



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние погрешностей системы синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией

Г.В. Куликов^{1, @},
С.Х. Данг¹,
А.Г. Куликов²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² CGF, Москва, 105082 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Резюме

Цели. Актуальной задачей современных систем радиосвязи и телевидения является повышение качества и количества передаваемой информации. Применение многопозиционных сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией (АФМ) 16-АФМ и 32-АФМ в системах цифрового спутникового телевидения стандарта DVB-S2 обеспечило возможность передачи на 30% больше данных в тех же полосах частот по сравнению с предыдущим стандартом DVB-S. Такое увеличение скорости передачи информации определило более жесткие требования к аппаратному обеспечению этих систем. Для приема сигналов АФМ, как и для многих других систем, использующих когерентную обработку сигналов, важную роль играет стабильность работы систем синхронизации. Наличие погрешностей в их работе может значительно снизить качество приема информации. Цель работы – анализ влияния погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией с кольцевой структурой сигнального созвездия.

Методы. Использованы методы статистической радиотехники и теории оптимального приема сигналов.

Результаты. Проведен анализ влияния погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией с кольцевой структурой сигнального созвездия. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от величины фазового сдвига и смещения тактовых моментов. Проведено сравнение влияния погрешностей синхронизации на качество приема с известными результатами для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ).

Выводы. Установлено, что при допустимых энергетических потерях не более 1 дБ критической фазовой погрешностью можно считать величину 2–3 градуса, а критическая тактовая погрешность составляет 3–4%. Когерентный приемник сигналов АФМ более чувствителен к фазовой погрешности опорных колебаний, чем аналогичный приемник сигналов КАМ, а тактовые погрешности одинаково сказываются на качестве приема этих сигналов.

Ключевые слова: амплитудно-фазовая манипуляция, синхронизация, фазовая погрешность, тактовая погрешность, помехоустойчивость

• Поступила: 23.11.2022 • Доработана: 14.12.2022 • Принята к опубликованию: 03.03.2023

Для цитирования: Куликов Г.В., Данг С.Х., Куликов А.Г. Влияние погрешностей системы синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):30–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-30-37>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Effect of synchronization system errors on the reception noise immunity of amplitude-phase shift keyed signals

Gennady V. Kulikov ^{1, @},
Xuan Khang Dang ¹,
Alexey G. Kulikov ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² CGF, Moscow, 105082 Russia

@ Corresponding author, e-mail: kulikov@mirea.ru

Abstract

Objectives. An urgent task in the context of modern radio and television systems is to improve the quality and quantity of transmitted information. For example, the use of multiple amplitude-phase shift keyed (APSK) signals—16-APSK and 32-APSK—in digital satellite television systems of the Digital Video Broadcasting–Satellite2 (DVB-S2) standard made it possible to transmit 30% more data in the same frequency bands in comparison with the previous DVB-S standard. Such increases in information transmission rates impose more stringent requirements on hardware. An important role in the reception of APSK signals, as well as the signals of other coherent signal processing systems, is played by the stability of synchronization systems. The presence of operational errors can significantly reduce the quality of information reception. The aim of the present work was to analyze the effect of phase and clock synchronization errors on the reception noise immunity of APSK signals with a ring signal constellation structure.

Methods. The study used statistical radio engineering methods informed by optimal signal reception theory.

Results. The effect of phase and clock synchronization errors on the reception noise immunity of APSK signals having a signal constellation ring structure is analyzed. The dependencies of the bit error probability on the magnitude of the phase shift and the clock offset were characterized. The effect of synchronization errors on reception quality were compared with the known results for quadrature amplitude modulation (QAM) signals.

Conclusions. At an acceptable energy loss of no more than 1 dB, the critical phase error can be considered as 2°–3°, while the critical clock error is 3–4%. A coherent receiver of APSK signals is more sensitive to the phase error of reference oscillations than a similar receiver of QAM signals, whereas clock errors have the same effect on the reception quality of these signals.

