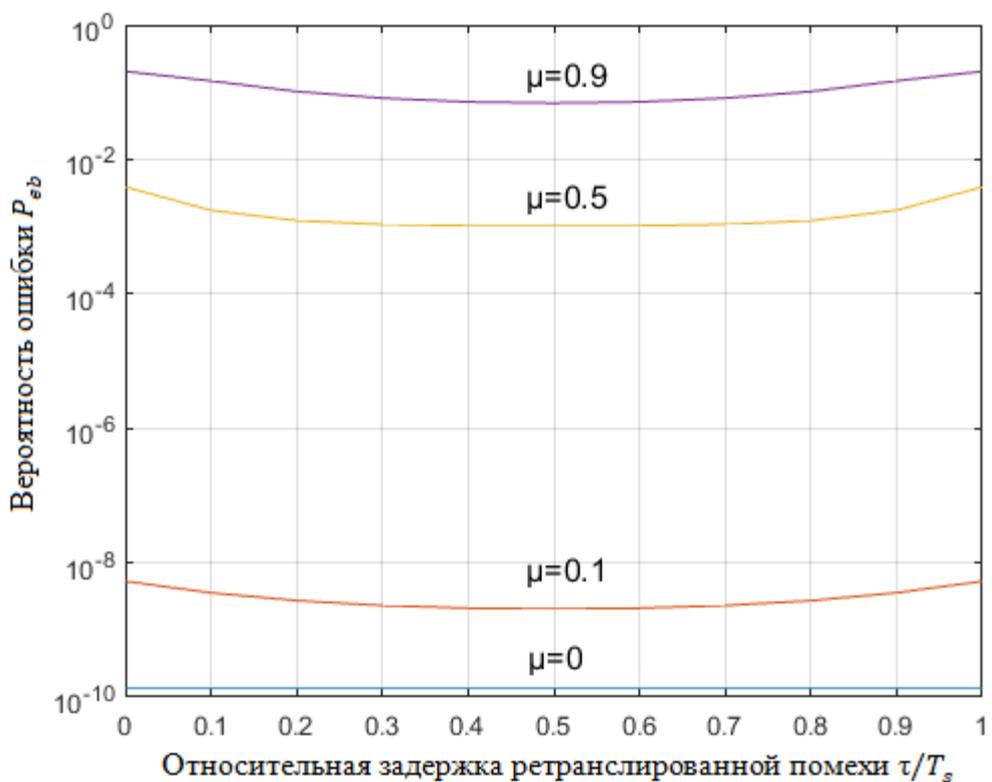


Рис.6. Зависимость усредненной вероятности ошибки P_{eb} от задержки ретранслированной помехи τ/T_s для 8-ФМ

