

УДК 621.391.072

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СКАНИРУЮЩЕЙ ПОМЕХИ

Г. В. Куликов¹, А. А. Лелюх^{1,2}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, г. Москва, просп. Вернадского, д.78

² АО «Московский научно-исследовательский институт радиосвязи»,
109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 32

Статья поступила в редакцию 13 января 2019 г., после доработки – 8 февраля 2019 г.

Аннотация. В различных цифровых системах передачи дискретной информации с высокой пропускной способностью нашли широкое применение сигналы с многопозиционной квадратурной амплитудной манипуляцией. На качество радиосвязи в таких системах оказывают влияние различные виды помех, как непреднамеренных, так и преднамеренных. Целью работы является анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии шумовой и сканирующей помехи. Для анализа использованы методы статистической радиотехники и расчеты с использованием численного интегрирования на компьютере. При этом сканирующая помеха представлена в виде гармонического колебания с частотой, изменяющейся по пилообразному закону. Для разной степени позиционности сигналов получены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум, от девиации частоты сканирующей помехи и от ее интенсивности. Показано, что помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией значительно снижается при увеличении интенсивности сканирующей помехи, попадающей в область главного лепестка спектра полезного сигнала, и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается.

Ключевые слова: квадратурная амплитудная манипуляция, сканирующая

помеха, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки.

Abstract. Multiposition quadrature amplitude modulation signals (M-QAM) are widely used in the high-capacity digital data transmission systems. In such systems, the quality of radio communication is affected by various types of interference, both, casual and intended. The aim of the work is to analyze the noise immunity of receiving M-QAM signals in the presence of noise and scanning interference. The scanning interference is presented in this paper in the form of a harmonic oscillation with a frequency varying according to the sawtooth law. Methods of statistical radio engineering and calculations using numerical integration on a computer were used for the analysis. The error probability calculation technique is based on the assumption that the initial phase of the interference and its frequency are first assumed to be some fixed values. In this case, it is possible to calculate the average values and variance of the conditional normal distributions of random processes at the outputs of all the correlators of the receiver and the conditional probability of bit error. Then averaging of the obtained results by random parameters is performed by numerical integration. The dependences of the bit error probability on the signal-to-noise ratio, the deviation of the scanning interference frequency and its intensity are obtained for different number of positions M . It is shown that the M-QAM signals are very strongly influenced by scanning interference and with increasing of number of positions of the signals this effect is significantly enhanced. For example, with a weak interference for $M=4$ or 16, the probability of error practically does not increase and the energy losses for are not more than 1 dB, for $M=32$ or 64, the reduction in noise immunity becomes noticeable, and the energy losses reach 2-5 dB. The scanning interference of high intensity threat for all kinds of M-QAM signals and completely destroy the reception. The main negative impact is caused by frequency components of the interference, close to the frequency of the carrier oscillation of the useful signal. The scanning interference that does not fall into the zone of the main lobe of the M-QAM signal spectrum slightly affects the noise immunity of the reception.

Keywords: quadrature amplitude modulation, scanning interference, noise immunity, probability of bit error.

Введение

В различных цифровых системах передачи дискретной информации (СПДИ) с высокой пропускной способностью, таких как спутниковые, радиорелейные линии связи, системы мобильной связи, системы цифрового телевидения нашли широкое применение сигналы с многопозиционной квадратурной амплитудной манипуляцией (М-КАМ). Одним из важнейших параметров таких систем является их помехоустойчивость. На входе приемника в зависимости от типа СПДИ могут присутствовать различные виды помех, как непреднамеренных, так и преднамеренных, которые сильно влияют на качество радиосвязи [1-7]. К их числу относятся гармонические, ретранслированные, импульсные помехи и т.д. Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе помехоустойчивости СПДИ. Одной из таковых является и сканирующая помеха, частотный диапазон действия которой может перекрываться с частотным диапазоном сигнала.

Целью данной работы является анализ помехоустойчивости когерентного приемника сигналов с многопозиционной квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии сканирующей помехи.