Keywords: amplitude-phase shift keying, synchronization, phase error, clock error, noise immunity

• Submitted: 23.11.2022 • Revised: 14.12.2022 • Accepted: 03.03.2023

For citation: Kulikov G.V., Dang X.Kh., Kulikov A.G. Effect of synchronization system errors on the reception noise immunity of amplitude-phase shift keyed signals. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):30–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-30-37>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества и количества передаваемой информации является актуальной задачей для современных систем радиосвязи и телевидения. Так, применение многопозиционных сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией (АФМ) 16-АФМ и 32-АФМ в системах нового поколения стандарта спутникового телевидения DVB-S2 позволило передавать на 30% больше данных в тех же полосах частот по сравнению с предыдущим стандартом DVB-S¹ [1]. Такое увеличение скорости передачи информации определило более жесткие требования к аппаратному обеспечению этих систем. Для приема сигналов АФМ, как и для многих других систем, использующих когерентную обработку сигналов, важную роль играет стабильность работы систем синхронизации. Наличие погрешностей в их работе может значительно снизить качество приема информации. В [2–12] проанализировано влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов с квадратной формой сигнала созвездия (сигналы КАМ). В данной статье проведен анализ влияния погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией с кольцевой структурой сигнала созвездия.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Модель сигнала АФМ на длительности тактового интервала T_s зададим следующим образом:

$$S_i(t) = A_{cp} r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i), t \in (0, T_s], i = \overline{0, M-1}, \quad (1)$$

где A_{cp} – средняя амплитуда сигнала; ω_0 – несущая частота; r_i и φ_i – величины, определяющие амплитуду и фазу сигнальной посылки; M – позиционность сигнала.

Работу многоканального когерентного приемника АФМ-сигналов (рис. 1) [13, 14] рассмотрим при наличии белого гауссовского шума $n(t)$ с параметрами:

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

где N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума; δ – дельта-функция; t_1, t_2 – моменты времени.

Корреляторы приемника вычисляют интегралы свертки

$$J_i = \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{opi}(t) dt, i = \overline{0, M-1} \quad (2)$$

принимаемого процесса $x(t) = s_i(t) + n(t)$ с опорными сигналами $s_{opi}(t)$. Сравнение полученных значений J_i и их комбинаций с порогами, заложенными в решающем устройстве (блоке выбора максимума), позволяет определить передаваемый канальный символ.

Вероятность ошибочного приема любого m -го канального символа находится при условии $J_m > \{J_i + \delta_{mi}\}; i \neq m; i, m = \overline{0, M-1}$, а именно:

$$P_{esm} = 1 - \prod_{\substack{i=0 \\ m \neq i}}^{M-1} p(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m, \quad (3)$$

где $p(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m$ – вероятность того, что выходное значение m -го коррелятора больше выходного значения любого другого i -го коррелятора при условии,

что передавался m -й символ; $\delta_{mi} = \frac{E_{s_m} - E_{s_i}}{N_0} =$

$= \frac{E_{scp}}{N_0} (r_m^2 - r_i^2) = \frac{E_b \log_2 M}{N_0} (r_m^2 - r_i^2)$ – порог принятия решения. Здесь E_b – средняя энергия сигнала, приходящаяся на 1 бит информации; E_{s_m}, E_{s_i} – энергии m -й и i -й сигнальных посылок; E_{scp} – среднее значение энергии сигнальных посылок.

Вероятности $p(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m$ можно рассчитать, определив статистические характеристики распределений случайных процессов J_i и их линейных комбинаций – математические ожидания m_{mi} и дисперсии D_{mi} [15]:

$$p(I_m - I_i > \delta_i)|_m = 1 - Q\left(\frac{m_{mi}}{\sqrt{D_{mi}}}\right),$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt, \quad (4)$$

где $Q(x)$ – это Q -функция.

¹ DVB. <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>. Дата обращения 20.12.2022. / Accessed December 20, 2022.