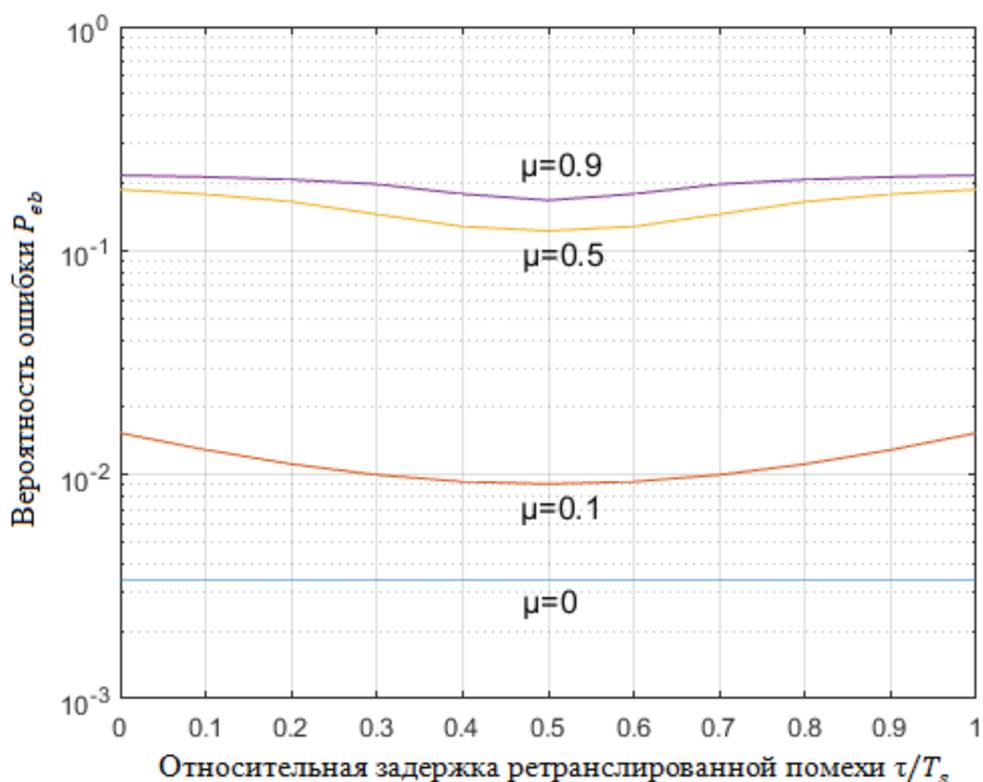


Рис.7. Зависимость усредненной вероятности ошибки P_{eb} от задержки ретранслированной помехи τ/T_s для 16-ФМ

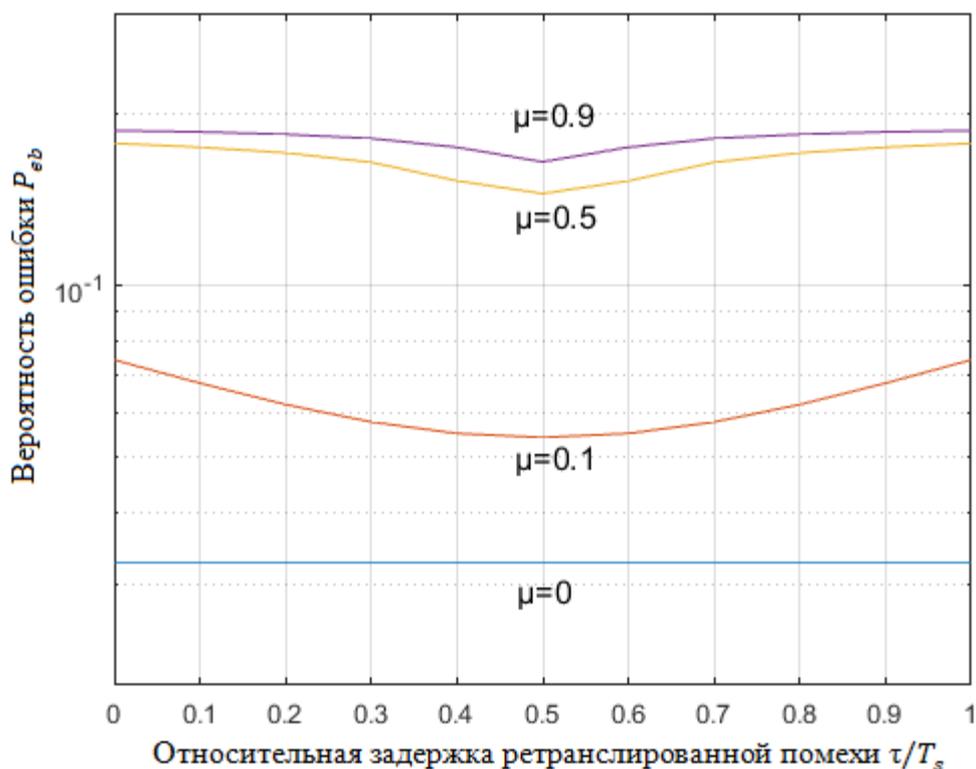


Рис.8. Зависимость усредненной вероятности ошибки P_{eb} от задержки ретранслированной помехи τ/T_s для 32-ФМ

Ретранслированные помехи большой интенсивности ($\mu \geq 0,5$) опасны для всех видов сигналов М-ФМ и практически разрушают прием.