1. Модели сигнала и помех

Сигнал М-КАМ на тактовом интервале, равном длительности канального символа T_s , несущего информацию об $k = \log_2 M$ информационных битах, может принимать одно из M возможных значений:

$$s_i(t) = A_{cp}(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), \quad t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

где $A_{cp} = \sqrt{2E_{ср} / T_s}$ – средняя амплитуда сигнала; $E_{ср} = kE_{бср}$ – энергия канального символа, средняя по всем информационным комбинациям, $E_{бср}$ – средняя энергия, приходящаяся на один бит информации, I_i и Q_i – коэффициенты, определяющие амплитуды квадратурных компонент сигнала; ω_0 – несущая частота.

Под сканирующей помехой будем понимать мешающий сигнал с относительной интенсивностью μ и частотой $\omega_{п}$, изменяющейся вокруг несущей

частоты полезного сигнала ω_0 по некоторому периодическому закону. В простейшем случае этот закон может быть пилообразным (рис. 1):

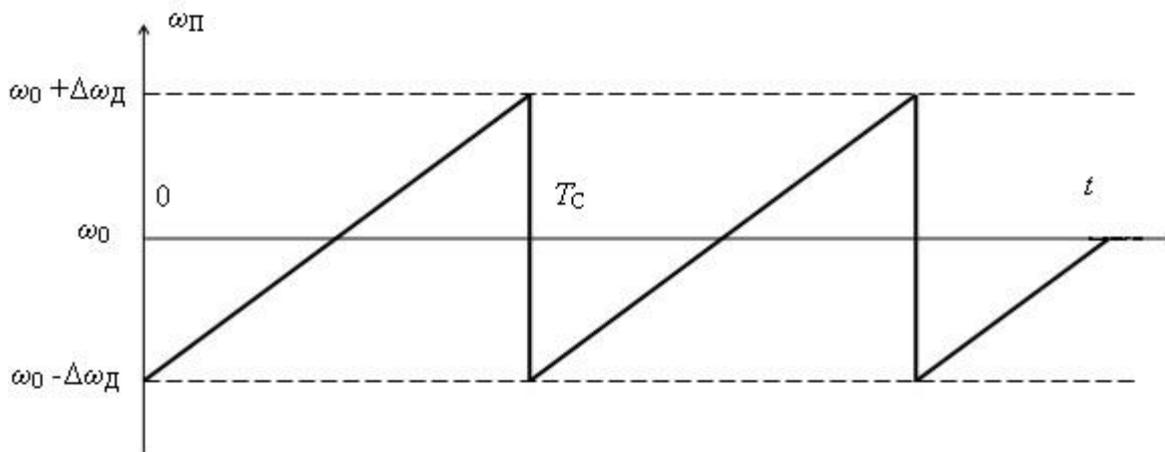


Рис. 1. Закон изменения частоты сканирующей помехи.

$$s_{\Pi}(t) = \mu A_0 \cos(\omega_{\Pi}(t)t + \varphi_{\Pi}), \quad (2)$$

$$\omega_{\Pi}(t) = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{Д}} - \frac{2\Delta\omega_{\text{Д}}t}{T_{\text{С}}}.$$

Здесь φ_{Π} — неизвестная и случайная начальная фаза помехи, $\Delta\omega_{\text{Д}}$ — девиация помехи, $T_{\text{С}}$ — период сканирования.

К качестве флуктуационной помехи рассмотрим шум белый гауссовский шум $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 :

$$\langle n(t) \rangle = 0; \langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1). \quad (3)$$

2. Методика оценки помехоустойчивости

Считаем, что входное колебание приемника является аддитивной смесью полезного сигнала (1), сканирующей помехи (2) и белого гауссовского шума (3):

$$x(t) = s_i(t) + s_{\Pi}(t) + n(t).$$

Классический когерентный приемник сигнала (1) вычисляет M интегралов свертки I_i принимаемого колебания $x(t)$ и опорных сигналов.

Методика расчета вероятности ошибки подробно изложена в [1-3] и основана на предположении, что начальная фаза φ_{Π} помехи и ее частота (частотный сдвиг $\Delta\omega_{\Pi}$) сперва полагаются некоторыми фиксированными величинами. В этом случае удается легко рассчитать средние значения и дисперсии условных по этому параметру нормальных распределений случайных процессов на выходах всех корреляторов приемника и аналогичные параметры суммарных процессов в устройстве сравнения корреляционных интегралов $m_{\Sigma i}$ и $D_{\Sigma i}$.