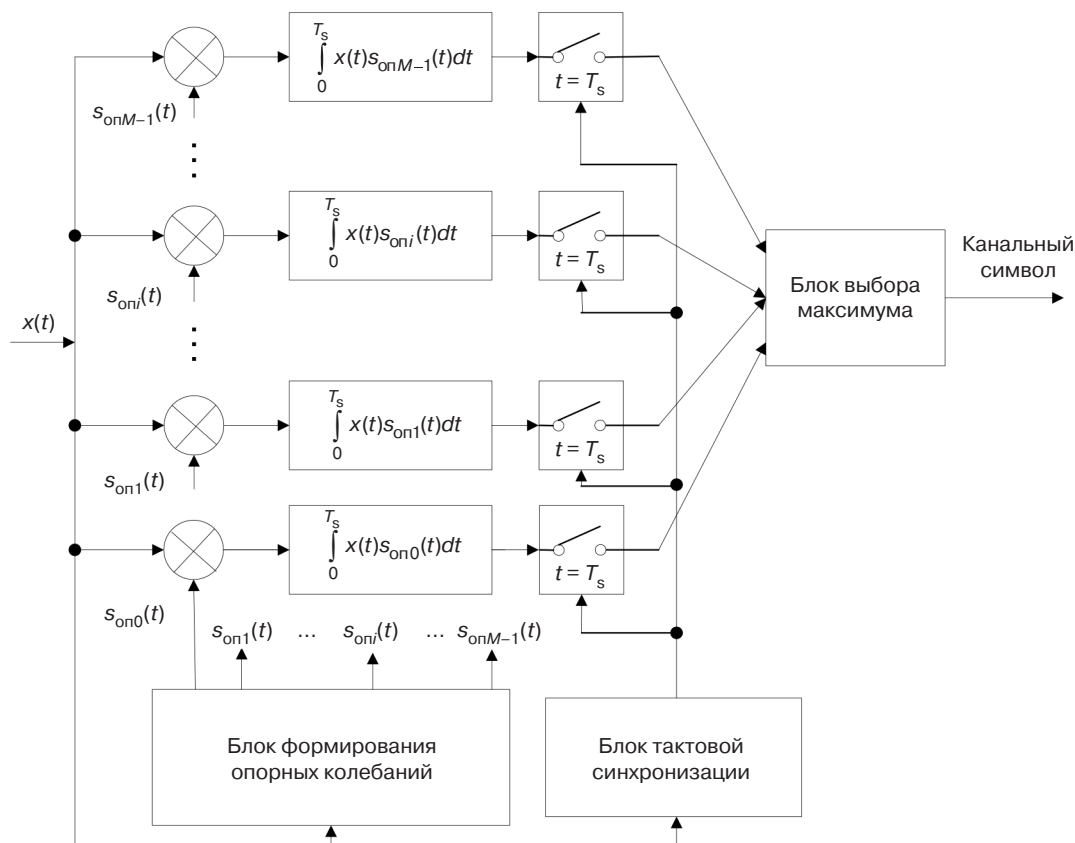


Рис. 1. Структурная схема многоканального когерентного приемника АФМ-сигналов

Для нахождения вероятности битовой ошибки при использовании кодирования Грея можно воспользоваться соотношением [13]:

$$P_{eb} = \frac{P_{es}}{\log_2 M}. \quad (5)$$

Наличие погрешностей в формировании опорных сигналов $s_{oni}(t)$ вызывает погрешности в вычислении корреляционных интегралов (2) и, как следствие, увеличение вероятностей ошибок (3) и (5).

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ БЛОКА ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Фазовая погрешность блока формирования опорных колебаний $s_{oni}(t)$ вызвана дополнительным фазовым сдвигом ϕ , например, за счет неидеальности характеристик системы автоподстройки:

$$s_{oni}(t) = A_{cp} r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \phi), \quad i = \overline{0, M-1}.$$

Пример влияния такого сдвига на форму сигнального созвездия для сигнала 16-АФМ показан на рис. 2.

В этом случае математические ожидания m_{mi} и дисперсии D_{mi} , входящие в (4), имеют вид:

$$m_{mi} = \frac{E_{scp}}{N_0} (2r_m^2 \cos \phi - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i - \phi) - r_m^2 + r_i^2),$$

$$D_{mi} = \frac{2E_{scp}}{N_0} (r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)).$$