Этот вывод подтверждают и графики, приведенные на рис. 9, где для сравнения даны кривые помехоустойчивости для всех исследованных сигналов в зависимости от величины μ при отношении $E_b/N_0 = 13$ дБ, относительной задержке помехи $\tau/T_s = 0.1$ (сплошные) и $\tau/T_s = 0.5$ (пунктирные). Если для шумовой помехи ($\mu = 0$) помехоустойчивость побитового приема 2-ФМ и 4-ФМ одинакова, то при наличии ретранслированной помехи 4-ФМ начинает существенно проигрывать.

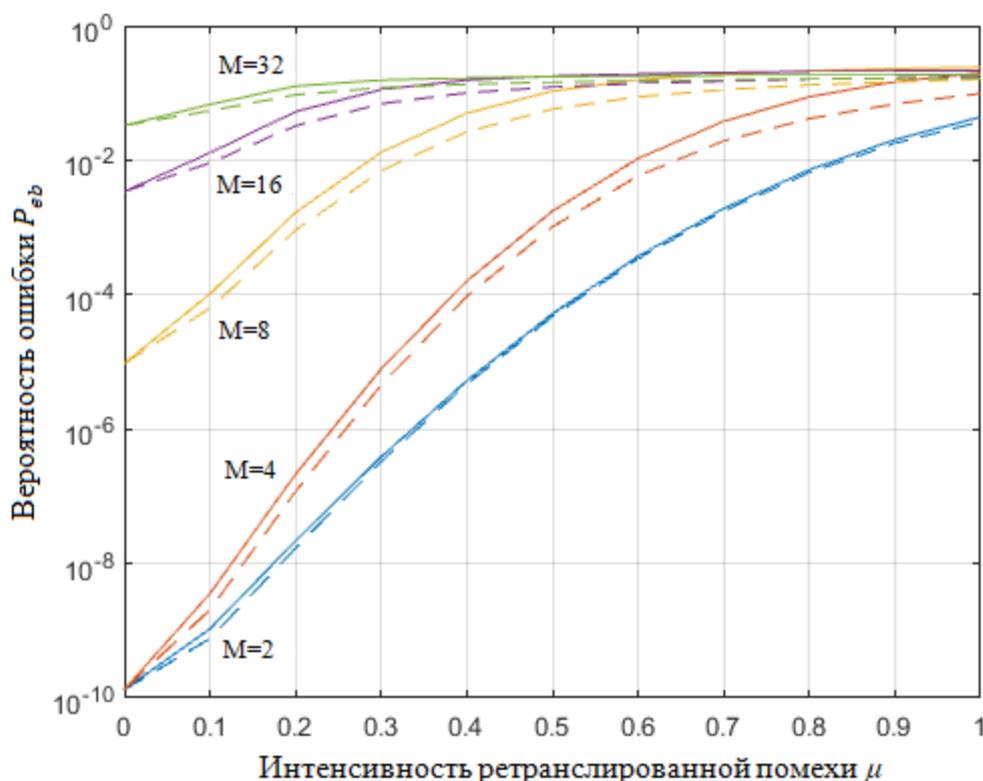


Рис. 9. Зависимость вероятности ошибки P_{ob} от интенсивности ретранслированной помехи μ

Наиболее показательной является зависимость вероятности ошибки P_b от отношения сигнал/шум на входе приемника E_b/N_0 . На рис. 10-14 приведены рассчитанные зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для $M=2, 4, 8, 16$ и 32 при разных интенсивностях помехи. Здесь же для сравнения приведен график помехоустойчивости

рассматриваемого приемника по отношению только к белому гауссовскому шуму.

На каждом рисунке исследована зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при разных значениях относительной задержки ретранслированной помехи. Сплошные кривые соответствуют приему сигнала на фоне ретранслированной помехи с относительной задержкой $\tau/T_s=0.1$, а пунктирные – $\tau/T_s=0.5$.

