

Метод определения влияния дестабилизирующих факторов цифровых фильтров на многокритериальный синтез средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств

И. Г. Бабанин¹ ✉, Е. Ю. Бабанина¹, О. Ю. Михайлова¹, А. В. Хмелевская¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Резюме

Цель исследования – разработка метода определения влияния дестабилизирующих факторов в нерекурсивных цифровых фильтрах частотной селекции на целевую функцию многокритериального структурно-параметрического синтеза средств радиосвязи с полезной нагрузки авиационных робототехнических устройств.

Методы. При проведении исследований получены математические выражения зависимости вероятности ошибки на бит (BER) от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигналов через симметричные нерекурсивные цифровые фильтры с квадратурной амплитудной модуляцией позиционностью не более 4096, неравномерностями сигнального созвездия не более 5. Полученные результаты необходимы для выполнения многокритериального синтеза радиосистем, адаптивных к когнитивно сформированному полётному заданию.

Результаты. В ходе проведенных исследований: 1) продемонстрирована математическая модель структурно-параметрического синтеза средств радиосвязи с авиационными робототехническими устройства, в основу которой положены критерии минимизации: электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости; излучения вне полосы рабочих частот; пик-фактора сигналов; действия узкополосных, широкополосных и структурных помех в радиоканале при заданной пропускной способности; использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды; 2) выявлена аналитическая зависимость влияния параметров одного из нескольких структурно-функциональных узлов (цифровых фильтров частотной селекции) на критерии синтеза средств связи. Рассмотрены аппроксимирующие функции вида – Кайзера, Тьюки, Барлетта-Хана, Чебышева. Показано влияние порядка фильтра на эквивалент энергетического проигрыша в информационных линиях связи авиационных робототехнических устройств.

Заключение. Представлен метод определения влияния неравномерности АЧХ симметричного нерекурсивного цифрового фильтра в устройствах приёма и обработки радиосигналов многокритериальных средств связи с полезной нагрузкой авиационных робототехнических устройств. Предложенный подход повышает достоверность определения значений критериев минимизации электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости, излучения вне рабочей полосы частот, а также использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды.

Ключевые слова: радиопередающие устройства; радиоприёмные устройства; эквивалентные энергетические потери; сложная электромагнитная обстановка; программно-конфигурируемые радиосистемы.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Бабанин И. Г., Бабанина Е. Ю., Михайлова О. Ю., Хмелевская А. В. Метод определения влияния дестабилизирующих факторов цифровых фильтров на многокритериальный синтез средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 14, № 3. С. 63–87. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-63-87>

Поступила в редакцию 05.07.2024

Подписана в печать 04.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Method for determining the effect of destabilizing factors of digital filters on the multicriteria synthesis of radio communications of aviation robotic devices

Ivan G. Babanin¹ ✉, Ekaterina Yu. Babanina¹, Olesya Yu. Mikhailova¹,
Alena V. Khmelevskaya¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Abstract

The purpose of the research is development of a method for determining the influence of destabilizing factors, such as the unevenness of the amplitude-frequency response (AFC) and the nonlinearity of the phase-frequency response (FFC), in non-recursive digital frequency selection filters on the target function of multicriteria structural-parametric synthesis of radio communications from the payload of aviation robotic devices.

Methods. In conducting scientific research, probability theory, mathematical statistics, statistical radio engineering and computational mathematics were used. The study obtained mathematical expressions of the dependence of the probability of error per bit (BER) on the average signal-to-noise ratio when signals pass through symmetrical non-recursive digital filters with quadrature amplitude modulation with a positivity of no more than 4096, signal constellation irregularities of no more than 5, which are the basis for the energy balance of radio lines with aviation robotic devices. The expressions obtained are one of the "foundations" for the implementation of a multi-criteria synthesis of radio systems adaptive to a cognitively formed flight task. In this paper, all the results of the probability of reliability of the received data by means of communication are reflected for the case of rigid decision-making (Gray coding).

Results. In the course of the conducted research: 1) a mathematical model of the structural-parametric synthesis of radio communications with aviation robotic devices is demonstrated, which is based on the criteria for minimizing: electronic computing resources with a given noise immunity; radiation outside the operating frequency band; peak factor signals; the effects of narrowband, broadband and structural interference in the radio channel at a given bandwidth; the use of structural and functional nodes specific to the existing information and communication environment; 2) the analytical dependence of the influence of the parameters of one of several structural and functional nodes - digital filters of frequency selection, on the criteria for the synthesis of communication means has been revealed. The paper considers the most common approximating functions - Kaiser, Tukey, Barlett-Khan, Chebyshev, and also shows the influence of the filter order on the equivalent of energy loss in information communication lines of aviation robotic devices.

Conclusion. The scientific article presents a method for determining the effect of the uneven frequency response of a symmetrical non-recursive digital filter in devices for receiving and processing radio signals of multicriteria means of communication with the payload of aviation robotic devices. The proposed approach increases the reliability of determining the values of criteria for minimizing electronic computing resources for a given noise immunity, radiation outside the operating frequency band, as well as the use of structural and functional nodes characteristic of the existing information and communication environment.

Keywords: radio transmitting devices; radio receiving devices; equivalent energy losses; complex electromagnetic environment; software-defined radiosystems.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Babanin I. G., Babanina E. Yu., Mikhailova O. Yu. Khmelevskaya A. V. A Method for determining the effect of destabilizing factors of digital filters on the multicriteria synthesis of radio communications of aviation robotic devices. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(3):63–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-63-87>

Received 05.07.2024

Accepted 04.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Своевременная передача информации является основой функционирования современного общества. В средствах связи большинства действующих систем формирование трактов осуществляется в установленных частотных диапазонах с заданными сигнально-кодowymi конструкциями [1].

Однако современное использование частотного ресурса средствами радиосвязи крайне неэффективно. Возникает проблема выделения новых радиочастотных полос для беспроводных средств, оказывающих предоставление телематических услуг. Прежняя политика распределения частот ГКРЧ малоэффективна. Возникшее противоречие способно разрешить использование когнитивных радиосистем [2].

Помимо электромагнитной обстановки перспективные системы должны учитывать тип, важность предоставляемых услуг, способы доставки. Так, в работах [3], [4] и [5] показаны методы

многокритериального синтеза радиотрактов, адаптивных к помеховой обстановке. Предложенный подход синтеза не затрагивает аспекты структурно-параметрического формирования приемно-передающих устройств средств связи с учётом влияния внутренних и внешних дестабилизирующих факторов, использования уже сформированной на территории инфраструктуры.

Так, актуальна задача синтеза средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств с учетом вышеизложенных недостатков.

Материалы и методы

Для осуществления структурно-параметрического синтеза средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств, адаптивных к внутренним и внешним дестабилизирующим факторам, необходимо сформировать критерии [6]:

1) критерий минимизации электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости:

$$\min_A \left\{ d_2 \left(\frac{E_b}{N_0} - \Delta_{\text{пот}}, \left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{A_1}^{\text{треб}} \right) \right\}, \text{ при } P_{\text{ош}}^{\text{треб}} = \text{const}, \quad (1)$$

где $d_2(\cdot)$ – евклидово расстояние между двумя элементами; E_b – энергия сигнала на бит на входе решающего устройства (РУ) демодулятора; N_0 – спектральная плотность мощности шума (СПМШ); $\Delta_{\text{пот}}$ – энергетические потери шумовой и нешумовой природы в радиотракте; $\left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{A_1}^{\text{треб}}$ – требуемое отношение сигнал-шум для элемента a из подмножества A_1 , необходимое для обеспечения

вероятности ошибки на бит $P_{\text{ош}}^{\text{треб}}$; A – множество размерностью $[5, M, N]$ из элементов набора параметров структурно-функциональных узлов радиотракта.

Для обеспечения минимизации электронно-вычислительных ресурсов в структурно-функциональных узлах радиотракта необходимо рассмотреть модифицированное уравнение энергетического баланса [7]:

$$P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}} - q = \underbrace{\left(L_0^* + L_G^* + L_R^* + L_P^* + L_C^* + L_M^* + L_D^* + L_{PM}^* \right)}_{\text{внешние дестабилизирующие факторы}} + \underbrace{\left(\Delta_{\text{пер}} + \Delta_{\text{пр}} \right)}_{\text{внутренние дестабилизирующие факторы}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пер}}$ – излучаемая мощность передающего устройства; $G_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления антенны передающего устройства; $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления антенны приёмного устройства, $q = (E'_b/N'_0)_a^{\text{треб}}$ – отношение сигнал-шум на входе счетно-решающего устройства приемного устройства для обеспечения заданной вероятности ошибки на бит; L_0^* – затухание в свободном пространстве; L_G^* – затухание в атмосферных газах; L_R^* – затухание в гидрометеорах; L_P^* – затухание из-за деполяризации при распространении; L_C^* –

затухание из-за рефракции и погрешности наведения антенных систем друг на друга; L_M^* – потери, вызванные многолучевых распространением сигнала; L_D^* – потери из-за эффекта Доплера; L_{PM}^* – потери из-за остаточного влияния помех; $\Delta_{\text{пер}}$ – потери, вызванные дестабилизирующими факторами в радиопередающем устройстве; $\Delta_{\text{пр}}$ – потери, вызванные дестабилизирующими факторами в элементах устройства приёма и обработки радиосигналов [8].

На данный момент в современных средствах радиосвязи используются реализации архитектур программно-конфигурируемого радио (ПКР) трёх

поколений. В первом поколении ПКР цифровая обработка сигналов осуществляется на нулевой частоте (ОЧ), во втором – на промежуточной частоте (ПЧ), в третьем – на радиочастоте (РЧ) [2].

Структурно-функциональная схема приемно-передающих устройств второго поколения [9], как наиболее распространенного технического решения, показана ниже (рис. 1).