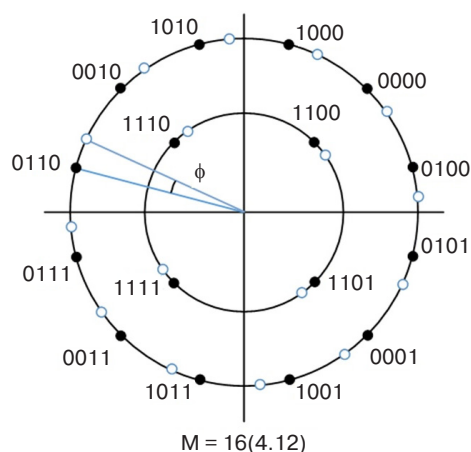
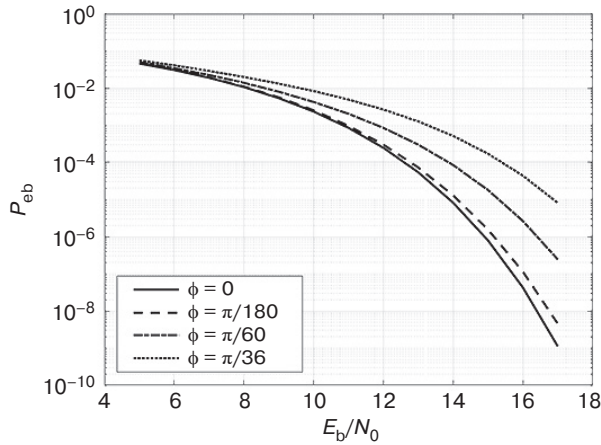
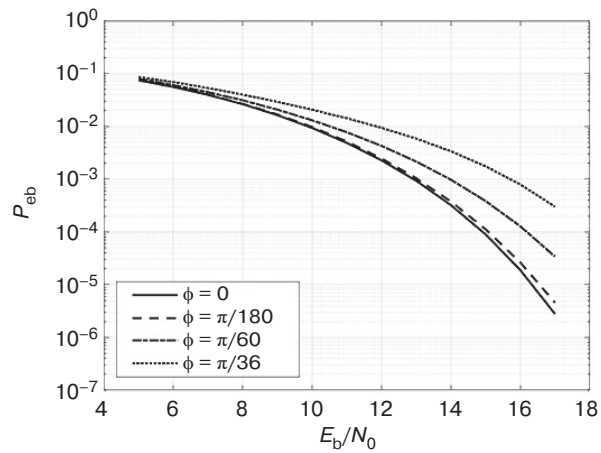


Рис. 2. Изменение сигнального созвездия 16-АФМ при наличии фазового сдвига ϕ

Расчет вероятности битовой ошибки по формулам (3)–(5) для сигналов 16-АФМ и 32-АФМ дает следующие результаты (рис. 3, 4).



(a)



(б)

Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при фазовом сдвиге ϕ опорных колебаний: (а) 16-АФМ; (б) 32-АФМ

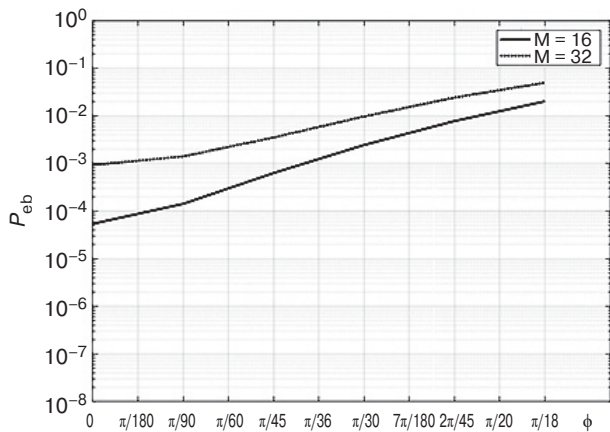


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки от фазового сдвига опорных колебаний ϕ ($E_b/N_0 = 13$ дБ)

Видно, что при наличии небольшого фазового сдвига $\phi < \pi/90$ (2 градуса) вероятность битовой ошибки снижается незначительно, но по мере его увеличения помехоустойчивость заметно ухудшается, и при $\phi > \pi/45 = 4^\circ$ величина P_{eb} может

увеличиться на порядок. Расчеты показывают, что для $P_{eb} = 10^{-4}$ при $\phi = \pi/36 = 5^\circ$ это эквивалентно энергетическим потерям около 2.5 дБ, если $M = 16$, и 3.0 дБ, если $M = 32$.