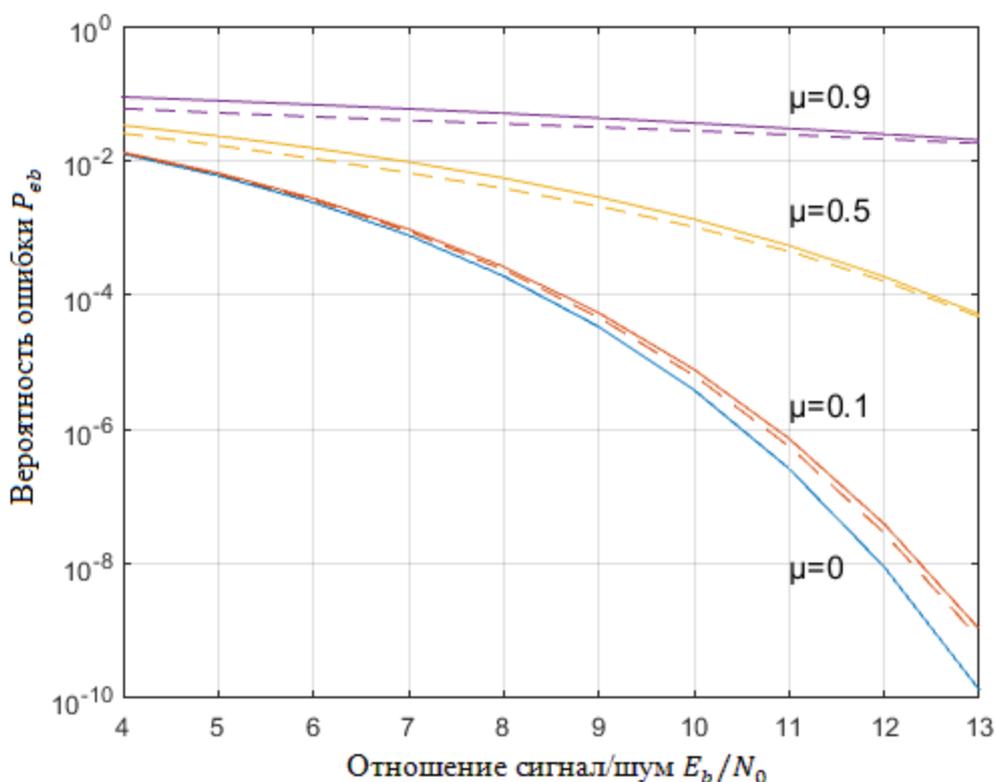


Рис.10. Зависимость вероятности ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для 2-ФМ

Видно, что с увеличением степени позиционности M полезного сигнала влияние ретранслированной помехи значительно усиливается. Так, если слабая помеха ($\mu=0,1$) для $M=2$ или 4 практически не увеличивает вероятность ошибки P_{eb} , то для $M=16$ или 32 снижение помехоустойчивости становится заметным.