Общая по ансамблю возможных вариантов посылок сигнала М-КАМ вероятность ошибки приема любого канального символа, например, с индексом "0", в этом случае равна

$$P_{es}(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi}) = 1 - \prod_{i=1}^{M-1} p_i(I_0 > I_i), \quad (4)$$

а вероятность битовой ошибки при достаточно большом отношении сигнал/шум [8]:

$$P_{eb}(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi}) = P_{es} / \log_2 M, \quad (5)$$

где

$$p_i(I_0 > I_i) = 1 - Q\left(\frac{m_{\Sigma i}}{\sqrt{D_{\Sigma i}}}\right),$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt.$$

Если предположить, что скорость изменения частоты сканирующей помехи мала по сравнению со скоростью передачи полезной информации ($T_c \gg T_s$), то на каждом тактовом интервале сигнала такую помеху можно считать гармонической с той или иной расстройкой несущей частоты $\Delta\omega_{\Pi}$ относительно величины ω_0 .

В [1] показано, что в присутствии такой помехи средние значения $m_{\Sigma i}$ и $D_{\Sigma i}$ с учетом величины порога принятия решения

$$\delta_i = \frac{E_{ссп}}{N_0} [(I_0^2 + Q_0^2) - (I_i^2 + Q_i^2)]$$

определяются следующим образом:

$$m_{\Sigma i} = \frac{2E_{ср}}{N_0} \left\{ 0,5[(I_0 - I_i)^2 + (Q_0 - Q_i)^2] + \mu \frac{\sin \frac{\Delta\omega_{\Pi} T_s}{2}}{\frac{\Delta\omega_{\Pi} T_s}{2}} [(I_0 - I_i) \cos \eta + (Q_0 - Q_i) \sin \eta] \right\},$$

$$D_{\Sigma i} = \frac{2E_{ср}}{N_0} [(I_0 - I_i)^2 + (Q_0 - Q_i)^2]. \quad (6)$$

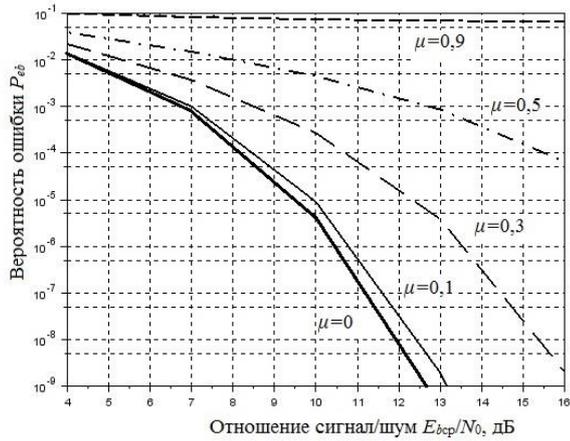
Для получения безусловной вероятности битовой ошибки необходимо провести усреднение величины $P_{eb}(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi})$ (4) по параметрам φ_{Π} и $\Delta\omega_{\Pi}$. При этом следует учесть, что неизвестная случайная величина φ_{Π} равномерно распределена на полуинтервале $(-\pi, \pi]$, а величина $\Delta\omega_{\Pi}$ в соответствии с (2) – на интервале $[-\Delta\omega_{Д}, +\Delta\omega_{Д}]$:

$$P_{eb} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{1}{2\Delta\omega_{Д}} \int_{-\Delta\omega_{Д}}^{+\Delta\omega_{Д}} P_e(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi}) d\Delta\omega_{\Pi} \right] d\varphi_{\Pi}. \quad (7)$$