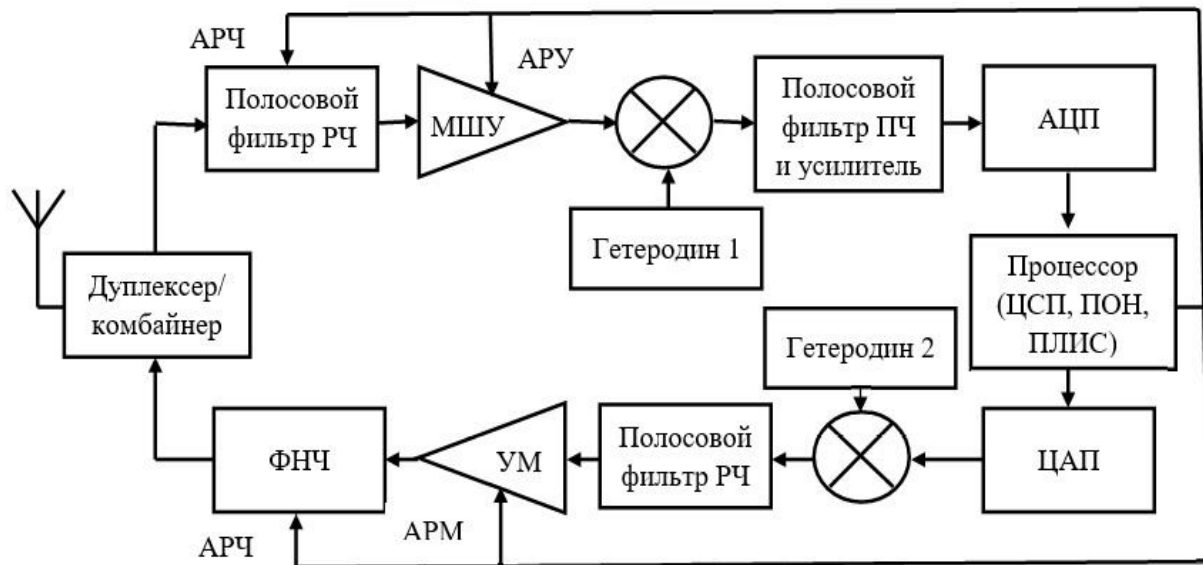


Рис. 1. Структурно-функциональная схема приемно-передающего устройства, построенного по технологии ПКР 2 поколения: АРЧ – автоматическая регулировка частоты; АРУ – автоматическая регулировка усиления; АРМ – автоматическая регулировка мощности; МШУ – малошумящий усилитель; УМ – усилитель мощности; ФНЧ – фильтр низких частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ЦСП – цифровой сигнальный процессор; ПОН – процессор общего назначения; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

Fig. 1. Structural and functional diagram of a receiving and transmitting device built using 2nd generation RCC technology: AFC – automatic frequency control; AGC – automatic gain control; AWP – automatic power control; LNA – low noise amplifier; PA – power amplifier; LPF – low pass filter; ADC – analog-to-digital converter; DAC – digital-to-analog converter; DSP – digital signal processor; PON – general purpose processor; FPGA – programmable logic integrated circuit

Исходя из представленной выше архитектуры построения современных

средств связи внутренними источниками энергетических потерь являются [10]:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{пер}} + \Delta_{\text{пр}} = & K_{\text{апр}} + \Delta_{\text{фидер}} [K_{\text{шфидер}}(f)] + \Delta_{\text{дк}} [K_{\text{шдк}}(f)] + \Delta_{\text{мшу}} [K_{\text{шмшу}}(f)] + \\ & + \sum_{i=1}^I \Delta_{\text{пф}}^i (\delta_{\text{ачх}}^i) + \sum_{m=1}^M \Delta_{\text{пф}}^m (\delta_{\text{фчх}}^m) + \sum_{p=1}^P \Delta_{\text{см}}^p [K_{\text{шсм}}^p(f)] + \sum_{j=1}^J \Delta_{\text{гет}}^j [G_{\text{в}}^j] + \\ & + \sum_{d=1}^D \Delta_{\text{упч}}^d [K_{\text{шупч}}^d(f)] + \Delta_{\text{свнч}} (\delta_f) + \Delta_{\text{свтч}} (\delta_0) + \Delta_{\text{увс}} (\delta_u) + \\ & + \Delta_{\text{рас}} (\delta_d) + \Delta_{\text{омси}} (\delta_{\text{мси}}) + \Delta_{\text{ацп}} (N_{\text{разр}}) + \Delta_{\text{ум}} (K_{\text{нел}}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $K_{\text{апр}}$ – коэффициент шума приёмной антенны; $\Delta_{\text{фидер}}[K_{\text{шфидер}}(f)]$ – энергетические потери в фидерных линиях; $\Delta_{\text{дк}}[K_{\text{шдк}}(f)]$ – энергетические потери в дуплексере / комбайнере; $\Delta_{\text{мшу}}[K_{\text{шмшу}}(f)]$ – энергетические потери в малошумящем усилителе (МШУ) с шумовой температурой $K_{\text{шмшу}}(f)$; $\Delta_{\text{пф}}^i(\delta_{\text{ачх}}^i)$ – эквивалент энергетических потерь в i -м фильтре частотной селекции с неравномерностью амплитудно-частотной характеристики $\delta_{\text{ачх}}$; $\Delta_{\text{пф}}^m(\delta_{\text{фчх}}^m)$ – эквивалент энергетических потерь в m -м частотной селекции с нелинейностью его фазочастотной характеристики $\delta_{\text{фчх}}$; $\Delta_{\text{см}}^p[K_{\text{шсм}}^p(f)]$ – энергетические потери в p -м смесителе, обусловленные тепловыми шумами с $K_{\text{шсм}}^p(f)$; $\Delta_{\text{гет}}^j[G_{\text{в}}^j]$ – энергетические потери, обусловленные неидеальностью сгенерированного амплитудно-фазового спектра j -го гетеродина [11]; $\Delta_{\text{упч}}^d[K_{\text{шупч}}^d(f)]$ – энергетические потери d -го усилителя промежуточной частоты с коэффициентом шума $K_{\text{шупч}}(f)$; $\Delta_{\text{свнч}}(\delta_f)$ – эквивалент энергетических потерь в системе восстановления несущей частоты (СВНЧ) с погрешностью восстановления гармонического несущего колебания δ_f ; $\Delta_{\text{свтч}}(\delta_0)$ – эквивалентные энергетические потери системы восстановления тактовой частоты (СВТЧ), обусловленные погрешностью восстановления тактовой частоты демодулятора δ_0 ; $\Delta_{\text{увс}}(\delta_u)$ – эквивалентные энергетические потери погрешностью поддержания уровня сигнала δ_u на входе демодулятора;

$\Delta_{\text{рас}}(\delta_d)$ – эквивалентные энергетические потери, вызванные рассогласованием частотных характеристик δ_d формирующего и комплексно-сопряженного с ним согласованного фильтров; $\Delta_{\text{омси}}(\delta_{\text{мси}})$ – эквивалентные энергетические потери из-за остаточной межсимвольной интерференции (МСИ) $\delta_{\text{мси}}$; $\Delta_{\text{ацп}}(N_{\text{разр}})$ – энергетические потери в усилителе мощности из-за нелинейных искажений $K_{\text{нел}}$; $\Delta_{\text{ацп}}(N_{\text{разр}})$ – энергетические потери в АЦП заданной разрядностью, вызванные ошибками квантования.

Необходимо заметить, что данные дестабилизирующие факторы можно классифицировать как вариативные и неизменные. Неизменные потери – это потери, которые невозможно компенсировать методами цифровой обработки. Вариативные потери – потери, значения которых можно изменить за счет задействования больших электронно-вычислительных ресурсов [12].

Задача критерия минимизации электронно-вычислительных ресурсов сводится к нахождению параметров структурно-функциональных узлов из заданной номенклатуры с потерями, наиболее приближенными к заданной вероятности ошибки;

2) критерий минимизации излучения вне полосы рабочих частот:

$$\min_A \left\{ h \left(10 \lg [G_{A_2}(f) - G_{\text{лог}}(f)] \right) \right\}, \quad (4)$$

где $h(\cdot)$ – «штрафная» функция на спектр излучаемого сигнала; $G_{A_2}(f)$ – спектральная плотность мощности (СПМ)

сформированного сигнала; $G_{\log}(f)$ – спектральная маска на излучаемый сигнал; A_2 – двумерное подмножество из структурно-функциональных элементов с различными параметрами данного критерия.

СПМ формируемого сигнала обеспечивается использованием [13]:

а) диапазонных частотно-селектирующих фильтров;

б) усилителей мощности;

в) набором приемно-передающих антенно-фидерных устройств.

Данный критерий позволяет формировать устройства связи с эквивалентной изотропной излучаемой мощностью (ЭИИМ), не превышающей установленные нормы ГКРЧ в заданных диапазонах частот [14];

3) критерий минимизации действия узкополосных, широкополосных и структурных помех в радиоканале при заданной пропускной способности:

$$\min_A \left(d_2 \left(G_{opt}(f), G_{A_3}(f) \right) \right), \quad (5)$$

где $G_{opt}(f), G_{A_3}(f)$ – нормированные эталонная и принятая спектральная плотность мощности (СПМ) радиосигналов; A_3 – двумерное подмножество из структурно-функциональных элементов с различными параметрами данного критерия.

Выполнение данного критерия достигается использованием устройств режекции, прямого расширения спектра (ПРС) с рядом чирп-последовательностей и псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) [15]. В случае действия широкополосных, узкополосных и структурных помех в канале связи синтезируемая система «отстраивается» в свободный диапазон частот от помех, в

противном случае при синтезе необходим режекторный фильтр с целью исключения воздействия узкополосных, структурных помех и устройство прямого расширения спектра с длиной чирп-последовательности для необходимого и достаточного обеспечения заданной пропускной способности;

4) критерий минимизации пик-фактора формируемого сигнала:

$$\min_A \left(\frac{D(P_{A_4})}{m(P_{A_4})} \right), \quad (6)$$

где $D(P_{A_4})$ – дисперсия сформированной сигнально-кодовой конструкции (СКК); $m(P_{A_4})$ – математическое ожидание сформированной СКК; A_4 – двумерное подмножество из структурно-функциональных элементов с различными параметрами данного критерия.

