

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>



УДК 621.391.072

Влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ

Г.В. Куликов[@]
Нгуен Ван Зунг

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ) благодаря своим энергетическим и спектральным характеристикам давно и успешно применяются для высокоскоростной передачи информации во многих приложениях – ряде принятых протоколов беспроводных сетей IEEE 802.11, системах цифрового спутникового телевидения DVB-S, DVB-S2/S2X, сотовых сетях CDMA и др. Важнейшей характеристикой таких систем является их помехоустойчивость, которая зависит не только от условий распространения радиоволн в канале связи, но и от качества работы составных узлов самих систем передачи информации. В работе проводится исследование влияния неточности оценивания частоты и фазы несущей и неточности работы системы тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ. Методами статистической радиотехники получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при различных ошибках вспомогательных систем приемника. При этом величины погрешностей полагались либо постоянными (статическая погрешность), либо динамически меняющимися (динамическая погрешность). Моделирование динамических погрешностей осуществлялось методом Монте-Карло, а сами динамические погрешности полагались гауссовскими случайными величинами. Показано, что неточность оценивания этих параметров сильно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигнала М-ФМ, и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается. Даны оценки максимально допустимых погрешностей анализируемых систем. При приеме сигналов М-ФМ допустимым значением смещения частоты опорных колебаний можно считать величину $\Delta\omega T_s$ порядка 0.05, допустимая неточность оценки фазы несущей зависит от позиционности сигнала и изменяется от $\pi/36 - \pi/72$ для 2-ФМ до $\pi/180$ для 32-ФМ, допустимым временным смещением тактовых моментов можно считать величину 3–5% от длительности тактового интервала.

Ключевые слова: многопозиционная фазовая манипуляция, частота, фаза, тактовый момент, отношение сигнал/шум, статическая погрешность, динамическая погрешность, вероятность битовой ошибки.

Для цитирования: Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг. Влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 5. С. 47–61. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>

Influence of synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of M-PSK signals

Gennady V. Kulikov[@],
Nguyen Van Dung

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author, e-mail: vapetrov@mirea.ru

Signals with multiple phase-shift keying (M-PSK) have long been successfully used for high-speed information transfer in many applications – a number of adopted protocols of IEEE 802.11 wireless networks, digital satellite television DVB-S, DVB-S2/S2X systems, cellular networks CDMA and others. The most important characteristic of such systems is their noise immunity, which depends not only on the propagation conditions of radio waves in the communication channel, but also on the quality of operation of the component nodes of the information transmission systems themselves. The paper investigates the influence of the inaccuracy of estimating the frequency and phase of the carrier and the inaccuracy of the clock synchronization system on the noise immunity of coherent reception of M-PSK signals. Analytical expressions were obtained by statistical radio engineering methods. The expressions allow calculating the dependence of the probability of a bit error on the signal-to-noise ratio for various errors of the receiver auxiliary systems. In this case, the magnitudes of the errors were assumed to be either constant (static error) or dynamically changing (dynamic error). The dynamic errors were modeled using the Monte Carlo method, and the dynamic errors themselves were assumed to be Gaussian random variables. It is shown that the inaccuracy of estimating these parameters strongly influences the noise immunity of the coherent reception of the M-PSK signal, and this effect increases with increasing signal positionality. Estimates of the maximum permissible errors of the analyzed systems are given. When M-PSK signals are received, a tolerable value of the frequency of the reference oscillations can be considered as a $\Delta\omega T_s$ value of about 0.05. The allowable inaccuracy of the carrier phase estimation depends on the positioning of the signal and varies from $\pi/36$ – $\pi/72$ for 2PSK to $\pi/180$ for 32PSK. The allowable time offset of the clock moments can be considered the value of 3–5% of the clock interval duration.

Keywords: multiple phase-shift keying, frequency, phase, clock time, signal-to-noise ratio, static shift, dynamic shift, bit error rate.

For citation: Kulikov G.V., Nguyen Van Dung. Influence of synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of M-PSK signals. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(5):47-61 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>

Введение

В настоящее время многопозиционная фазовая манипуляция (М-ФМ) применяется для высокоскоростной передачи информации во многих приложениях – ряде принятых протоколов беспроводных сетей IEEE 802.11, системах цифрового спутникового телевидения DVB-S, DVB-S2/S2X, сотовых сетях CDMA и др. Важнейшей характеристикой таких систем является их помехоустойчивость, которая зависит не только от условий распространения радиоволн в канале связи, но и от качества работы составных узлов самих систем передачи информации. Так, в любом когерентном приемнике присутствует блок формирования опорных колебаний и блок тактовой синхронизации, которые стро-

яется на основе схемы ФАПЧ, оценивающей и компенсирующей статические и динамические сдвиги несущей и тактовой частот, обусловленные нестабильностями генераторов и условиями распространения радиоволн, например, за счет эффекта Доплера. Однако любая схема ФАПЧ имеет погрешности, которые приводят к неточностям формирования опорных колебаний и тактовых импульсов. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить значение вероятности битовых ошибок.

Целью данной работы является исследование влияния неточностей оценивания частоты и фазы несущей и неточностей работы системы тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов М-ФМ. Для независимости выводов расчеты по их влиянию были проведены отдельно.

Вывод формул

Сигнал М-ФМ 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:

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

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 принять равным нулю.

Структурная схема когерентного приемника сигналов М-ФМ представлена на рис. 1.