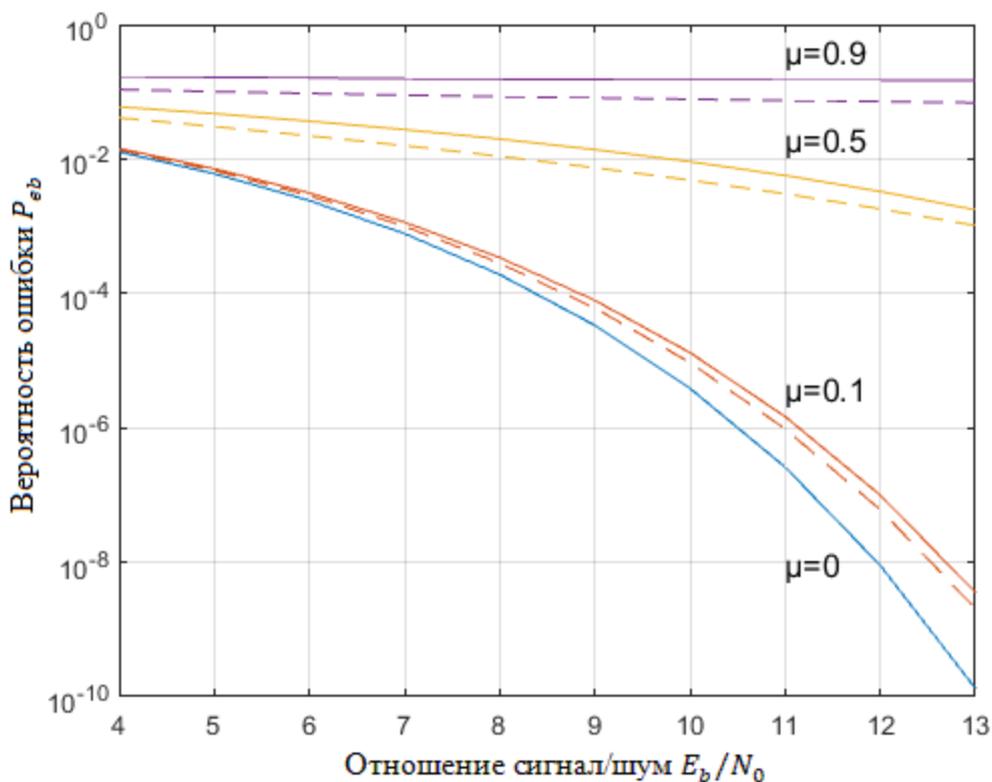


Рис. 11. Зависимость вероятности ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для 4-ФМ

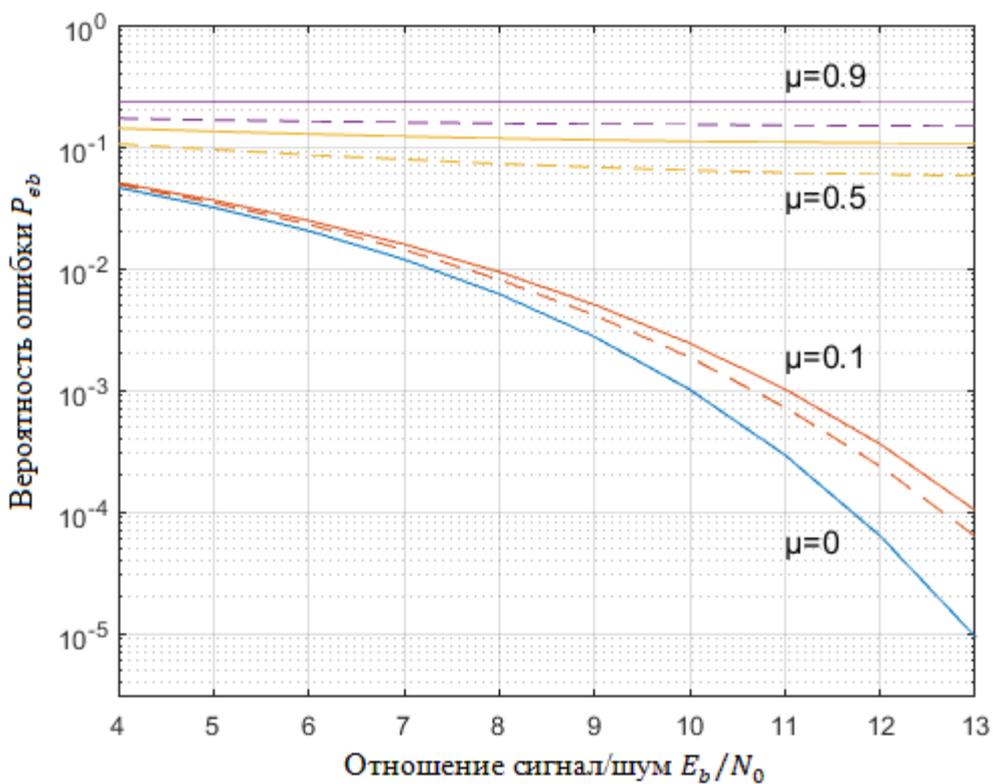


Рис.12. Зависимость вероятности ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для 8-ФМ