Выполнение данного критерия обеспечивается за счет применения ортогонального частотного мультиплексора (OFDM), использования формирователей СКК с различными коэффициентами неравномерности сигнального созвездия (χ) [16];

5) критерий минимизации использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды [17]:

$$\min_A \left\{ d_2 \left(\frac{E_b}{N_0} - \Delta_{\text{пот}}, \left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{A_5}^{\text{треб}} \right) \right\} \\ \text{при } P_{\text{ощ}}^{\text{треб}} = \text{const}. \quad (7)$$

Данный критерий позволяет установить приоритет на использование объектов сигнально-кодовых конструкций сотовых, ячеистых, спутниковых систем радиодоступа, развернутых в данном

квадранте местности. Кроме того, возможно построение организационно-скрытных радиотрактов [18].

Для выполнения наиболее эффективного структурно-параметрического

синтеза средств радиосвязи авиационных робототехнических устройств к сложившейся ЭМО необходимо ввести следующую целевую функцию:

$$F(A) = k_1^* M_1^* \min_A \left\{ d_2 \left(\frac{E_b}{N_0} - \Delta_{\text{пот}}, \left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{a_{1,n}}^{\text{треб}} \right) \right\} +$$

$$+ k_2^* M_2^* \min_A \left\{ h \left(10 \lg [G_{a_{2,n,m}}(f) - G_{\log}(f)] \right) \right\} + k_3^* M_3^* \min_A \left(d_2 (G_{\text{opt}}(f), G_{A_3}(f)) \right) +$$

$$+ k_4^* M_4^* \min_A \left(\frac{D(P_{A_4})}{m(P_{A_4})} \right) + k_5^* M_5^* \min_A \left\{ d_2 \left(\frac{E_b}{N_0} - \Delta_{\text{пот}}, \left(\frac{E'_b}{N'_0} \right)_{A_5}^{\text{треб}} \right) \right\},$$

где $k_1^* - k_5^*$ – коэффициенты важности критериев; $M_1^* - M_5^*$ – нормирующие множители; $\sum_{n=1}^5 k_n^* = 1$.

Результатом синтеза средства радиосвязи будет набор структурных элементов с параметрами при минимальном значении целевой функции $F(A)$ (рис. 2).

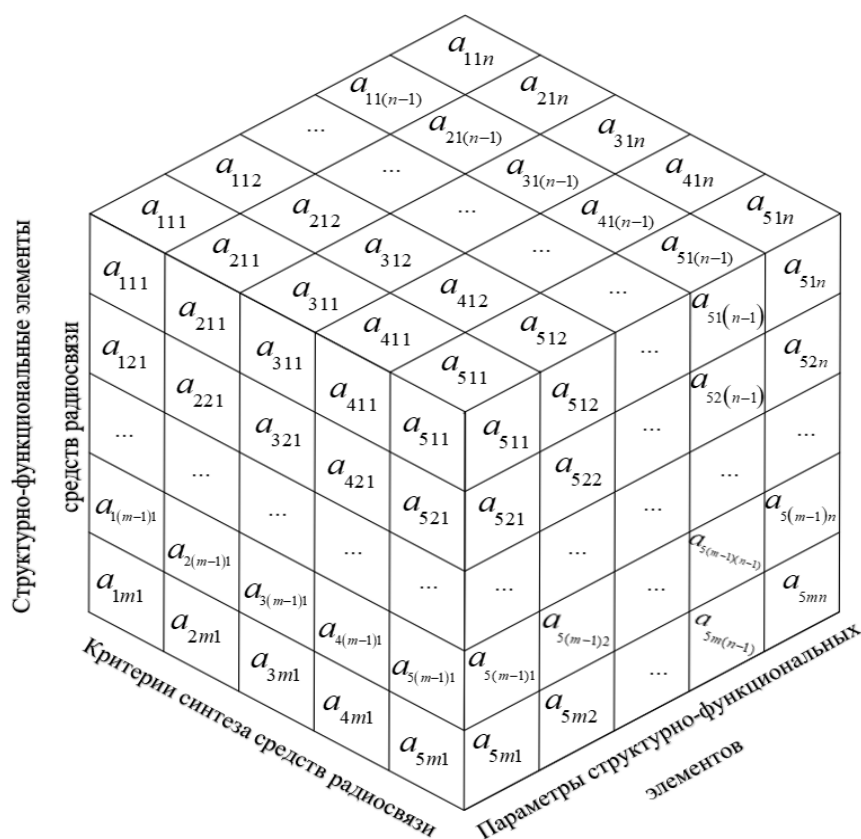


Рис. 2. Многокритериальное структурно-параметрическое множество по достижению целевой функции синтеза средств радиосвязи

Fig. 2. Multi-criteria structural-parametric set for achieving the objective function of radio communication synthesis

Задание необходимых режимов работы формируемого радиотракта осуществляется коэффициентами $k_1^* - k_5^*$.

Метод оценки дестабилизирующих факторов в нерекурсивном цифровом фильтре

Рассмотрим один из вышепредставленных факторов, оказывающих негативное влияние на критерии минимизации электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости, минимизации внеполосного излучения, минимизации использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды, – неравномерность амплитудно-частотной и нелинейность фазочастотной характеристики нерекурсивного фильтра частотной селекции, вызванная ограничением импульсной характеристики (ИХ) [19].

Из анализа работ [19] выявлено, что при синтезе средств радиосвязи с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) кратностью $M \geq 5$ в нерекурсивных цифровых фильтрах (НЦФ) приёмно-селектирующего устройства (ПСУ) начинают проявляться потери нешумовой природы. В связи с этим актуальна задача разработки математического аппарата по установлению зависимости эквивалента энергетического проигрыша в исследуемом узле от отношения сигнал-шум на входе решающего устройства радиоприёмника.

В фильтрах частотной селекции необходимо выделить два дестабилизи-

рующих фактора: неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), нелинейность фазочастотной характеристики (ФЧХ). Второй фактор в процессе моделирования исключен путем применения симметричных НЦФ типа 1.

Рассмотрим далее методику оценки влияния дестабилизирующих факторов, а именно неравномерности АЧХ фильтра на эквивалент энергетического проигрыша.

Сигнал на выходе аналого-цифрового преобразователя

$$x(k) = s(k t_d) = s_I(k) \cos(k \omega_0) + s_Q(k) \sin(k \omega_0), \quad (8)$$

где $\omega_d = 2\pi/t_d$ – циклическая частота дискретизации; k – номер отсчета; $s_I(k)$, $s_Q(k)$ – огибающие радиосигнала по синфазному и квадратурному каналам устройства приёма и обработки.

В расчетах эквивалента энергетического проигрыша в фильтрах частотной селекции дисперсия шума постоянна.

После АЦП – изучаемый фильтр частотной селекции с заданными весовыми коэффициентами.

Радиосигнал на выходе цифрового селектирующего устройства определяется полным разностным уравнением

$$y(k) = \sum_{n=0}^N b(n) x(k-n) - \sum_{m=1}^M a(m) y(k-m). \quad (9)$$

КАМ-сигнал на выходе демодулирующего устройства (ДУ) будет определяться как

$$y_I'(k) = y(k) \cos(k\omega_0) = (a(k) \cos(k\omega_0) + b(k) \sin(k\omega_0)) \cos(k\omega_0) = \\ = \frac{1}{2} a(k) + \frac{1}{2} a(k) \cos(2k\omega_0) + \frac{1}{2} b(k) \sin(2k\omega_0), \quad (10)$$

$$y_Q' = y(k) \sin(k\omega_0) = (a(k) \cos(k\omega_0) + b(k) \sin(k\omega_0)) \sin(k\omega_0) = \\ = \frac{1}{2} b(k) - \frac{1}{2} b(k) \cos(2k\omega_0) + \frac{1}{2} a(k) \sin(2k\omega_0), \quad (11)$$

где $y_I(k) = a(k) \cos(k\omega_0)$;
 $y_Q(k) = b(k) \sin(k\omega_0)$.

Для подавления составляющих с частотой $2\omega_{0b}$ используется фильтр нижних частот ФНЧ.

Квадратурные составляющие сигналы на входе оптимального комплексного фильтра:

$$x_I'(k) = \frac{1}{2} a(k), \quad x_Q'(k) = \frac{1}{2} b(k). \quad (12)$$

АЧХ оптимального фильтра (согласованного фильтра, СФ) определяется как

$$h_{si}(n) = s_I(-k), \quad h_{sq}(n) = s_Q(-k). \quad (13)$$

Необходимо отметить, что достоверность принимаемых данных в системе будет полностью определяться взаимной согласованностью АЧХ оптимального фильтра с амплитудным спектром сигнала. При этом достоверность принимаемых данных будет снижена:

1) из-за искажений амплитудного спектра сигнала в радиоканале;

2) из-за финитности импульсной характеристики селектирующего фильтра (рис. 3).

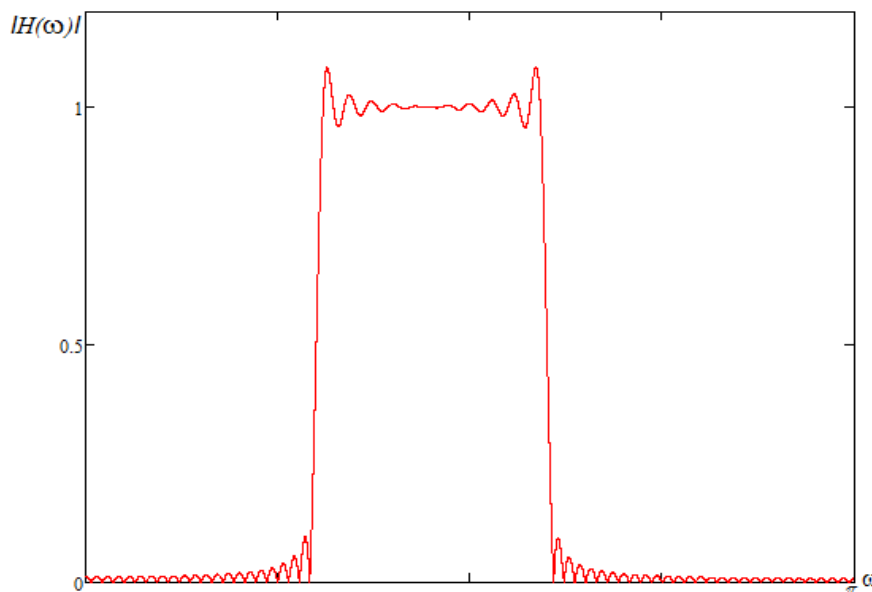


Рис. 3. Проявление явления Гиббса на амплитудно-частотную характеристику селектирующего фильтра

Fig. 3. The manifestation of the Gibbs phenomenon on the amplitude-frequency response of the selected filter

В проводимом эксперименте оценки эквивалента энергетического проигрыша в селектирующем фильтре потери из-за «искусственного» рассогласования АЧХ оптимального фильтра с ФНЧ демодулирующего устройства пренебрегаются.