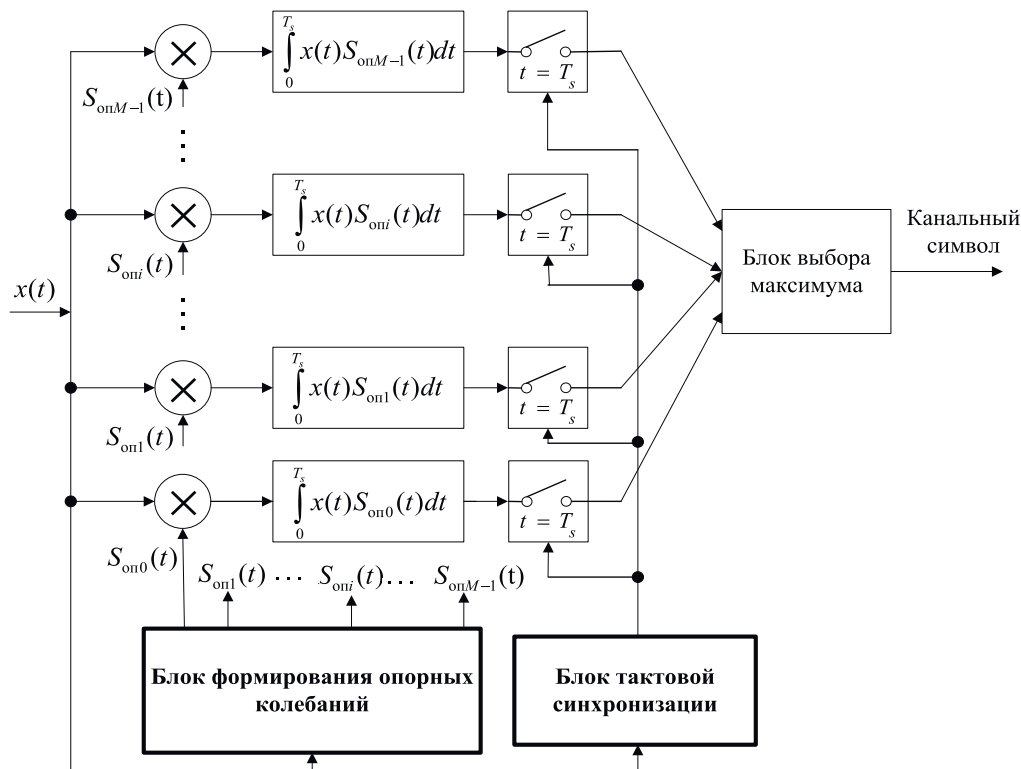


Рис. 1. Структурная схема когерентного приемника М-ФМ-сигналов.

Корреляционный прием сигнала (1) в присутствии белого гауссовского шума с односторонней спектральной плотностью мощности N_0 предполагает вычисление интегралов свертки:

$$I_i = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} x(t)s_{\text{оп}i}(t)dt. \quad (2)$$

При наличии неточности работы схемы ФАПЧ по частоте и фазе несущей частоты опорные сигналы, входящие в (2), будут иметь некоторое частотное ($\Delta\omega$) и фазовое смещение ($\varphi_{\text{см}}$) относительно номинальных значений:

$$s_{\text{оп}i}(t) = \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi_i + \varphi_{\text{см}}], i = 0, 1, \dots, M-1.$$

При неточностях работы блока тактовой синхронизации интегралы свертки (2) будут иметь вид:

$$I_i = \frac{2A_0}{N_0} \int_{\xi_1}^{T_s + \xi_2} x(t)s_{\text{оп}i}(t)dt.$$

Заметим, что сдвиги рассматриваемых параметров могут быть как постоянными (статическими), так и динамически меняющимися (флуктуации).

В случае, если тактовая частота соответствует номинальной, но все тактовые моменты смещены на одинаковую величину $\xi = \xi_1 = \xi_2$ (статическое смещение), в вычислении интегралов свертки будет использоваться реализация сигнала М-ФМ (рис. 2):

$$x(t) = \begin{cases} A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i); & t \in (\xi, T_s) \\ A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_j); & t \in [T_s, T_s + \xi) \end{cases}$$

и опорные колебания на временном интервале $t \in (\xi, T_s + \xi)$.

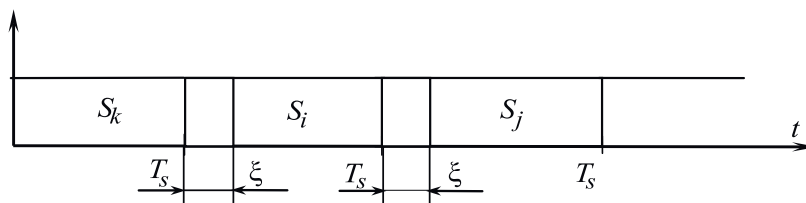


Рис. 2. Временное рассогласование при статическом смещении тактовых моментов.

В случае, если значение тактовой частоты флуктуирует вокруг своего номинального значения, интегралы свертки можно представить в следующем виде:

$$I_i = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s \pm \xi} x(t)s_{\text{оп}i}(t)dt.$$

При их вычислении используются реализации сигнала М-ФМ (рис. 3):
при $+\xi$

$$x(t) = \begin{cases} A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i); t \in (0, T_s) \\ A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_j); t \in [T_s, T_s + \xi) \end{cases}$$

при $-\xi$

$$x(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), t \in (0, T_s - \xi)$$

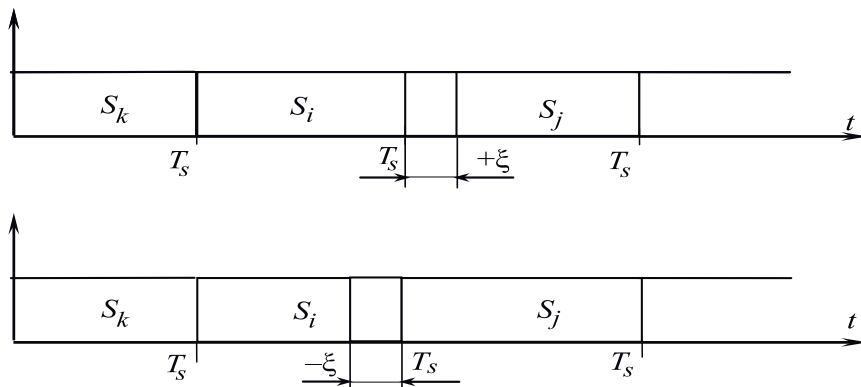


Рис. 3. Временные рассогласования при динамическом смещении тактовых моментов.

Частотные ($\Delta\omega$), фазовые ($\varphi_{\text{см}}$) и тактовые (ξ) сдвиги изменяют статистические параметры распределений на выходах всех корреляторов, а, следовательно, и вероятность ошибочного приема символа [1, 2]:

$$P_{es} = 1 - \prod_{\substack{i=0 \\ m \neq i}}^{M-1} p(I_m > I_i) \Big|_m, \quad (3)$$

где $p(I_m > I_i) \Big|_m = 1 - Q\left(\frac{m_{mi}}{\sqrt{D_{mi}}}\right)$ – вероятность того, что выходное значение m -го коррелятора больше выходного значения любого другого i -го коррелятора при условии, что передавался m -й символ; m_{mi} , D_{mi} – средние значения и дисперсии распределений комбинаций соответствующих напряжений на выходах корреляторов.

Вероятность битовой ошибки P_{eb} при достаточно большом отношении сигнал/шум с учетом кодирования Грея можно найти по формуле [3]:

$$P_{eb} = P_{es} / \log_2 M.$$

Результаты расчетов

Были проведены расчеты вероятностей битовых ошибок по методике, изложенной в [1, 2]. При этом величины $\Delta\omega$, $\varphi_{\text{см}}$, ξ полагались либо постоянными (статическая погреш-

ность), либо динамически меняющимися (динамическая погрешность). Моделирование динамических погрешностей осуществлялось методом Монте-Карло, а сами динамические погрешности полагались гауссовскими случайными величинами с нулевыми средними и дисперсиями D_ω (рад²), D_φ (рад²), D_ξ .

