

УДК 621.391.82

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-31-42>

EDN UDTTHY



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование эффективности компенсации многолучевости в каналах связи при использовании фильтров с инверсной импульсной характеристикой

Ю.А. Полевода[@],
Г.В. Куликов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

• Поступила: 21.04.2025 • Доработана: 19.06.2025 • Принята к опубликованию: 10.11.2025

Резюме

Цели. При передаче данных в современных системах связи одной из ключевых проблем является многолучевое распространение сигналов, вызванное отражениями от различных препятствий. Для борьбы с этим эффектом используются разные методы, такие как направленные антенны, разнесенный прием, адаптивная фильтрация и выбор эффективных методов модуляции. Одним из перспективных подходов является применение фильтров с импульсной характеристикой (ИХ), инверсной ИХ канала, которые позволяют компенсировать задержанные сигналы. Эффективность таких фильтров зависит от точности настройки их параметров. Цель работы состоит в выработке рекомендаций для обеспечения эффективной компенсации многолучевости при использовании фильтров с инверсной ИХ, оценке влияния параметров канала (временных задержек и интенсивностей отраженных сигналов) на вероятность битовой ошибки (bit error rate, BER) и определении энергетического выигрыша.

Методы. Используются методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и математического моделирования.

Результаты. Представлены результаты исследования эффективности компенсации многолучевости в каналах связи при использовании на приемной стороне фильтров с ИХ, инверсной ИХ канала. В программной среде *Simulink* разработана модель многолучевого канала связи, включающая шесть лучей с различными временными задержками и интенсивностями. Проведено моделирование приема дискретной информации для разных методов модуляции: 16-КАМ (квадратурной амплитудной), 8-ФМ (многопозиционной фазовой) и 8-ЧМ (многопозиционной частотной) модуляциями. Выполнена оценка вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум и параметров многолучевого канала (временных задержек, интенсивностей отраженных лучей). Показано, что применение фильтров с инверсной ИХ позволяет значительно снизить вероятность битовой ошибки и улучшить качество связи. Оценено изменение величины BER при отклонениях параметров фильтра от идеальных.

Выводы. Результаты демонстрируют, что использование компенсационных фильтров эффективно для борьбы с многолучевыми искажениями, особенно в условиях сильной интерференции. Полученные данные могут быть использованы для проектирования и оптимизации современных систем связи, работающих в сложных условиях распространения сигналов.

Ключевые слова: многолучевой канал связи, импульсная характеристика, фильтр с инверсной импульсной характеристикой, многопозиционная модуляция, вероятность битовой ошибки, отношение сигнал/шум

Для цитирования: Полевода Ю.А., Куликов Г.В. Исследование эффективности компенсации многолучевости в каналах связи при использовании фильтров с инверсной импульсной характеристикой. *Russian Technological Journal*. 2026;14(1):31–42. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-31-42>, <https://www.elibrary.ru/UDTTHY>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Investigation of multipath compensation efficiency in communication channels using filters with inverse impulse response

Yuriy A. Polevoda[@],
Gennady V. Kulikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

• Submitted: 21.04.2025 • Revised: 19.06.2025 • Accepted: 10.11.2025

Abstract

Objectives. A key challenge when transmitting data in modern communication systems is the multipath propagation of signals caused by reflections from various obstacles. Various methods have been developed to address this issue including: directional antennas; diversity reception; adaptive filtering; and the choice of effective modulation methods. One promising approach is the use of filters with impulse response (IR) inverse to IR channel. This allows for compensating delayed signals. The effectiveness of such filters depends on the accuracy of their parameter settings. The paper aims to develop guidelines for effectively using filters with inverse IR to compensate for multipath. Additionally, it aims to evaluate the impact of various channel parameters, such as time delays and reflected signal intensities, on the bit error rate (BER) and to determine the energy gain.

Methods. The methods of statistical radio engineering, the theory of optimal signal reception and mathematical modeling were used.

Results. The results of a study on the effectiveness of multipath compensation in communication channels when using filters with inverse IR to that of the channel at the receiving side are presented. A multipath communication channel model was developed in the *Simulink* software environment, consisting of six beams with different time delays and intensities. Discrete information reception was simulated using different modulation methods: 16-QAM (quadrature amplitude modulation), 8-PSK (phase-shift keying), and 8-FSK (frequency-shift keying). The BER value was estimated depending on the signal-to-noise ratio and multipath channel parameters, including time delays and reflected beam intensities. It was shown that the use of filters with inverse IR can significantly reduce BER and improve communication quality. The change in the BER value is estimated for deviations of filter parameters from the ideal ones.

Conclusions. The results demonstrate that the use of compensating filters is effective in combating multipath distortion, especially under strong interference conditions. The data obtained can be used for the design and optimization of modern communication systems operating in complex signal propagation conditions.

Keywords: multipath communication channel, impulse response, filter with inverse impulse response, multi-position modulation, bit error probability, signal-to-noise ratio

For citation: Polevoda Yu.A., Kulikov G.V. Investigation of multipath compensation efficiency in communication channels using filters with inverse impulse response. *Russian Technological Journal*. 2026;14(1):31–42. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-31-42>, <https://www.elibrary.ru/UDTTHY>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы связи сталкиваются с множеством проблем, среди которых одной из самых трудных является передача данных в условиях многолучевого распространения сигналов. Многолучевое распространение, вызванное отражениями сигналов от различных препятствий, приводит к интерференции и искажению принимаемого сигнала, что существенно снижает качество связи. Существуют различные методы борьбы с этим эффектом: использование направленных антенн [1, 2], разнесенный прием [3–6], адаптивная фильтрация [7, 8], выбор эффективных методов модуляции [9–12]. Одним из ключевых методов борьбы с негативным влиянием многолучевости является использование фильтров с импульсной характеристикой (ИХ), инверсной ИХ канала, которые позволяют компенсировать задержанные сигналы [13–17]. В настоящей работе представлены результаты моделирования и анализа эффективности таких фильтров в условиях многолучевого канала связи при использовании сигналов с разными методами модуляции: квадратурной амплитудной (16-КАМ, когерентный прием), многопозиционной фазовой (8-ФМ, когерентный прием) и многопозиционной частотной (8-ЧМ, некогерентный прием).