Эквивалент энергетического проигрыша из-за несогласованности сигнала с оптимальным фильтром (Гцф) определяется

$$G_{\text{цф}} = \frac{q_{\text{sf_ideal}}}{q_{\text{sf_real}}}, \quad (14)$$

где $q_{\text{sf_ideal}}$, $q_{\text{sf_real}}$ – отношение сигнал-шум на выходе комплексного оптимального фильтра в случае прохождения через идеальный и исследуемый селективные фильтры соответственно.

$$\begin{aligned} P_{BP}(q_{\text{avrgen}}) = & \frac{4}{L} \cdot \left(H_1 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \Phi \left(\sqrt{f(q_{\text{avrgen}})/G_{\text{цф}}} \right) \right)^2 + \right. \\ & + H_2 \cdot 0,5 \cdot \left(1 + \Phi \left(\sqrt{f(q_{\text{avrgen}})/G_{\text{цф}}} \right) \right) \cdot \Phi \left(\sqrt{f(q_{\text{avrgen}})/G_{\text{цф}}} \right) + \\ & \left. + H_3 \cdot \left(\Phi \left(\sqrt{f(q_{\text{avrgen}})/G_{\text{цф}}} \right) \right)^2 \right), \end{aligned} \quad (16)$$

где $q_{\text{lgen}} = f(q_{\text{avrgen}}) = \text{const} \cdot q_{\text{avrgen}}$, причем const – это множитель при q_{lgen} в левой части выражения (17); L – позиция модуляции, H_3 , H_2 , H_1 – количество векторов в сигнальном созвездии с заданными пределами условных вероятностей правильного приёма в одном из квадрантов.

Математическая зависимость между средним и минимальным значениями отношениями сигнал-шум:

$$q_{\text{avrgen}} = \sum_{mp} \left(\frac{U_{mp}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot q_{\text{lgen}} \cdot \frac{4}{L}, \quad (17)$$

Также в работе следует рассматривать вклад, внесенный селективирующим фильтром, в значение межсимвольной интерференции.

Для памяти радиоканала не превышающей 10:

$$\begin{aligned} P_{\text{osh}}(q_{\text{avr_gen}}) &= P_{\text{osh}}(q_{\text{avr}} + q_{\text{MSI}}), \\ q_{\text{MSI}} &= \sum_{i=1}^M q_{i\text{MSI}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где M – память радиоканала; q_{MSI} – отношение сигнал-шум с учётом межсимвольной интерференции; $q_{i\text{MSI}}$ – отношение сигнал-шум с учётом межсимвольной интерференции от i -го символа.

Вероятность правильного приема для одной из «четвертей» констелляционной плоскости определяется как

где m , p – количество уровней по в сигнальной матрице; q_{lgen} – минимальное отношение сигнал-шум; U_{mp} – значение вектора сигнала.

Если память радиоканала свыше 10 символов, необходимо использовать выражение

$$\begin{aligned} P_{\text{osh}} = & \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(uh_0)}{u} \times \\ & \times \exp(-0,5u^2\sigma^2) \prod_{k \neq 0}^k \cos(uh_k) du, \end{aligned} \quad (18)$$

где u – напряжение на входе системы;
 h_k – отклик системы в k -отчете; σ –
 среднеквадратическое отклонение.

Нормирующие коэффициенты пиковых значений при расчете эквивалента энергетических потерь в НЦФ для сигналов с КАМ определяются как:

$$\begin{aligned} q_{\text{avrgen-64}} &= 0,872 q_{\text{avrgen-16}}, \\ q_{\text{avrgen-256}} &= 0,817 q_{\text{avrgen-16}}, \\ q_{\text{avrgen-1024}} &= 0,792 q_{\text{avrgen-16}}, \\ q_{\text{avrgen-4096}} &= 0,779 q_{\text{avrgen-16}}, \\ q_{\text{avrgen-32}} &= 1,027 q_{\text{avrgen-16}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Учет неравномерности созвездия χ осуществляется следующими поправками, представленными ниже (табл. 1).

Таблица 1. Поправка в среднее отношение сигнал-шум для учёта коэффициента неравномерности созвездия [20]

Table 1. Correction of the average signal-to-noise ratio to account for the coefficient irregularities of the constellation [20]

Позиционность модуляции L	Коэффициент неравномерности созвездия χ	Поправка k , $\times 10^{-5}$	Позиционность модуляции L	Коэффициент неравномерности созвездия χ	Поправка k , $\times 10^{-5}$
16	1	100000	32	1	100000
	2	91688		2	91159
	3	86946		3	85429
	4	83848		4	81471
	5	81808		5	78478
64	1	100000	128	1	100000
	2	93750		2	94483
	3	89260		3	90132
	4	85655		4	86572
	5	82996		5	83664
256	1	100000	512	1	100000
	2	96321		2	97048
	3	93053		3	94434
	4	90424		4	91958
	5	88073		5	89761
1024	1	100000	2048	1	100000
	2	96667		2	98470
	3	94836		3	96987
	4	93232		4	95547
	5	91681		5	94150
4096	1	100000	8192	1	100000
	2	99099		2	99027
	3	98039		3	98263
	4	97002		4	97510
	5	96154		5	96768

Расчет эквивалента энергетического проигрыша цифрового селектирующего фильтра (дБ) определяется как

$$\begin{aligned} \text{ЭЭП} &= q_{\text{avrgen}}(n^*, L) - q_{\text{avrgen}}(\infty, L) \\ \text{при } P_{\text{osh}} &= \text{const}, \end{aligned} \quad (20)$$

где $P_{\text{osh}}(q_{\text{avrgen}}) = 1 - P_{BP}(q_{\text{avrgen}})$; n^* – порядок исследуемого КИХ-фильтра.

Результаты и их обсуждение

На базе предложенной методики расчета эквивалента энергетического проигрыша в селектирующих фильтрах показаны математические зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум для следующих неперекрывающихся типов фильтров [19]:

$$w(k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi(k-1)}{(n-1)r} \right) \right), & 1 \leq k \leq \frac{(n-1)r}{2} + 1, \\ 1, & \frac{(n-1)r}{2} + 1 \leq k \leq n - \frac{(n-1)r}{2}, \\ \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi(k-n)}{(n-1)r} \right) \right), & n - \frac{(n-1)r}{2} \leq k \leq n. \end{cases} \quad (22)$$

При $r = 0$ окно Тьюки прямоугольное, а при $r = 1$ вырождается в окно Ханна.

На рисунках 4–7 представлены аналитические зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при

Весовое окно Чебышева определяется как [19]:

$$S(w) = \frac{\cos \left((n-1) \arccos \left(\alpha \cos \left(\pi \frac{\omega}{\omega_d} \right) \right) \right)}{\text{ch} \left((n-1) \text{arch}(\alpha) \right)}, \quad \alpha = \text{ch} \left(\frac{\text{arch}(10^{\beta/20})}{n-1} \right), \quad (23)$$

где β – степень подавления боковых лепестков в децибелах; n – количество отчётов окна.

- Кайзера;
- Тьюки;
- Чебышева;
- Бартлетта-Ханна.

Весовое окно Кайзера определяется как

$$w(k) = \frac{\left| I_0 \left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2k-n-1}{n-1} \right)^2} \right) \right|}{|I_0(\beta)|}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (21)$$

где $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Весовое окно Тьюки определяется как

прохождении сигналов с КАМ различной позиционности, неравномерностью сигнального созвездия $\chi = 1$ через симметричный НЦФ 80 порядка с весовыми функциями Кайзера ($\beta = 9$), Тьюки ($r = 0,5$).