Сначала для всех распределений были рассчитаны средние значения m_{mi} и дисперсии D_{mi} , входящие в (3). Полученные выражения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры распределений при различных неточностях работы вспомогательных систем приемника

Вид неточности	Математическое ожидание m_{mi}	Дисперсия D_{mi}
Неточность оценивания частоты несущей $\Delta\omega T_s$ (рад)	$\frac{4E_s}{N_0} \frac{\sin \frac{\Delta\omega T_s}{2}}{\frac{\Delta\omega T_s}{2}} \left[\sin\left(\frac{\Delta\omega T_s}{2} + \frac{i\pi}{M}\right) \sin \frac{i\pi}{M} \right]$	$\frac{4E_s}{N_0} (1 - \cos \frac{i2\pi}{M})$
Неточность оценивания фазы несущей φ_{cm} (рад)	$\frac{4E_s}{N_0} \left[\sin \frac{i\pi}{M} \sin\left(\varphi_{cm} + \frac{i\pi}{M}\right) \right]$	
Статическое смещение тактовых моментов $\frac{\xi}{T_s}$	$\frac{4E_s}{N_0} \sin \frac{i\pi}{M} \left\{ \left(1 - \frac{\xi}{T_s}\right) \sin \frac{i\pi}{M} - \frac{\xi}{T_s} \sin\left(\varphi_j - \frac{i\pi}{M}\right) \right\}$	
Случайные флуктуации тактовых моментов: при $-\xi$	$\frac{2E_s}{N_0} \left(1 - \frac{\xi}{T_s}\right) \left(1 - \cos \frac{i2\pi}{M}\right)$	$\frac{4E_s}{N_0} \left(1 - \frac{\xi}{T_s}\right) \left(1 - \cos \frac{i2\pi}{M}\right)$
Случайные флуктуации тактовых моментов: при $+\xi$	$\frac{4E_s}{N_0} \sin \frac{i\pi}{M} \left[\sin \frac{i\pi}{M} - \frac{\xi}{T_s} \sin\left(\varphi_j - \frac{i\pi}{M}\right) \right]$	$\frac{4E_s}{N_0} \left(1 + \frac{\xi}{T_s}\right) \left(1 - \cos \frac{i2\pi}{M}\right)$

А. Влияние неточности оценивания частоты несущей

На рис. 4–7 представлены зависимости битовой ошибки P_{eb} при разных значениях смещения частоты опорных колебаний относительно номинальной для $M = 2, 4, 8, 16, 32$.

а. Для статического смещения

Рис. 4 и 5 относятся к случаю статического смещения частоты опорных колебаний.

б. Для случайных флуктуаций

На рис. 6 и 7 представлены зависимости вероятности ошибки при случайных флуктуациях частоты опорных колебаний.

Видно, что незначительное смещение частоты опорных сигналов ($\Delta\omega T_s = 0.1$) по-разному влияет на помехоустойчивость приема сигналов М-ФМ. Для 2-ФМ это практически не увеличивает вероятность ошибки, а для $M = 6$ или 32 снижение помехоустойчивости становится заметным (энергетический проигрыш составляет единицы дБ).

Полученные результаты позволяют утверждать, что при приеме сигналов М-ФМ допустимыми значениями смещения частоты опорных колебаний можно считать величину $\Delta\omega T_s$ порядка 0.05.