Сравнение полученных результатов с результатами, полученными в [5, 9] для сигналов КАМ, показывает, что при одинаковой позиционности когерентный прием сигналов с квадратной формой сигнала несколько более устойчив к фазовым погрешностям опорных колебаний, чем для сигналов с кольцевой формой. Так, например, при $\phi = \pi/60 = 3^\circ$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ энергетические потери составляют 1.0 дБ и 1.2 дБ, соответственно.

ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ТАКОВЫХ МОМЕНТОВ В БЛОКЕ ТАКОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Погрешности в работе блока тактовой синхронизации могут приводить к сдвигу на некоторое значение ξ во времени тактовых импульсов, определяющих пределы интегрирования в (2).

В этом случае вычисление интегралов свертки

$$J_i = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s + \xi} x(t)r_i \cos(\omega_0 t + \phi_i) dt$$

осуществляется со следующими параметрами принимаемых и опорных сигналов:

$$s(t) = \begin{cases} A_{cp}r_i \cos(\omega_0 t + \phi_i), & t \in (\xi, T_s), \\ A_{cp}r_j \cos(\omega_0 t + \phi_j), & t \in [T_s, T_s + \xi), \end{cases}$$

$$s_{опi}(t) = A_{cp}r_i \cos(\omega_0 t + \phi_i), t \in (\xi, T_s + \xi),$$

где индекс j относится к соседнему каналному символу.

В этом случае математические ожидания m_{mi} и дисперсии D_{mi} , входящие в (4), примут вид:

$$\begin{aligned} m_{mi} = & \frac{2E_{scp}}{N_0} r_m \left(1 - \frac{\xi}{T_s}\right) (r_m - r_i \cos(\phi_m - \phi_i)) + \\ & + \frac{2E_{scp}}{N_0} r_j \frac{\xi}{T_s} (r_m \cos(\phi_j - \phi_m) - \\ & - r_i \cos(\phi_j - \phi_i)) - \frac{E_{scp}}{N_0} (r_m^2 - r_i^2), \end{aligned}$$

$$D_{mi} = \frac{2E_{scp}}{N_0} (r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\phi_m - \phi_i)).$$

Зависимости вероятности битовой ошибки при различных значениях тактового смещения показаны на рис. 5 и 6.

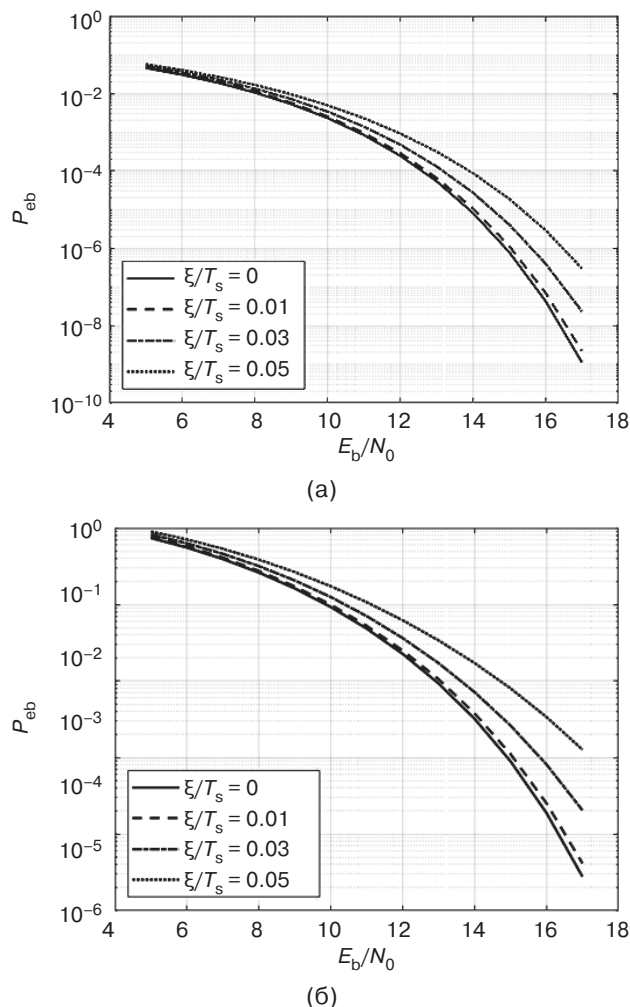


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при смещении тактовых моментов ξ/T_s : (а) 16-АФМ; (б) 32-АФМ

Видно, что большая погрешность системы тактовой синхронизации заметно снижает помехоустойчивость приема сигналов АФМ. Так, для $P_{eb} = 10^{-4}$ уже при $\xi/T_s = 0.05$ (или 5%) эквивалентные энергетические потери составляют около 1.5 дБ, если $M = 16$, и 2.0 дБ, если $M = 32$.