Целью исследования является оценка влияния параметров многолучевого канала (задержек, интенсивностей отраженных сигналов) и фильтра на вероятность битовой ошибки (bit error rate, BER) при приеме дискретных сигналов и определение энергетического выигрыша при использовании фильтров с инверсной ИХ. Для проведения анализа в программной среде *Simulink*¹ разработана модель многолучевого канала связи, включающая шесть лучей с различными задержками и интенсивностями (дискретная многолучевость).

МОДЕЛЬ МНОГОЛУЧЕВОГО КАНАЛА

Определение ИХ канала связи и оценка ее параметров может быть осуществлена с помощью

предварительного зондирования этого канала сигналами специальной формы [18–23], например, короткими δ -импульсами, сигналами с частотной модуляцией, сигналами, кодированными специальными псевдослучайными последовательностями. В настоящей работе этот вопрос детально не рассматривается, а полагается, что параметры ИХ канала определены идеально или с некоторой погрешностью. Такую информацию в модели можно получить с помощью короткого зондирующего импульса, длительность которого влияет на нижнюю границу диапазона возможных задержек лучей. Для примера, длительность зондирующего импульса выбрана равной 1 нс.

Модель дискретной многолучевости канала связи (6 лучей, включая прямой $s_{\text{пр}}(t)$) создана в программной среде *MATLAB/Simulink* (trial-версия) и *Scilab Xcos*² с задержками τ_k сигнала на 0 (прямой луч), 7, 14, 21, 28 и 33 нс и относительными (относительно средней амплитуды сигнала прямого луча) интенсивностями μ_k задержанных сигналов 0.09, 0.08, 0.07, 0.06 и 0.05, соответственно (рис. 1, левая сторона). Величины задержек приведены для примера и могут быть масштабированы в зависимости от задаваемых условий распространения радиоволн.

Таким образом, сигнал на выходе многолучевого канала связи имеет следующий вид:

$$s(t) = s_{\text{пр}}(t) + \sum_{k=1}^5 \mu_k s_{\text{пр}}(t - \tau_k) + n(t),$$

где $n(t)$ – белый гауссовский шум (блок AWGN³ Channel), t – время.

Схема фильтра с инверсной ИХ включает в себя 6 ветвей с коэффициентами усиления, соответствующими интенсивностям, и временными задержками (рис. 1, правая сторона). В части, соответствующей задержанным сигналам, она является зеркальным (по знаку) отображением модели канала связи.

¹ <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. Дата обращения 15.02.2025. / Accessed February 15, 2025.

² <https://www.scilab.org/software/xcos>. Дата обращения 05.04.2025. / Accessed April 05, 2025.

³ Additive white Gaussian noise.

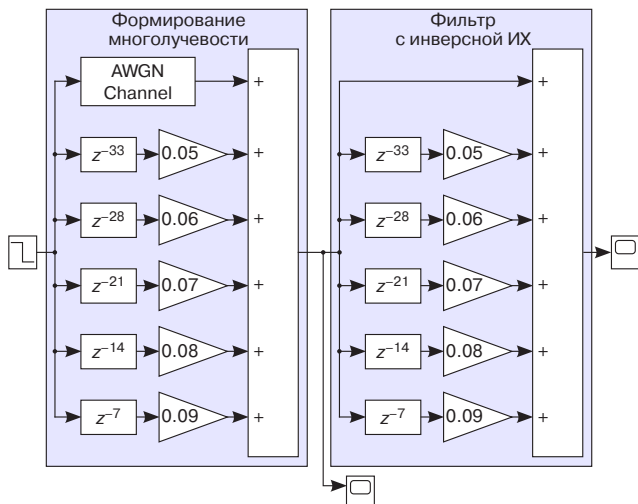


Рис. 1. Модель формирования и обработки многолучевого сигнала. z^{-1} – блок задержки, где «-1» – время задержки луча

ПРОВЕРКА РАБОТЫ ФИЛЬТРА С ИНВЕРСНОЙ ИХ

Проверка работы фильтра с инверсной ИХ хорошо иллюстрируется при прохождении через канал одиночного зондирующего импульса. На рис. 2а приведена осциллограмма сигнала на выходе канала связи, где показаны 1 прямой и 5 отраженных сигналов, что эквивалентно ИХ канала.

На рис. 2б показан сигнал на выходе фильтра с инверсной ИХ, откуда видно, что фильтр компенсировал сигналы задержанных лучей, но вместо них появились отклики на временных позициях, определяемых удвоенной временной задержкой, что легко объяснимо особенностями прохождения сигналов через фильтр [24].

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Анализ энергетического выигрыша

В рамках исследования проведен анализ энергетического выигрыша (по отношению сигнал/шум) в зависимости от относительной интенсивности одного отраженного луча для разных методов модуляции: 16-КАМ, 8-ФМ и 8-ЧМ. Моделирование проводилось с одним прямым и одним отраженным лучом, задержанным на 7 нс. Интенсивность отраженного луча μ варьировалась в широком диапазоне, что позволило оценить влияние как слабых, так и сильных отражений на вероятность битовой ошибки. При расчетах для каждого метода модуляции построены (рис. 3) зависимости величины BER от отношения сигнал/шум E_b/N_0 (E_b – энергия, приходящаяся