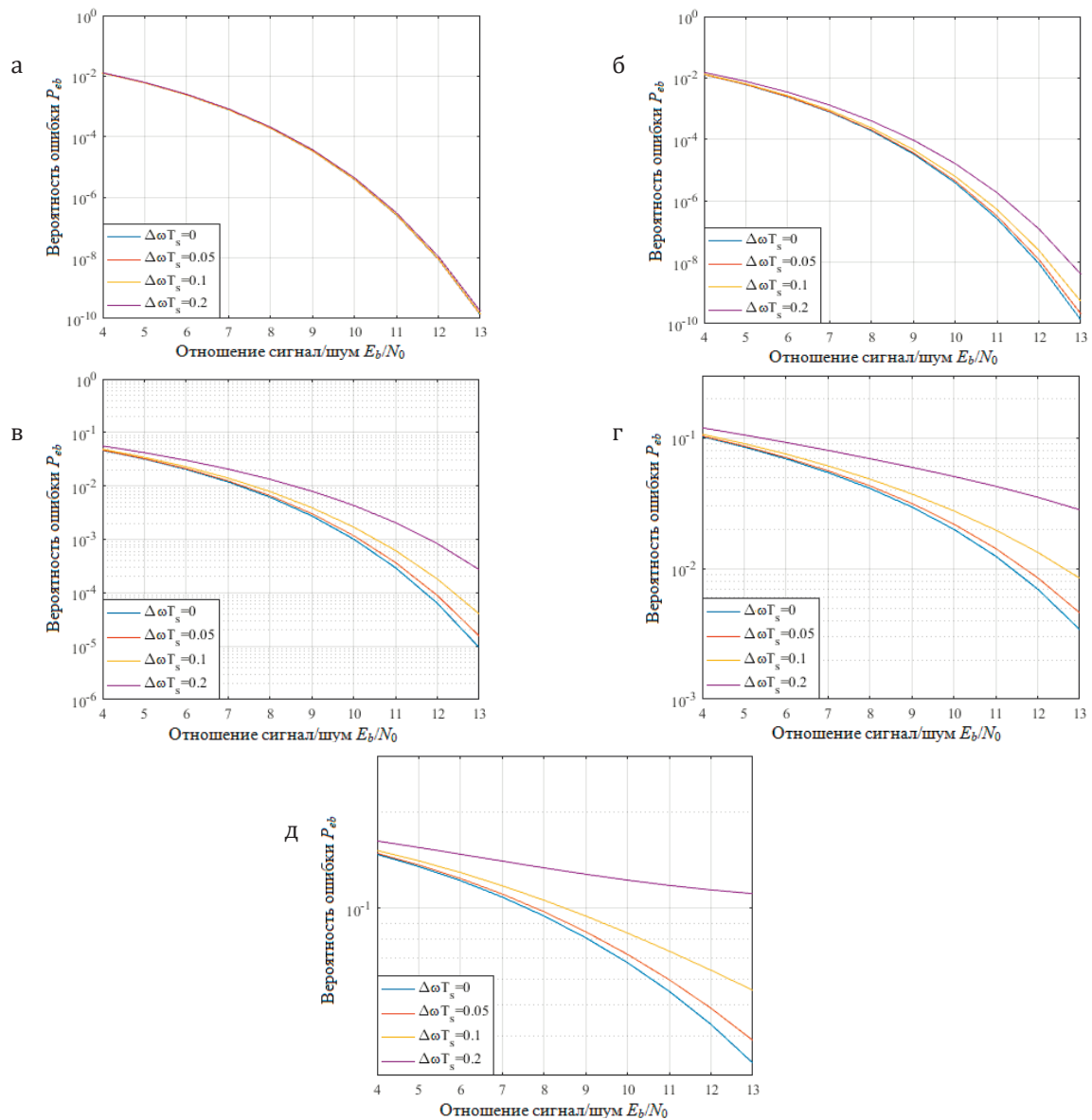


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при статических погрешностях частоты опорных колебаний $\Delta\omega T_s$: а – 2ФМ; б – 4ФМ; в – 8ФМ; г – 16ФМ; д – 32ФМ.

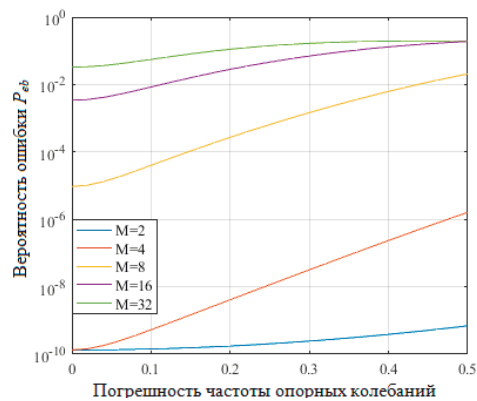


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от статической погрешности частоты опорных колебаний $\Delta\omega T_s$.

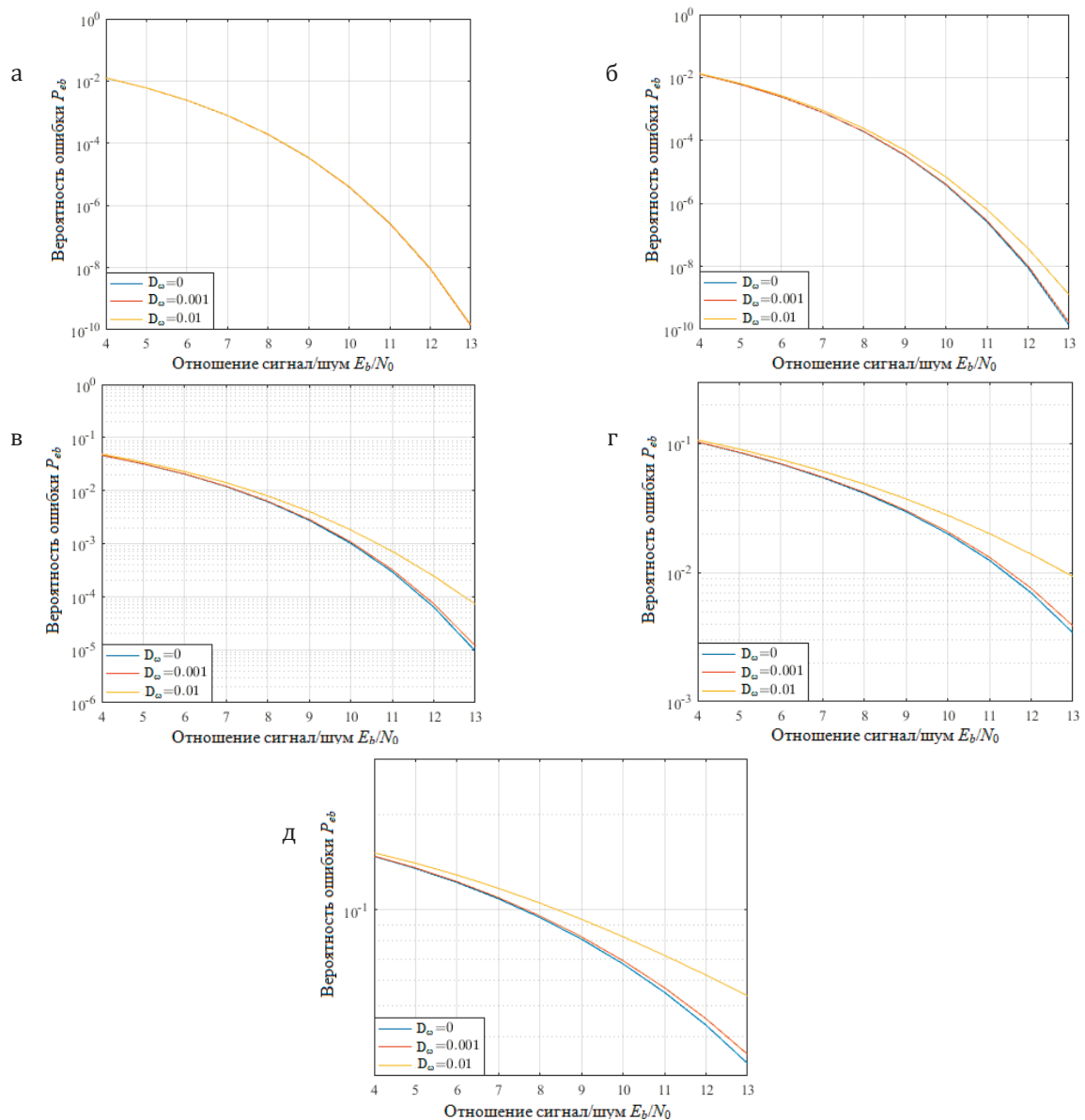


Рис. 6. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при случайных флуктуациях частоты опорных колебаний D_ω : а – 2ФМ; б – 4ФМ; в – 8ФМ; г – 16ФМ; д – 32ФМ.

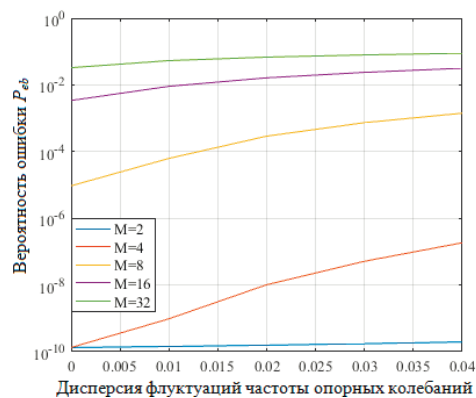


Рис. 7. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от дисперсии флуктуаций частоты опорных колебаний D_ω .

