Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391.072

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией

Г.В. Куликов[@],
А.А. Лелюх,
Е.В. Баталов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме: Сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) применяются для высокоскоростной передачи информации во многих радиосистемах, в частности, в системах цифрового телевидения и в перспективе – в системах информационного обмена для аэромобильных абонентов. В любом когерентном приемнике, входящем в состав приемно-передающей аппаратуры, присутствует блок синхронизации, который строится на основе систем ФАПЧ. Однако любая система ФАПЧ имеет погрешности, которые приводят к неточностям формирования опорных колебаний и тактовых сигналов. Эти погрешности, в свою очередь, вызывают ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут приводить к возрастанию вероятности ошибки. В работе исследуется влияние погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Методами статистической радиотехники получены параметры распределений процессов в приемнике и проведена оценка вероятности битовой ошибки. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от величины фазовой погрешности формирования опорных колебаний и от величины относительного смещения тактовых моментов, а также от отношения сигнал/шум. Показано, что указанные погрешности могут сильно снижать помехоустойчивость приема, и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается. При допустимой величине энергетических потерь при приеме, равной 0.5 дБ за счет каждой из этих погрешностей, допустимая фазовая погрешность составляет от $\sim 3^\circ$ при $M = 4$ до $\sim 1^\circ$ при $M = 64$, а допустимая погрешность тактовой синхронизации, соответственно, от $\sim 5\%$ при $M = 4$ до $\sim 2\%$ при $M = 64$. Для обеспечения более жестких требований к величине потерь требования к указанным погрешностям существенно возрастают.

Ключевые слова: квадратурная амплитудная модуляция, фаза опорных колебаний, тактовая синхронизация, погрешность, отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 18.09.2020 • Доработана: 21.09.2020 • Принята к опубликованию: 12.11.2020

Для цитирования: Куликов Г.В., Лелюх А.А., Баталов Е.В. Влияние погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):35–43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Influence of phase and clock synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation

Gennady V. Kulikov[@],
Andrey A. Lelyukh,
Evgenii V. Batalov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: kulikov@mirea.ru

Abstract. Signals with quadrature amplitude modulation (QAM) is widely used for high-speed transmission of information in many radio systems and, in particular, in digital television systems. In the receiver, which is part of the transceiver equipment of such systems, there is a block for the formation of reference oscillations and a clock synchronization block. Due to hardware instabilities and propagation conditions, phase and clock errors may occur, which cause additional errors during demodulation of the received signal, and which can significantly impair the noise immunity of the reception. The paper investigates the effect of phase and clock synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of QAM signals. Using the methods of statistical radio engineering, the parameters of the distributions of processes in the receiver are obtained and the probability of bit error is estimated. The dependences of the probability of bit error on the magnitude of the phase error in the formation of the reference oscillations and on the relative displacement of the clock moments, as well as on the signal-to-noise ratio, are obtained. It is shown that these errors can greatly reduce the noise immunity of the reception, and with an increase in the positioning of the signals, this effect increases. If we assume that the admissible reception energy loss is 0.5 dB due to each of these errors, then the allowable phase error is from $\sim 3^\circ$ at $M = 4$ to $\sim 1^\circ$ at $M = 64$, and the allowable clock synchronization error, respectively, is from $\sim 5\%$ at $M = 4$ to $\sim 2\%$ at $M = 64$. To provide more stringent requirements for the magnitude of losses, the requirements for the indicated errors increase significantly.

Keywords: quadrature amplitude modulation, reference oscillation phase, clock synchronization, error, signal-to-noise ratio, bit error probability

• Submitted: 18.09.2020 • Revised: 21.09.2020 • Accepted: 12.11.2020

For citation: 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. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):35–43 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) применяется для высокоскоростной передачи информации во многих радиосистемах, в частности, в системах цифрового телевидения [1–3] и в перспективе – в системах информационного обмена для автомобильных абонентов [4].

В любом когерентном приемнике, входящем в состав приема-передающей аппаратуры, присутствует блок синхронизации, который строится на основе

систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Однако любая система ФАПЧ имеет погрешности, которые приводят к неточностям формирования опорных колебаний и тактовых сигналов. Эти погрешности, в свою очередь, вызывают ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут приводить к возрастанию вероятности ошибки [5–11].