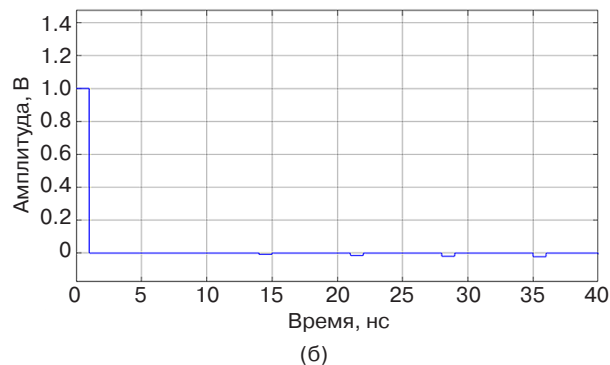
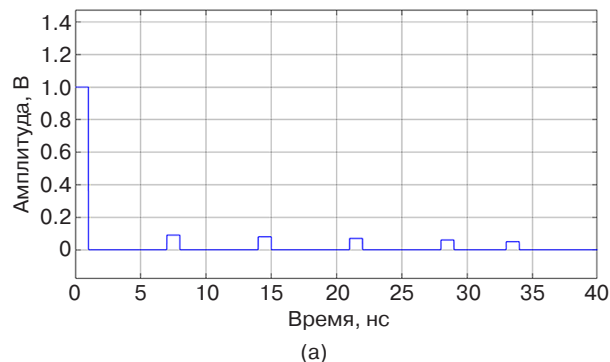


Рис. 2. Осциллограммы: (а) ИХ, (б) сигнала на выходе фильтра с инверсной ИХ

на бит информации, N_0 – спектральная плотность мощности шума) как без использования фильтра с инверсной ИХ (штриховые линии), так и с его применением (сплошные линии).

На рис. 4 приведены результаты расчета энергетического выигрыша для $BER = 10^{-3}$.

Из рис. 3 и 4 видно, что для интенсивности отраженного луча $\mu = 0.3$ при использовании фильтра с инверсной ИХ выигрыш по отношению сигнал/шум E_b/N_0 в зависимости от используемой модуляции сигналов составляет от единиц до десятка децибел, причем для сигнала 16-КАМ он в 2 раза больше по сравнению с сигналом 8-ФМ и более чем в 10 раз – с сигналом 8-ЧМ. Это связано с тем, что сигнал 8-ЧМ изначально обеспечивает наибольшую помехоустойчивость [11]: например, для него при интенсивности отраженного луча $\mu = 0.3$ для отношения сигнал/шум $E_b/N_0 = 9$ дБ вероятность битовой ошибки без фильтра составляет 10^{-3} , для сигнала 8-ФМ – более чем на порядок выше, а для 16-КАМ – на 2 порядка выше.

Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум

Следующий этап исследования – моделирование канала связи с одним прямым и пятью отраженными лучами, имеющими различные задержки (7, 14, 21, 28 и 33 нс) и интенсивности (для 16-КАМ и 8-ФМ $\mu = 0.09, 0.08, 0.07, 0.06$ и 0.05 относительно

средней амплитуды сигнала прямого луча, для 8-ЧМ $\mu = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$). Результатом моделирования являются зависимости BER от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при различном количестве лучей (рис. 5–7) без фильтрации (штриховые линии) и с фильтрацией (сплошные линии).

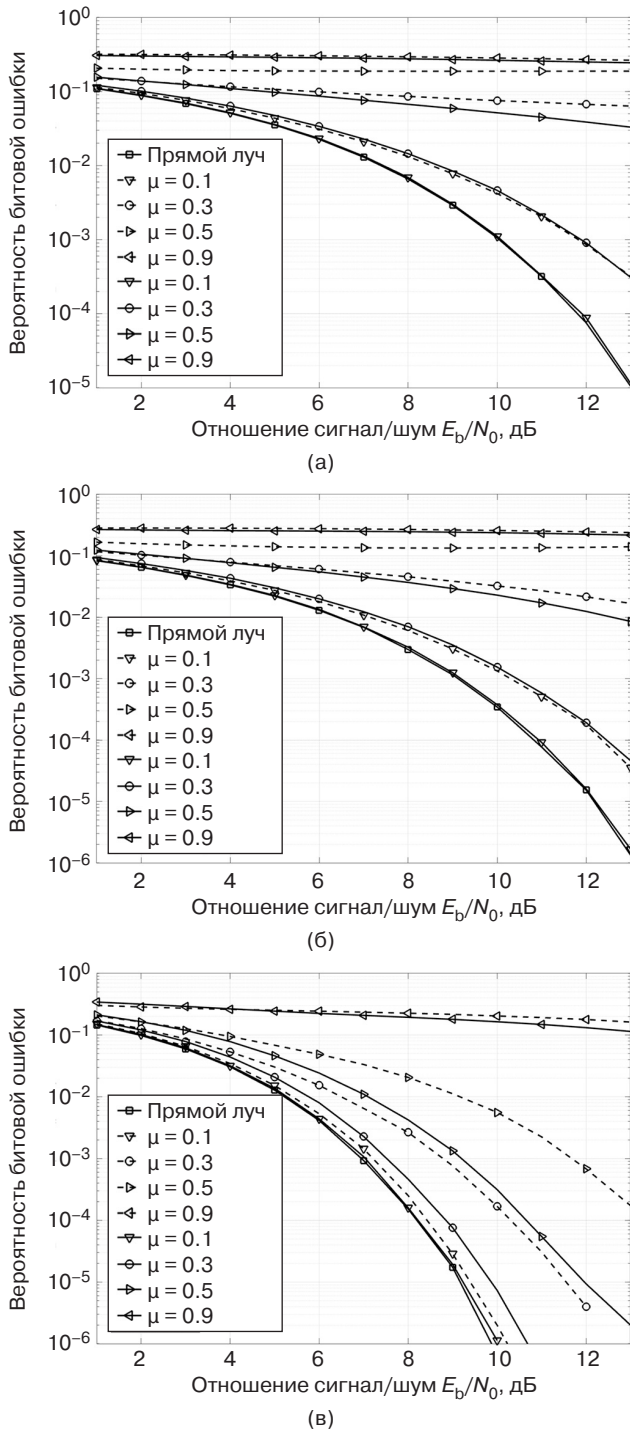


Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при приеме сигналов с одним прямым и одним отраженным лучом: (а) 16-КАМ, (б) 8-ФМ, (в) 8-ЧМ