Аналогичный анализ для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией, выполненный в [5, 9], показал, что тактовые погрешности одинаково сказываются на качестве приема сигналов КАМ и АФМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minoli D. *Innovations in satellite communications and satellite technology: The industry implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. New York: John Wiley & Sons; 2015. 448 p. ISBN 978-1-118-98408-6

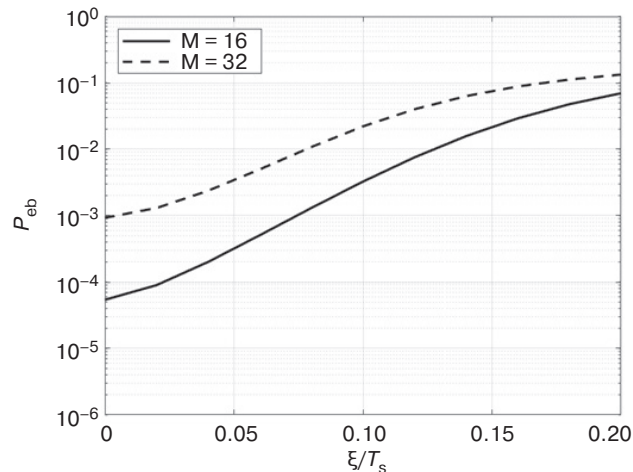


Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки от смещения тактовых моментов ξ/T_s ($E_b/N_0 = 13$ дБ)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Наличие фазового сдвига опорных колебаний при когерентном приеме сигналов АФМ может привести к заметному ухудшению помехоустойчивости. При допустимых энергетических потерях не более 1 дБ критической фазовой погрешностью можно считать величину 2–3 градуса.
2. Наличие погрешности в работе блока тактовой синхронизации при когерентном приеме сигналов АФМ также может заметно снизить помехоустойчивость. При допустимых энергетических потерях не более 1 дБ критической тактовой погрешностью можно считать величину 3–4%.
3. Когерентный приемник сигналов АФМ более чувствителен к фазовой погрешности опорных колебаний, чем аналогичный приемник сигналов КАМ, а тактовые погрешности одинаково сказываются на качестве приема этих сигналов.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

REFERENCES

1. Minoli D. *Innovations in satellite communications and satellite technology: The industry implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. New York: John Wiley & Sons; 2015. 448 p. ISBN 978-1-118-98408-6