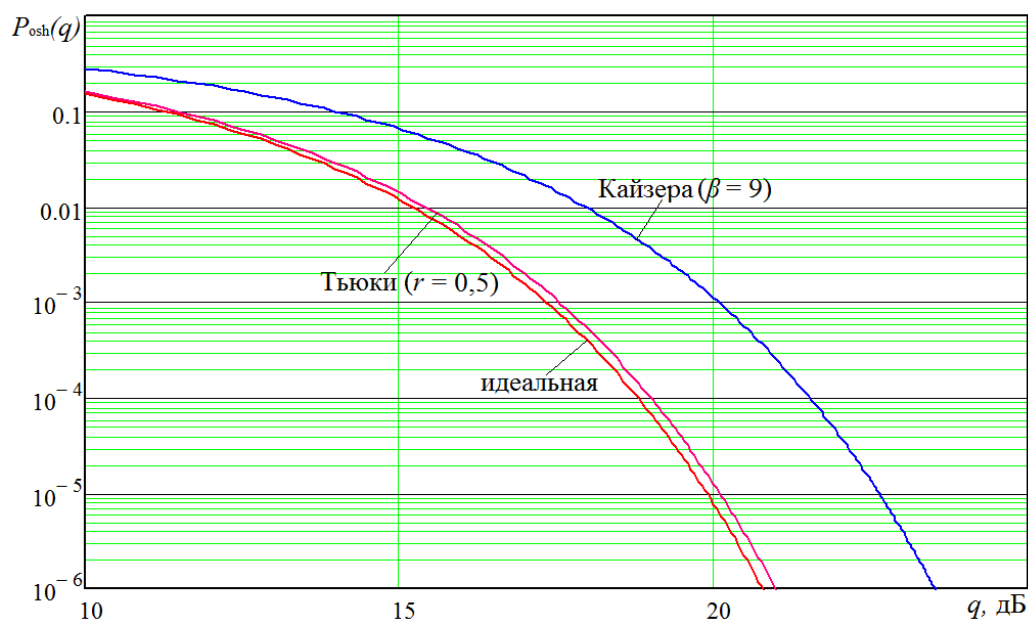


Рис. 4. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-16 через фильтры с временными окнами Кайзера $\beta = 9$, Тьюкиг = 0,5

Fig. 4. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a KAM-16 signal through filters with Kaiser time windows $\beta = 9$, Tucker = 0,5

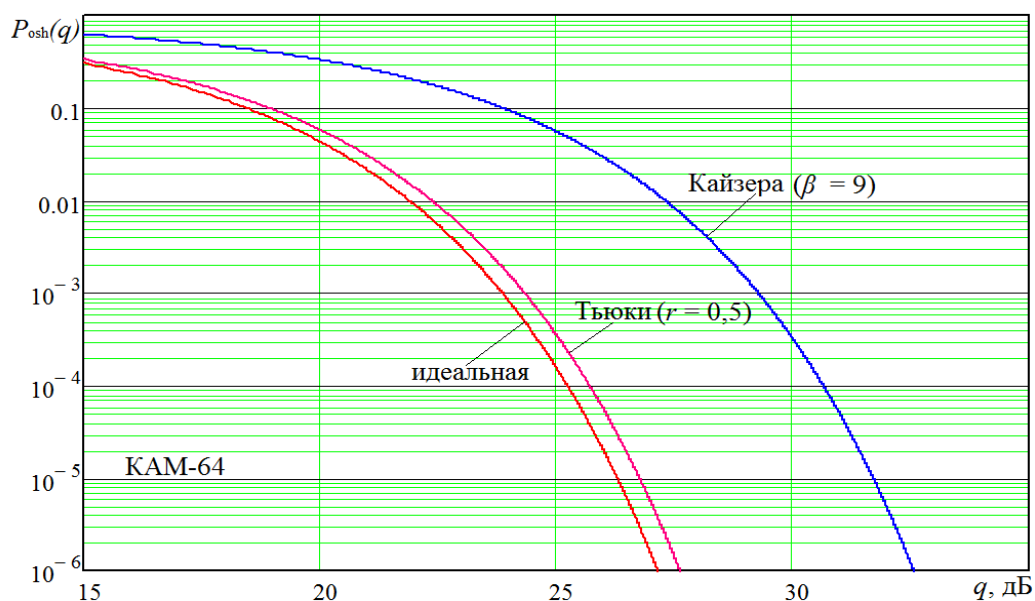


Рис. 5. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-64 через фильтры с временными окнами Кайзера $\beta = 9$, Тьюкиг = 0,5

Fig. 5. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a KAM-64 signal through filters with Kaiser time windows $\beta = 9$, Tucker = 0,5

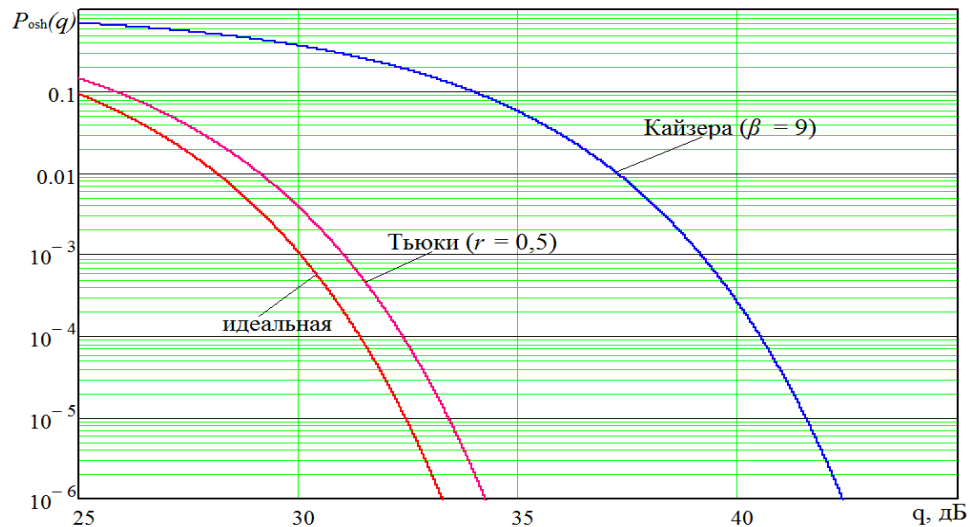


Рис. 6. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-256 через фильтры с временными окнами Кайзера $\beta = 9$, Тьюки $r = 0,5$

Fig. 6. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a KAM-256 signal through filters with Kaiser time windows $\beta = 9$, Tucker $r = 0,5$

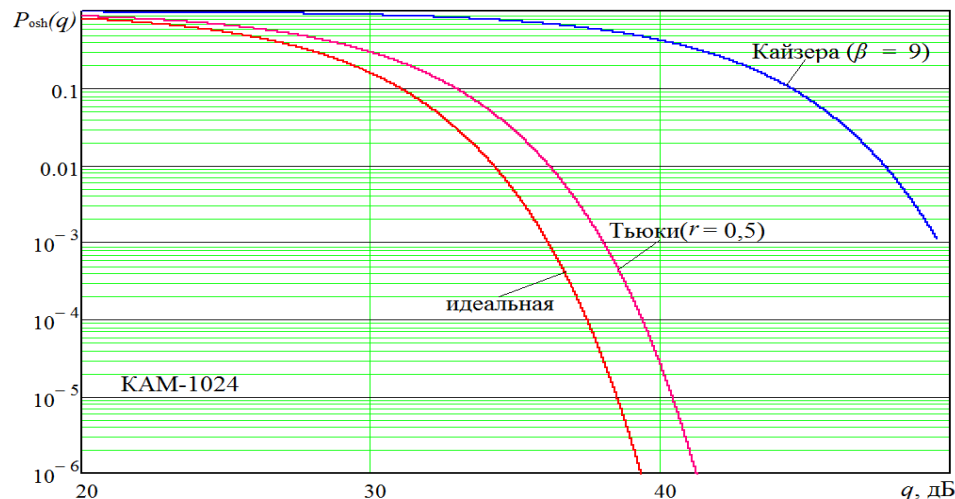


Рис. 7. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-1024 через фильтры с временными окнами Кайзера $\beta = 9$, Тьюки $r = 0,5$

Fig. 7. Dependence of the error probability per symbol on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM signal with a positionality of 1024 through symmetrical non-recursive filters with Kaiser time windows $\beta = 9$, Tukey $r = 0,5$

Весовое окно Бартлетта-Ханна определяется как [19]:

$$w(k) = 0,62 - 0,48 \left| \frac{k-1}{n-1} - 0,5 \right| - 0,38 \cos \left(2\pi \frac{k-1}{n-1} \right). \quad (24)$$

На рисунках 8–11 представлены аналитические зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигналов с КАМ различной позиционности, неравномерностью

сигнального созвездия $\chi = 1$ через симметричный НЦФ 80 порядка с весовыми

функциями Чебышева ($\beta = 40$ дБ), Барлетта-Ханна.

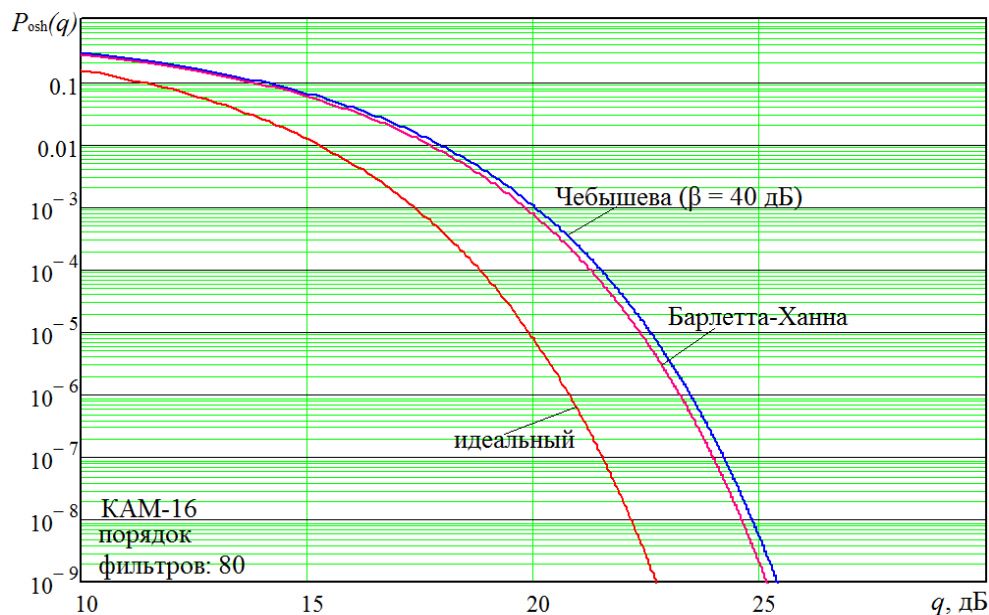


Рис. 8. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-16 через фильтры с временными окнами Чебышева $\beta = 40$ дБ, Барлетта – Ханна

Fig. 8. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM-16 signal through filters with Chebyshev time windows $\beta = 40$ dB, Bartlett – Hanna