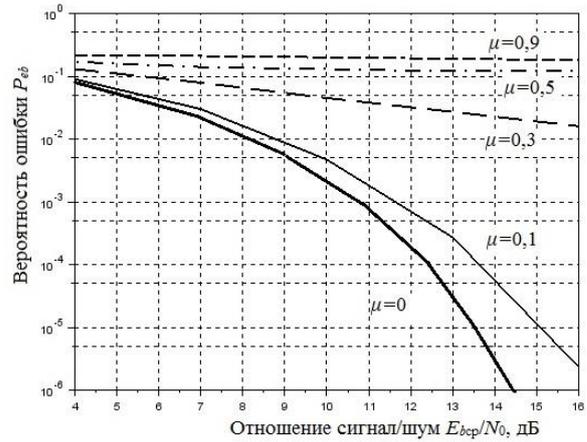
3. Результаты расчетов

Результаты численных расчетов по формуле (7) с учетом (4)-(6) представлены на рис. 2–4. Заметим, что из-за ограничений применимости формулы (5) результаты при малых отношениях сигнал/шум ($E_{бср} / N_0 < 7$ дБ) и большой интенсивности помех $\mu > 0,5$ представляют собой нижнюю границу вероятности ошибки и имеют определенную погрешность. При численном интегрировании (7) учтено, что погрешность вычислений как минимум на порядок меньше минимальной представленной вероятности битовой ошибки.

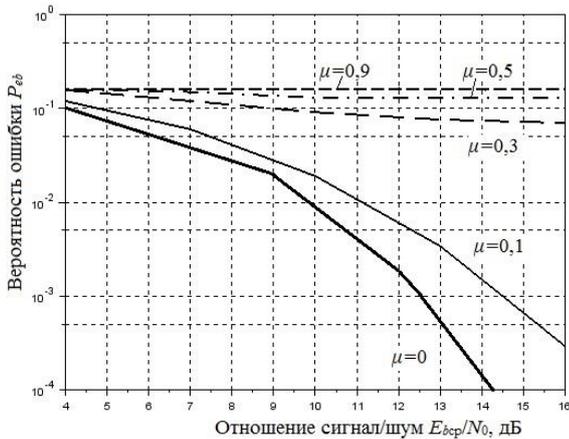
На рис. 2 для разной степени позиционности сигнала M показаны зависимости вероятности ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум $E_{бср} / N_0$ при $\Delta\omega_{Д} T_s = 6$. Рис. 3 иллюстрирует для разных M зависимости вероятности ошибки P_{eb} от интенсивности сканирующей помехи μ при $E_{бср} / N_0 = 13$ дБ и $\Delta\omega_{Д} T_s = 6$.



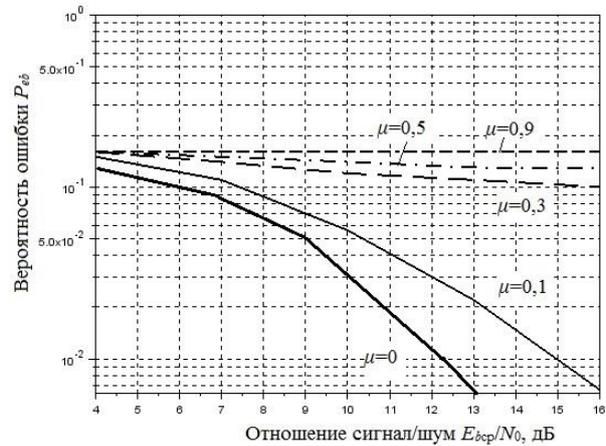
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при девиации частоты помехи $\Delta\omega_d T_s = 6$:
а – $M=4$, б – $M=16$, в – $M=32$, г – $M=64$.

Видно, что с увеличением степени позиционности M влияние сканирующей помехи значительно усиливается. При этом, если при слабой помехе ($\mu=0,1$) для $M=4$ и 16 вероятность ошибки практически не увеличивается и энергетические потери для $P_{eb}=10^{-3}$ составляют не более 1 дБ, то для $M=32$ или 64 при такой же помехе снижение помехоустойчивости становится заметным, а энергетические потери уже достигают 2-5 дБ. Помехи большой интенсивности ($\mu \geq 0,5$) опасны для всех видов сигналов М-КАМ и полностью разрушают прием.