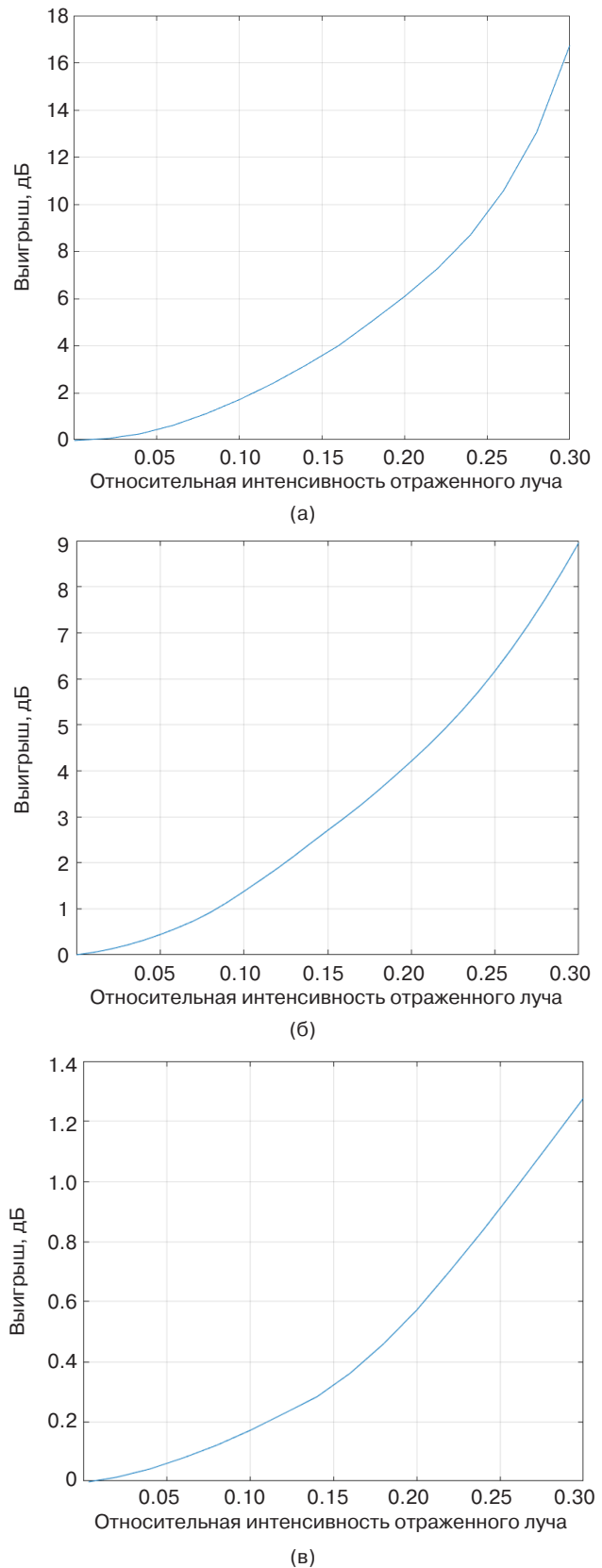


Рис. 4. Результаты расчета энергетического выигрыша для: (а) 16-КАМ, (б) 8-ФМ, (в) 8-ЧМ

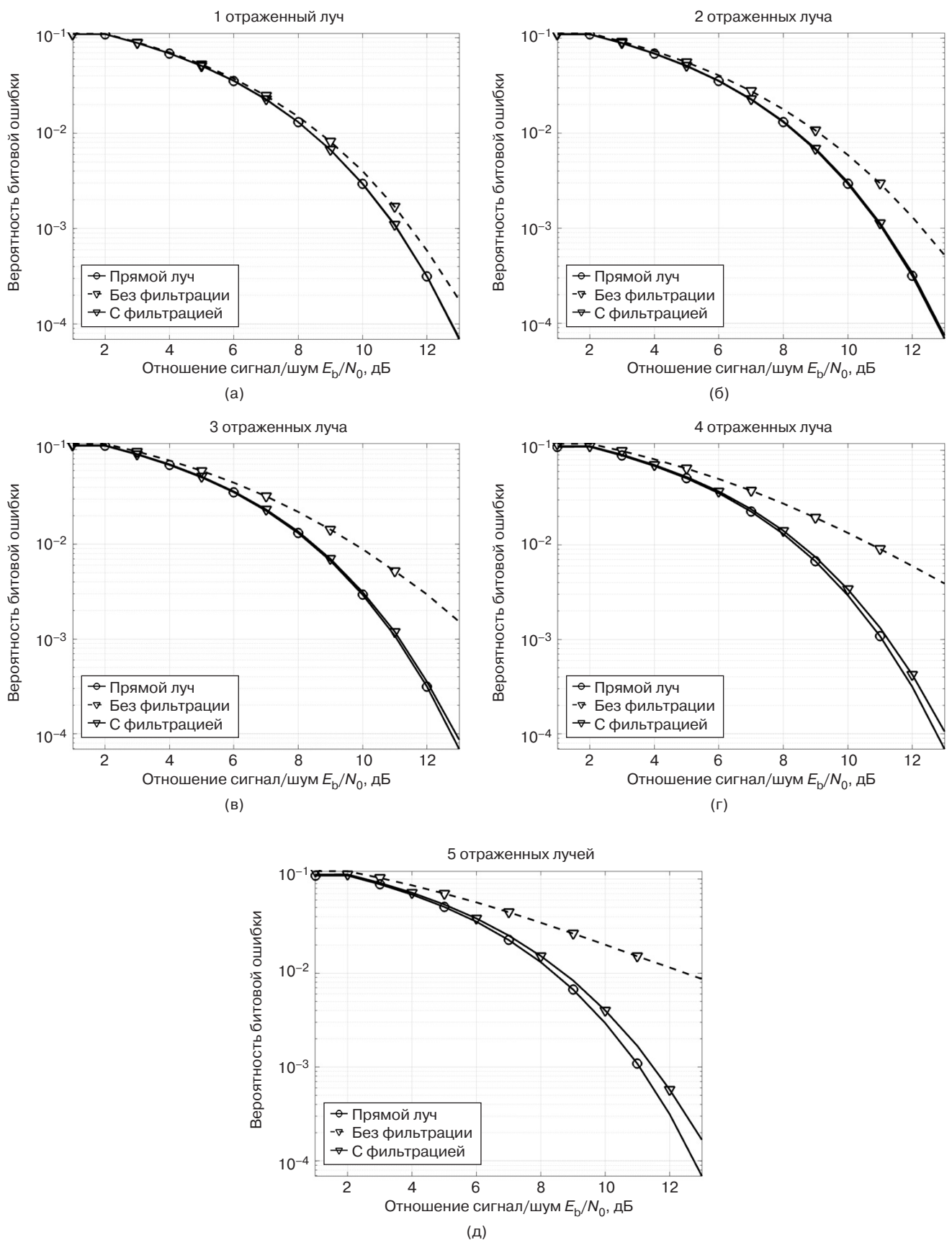


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при различном количестве лучей для 16-QAM