2. Савищенко Н.В. Помехоустойчивость когерентного приема многопозиционных сигналов КАМ и ФМ при неидеальной синхронизации. *Информационно-управляющие системы*. 2010;1(44):53–63.
3. 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;2:81–87.
4. Куликов Г.В., Ван Зунг Н. Влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ. *Russ. Technol. J.* 2019;7(5):47–61. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
5. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Баталов Е.В. Влияние погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Russ. Technol. J.* 2021;9(2):35–43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>
6. Довбня В.Г., Севрюков А.Е. Влияние качества функционирования системы тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема КАМ-сигналов. *Телекоммуникации*. 2016;4:43–47.
7. Saeedi-Sourck H., Sadri S., Wu Y., Bergmans J.W.M., Farhang-Boroujeny B. Sensitivity analysis of offset QAM multicarrier systems to residual carrier frequency and timing offsets. *Signal Process.* 2011;91(7):1604–1612. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.12.019>
8. Chung W., Kim B., Choi M., Nam H., Yu H., Choi S., Hong D. Synchronization error in QAM-based FBMC system. In: *2014 IEEE Military Communications Conference*. 2014. P. 699–705. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2014.122>
9. Kulikov G.V., Van Dung N., Kulagin V.P., Lelyukh A.A. Influence of synchronization errors on the noise immunity of receiving multi-position M-PSK and M-QAM signals. In: *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020:9166034. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166034>
10. Teng K., Zhang Y., Yuan X., Liu Q. Implementation of a novel M-QAM OFDM timing synchronization method with FSO RoF system. In: *2019 7th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN)*. 2019. P. 48–52. <https://doi.org/10.1109/ICICN.2019.8834953>
11. Huang Y., Song Q., Wang S., Jamalipour A. Symbol error rate analysis for M-QAM modulated physical-layer network coding with phase errors. In: *2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications – (PIMRC)*. 2012. P. 2003–2008. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2012.6362683>
12. Matta M., Cardarilli G.C., Di Nunzio L., Fazzolari R. A reinforcement learning-based QAM/PSK symbol synchronizer. In: *IEEE Access*. 2019;7:124147–124157. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938390>
13. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
14. Fuqin Xiong. *Digital modulation techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House; 2006. 1039 p.
2. Savishchenko N.V. Noise immunity of coherent reception of multi-position QAM and PSK signals in the case of non-ideal synchronization. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2010;1(44):53–63 (in Russ.).
3. 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 = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod*. 2007;2:81–87 (in Russ.).
4. Kulikov G.V., Van Dung N. Influence of synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of M-PSK signals. *Russ. Technol. J.* 2019;7(5):47–61 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
5. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Batalov E.V. Influence of phase and clock synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation. *Russ. Technol. J.* 2021;9(2):35–43 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>
6. Dovbnya V.G., Sevryukov A.E. Influence of performance quality of clock synchronization system on noise immunity of QAM signal reception. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2016;4:43–47 (in Russ.).
7. Saeedi-Sourck H., Sadri S., Wu Y., Bergmans J.W.M., Farhang-Boroujeny B. Sensitivity analysis of offset QAM multicarrier systems to residual carrier frequency and timing offsets. *Signal Process.* 2011;91(7):1604–1612. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.12.019>
8. Chung W., Kim B., Choi M., Nam H., Yu H., Choi S., Hong D. Synchronization error in QAM-based FBMC system. In: *2014 IEEE Military Communications Conference*. 2014. P. 699–705. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2014.122>
9. Kulikov G.V., Van Dung N., Kulagin V.P., Lelyukh A.A. Influence of synchronization errors on the noise immunity of receiving multi-position M-PSK and M-QAM signals. In: *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020:9166034. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166034>
10. Teng K., Zhang Y., Yuan X., Liu Q. Implementation of a novel M-QAM OFDM timing synchronization method with FSO RoF system. In: *2019 7th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN)*. 2019. P. 48–52. <https://doi.org/10.1109/ICICN.2019.8834953>
11. Huang Y., Song Q., Wang S., Jamalipour A. Symbol error rate analysis for M-QAM modulated physical-layer network coding with phase errors. In: *2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications – (PIMRC)*. 2012. P. 2003–2008. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2012.6362683>
12. Matta M., Cardarilli G.C., Di Nunzio L., Fazzolari R. A reinforcement learning-based QAM/PSK symbol synchronizer. In: *IEEE Access*. 2019;7:124147–124157. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938390>
13. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. McGraw-Hill; 2001. 1002 p.

15. Тихонов В.И. *Статистическая радиотехника*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь; 1982. 624 с.
14. Fuqin Xiong. *Digital modulation techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House; 2006. 1039 p.
15. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika (Statistical radio engineering)*. 2nd ed. Moscow: Radio i svyaz'; 1982. 624 p. (in Russ.).

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, SPIN-код РИНЦ 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Данг Суан Ханг, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dangxuankhang147@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3372-7172>

Куликов Алексей Геннадьевич, сотрудник компании CGF (105082, Россия, Москва, Бакунинская улица, д. 73, стр.1). E-mail: onemoreuser@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8241-9619>

About the authors

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, RSCI SPIN-code 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Xuan Khang Dang, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dangxuankhang147@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3372-7172>

Alexey G. Kulikov, CGF employee (73/1, Bakuninskaya ul., Moscow, 105082 Russia). E-mail: onemoreuser@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8241-9619>