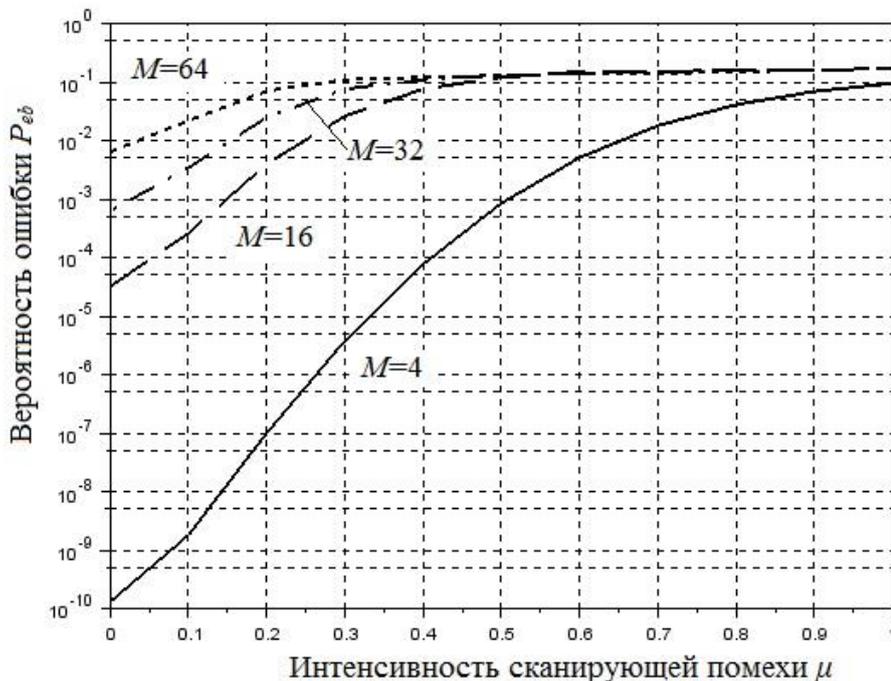


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от интенсивности сканирующей помехи.

При увеличении девиации частоты помехи, "накрывающей" зону главного лепестка спектра сигнала, ее влияние на помехоустойчивость демодулятора М-КАМ снижается, оставаясь при этом весьма существенным (рис. 4). Так при увеличении девиации на порядок вероятность ошибки снижается в несколько раз. Это связано с тем, что основной отрицательный вклад помехи приходится на ее частотные составляющие, близкие к частоте несущего колебания полезного сигнала, а при расширении зоны сканирования их доля пропорционально снижается. При стремлении девиации частоты помехи к нулю, вероятность ошибки стремится к величине, полученной для случая прицельной гармонической помехи [1].

Заключение

По результатам анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Сигналы с квадратурной амплитудной манипуляцией весьма сильно подвержены влиянию сканирующей помехи и с увеличением позиционности

сигналов это влияние значительно усиливается. Так для $M > 16$ помехоустойчивость приема на фоне сканирующей помехи заметно снижается даже при малых уровнях помехи.