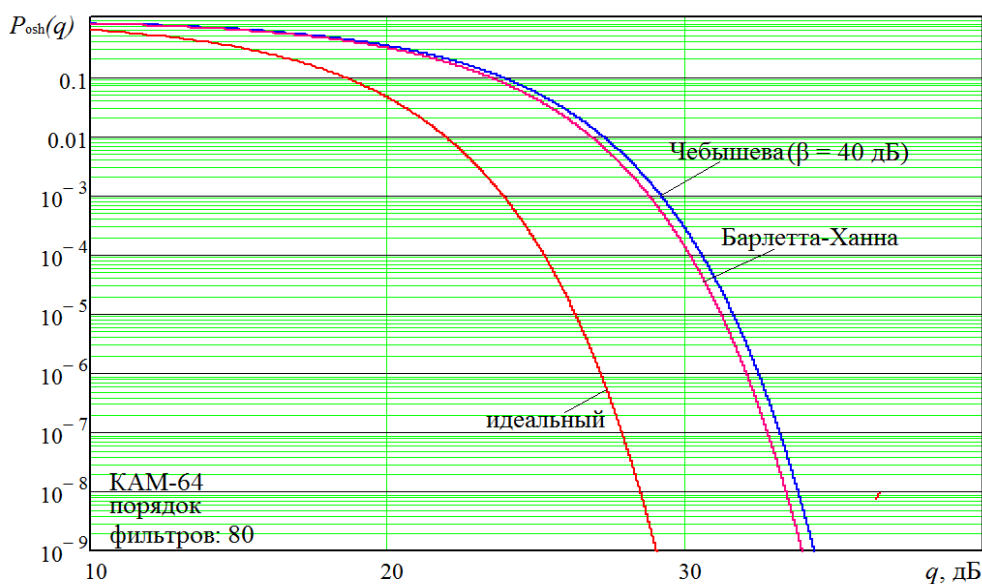


Рис. 9. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-64 через фильтры с временными окнами Чебышева $\beta = 40$ дБ, Барлетта – Ханна

Fig. 9. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM-64 signal through filters with Chebyshev time windows $\beta = 40$ dB, Bartlett – Hanna

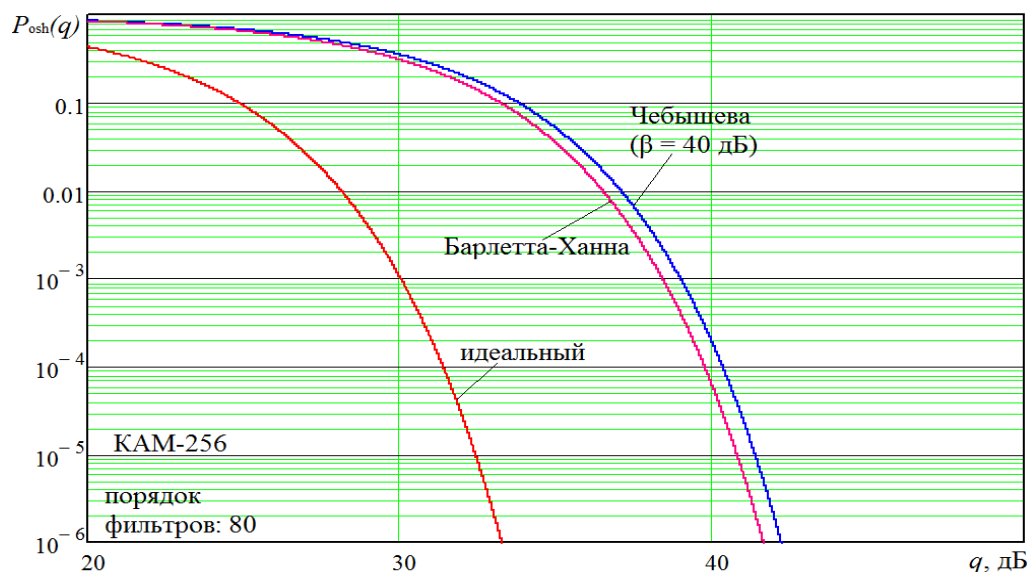


Рис. 10. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-256 через фильтры с временными окнами Чебышева $\beta = 40$ дБ, Барлетта-Ханна

Fig. 10. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM-256 signal through filters with Chebyshev time windows $\beta = 40$ dB, Bartlett-Hanna

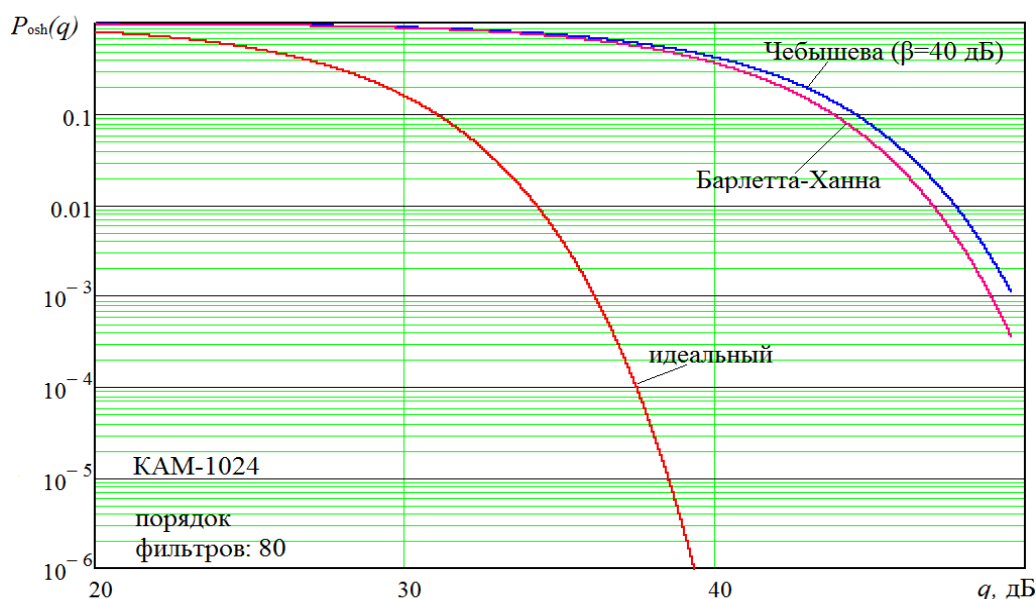


Рис. 11. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала КАМ-1024 через фильтры с временными окнами Чебышева $\beta = 40$ дБ, Барлетта-Ханна

Fig. 11. Dependence of losses in the reliability of received data on the average signal-to-noise ratio when passing a QAM-1024 signal through filters with Chebyshev time windows $\beta = 40$ dB, Bartlett-Hanna

На рисунках 12–17 показаны математические зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от

отношения сигнал-шум при прохождении сигналов с КАМ-16, -64, -1024 через нерекурсивные фильтры с весовым

окном Кайзера ($\beta = 7$, $\beta = 9$) (порядок фильтров: 80, 100, 120) [19].

Из анализа матзависимостей при повышении порядка фильтра с 80 до 120 эквивалент энергетического проигрыша,

вызванный неравномерностью АЧХ, снижаются для КАМ-16 на 0,15 дБ, КАМ-64 – на 0,33 дБ, КАМ-1024 – на 0,92 дБ ($P_{\text{osh}} = 10^{-6}$, весовая функция Кайзера, $\beta = 7$).

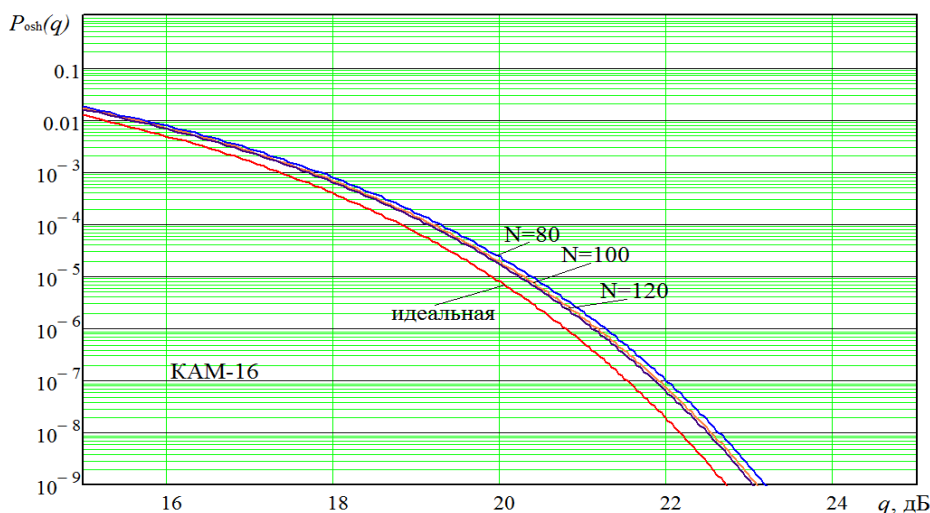


Рис. 12. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 7$) сигнала с КАМ-16 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 12. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 7$) of a signal from QAM-16 (filter order: 80, 100, 120)

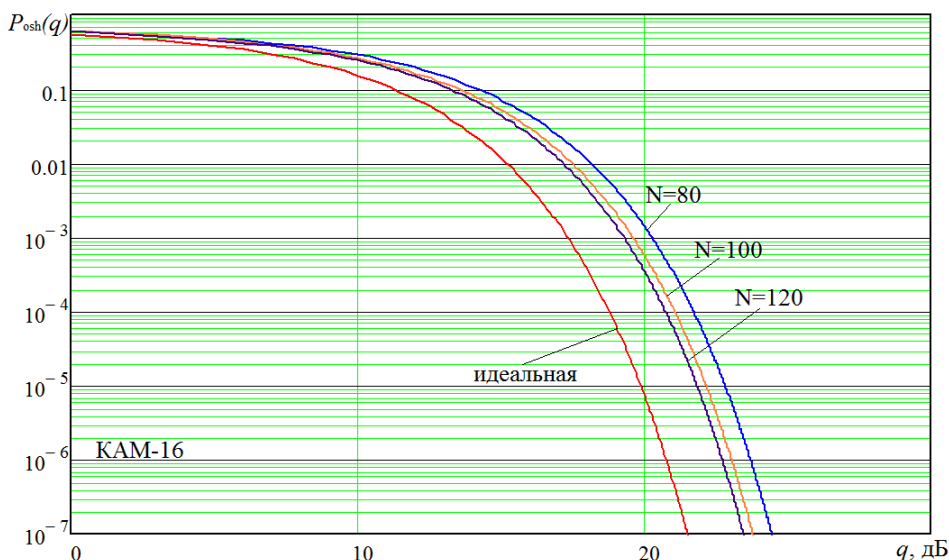


Рис. 13. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 9$) сигнала с КАМ-16 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 13. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 9$) of a signal from QAM-16 (filter order: 80, 100, 120)