Целью данной работы являлось исследование влияния погрешностей оценивания фазы несущей и погрешностей тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов КАМ.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ КАМ

Сигнал КАМ на длительности канального символа T_s может принимать одно из M возможных значений:

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

$$i = 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

где $A_{cp} = \sqrt{2E_{scp}/T_s}$ – средняя амплитуда сигнала; $E_{scp} = kE_{bcp}$ – энергия канального символа, средняя по всем информационным комбинациям; $k = \log_2 M$, E_{bcp} – средняя энергия, приходящаяся на один бит информации; I_i и Q_i – коэффициенты, определяющие амплитуды квадратурных компонент сигнала; ω_0 – несущая частота.

Рассмотрим работу когерентного приемника сигнала (1), реализующего алгоритм по максимуму правдоподобия. Такой приемник вычисляет M интегралов свертки J_i принимаемого процесса:

$$x(t) = s_i(t) + n(t)$$

со всеми копиями сигнала – опорными колебаниями:

$$J_i = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} x(t)s_{опi}(t)dt.$$

Здесь $n(t)$ – белый гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью мощности N_0 и параметрами

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

Принятие решения в пользу того или иного канального символа осуществляется в результате сравнения интегралов J_i с учетом порогов, пропорциональных полуразности энергий соответствующих посылок m и i :

$$\delta_{mi} = \frac{E_{sm} - E_{si}}{N_0} = \frac{E_{scp}}{N_0} [(I_m^2 + Q_m^2) - (I_i^2 + Q_i^2)].$$

В этом случае вероятности ошибочного приема канального символа и вероятность битовой ошибки (BER) при достаточно большом отношении сигнал/шум [12] с учетом кодирования Грея определяются следующим образом:

$$P_{es} = 1 - \prod_{i=0}^{M-1} p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m, \quad (2)$$

$$BER = P_{eb} = P_{es} / \log_2 M. \quad (3)$$

Неточности оценивания фазы несущей, приводящие к фазовым погрешностям формирования опорных колебаний, и погрешности тактовой синхронизации изменяют статистические параметры распределений на выходах всех корреляторов приемника и, соответственно, влияют на величины вероятностей символьной (2) и битовой (3) ошибки.

Распределения случайных процессов J_i являются нормальными и характеризуются средними значениями m_{mi} и дисперсиями D_{mi} . Следовательно

$$p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m = 1 - \Phi\left(\frac{m_{mi}}{\sqrt{D_{mi}}}\right), \quad (4)$$

$$\text{где } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

А. Влияние неточности оценивания фазы несущей

При наличии неточности работы системы ФАПЧ по фазе несущей частоты все опорные сигналы в схеме когерентного приема КАМ будут иметь некоторый фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ (рис. 1):

$$s_{опi}(t) = I_i \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi) - Q_i \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi),$$

$$i = 0, 1, \dots, M-1.$$

Вычислим средние значения и дисперсии (в качестве примера расчет показан для сигнала с индексом «0»):

$$m_0 = \langle J_0 \rangle = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle \times$$

$$\times (I_0 \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi)) dt =$$

$$= \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) + n(t) \rangle \times$$

$$\times (I_0 \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi)) dt =$$

$$= \frac{A_{cp}^2 T_s (I_0^2 + Q_0^2)}{N_0} \cos \Delta\varphi.$$

$$m_i = \langle J_i \rangle = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle \times$$

$$\times (I_i \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi) - Q_i \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi)) dt =$$

Рис. 1. Пример искажения сигнального созвездия 16КАМ при наличии ошибки оценивания фазы несущего колебания

$$= \frac{A_{\text{ср}}^2 T_s}{N_0} \left((I_0 I_i + Q_0 Q_i) \cos \Delta\varphi - (I_0 Q_i - I_i Q_0) \sin \Delta\varphi \right).$$

$$m_{mi} = m_0 - m_i = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \times$$

$$\times \left((I_0^2 + Q_0^2 - I_0 I_i - Q_0 Q_i) \cos \Delta\varphi + (I_0 Q_i - I_i Q_0) \sin \Delta\varphi \right).$$

$$D_0 = \langle J_0^2 \rangle - \langle J_0 \rangle^2 = \langle J_0^2 \rangle - m_0^2 =$$

$$= \frac{4A_{\text{ср}}^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1) x(t_2) \rangle \times$$