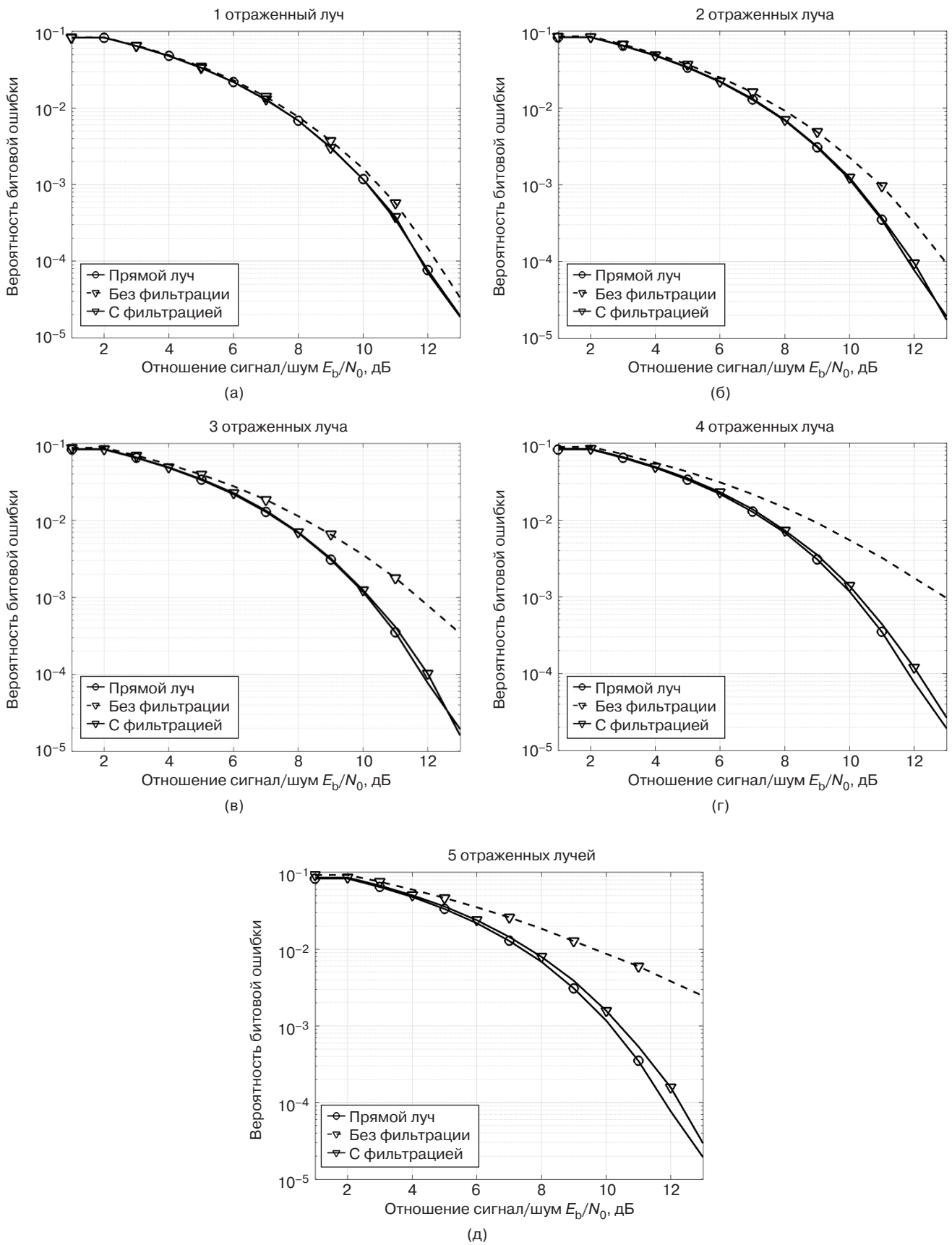


Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при различном количестве лучей для 8-ФМ