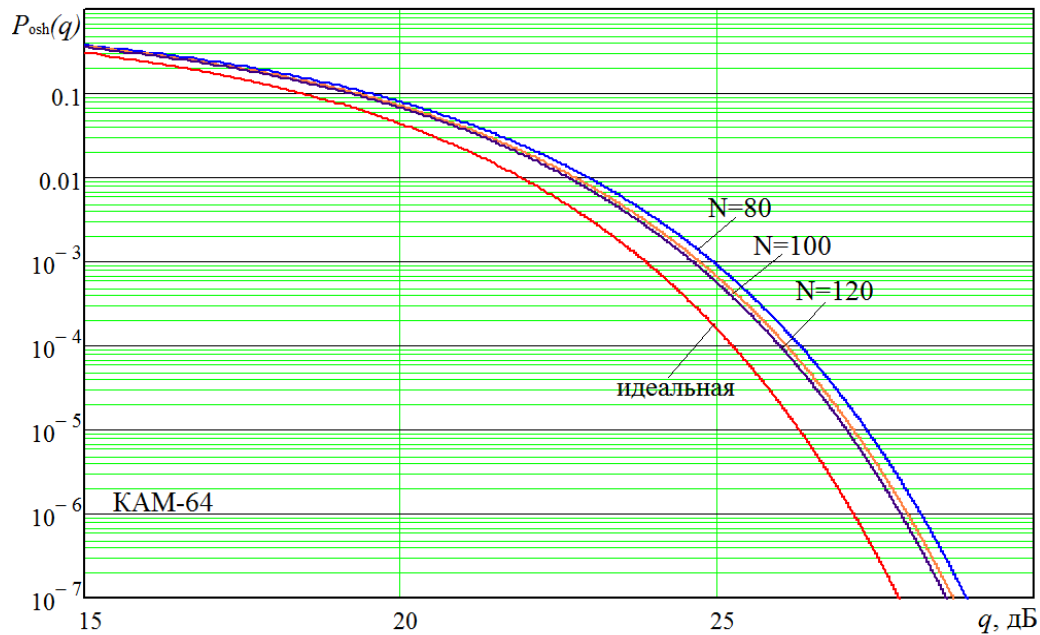


Рис. 14. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 7$) сигнала с КАМ-64 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 14. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 7$) of a signal from QAM-64 (filter order: 80, 100, 120)

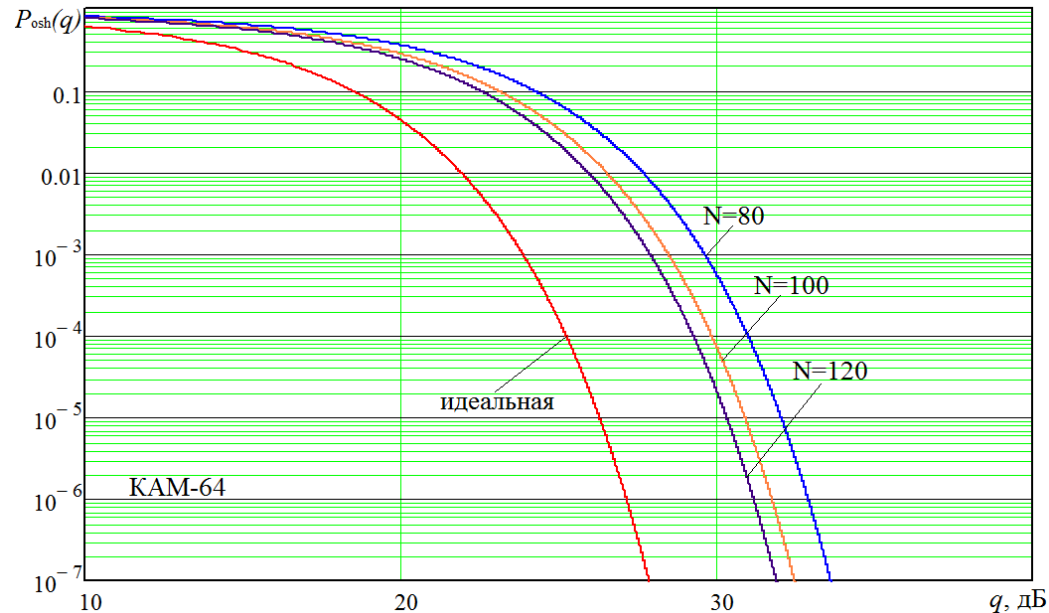


Рис. 15. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 9$) сигнала с КАМ-64 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 15. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 9$) of a signal from QAM-64 (filter order: 80, 100, 120)

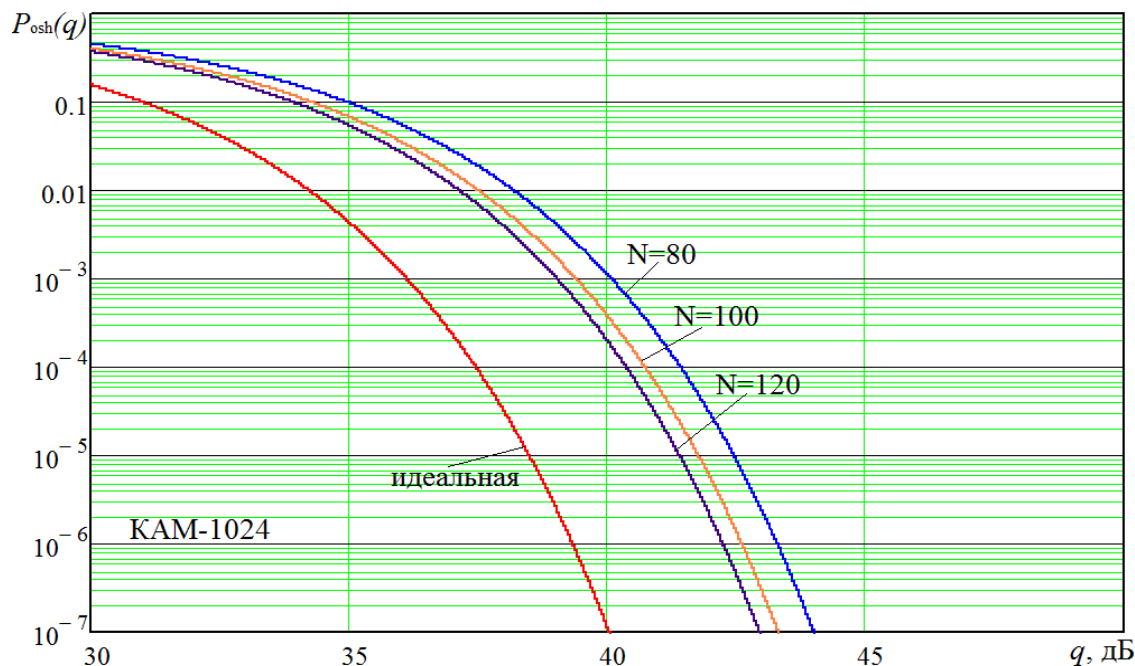


Рис. 16. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 7$) сигнала с КАМ-1024 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 16. Dependence of losses in the reliability of received data on the signal-to-noise ratio when passing through a non-recursive filter with a Kaiser weighting window ($\beta = 7$) of a signal from QAM-1024 (filter order: 80, 100, 120)

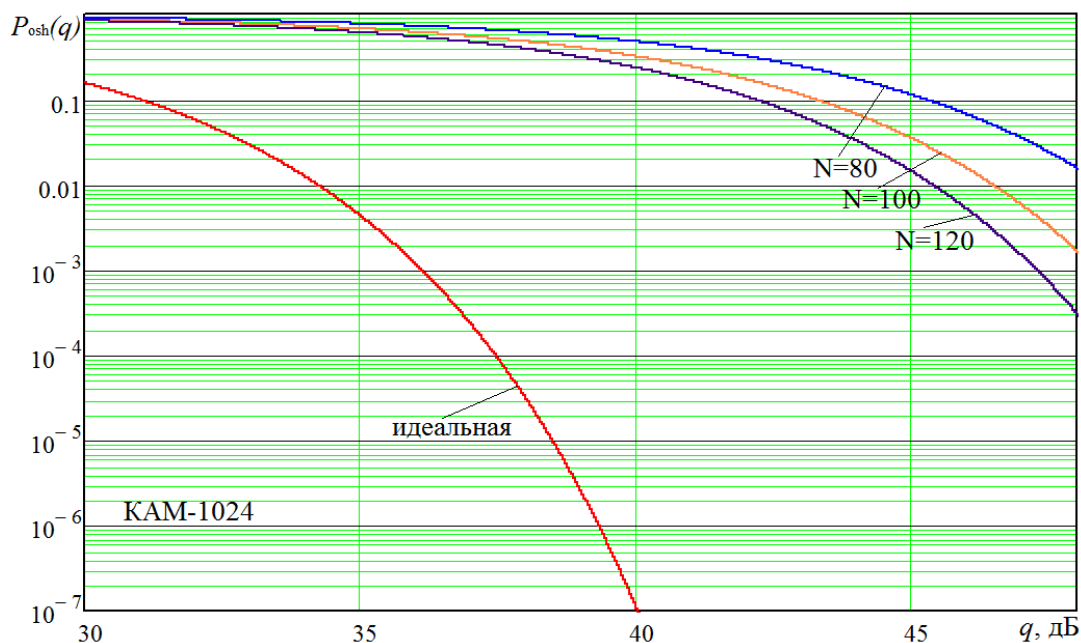


Рис. 17. Зависимости потерь в достоверности принимаемых данных от отношения сигнал-шум при прохождении через нерекурсивный фильтр с весовым окном Кайзера ($\beta = 9$) сигнала с КАМ-1024 (порядок фильтров: 80, 100, 120)

Fig. 17. Dependences of losses in the reliability of the received data on the ratio signal-to-noise when passing through a non-recursive filter with a weight Kaiser window ($\beta = 9$) of the signal from KAM-1024 (filter order: 80, 100, 120)

Оцененный эквивалент энергетического проигрыша фильтра Кайзера ($\beta = 9$) при приеме сигналов с КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1024 при $P_{\text{osh}} = 10^{-6}$, порядке фильтра – 80 соответственно равен: 2,25; 3,87; 7,5; 11,22 дБ.