$$\times (I_0 \cos(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi)) \times \\ \times (I_0 \cos(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi)) \times \\ \times dt_1 dt_2 - m_0^2 = m_0^2 + \frac{4A_{\text{ср}}^2}{N_0^2} \times$$

$$\times \frac{N_0}{2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} (I_0 \cos(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi) - \\ - Q_0 \sin(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi)) (I_0 \cos(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi) - \\ - Q_0 \sin(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi)) dt_1 dt_2 - m_0^2 = \\ = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0^2 + Q_0^2).$$

$$D_i = \langle J_i^2 \rangle - \langle J_i \rangle^2 = \langle J_i^2 \rangle - m_i^2 = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_i^2 + Q_i^2).$$

$$M_{0i} = \frac{4A_{\text{ср}}^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1) x(t_2) \rangle \times$$

$$\times (I_0 \cos(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi)) \times$$

$$\times (I_i \cos(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi) - Q_i \sin(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi)) \times \\ \times dt_1 dt_2 - m_0 m_i = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0 I_i + Q_0 Q_i).$$

$$D_{mi} = D_0 + D_i - 2M_{0i} = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0^2 + Q_0^2) +$$

$$+ \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_i^2 + Q_i^2) - \frac{4E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0 I_i + Q_0 Q_i) =$$

$$= \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left((I_0 - I_i)^2 + (Q_0 - Q_i)^2 \right).$$

Подставим выражения для среднего и дисперсии в (2)–(4) и получим зависимости вероятности битовой ошибки BER от параметров: отношения сигнал/шум $\text{SNR} = E_{\text{ср}}/N_0$ (дБ) и фазового сдвига $\Delta\varphi$. При вычислениях необходимо провести перебор всех возможных фазовых и амплитудных состояний сигнала КАМ и учесть нормировку по средней энергии. Для 16КАМ в зависимости от выбора сигнальной точки использованы корректирующие коэффициенты [13] $1/\sqrt{10}$ и $3/\sqrt{10}$, для 32КАМ – $1/\sqrt{20}$, $3/\sqrt{20}$ и $5/\sqrt{20}$, для 64КАМ – $1/\sqrt{42}$, $3/\sqrt{42}$, $5/\sqrt{42}$ и $7/\sqrt{42}$.

Графики зависимостей вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR для $M = 4, 16, 32, 64$ приведены на рис. 2, а от величины фазового сдвига $\Delta\varphi$ – на рис. 3.

Проведенное моделирование работы когерентного приемника при фазовой погрешности формирования опорных колебаний подтвердило правильность теоретических результатов. На рис. 2 дополнительно показаны точки, полученные в результате компьютерного эксперимента.

Из графиков видно, что неточность оценивания фазы несущей и, соответственно, фазовая погрешность формирования опорных колебаний, может сильно снижать помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ, и с увеличением позиционности

Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR при наличии фазовой ошибки формирования опорных колебаний: (а) 4КАМ; (б) 16КАМ; (в) 32КАМ; (г) 64КАМ

Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от фазового сдвига $\Delta\phi$

Рис. 4. Временное рассогласование при статистическом смещении тактовых моментов

сигналов это влияние усиливается. Так, фазовая погрешность $\Delta\phi = 0.15$ радиан ($8,5^\circ$) для $BER = 10^{-2}$ при $M = 4$ вызывает дополнительные энергетические потери около 1 дБ, при $M = 16$ – около 3 дБ, при $M = 32$ – около 5 дБ, а при $M = 64$ – около 9 дБ.

Б. Влияние статического смещения тактовых моментов

Предположим, что тактовая частота в приемнике соответствует номинальной, но все тактовые моменты смещены во времени на одинаковую величину ξ (статическое смещение) (рис. 4).

В этом случае в вычислении интегралов свертки будет использоваться реализация сигнала М-КАМ:

$$s(t) = \begin{cases} A_{cp} (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t); & t \in (\xi, T_s) \\ A_{cp} (I_j \cos \omega_0 t - Q_j \sin \omega_0 t); & t \in [T_s, T_s + \xi) \end{cases}$$

и опорные колебания:

$$s_{\text{опи}}(t) = A_{\text{ср}} (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), t \in (\xi, T_s + \xi).$$

Интегралы свертки будут иметь вид:

$$J_i = \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s + \xi} x(t) s_{\text{опи}}(t) dt.$$