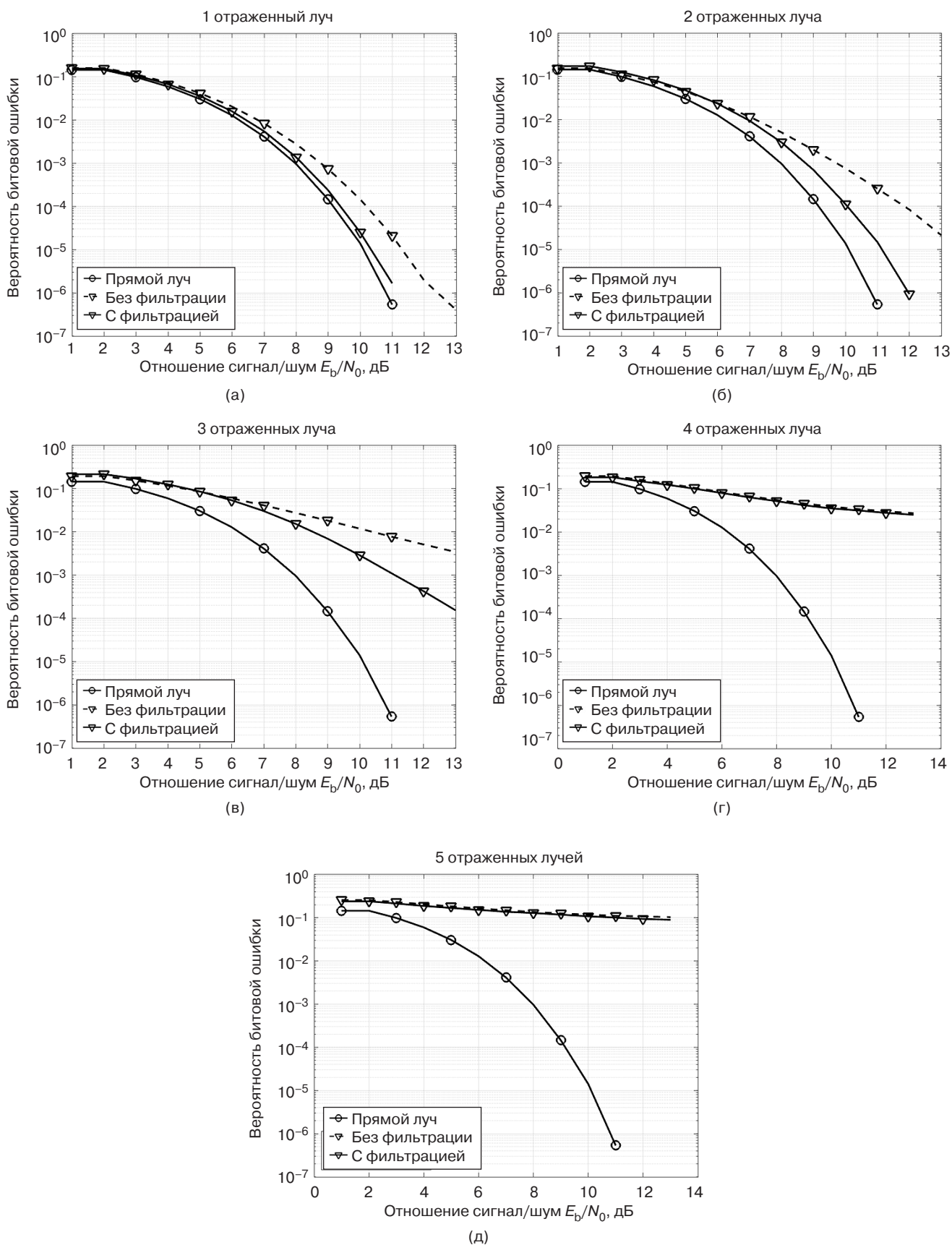


Рис. 7. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при различном количестве лучей для 8-ЧМ

Из рис. 5–7 видно, что при любом количестве отраженных лучей фильтр с инверсной ИХ для всех видов сигналов компенсирует влияние многолучевости, уменьшая вероятность битовой ошибки. Например, при отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 10$ дБ для сигналов 16-КАМ и 8-ФМ при 5 отраженных лучах на входе приемника вероятность битовой ошибки снижается в ~ 7 раз. Для сигнала 8-ЧМ, обеспечивающего более высокую помехоустойчивость, при моделировании взяты большие интенсивности отраженных лучей, поэтому выигрыш менее заметен по сравнению с 16-КАМ и 8-ФМ сигналами.

Влияние неточности установки параметров в фильтре с инверсной ИХ

Эффективность работы фильтра с инверсной ИХ зависит от точности установки его параметров, включая коэффициенты усиления и временные задержки в ветвях. В реальных условиях эти параметры могут отклоняться от расчетных значений из-за изменений в среде распространения сигналов, неточностей в оценке характеристик канала или ошибок в алгоритмах адаптации. Поэтому важно оценить, как отклонения параметров фильтра с инверсной ИХ влияют на качество связи и вероятность битовой ошибки.

Для оценки выбран случай канала с одним прямым и одним задержанным лучом с относительной интенсивностью 0.2 и задержкой 21 нс при отношении сигнал/шум 10 дБ.

На рис. 8 приведены графики зависимости вероятности битовой ошибки от отклонения коэффициента усиления в ветви фильтра, нормированного к номинальному значению 0.2, для сигналов 16-КАМ, 8-ФМ и 8-ЧМ.

Из полученных результатов видно, что правильная работа фильтра обеспечивается в достаточно широких пределах отклонения коэффициента усиления в ветви фильтра. Так, даже при отклонении этого коэффициента усиления в 1.5 раза относительно номинального значения, определяемого уровнем отраженного луча, вероятность битовой ошибки увеличивается примерно в 2 раза, а при отклонении коэффициента усиления в 2 раза вероятность битовой ошибки увеличивается на порядок для всех рассматриваемых сигналов.

На рис. 9 приведены графики зависимости вероятности битовой ошибки от отклонения величины задержки в ветви фильтра, нормированной к номинальному значению 21 нс, для сигналов 16-КАМ, 8-ФМ (при интенсивности отраженного луча $\mu = 0.2$) и 8-ЧМ (при интенсивности отраженного луча $\mu = 0.5$).

Характерный вид графиков на рис. 9а, б (16-КАМ и 8-ФМ) объясняется использованием в модели