Б. Влияние неточности оценивания фазы несущей

На рис. 8–11 представлены зависимости битовой ошибки P_{eb} при разных значениях смещения фазы опорных колебаний относительно номинальной для $M = 2, 4, 8, 16, 32$.

а. Для статического смещения

Рис. 8 и 9 относятся к случаю статического смещения фазы опорных колебаний.

б. Для случайных флуктуаций

На рис. 10 и 11 представлены зависимости вероятности ошибки при случайных флуктуациях фазы опорных колебаний.

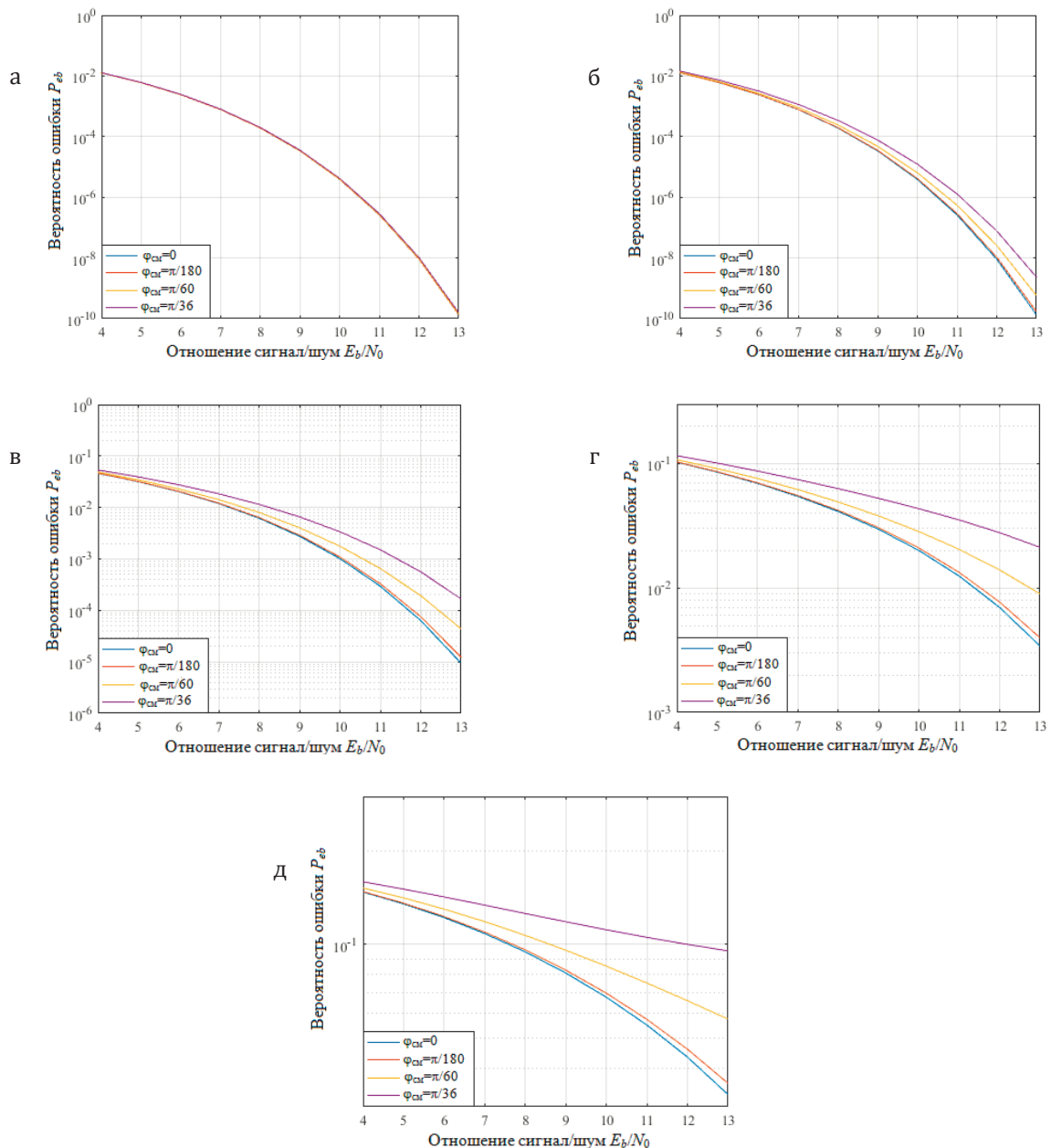


Рис. 8. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при статическом смещении фазы опорных колебаний φ_{cm} :
а – 2ФМ; б – 4ФМ; в – 8ФМ; г – 16ФМ; д – 32ФМ.

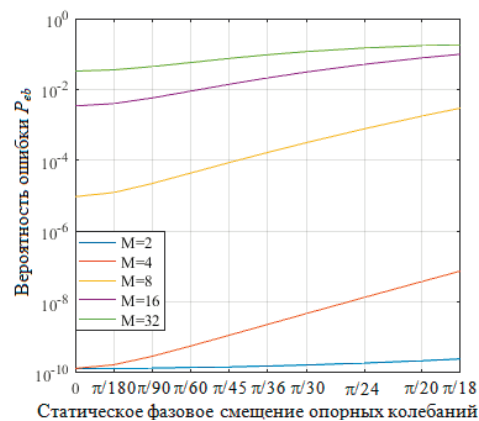


Рис. 9. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от статического смещения фазы опорных колебаний φ_{CM} .