Выводы

В работе показана методика расчета эквивалента энергетических потерь в селектирующих фильтрах, которая позволяет в дальнейшем провести

обоснованное предъявление требований к параметрам фильтров при синтезе многокритериальных средств радиосвязи.

Предложенный метод повышает достоверность определения значений критериев минимизации электронно-вычислительных ресурсов при заданной помехоустойчивости, а также минимизации использования структурно-функциональных узлов, характерных для существующей информационно-коммуникационной среды.

Список литературы

1. Метод и алгоритм автономного планирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при мониторинге пожарной обстановки в целях раннего обнаружения источника возгорания / Р. А. Томакова, С. А. Филист, А. Н. Брежнева [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 93–110.
2. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая линия – Телеком, 2023. 372 с.
3. Лисничук А. А. Процедура многокритериального синтеза OFDM-радиосигналов для снижения пик-фактора и повышения структурной скрытности систем передачи информации // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2021. № 77. С. 17–28.
4. Лисничук А. А. Многокритериальный синтез радиосигналов с прямым расширением спектра для адаптивных к узкополосным и структурным помехам систем передачи информации // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 1. С. 19–23.
5. Многокритериальный подход к выбору процедуры кодирования телеметрических радиосигналов сложных технических объектов / С. Н. Кириллов, А. А. Лисничук, П. С. Писака [и др.] // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2021. № 75. С. 3–14.
6. Концепция построения интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы по контролю и управлению жизнедеятельностью пчелиных семей / И. Г. Бабанин, Е. Ю. Бабанина, А. А. Боголюбская [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 8–26.
7. Оценка дальности передачи видеоинформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата / М. Ю. Алемпьев, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, Е. В. Скрипкина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 31–44.

8. Метод параметрического синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средств радиомониторинга источников радиоизлучения с квадратурной амплитудной модуляцией спутниковых систем связи / И. Г. Бабанин, И. Е. Мухин, Е. Ю. Бабанина, А. В. Хмелевская // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 41–63.
9. Фокин Г. А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программно-конфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов // Труды учебных заведений связи. 2019. № 5 (1). С. 78–94.
10. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Модифицированная математическая модель приемного тракта цифровых линий связи // Телекоммуникации. 2022. № 6. С. 16–23.
11. Леон Г., Коптев Д. С. Оценка влияния качества функционирования гетеродинов радиоприемных устройств на помехозащищенность приема цифровых сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Системы формирования и обработки сигналов в области бортовой связи. 2023. Т. 6, № 1. С. 264–268.
12. Конаныхин А. Ю., Конаныхина Т. Н., Панищев В. С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстродействующей обработке символьной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 106–119.
13. Плугатарев А. В., Егоров С. И., Локтионов А. П. Метод определения источника сообщений на основе обработки времени их поступления // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26, № 3. С. 81–97.
14. Прототип приемопередающего оборудования скоростной передачи данных в частотном диапазоне 57–64 ГГц / О. В. Болховская, Г. А. Ермолаев, С. Н. Трушков, А. А. Мальцев // Труды учебных заведений связи. 2023. № 9 (2). С. 23–39.
15. Кулешова Е. А., Таныгин М. О. Исследование характеристик современных генераторов псевдослучайных последовательностей // Телекоммуникации. 2023. № 7. С. 28–39.
16. Лисничук А. А., Батищев А. В. Двухкритериальный синтез OFDM-сигналов для повышения энергетической эффективности и помехоустойчивости // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2021. № 76. С. 3–16.
17. Липатников В. А., Петренко М. И. Модель самоорганизующейся сети радиосвязи, функционирующей в сложной сигнально-помеховой обстановке / В. А. Липатников // Труды учебных заведений связи. 2023. № 9 (2). С. 72–80.
18. Способ реализации криптографической защиты каналов для организации связи по протоколу MavLink при управлении автономными БПЛА / А. В. Хмелевская, А. Е. Севрюков, А. А. Севрюков [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 122–141.
19. Бабанин И. Г., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Методологические основы выбора параметров фильтров частотной селекции с учетом эквивалентных энергетических потерь

в радиоприёмных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2020. 136 с.

20. Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов / С. А. Филист, Р. А. Томакова, Н. Г. Нефедов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 64–85.

References

1. Tomakova R.A., Filist S.A., Brezhnev A.N., et al. Method and algorithm of autonomous flight trajectory planning of an unmanned aerial vehicle when monitoring the fire situation in order to detect the source of ignition early. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(1):93–110. (In Russ.)

2. Galkin V.A. Fundamentals of software-configurable radio. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2023. 372 p. (In Russ.)

3. Lisnichuk A.A. The procedure of multicriteria synthesis of OFDM radio signals to reduce the peak coefficient and increase the structural secrecy of information transmission systems. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan Radio Engineering University*. 2021;(77):17–28. (In Russ.)

4. Lisnichuk A.A. Multicriteria synthesis of radio signals with direct spectrum expansion for information transmission systems adaptive to narrowband and structural interference. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*. 2022;(1):19–23. (In Russ.)

5. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A., Pisaka P.S., et al. Multicriteria approach to selection procedures for encoding telemetric radio signals of complex technical objects. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan Radio Engineering University*. 2021;(75):3–14. (In Russ.)

6. Babanin I.G., Babanina E.Y., Bogolyubskaya A.A., et al. The concept of building an intelligent information and telecommunications system for monitoring and managing the vital activity of bee colonies. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(2):8–26. (In Russ.)

7. Alempyev M.Yu., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Evaluation of the transmission range of video information of various quality when monitoring emergency situations from an unmanned aerial vehicle *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(2):31–44. (In Russ.)

8. Babanin I.G., Mukhin I.E., Babanina E.Y., Khmelevskaya A.V. Method of parametric synthesis of electromagnetic access systems for radio monitoring of radio sources with

quadrature amplitude modulation of satellite communication systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(4):41–63. (In Russ.)

9. Fokin G.A. Principles and technologies of digital communication based on software-configurable radio: an overview of current trends in the field of creating a complex of training specialists. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication*. 2019;5(1):78–94. (In Russ.)

10. Dovbnya V.G., Koptev D.S. Modified mathematical model of the receiving path of digital communication lines. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2022;(6):16–23.

11. Leon G., Koptev D.S. Assessment of the influence of the quality of functioning of radio receiver heterodynes on the noise immunity of receiving digital signals with quadrature amplitude modulation. *Sistemy formirovaniya i obrabotki signalov v oblasti bortovoi svyazi = Signal Generation and Processing Systems in the Field of On-board Communications*. 2023;6(1):264–268. (In Russ.)

12. Konanykhin A.Yu., Konanykhina T.N., Panishchev V.S. Methods of improving the selected image area with high-speed processing of symbolic information. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021;11(4):106–119. (In Russ.)

13. Plugatarev A.V., Egorov S.I., Loktionov A.P. A method for determining the source of messages based on processing the time of their receipt. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. = Proceedings of the Southwest State University*. 2022;26(3):81–97. (In Russ.)

14. Bolkhovskaya O.V., Ermolaev G.A., Trushkov S.N., Maltsev A.A. Prototype of high-speed data transmission equipment in the frequency range 57–64 GHz band. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication*. 2023;9(2):23–39. (In Russ.)

15. Kuleshova E.A., Tanygin M.O. Investigation of the characteristics of modern pseudorandom sequence generators. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2023;(7):28–39. (In Russ.)

16. Lisnichuk A.A., Batishchev A.V. Two-criteria synthesis of OFDM signals to improve energy efficiency and noise immunity. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan Radio Engineering University*. 2021;(76):3–16. (In Russ.)

17. Lipatnikov V.A., Petrenko M.I. Model of a self-organizing radio communication network operating in a complex signal-interference environment. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication*. 2023;9(2):72–80. (In Russ.)

18. Khmelevskaya A.V., Sevryukov A.E., Sevryukov A.A., et. al. A method for implementing cryptographic protection of channels for organizing communication using the MAVLink protocol when controlling autonomous UAVs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika*.

Meditinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2022;12(4):122–141. (In Russ.)

19. Babanin I.G., Mukhin I.E., Koptev D.S. Methodological foundations for the selection of parameters of frequency selection filters taking into account equivalent energy losses in radio receivers of high-speed radio information transmission systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvenyi universitet; 2020. 136 p. (In Russ.)

20. Filist S.A., Tomakova R.A., Nefedov N.G., et al. Intelligent image processing system obtained from unmanned aerial vehicles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2022;12(4):64–85. (In Russ.)*

Информация об авторах / Information about the Authors

Бабанин Иван Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: babanin_ivan@bk.ru, ORCID: 0000-0001-6114-871X

Ivan G. Babanin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: babanin_ivan@bk.ru, ORCID: 0000-0001-6114-871X

Бабанина Екатерина Юрьевна, ассистент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: babanina@internet.ru, ORCID: 0009-0001-8014-6506

Ekaterina Yu. Babanina, Assistant of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: babanina@internet.ru, ORCID: 0009-0001-8014-6506

Михайлова Олеся Юрьевна, студент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mikhailova.olesya.u@gmail.com, ORCID: 0009-0003-0018-9595

Olesya Yu. Mikhailova, Student of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mikhailova.olesya.u@gmail.com, ORCID: 0009-0003-0018-9595

Хмелевская Алена Валентиновна, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Alena V. Khmelevskaya, Senior Lecture of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0009-0003-0018-9595