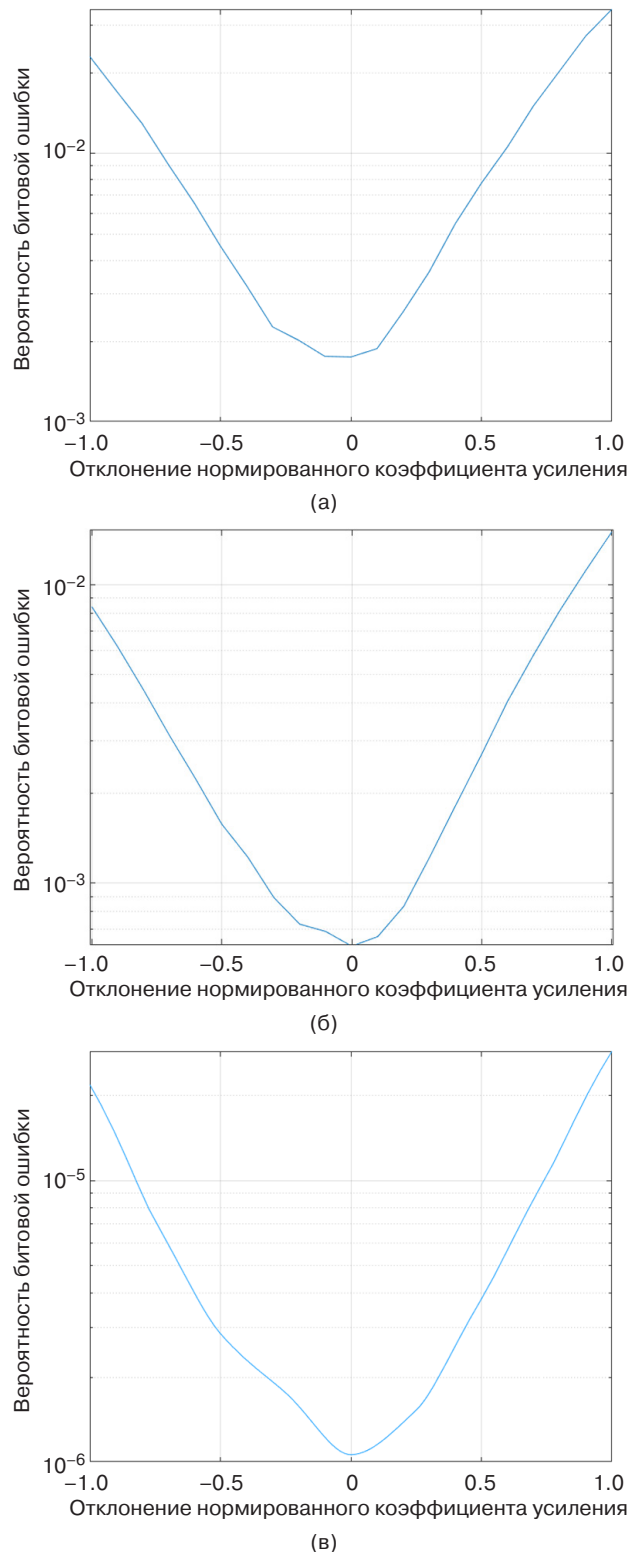


Рис. 8. Зависимости вероятности битовой ошибки от отклонения нормированного коэффициента усиления в ветви фильтра для сигналов: (а) 16-КАМ, (б) 8-ФМ, (в) 8-ЧМ

комплексной огибающей при представлении сигналов, из-за чего по временной оси нормированной задержки наблюдается нижнее «плато», длительность которого определяется длительностью канального

символа, в пределах которого информационная составляющая фазы сигналов постоянна; при выходе за границы этого «плато» вероятность ошибки резко возрастает. Для модели с 8-ЧМ в связи с некоторыми

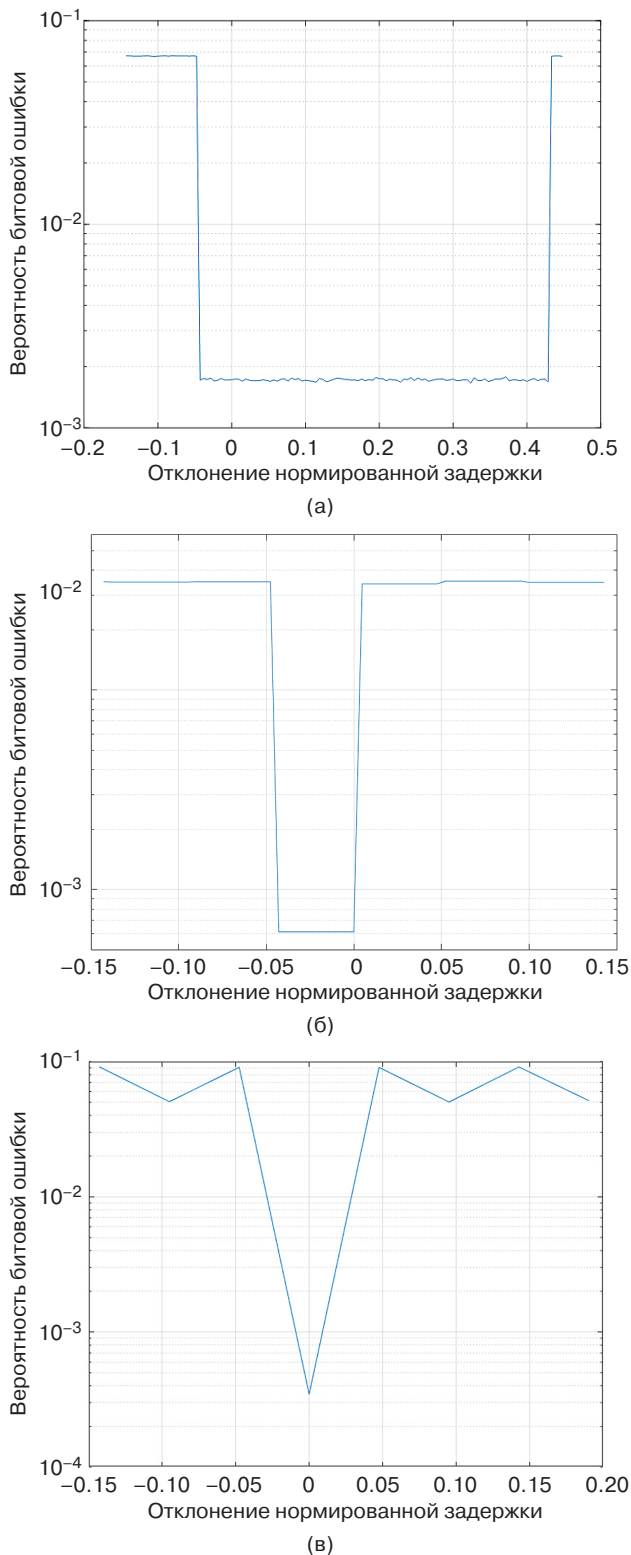


Рис. 9. Зависимости вероятности битовой ошибки от отклонения нормированной задержки в ветви фильтра для сигналов: (а) 16-КАМ, (б) 8-ФМ, (в) 8-ЧМ

программными ограничениями не предоставлялось возможным оценить вероятность битовой ошибки при отклонении задержки относительно номинального значения менее чем на 5%. Тем не менее, полученные результаты позволяют утверждать, что правильная работа фильтра обеспечивается в очень узких пределах отклонения величины задержки в ветви фильтра относительного номинального значения. Можно говорить о требуемой точности 1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования эффективности применения фильтра с ИХ, инверсной ИХ канала связи с дискретной многолучевостью, при приеме сигналов с многопозиционными видами модуляции 16-КАМ, 8-ФМ и 8-ЧМ. На основе математического моделирования в среде *Simulink* изучено влияние параметров канала и параметров фильтра на вероятность битовой ошибки.