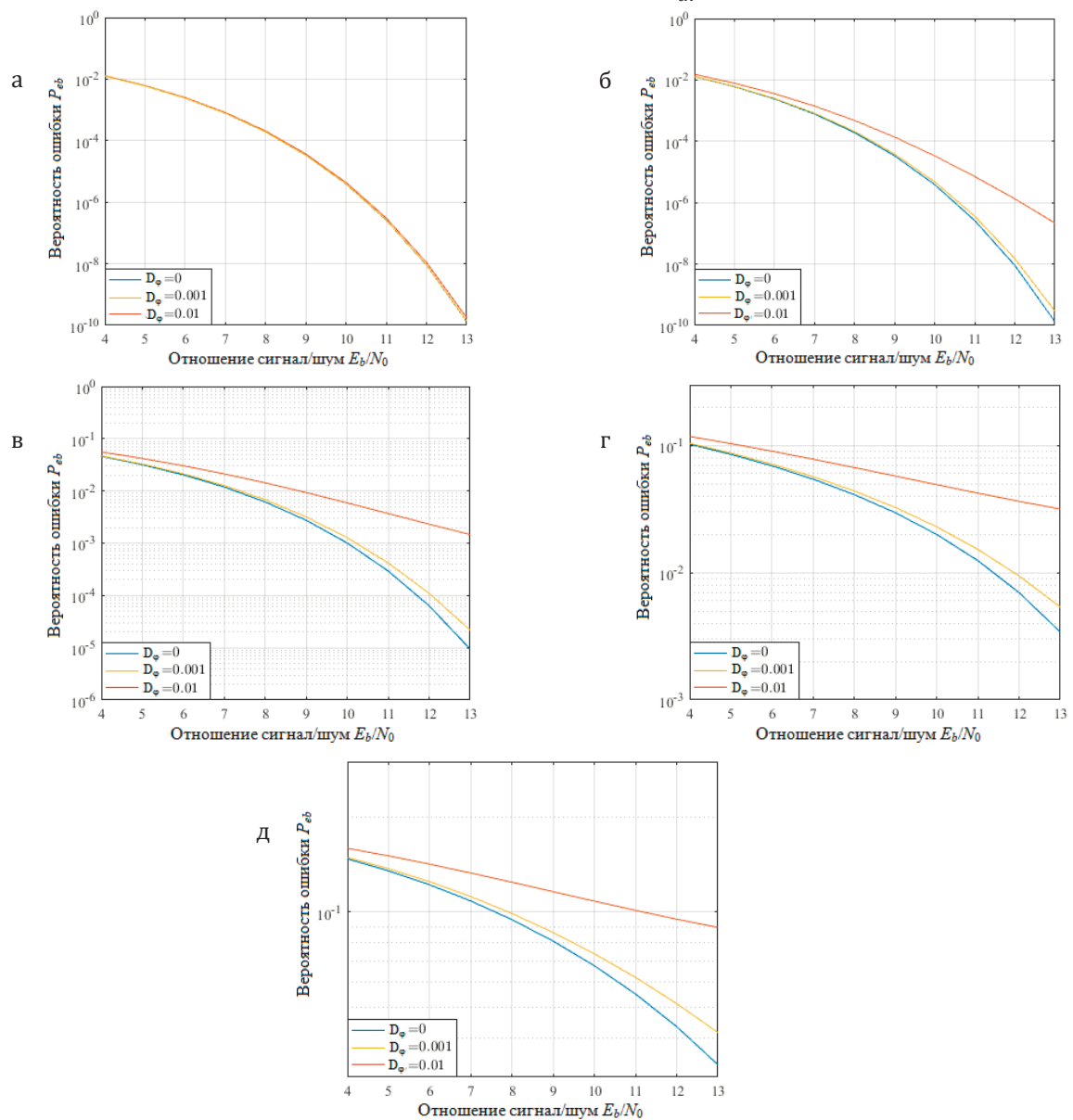


Рис. 10. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при случайных флуктуациях фазы опорных колебаний D_φ : а – 2ФМ; б – 4ФМ; в – 8ФМ; г – 16ФМ; д – 32ФМ.

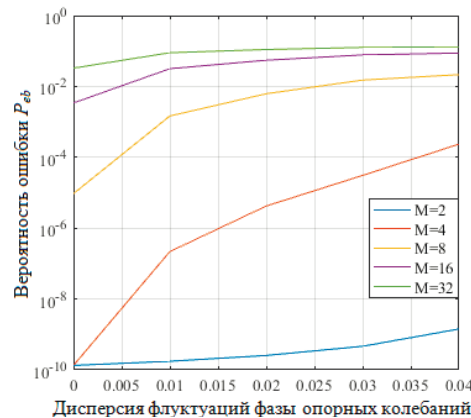


Рис. 11. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от дисперсии случайных флуктуаций фазы опорных колебаний D_φ .

Видно, что при увеличении позиционности сигналов М-ФМ влияние ошибки оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок возрастает. Например, для 2-ФМ среднеквадратическая ошибка оценивания фазы $\varphi_{см} = \pi/36$ эквивалентна ухудшению отношения сигнал/шум всего на 0.04 дБ (при $P_{eb} = 10^{-3}$), а для 8ФМ – уже на 1.4 дБ. Полученные результаты позволяют утверждать, что при приеме сигналов М-ФМ допустимое значение неточности оценки фазы несущей зависит от позиционности M и изменяется от $\pi/36 - \pi/72$ для 2ФМ до $\pi/180$ для 32ФМ.

В. Влияние неточности работы блока тактовой синхронизации

а. Для статического смещения тактовых моментов

На рис. 12 и 13 представлены зависимости битовой ошибки P_{eb} при разных значениях статического смещения тактовых моментов относительно номинального значения (в долях величины T_s) для $M = 2, 4, 8, 16, 32$.

б. Для случайных флуктуаций тактовых моментов

На рис. 14 представлены зависимости вероятности ошибки при случайных флуктуациях тактовых моментов.

Проведенное исследование влияния неточности тактовой синхронизации позволило установить, что возникающее в этом случае смещение тактовых моментов существенно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигнала М-ФМ, и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается. Заметим, что в случае одинаковой ошибки в определении тактовых моментов при приеме 2ФМ и 4ФМ помехоустойчивость снижается одинаково (см. рис. 12 и 14).

Полученные результаты позволяют утверждать, что при приеме сигналов М-ФМ допустимыми значениями временного смещения тактовых моментов можно считать величину 3–5%. При этом энергетический проигрыш относительно случая идеальной тактовой синхронизации для $P_{eb} = 10^{-3} - 10^{-4}$ достигает величины 0.5 дБ при $M = 2$ и 2 дБ при $M = 32$.

Требования по стабильности частоты и фазы существенно ужесточаются с увеличением позиционности сигналов. Сделанные выводы подтверждаются результатами исследований других авторов, например, [4–11].