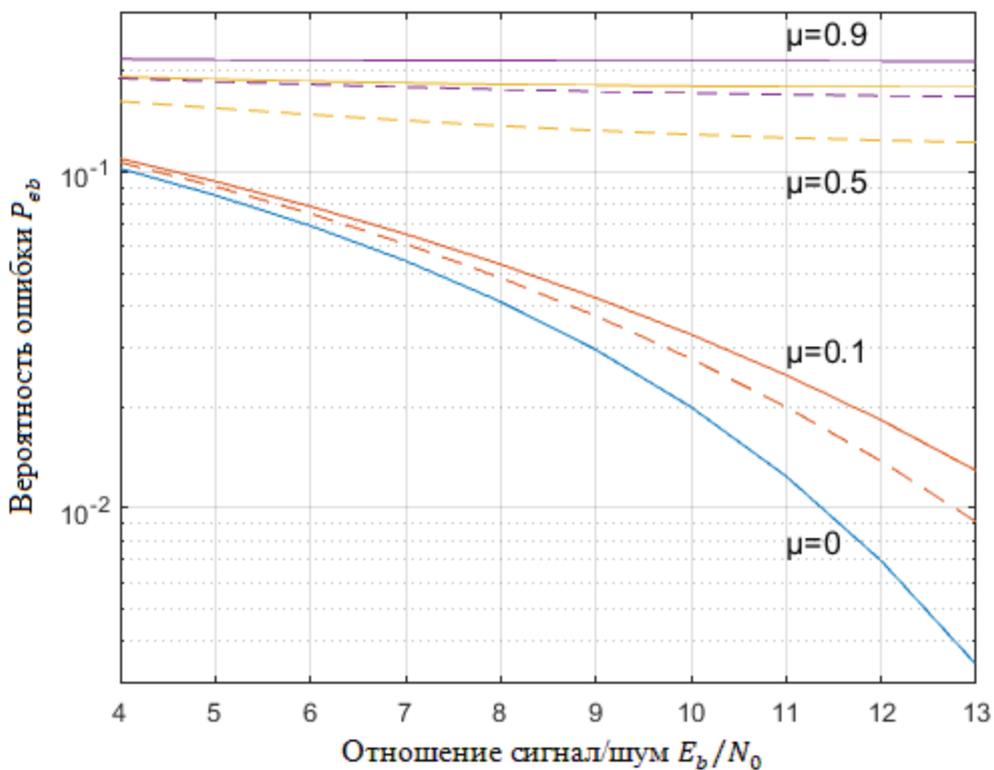


Рис.13. Зависимость вероятности ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для 16-ФМ

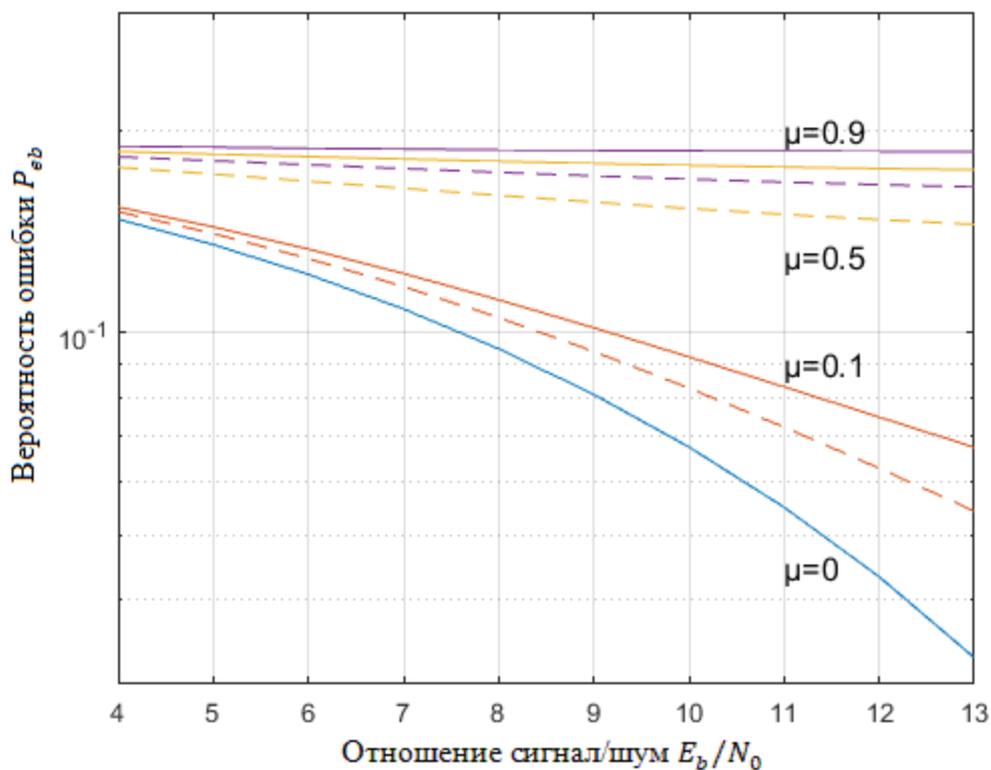


Рис.14. Зависимость вероятности ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для 32-ФМ