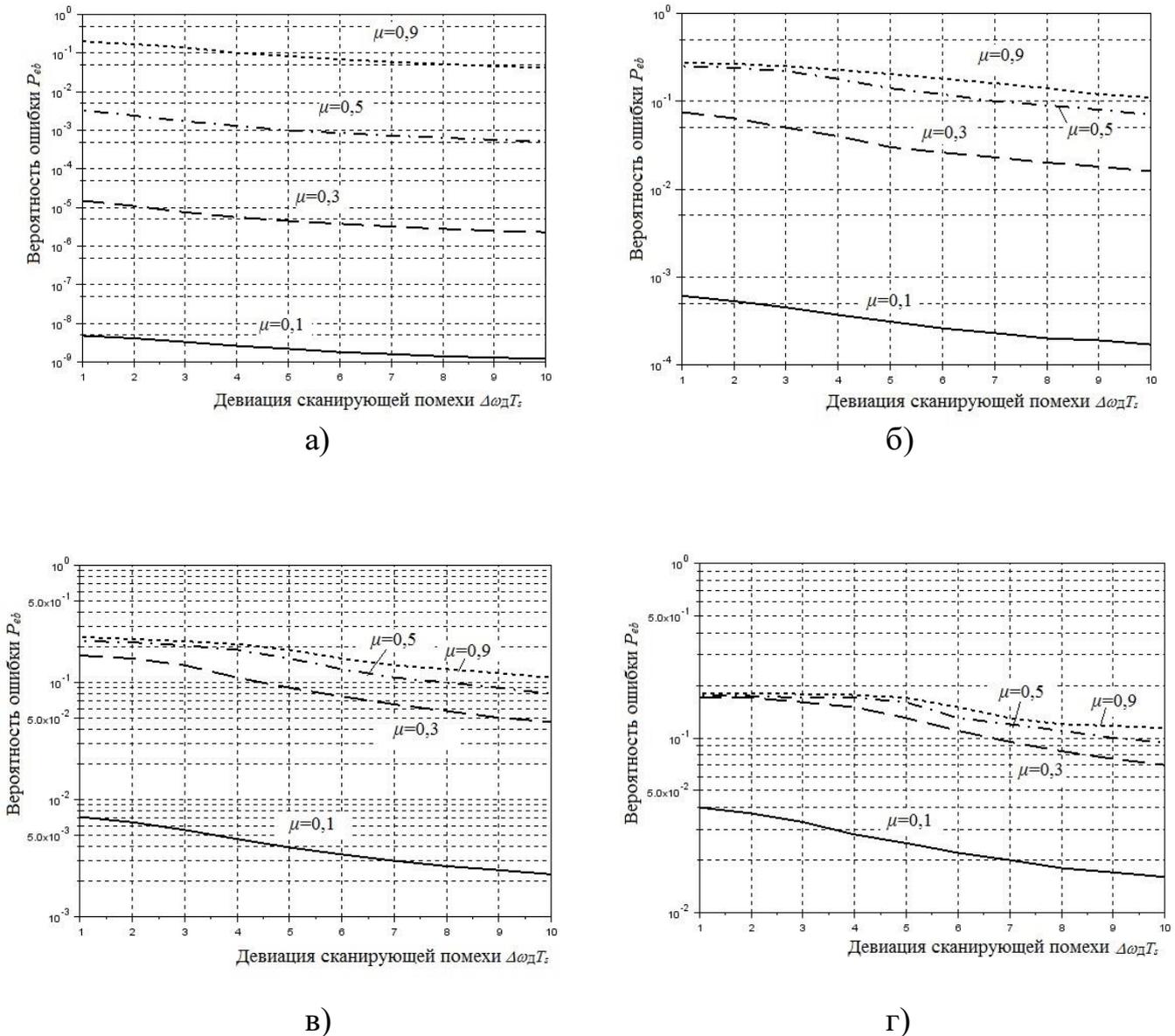


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки от девиации частоты сканирующей помехи при $E_{b\text{cp}} / N_0 = 13$ дБ:
 а – $M=4$, б – $M=16$, в – $M=32$, г – $M=64$.

2. Основное отрицательное влияние оказывают частотные составляющие помехи, близкие к частоте несущего колебания полезного сигнала. Сканирующая помеха, не попадающая в зону главного лепестка спектра сигнала незначительно влияет на помехоустойчивость демодулятора М-КАМ.

3. Для повышения помехоустойчивости приема сигналов М-КАМ на фоне сканирующей помехи необходимо использовать алгоритмы компенсации помех, например, следящие режекторные фильтры.

Литература

1. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/9/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2018.11.9.
2. Куликов Г.В. Влияние гармонической помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов МЧМ // Радиотехника, 2002, № 7, с. 42-44.
3. 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. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12.
4. Ложкин К.Ю., Стиценко А.И. Помехоустойчивость некогерентного и когерентного приема ДФРМ-сигнала в условиях воздействия фазоманипулированной, гармонической или гауссовской помех // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2017, Т. 10, № 2, с. 260-270.
5. Перов А.И. Синтез оптимального алгоритма обработки сигналов в приемнике спутниковой навигации при воздействии гармонической помехи // Радиотехника, 2005, № 7, с. 37-42.
6. Кондратенко А.Е., Поддубный В.Н. Эффективность воздействия гармонической и гауссовской помех на линии многоканальной радиосвязи с синхронным нелинейным кодовым уплотнением каналов // Радиотехника, 2009, № 6, с. 52-56.

7. Зеленевский В.В. Помехоустойчивость приема избыточных частотноманипулированных сигналов на фоне гармонических помех // Радиотехника, 2002, № 7, с. 32-36.
8. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.

Для цитирования:

Г. В. Куликов, А. А. Лелюх. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией при воздействии сканирующей помехи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/5/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.5