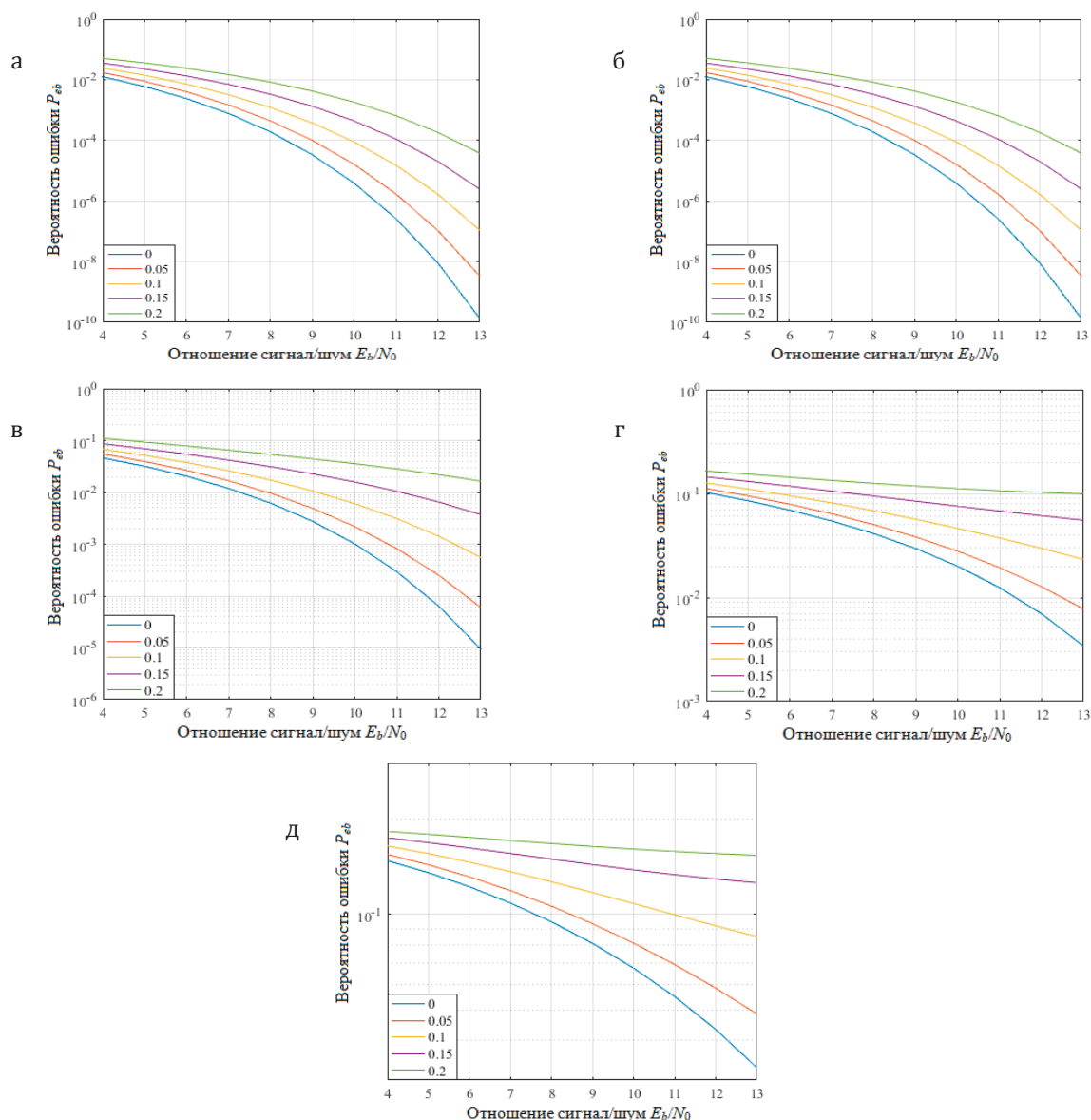


Рис. 12. Зависимость вероятности битовой ошибки $P_{\text{б}}$ от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при статическом смещении тактовых моментов ξ/T_s : а – 2ФМ; б – 4ФМ; в – 8ФМ; г – 16ФМ; д – 32ФМ.

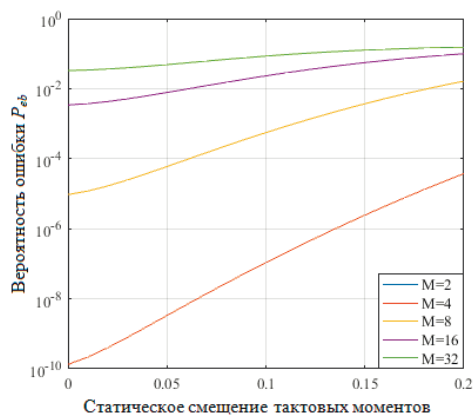


Рис. 13. Зависимость вероятности битовой ошибки $P_{\text{б}}$ от статического смещения тактовых моментов ξ/T_s .