Анализ показывает, что присутствие на входе приемника ретранслированной помехи для 2-ФМ с интенсивностью $\mu=0.1$ при $P_{eb} = 10^{-6}$ эквивалентно ухудшению отношения сигнал/шум на 0.4 дБ, а для $\mu =0.5$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ это ухудшение уже составляет почти 4 дБ. А для 4-ФМ с интенсивностью $\mu =0.1$ при $P_{eb} = 10^{-6}$ эквивалентно ухудшению отношения сигнал/шум на 0.7 дБ, а для $\mu =0.5$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ это ухудшение уже составляет почти 8 дБ.

5. Заключение

Проведен анализ помехоустойчивости приема сигналов М-ФМ при наличии шумовой и ретранслированной помехи. По результатам анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией весьма сильно подвержены влиянию ретранслированной помехи и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается. Так для $M>8$ помехоустойчивость приема на фоне ретранслированной помехи заметно снижается даже при малых уровнях помехи.
2. Известно, что для шумовой помехи помехоустойчивость побитового приема 2ФМ и 4ФМ одинакова. В присутствии же ретранслированной помехи приемник 4ФМ начинает существенно проигрывать.
3. Для повышения помехоустойчивости приема сигналов М-ФМ на фоне ретранслированной помехи необходимо использовать алгоритмы компенсации помех.

Выражаю благодарность моему научному руководителю Куликову Г.В., доктору технических наук, профессору кафедры радиоэлектронных систем и комплексов МИРЭА-Российского технологического университета.

Литература

1. Куликов Г.В. Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов МЧМ при наличии ретранслированной помехи // Труды 50 Юбилейной 50 научно-технической конференции МИРЭА: Сб. науч. тр. М.: МИРЭА, 2001. Ч. 2. С. 78-84.
2. Биккенин Р.Р., Андрюков А.А. Подавление ответных (ретранслированных) помех при обработке псевдослучайных сигналов с относительной фазовой модуляцией // Информация и космос. 2016. № 2. С. 27-32.
3. Вознюк В. В., Куценко Е. В. Помехоустойчивость систем радиосвязи с бинарными фазоманипулированными шумоподобными сигналами при воздействии ретранслированных компенсационных помех типа инверсии огибающей сигнала // Журнал Радиоэлектроники. 2018. № 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/1/text.pdf>.
4. Луценко С. А. Модель функционирования спутниковой системы радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами в условиях постановки преднамеренных помех // Журнал Радиоэлектроники. 2018. № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/14/text.pdf>.
5. Куликов Г.В. Помехоустойчивость приемников модулированных сигналов с непрерывной фазой при наличии нефлуктуационных помех // Радиотехника. 2003. № 7. С. 21-25.
6. Леммле Д.В. Характеристики передачи сигналов OFDM в многолучевых каналах // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2015. № 2. С. 207-216.
7. Литвин С.А., Мареха А.С., Петрищев А.В. Оценка параметров фазоманипулированных радиосигналов при двухпозиционном приеме // Радиоэлектроника и информатика. 2001. № 2. С. 26-32.
8. Имитация многолучевого канала на основе IEEE 802.11b [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/post/122544/>.
9. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д.Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

10. Боккер П. Передача данных. Том 1. (Техника связи в системах телеобработки данных). Том I. Основы: Пер. с нем. / Под ред. Д. Д. Кловского. М.: Связь, 1980. 264 с.
11. Волхонская Е. В., Коротей Е. В., Власова К. В., Рушко М. В. Модельное исследование помехоустойчивости приема радиосигналов с QPSK, BPSK, 8PSK и DBPSK // Научный журнал «Известия КГТУ». 2017. № 46. С. 165-174.
12. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Научные технологии, 2018, № 11. С. 32-38.
13. Куликов Г. В. Нгуен Ван Зунг. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 5-12.

Для цитирования:

Нгуен Ван Зунг. Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/4/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.3.4