На выходах корреляторов средние значения m_0 и m_i определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} m_0 &= \langle J_0 \rangle = \\ &= \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s + \xi} \langle x(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s} \langle s_0(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin \omega_0 t) dt + \\ &+ \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{T_s}^{T_s + \xi} \langle s_j(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left((I_0^2 + Q_0^2) \left(1 - \frac{\xi}{T_s} \right) + (I_0 I_j + Q_0 Q_j) \frac{\xi}{T_s} \right). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_i &= \langle I_i \rangle = \\ &= \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s + \xi} \langle x(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s} \langle s_0(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t) dt + \\ &+ \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{T_s}^{T_s + \xi} \langle s_j(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left((I_0 I_i + Q_0 Q_i) \left(1 - \frac{\xi}{T_s} \right) + (I_i I_j + Q_i Q_j) \frac{\xi}{T_s} \right). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{mi} &= m_0 - m_i = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left\{ (I_0^2 + Q_0^2 - I_0 I_i - Q_0 Q_i) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\xi}{T_s} [(I_0 - I_j)(I_0 - I_i) + (Q_0 - Q_j)(Q_0 - Q_i)] \right\}. \end{aligned}$$

Дисперсии и смешанные моменты определяются по формулам:

$$\begin{aligned} D_0 &= \langle J_0^2 \rangle - \langle J_0 \rangle^2 = \\ &= \langle J_0^2 \rangle - m_0^2 = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0^2 + Q_0^2), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_i &= \langle J_i^2 \rangle - \langle J_i \rangle^2 = \\ &= \langle J_i^2 \rangle - m_i^2 = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_i^2 + Q_i^2), \end{aligned}$$

$$M_{0i} = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0 I_i + Q_0 Q_i).$$

$$D_{mi} = D_0 + D_i - 2M_{0i} = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left((I_0 - I_i)^2 + (Q_0 - Q_i)^2 \right).$$

Подставив полученные выражения в (2)–(4), получим зависимости вероятности битовой ошибки BER от параметров: отношения сигнал/шум $\text{SNR} = E_{\text{ср}}/N_0$ (дБ) и величины относительного смещения тактовых моментов ξ/T_s . При вычислениях, как и ранее, проведен перебор всех возможных фазовых и амплитудных состояний сигнала КАМ и учтена нормировка по средней энергии.

Соответствующие графики для $M = 4, 16, 32, 64$ приведены на рис. 5 и 6.

Проведенное моделирование работы когерентного приемника при погрешностях работы системы тактовой синхронизации подтвердило правильность теоретических результатов. На рис. 5 дополнительно показаны точки, полученные в результате компьютерного эксперимента.

Из приведенных графиков видно, что смещение тактовых моментов также сильно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Величина относительного смещения всего в 3% ($\xi/T_s = 0.03$) для $\text{BER} = 10^{-2}$ при $M = 4$ вызывает энергетические потери около 0.4 дБ, при $M = 16$ – около 0.6 дБ, при $M = 32$ – около 0.8 дБ, а при $M = 64$ – более 1 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование влияния фазовых погрешностей при формировании опорных колебаний и погрешностей тактовой синхронизации при когерентном приеме сигналов КАМ позволяет сделать следующие выводы:

1. Указанные погрешности систем фазовой и тактовой синхронизации могут сильно снижать помехоустойчивость приема, и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается.
2. Если допустить величину энергетических потерь при приеме, равную 0.5 дБ за счет каждой из этих погрешностей, то для $\text{BER} = 10^{-2}$ допустимая фазовая погрешность $\Delta\phi$ должна быть от $\sim 3^\circ$ при $M = 4$ до $\sim 1^\circ$ при $M = 64$, а допустимая погрешность тактовой синхронизации ξ/T_s , соответственно, от $\sim 5\%$ при $M = 4$ до $\sim 2\%$ при $M = 64$.

Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR при наличии смещения тактовых моментов: (а) 4КАМ; (б) 16КАМ; (в) 32КАМ; (г) 64КАМ

Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от величины смещения тактовых моментов ξ/T_s

3. Для обеспечения более жестких требований к величине потерь и величине BER требования к указанным погрешностям существенно возрастают.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digital Video Broadcasting (DVB). Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1. S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-1. March 2015. 115 p. URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2. S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-2. March 2015. 183 p. URL: <https://dvb.org/?standard=dvb-s2x-implementation-guidelines>
3. DVB. URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>
4. Нестеров А.В., Лелюх А.А., Гавриков Н.С., Куликов Г.В. Оценка энергетических характеристик радиолиний перспективных систем спутникового широкополосного доступа для аэромобильных абонентов. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.11>
5. Шахтарин Б.И., Иванов А.А., Кобылкина П.И., Рязанова М.А. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации. М.: Горячая линия – Телеком; 2011. 278 с. ISBN 978-5-99121-0177-3
6. Шахтарин Б.И. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации. М.: Гелиос АРВ; 2007. 256 с. ISBN 978-5-85438-174-1
7. Боев Н.М. Синхронизация цифровых систем связи по сигналам спутниковых радионавигационных систем. URL: <https://uav-siberia.com/news/sinkhronizatsiya-tsifrovyykh-sistem-svyazi-po-signalam-sputnikovykh-radionavigatsionnykh-sistem/>
8. Артеменко А.А., Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в m-КАМ системах передачи данных. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2007;2:81–87.
9. Пастухов А.С., Иванов Ю.А., Малышев С.И. Оценка вероятности битовых ошибок в системах связи 4G. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2009;5(4):28–34.
10. Мирошникова Н.Е. Влияние ошибок синхронизации на прием цифровых сигналов. *T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт*. 2013;9:112–114.
11. Куликов Г.В., Ван Зунг Нгуен. Влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ. *Российский технологический журнал*. 2019;7(5):47–61. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
12. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь; 2000. 800 с. ISBN 5-256-01434-X

REFERENCES

1. Digital Video Broadcasting (DVB). Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1. S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-1. March 2015. 115 p. URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2. S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-2. March 2015. 183 p. URL: <https://dvb.org/?standard=dvb-s2x-implementation-guidelines>
3. DVB. URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>
4. Nesterov A.V., Lelyukh A.A., Gavrikov N.S., Kulikov G.V. Assessment of energy characteristics of radio lines of perspective systems of satellite broadband access for airmobile subscribers. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2019;1 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.11>
5. Shakhtarin B.I., Ivanov A.A., Kobylkina P.I., Ryazanova M.A. *Sinkhronizatsiya v radiosvyazi i radionavigatsii (Synchronization in radio communication and radio navigation)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2011. 256 p. (in Russ.). ISBN 978-5-99121-0177-3
6. Shakhtarin B.I. *Sinkhronizatsiya v radiosvyazi i radionavigatsii (Synchronization in radio communication and radio navigation)*. Moscow: Gelios ARV; 2007. 256 p. (in Russ.). ISBN 978-5-85438-174-1
7. Boev N.M. *Sinkhronizatsiya tsifrovyykh sistem svyazi po signalam sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem (Synchronization of digital communication systems using signals from satellite radio navigation systems)*. URL: <https://uav-siberia.com/news/sinkhronizatsiya-tsifrovyykh-sistem-svyazi-po-signalam-sputnikovykh-radionavigatsionnykh-sistem/>
8. 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 Nizhni Novgorod*. 2007;2:81–87 (in Russ.).
9. Pastukhov A.S., Ivanov Yu.A., Malyshev S.I. Bit error probability estimation in 4G communication systems. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and Data processing Facilities and systems*. 2009;5(4):28–34 (in Russ.).
10. Miroshnikova N.E. Phase and timing synchronization error on digital receiver properties. *T-Comm: Telekommunikatsii i Transport = T-Comm: Telecommunications and Transportation*. 2013;9:112–114 (in Russ.).
11. Kulikov G.V., Van Dung N. Influence of synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of

13. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
- 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>
12. Proakis J. *Digital communications*. 5th ed. McGraw-Hill Comp.; 2008. 1150 p. [Proakis J. *Tsifrovaya svyaz'*. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 800 p. ISBN 5-256-01434-X]
13. Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Interference immunity of reception of signals with quadrature amplitude shift keying in the presence of harmonic interference. *Zhurnal radioelektroniki* = *Journal of Radio Electronics*. 2018;11 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., 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). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Лелюх Андрей Александрович, 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). E-mail: a.lel@mail.ru.

Баталов Евгений Вячеславович, студент Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: evgenijbatalov@yandex.ru.

About the authors

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

Andrey A. Lelyukh, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: a.lel@mail.ru.

Evgenii V. Batalov, Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: evgenijbatalov@yandex.ru.