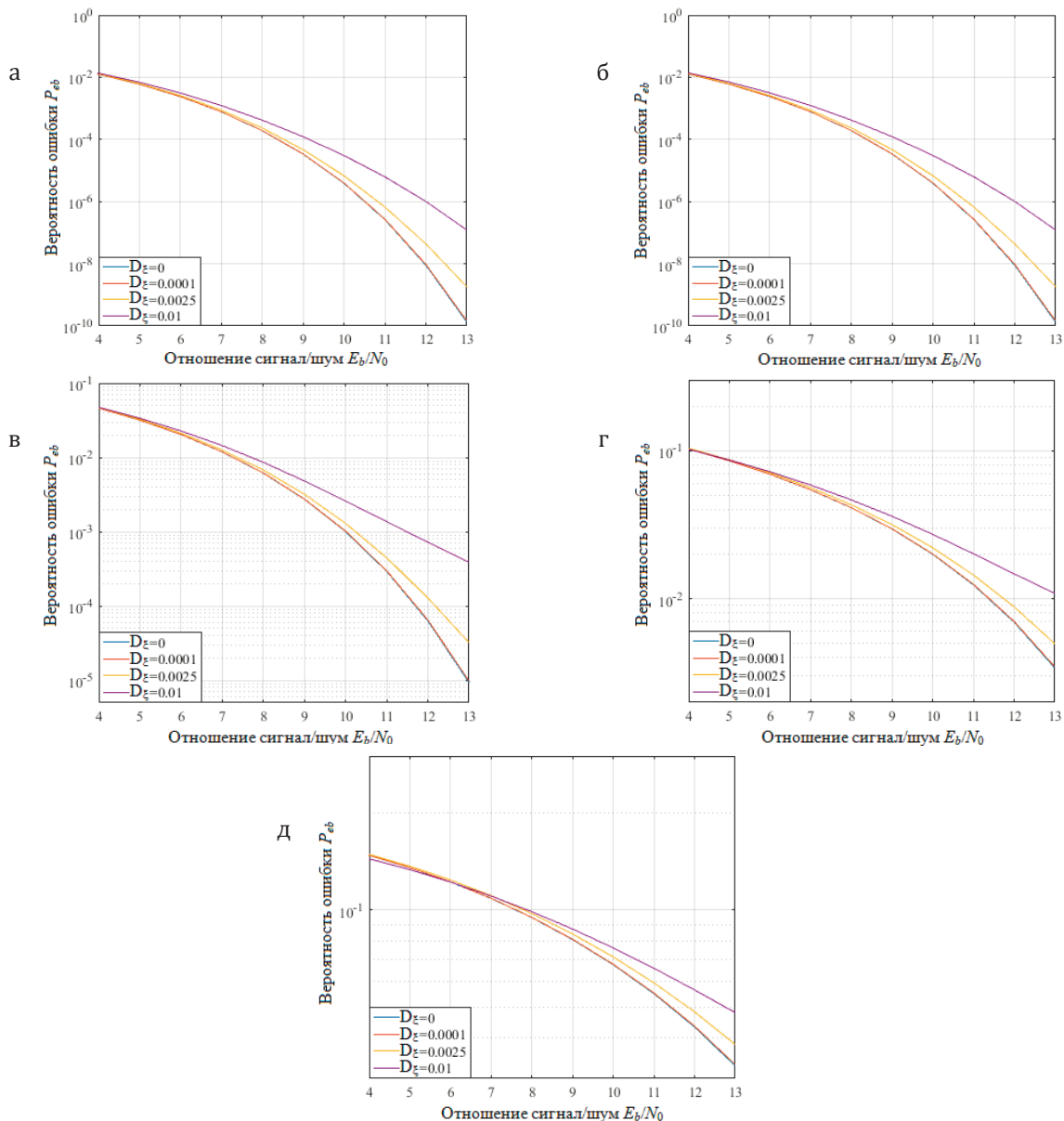


Рис. 14. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при случайных флуктуациях тактовых моментов D_ξ : а – 2ФМ; б – 4ФМ; в – 8ФМ; г – 16ФМ; д – 32ФМ.

Заключение

Проведенное исследование влияния погрешностей синхронизации приемника, а именно, ошибок оценивания частоты и фазы несущей и погрешностей работы блока тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ позволило определить допустимые отклонения этих параметров от номинальных значений. Так, допустимыми значениями смещения частоты опорных колебаний можно считать величину $\Delta\omega T_s$ порядка 0.05, допустимое значение неточности оценки фазы несущей зависит от позиционности M и изменяется от $\pi/36 - \pi/72$ для 2ФМ до $\pi/180$ для 32ФМ, а допустимое значение временного смещения тактовых моментов лежит в интервале 3–5% от T_s .

Список литературы:

1. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
2. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи // *Наукоемкие технологии*. 2018. № 11. С. 32–38. <https://doi.org/10.18127/j19998465-201811-06>
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. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12>
4. Артеменко А.А., Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в М-КАМ системах передачи данных // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2007. № 2. С. 81–87.
5. Мирошникова Н.Е. Влияние ошибок синхронизации на прием цифровых сигналов // *T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт*. 2013. № 9. С. 112–114.
6. Бумагин А.В., Калашников К.С., Прудников А.А., Стешенко В.Б. Синтез алгоритмов частотной и временной синхронизации для приема OFDM-сигналов в стандарте DVB-T // *Цифровая обработка сигналов*. 2009. № 1. С. 42–47.
7. Таран А.Н. О методах синхронизации в одночастотных сетях // *T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт*. 2013. № 8. С. 150–152.
8. Гоголева С.А., Демидов А.Я., Каратаева Н.А., Майков Д.Ю., Ворошилин Е.П. Оценка влияния частотной расстройки на вероятность битовой ошибки в OFDMA системах связи // *Доклады ТУСУР*. 2011. № 2. С. 45–48.
9. Adaickalavan Meiyappan, Pooi-Yuen Kam, Hoon Kim. On Decision Aided Carrier Phase and Frequency Offset Estimation in Coherent Optical Receivers // *J. Lightwave Technology*. 2013. V. 31. № 13. P. 2055–2069. <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-31-13-2055>
10. Парамонов А.А., Бородин А.О. Метод оценки влияния рассинхронизации в приемниках сигналов МНФ на их помехоустойчивость // 3-ая Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA–2000). Москва, 29 ноября – 1 декабря 2000 г. URL: <http://www.autex.spb.ru/>
11. Hanzo L., Ng S.X., Keller T., Webb W.T. Quadrature Amplitude Modulation: Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems. New York, USA: Wiley-IEEE Press Publ., 2004. 1136 p.

References:

1. Proakis J.G. Digital Communications. 4th Edition. McGraw-Hill, New York, 2001.
2. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase-shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii* [Science Intensive Technologies]. 2018;11:32-38 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j19998465-201811-06>
3. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung. Analysis of noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying under the influence of scanning interference. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal]. 2018;6(6):5-12 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12>
4. Artemenko A.A., Maltsev A.A., Rubtsov A.E. Effect of the carrier-phase estimation error on the bit-error rate in M-QAM data transmission systems. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of the N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod University]. 2007;2:81-87 (in Russ.).
5. Miroshnikova N.E. Phase and timing synchronization error influence on digital receiver properties. *T-Comm: Telekommunikatsii i Transport* [T-Comm: Telecommunications and Transportation]. 2013;9:112-114 (in Russ.).
6. Bumagin A.V., Kalashnikov K.S., Prudnikov A.A., Steshenko V.B. Synthesis of frequency and time synchronization algorithms for receiving OFDM signals in the DVB-T standard. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. 2009;1:42-47 (in Russ.).
7. Taran A.N. On synchronization methods in single-frequency networks. *T-Comm: Telekommunikatsii i Transport* [T-Comm: Telecommunications and Transportation]. 2013;8:150-152 (in Russ.).
8. Gogoleva S.A., Demidov A.Y., Karataeva N.A., Maykov D.U., Voroshilin E.P. Assessing the impact of frequency detuning on the probability of bit error in the OFDMA communication systems. *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University]. 2011;2:45-48 (in Russ.).
9. Adaickalavan Meiyappan, Pooi-Yuen Kam, Hoon Kim. On decision aided carrier phase and frequency offset estimation in coherent optical receivers. *J. Lightwave Technol.* 2013;31(13):2055-2069. <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-31-13-2055>

10. Paramonov A.A., Borodin A.O. The method of estimation of noisaproof feareure on demudulator mistiming condition. *3rd International Conference "Digital Signal Processing and its Applications" (DSPA-2000)*. Moscow, November 29 – December 1, 2000. URL: <http://www.autex.spb.ru/> (in Russ.).

11. Hanzo L., Ng S.X., Keller T., Webb W.T. *Quadrature Amplitude Modulation: Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems*. New York, USA: Wiley-IEEE Press Publ., 2004. 1136 p.

Об авторах:

Куликов Геннадий Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>. E-mail: kulikov@mirea.ru

Нгуен Ван Зунг, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Gennady V. Kulikov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>. E-mail: kulikov@mirea.ru

Nguyen Van Dung, Postgraduate Student of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).