Использование такого рода компенсационных фильтров обеспечивает существенный энергетический выигрыш по отношению сигнал/шум, достигающий в зависимости от вида модуляции единиц и десятков децибел, что делает их применение особенно перспективным в высокоскоростных системах связи. Установлено, что фильтр сохраняет работоспособность при отклонениях коэффициента усиления в ветви фильтра до 1.5 раз от номинального значения, но весьма требователен к точности установки временных задержек – допустимое отклонение составляет 1%.

Эффективность фильтра также зависит от количества лучей и их интенсивности. Так, границей применимости сверху можно считать величину μ , немногим более 0.5. При $\mu \rightarrow 0.9$ фильтр оказывается малоэффективным, что объясняется большой величиной откликов на временных позициях с удвоенной временной задержкой (рис. 2).

Таким образом, применение фильтров с ИХ, инверсной ИХ канала связи, зачастую является эффективным методом борьбы с многолучевыми искажениями, обеспечивающим значительное улучшение качества связи и энергетический выигрыш. Полученные данные подтверждают перспективность данного подхода для повышения надежности и пропускной способности современных телекоммуникационных систем.

Направлением дальнейших исследований является разработка адаптивных алгоритмов определения ИХ канала связи и автоматического определения параметров для фильтра с инверсной ИХ.

Вклад авторов

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

Authors' contribution

All authors contributed equally to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кубанов В.П., Ружников В.А., Сподобаев М.Ю., Сподобаев Ю.М. *Основы теории антенн и распространения радиоволн*. Самара: ОФОРТ; 2016, 258 с.
2. Вендик И.Б., Вендик О.Г., Козлов Д.С., Мунина И.В. *Диагностическое образование в антенных решетках*. М.: Физматлит; 2020, 112 с.
3. Proakis J. *Digital Communications*. N.Y.: McGraw-Hill Publ.; 2001, 1002 p.
4. Назаров С.Н., Шагарова А.А. Методы разнесенного приема в системах подвижной связи и широкополосного доступа. *Автоматизация процессов управления*. 2010;3:88–94. <https://elibrary.ru/muonlj>
5. Криницкий Г.В., Леонова М.Д., Юрасова Е.Н. Методы снижения влияния многолучевости на качество спутниковой навигации для обеспечения точного захода на посадку. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2015;222:98–102.
6. Куликов Г.В., Полевода Ю.А., Костин М.С. Использование пространственно-распределенной синфазной антенны для повышения помехоустойчивости приема сигналов. *Russian Technological Journal*. 2023;11(6):39–46. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-39-46>
7. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive Signal Processing*. Prentice-Hall; 1985, 474 p.
8. Фалько А.И. *Адаптивный прием сигналов*: монография. Новосибирск: СибГУТИ; 2015, 328 с.
9. Fuqin Xiong. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House, Inc.; 2006, 1039 p.
10. Sklar B., Harris F.J. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 3rd ed. Pearson Education, Inc.; 2021, 1105 p.
11. Троицкая А.Е., Полевода Ю.А., Куликов Г.В. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией на фоне ретранслированной помехи. *Russian Technological Journal*. 2024;12(5):33–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-33-41>
12. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. *Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи*: монография. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского; 2011, 368 с.
13. Голубев А.Г., Молчанов П.А. Алгоритмы оценивания импульсной характеристики многолучевого канала связи с трансформацией рабочего диапазона частот. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2024;1(189):150–156.
14. Нечаев Ю.Б., Малютин А.А. Методы оценки параметров многолучевого канала связи при итеративных алгоритмах приема. *Теория и техника радиосвязи*. 2009;2:13–25. <https://www.elibrary.ru/mwnirh>
15. Нечаев Ю.Б., Малютин А.А., Радько П.Н. Помехоустойчивость итеративных алгоритмов приема в многолучевых каналах с неточно известными параметрами. *Теория и техника радиосвязи*. 2009;4:23–28. <https://www.elibrary.ru/muukjn>
16. Коренной А.В., Межуев А.М., Ревин В.С. Адаптивный алгоритм приема многолучевых сигналов в декаметровом канале связи на основе оценки его импульсной характеристики. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2017;10(2):200–210. <https://www.elibrary.ru/yhssll>
17. Аникин А.С. Изменчивость импульсных реакций сухопутных трасс распространения сантиметровых радиоволн в десятисекундных интервалах. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Доклады ТУСУР)*. 2017;20(2):10–14. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2017-20-2-10-14>, <https://www.elibrary.ru/zgqmap>
18. Kolmonen V.-M., Kivinen J., Vuokko L., Vainikainen P. 5.3-GHz MIMO Radio channel sounder. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2006;55(4):1263–1269. <https://doi.org/10.1109/TIM.2006.877724>
19. Molina-Garcia-Pardo J.-M., Rodriguez J.-V., Juan-Llacer L. MIMO Channel Sounder Based on Two Network Analyzers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2008;57(9):2052–2058. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.922091>
20. Калачиков А.А., Щелкунов Н.С. Методы зондирования радиоканала ММО. *Вестник СибГУТИ*. 2015;3(31):66–72. <https://www.elibrary.ru/vnvxfb>
21. Farina A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. *Audio Engineering Society. AES Convention Papers Forum*. February 2000. Papers Number 5093, 21 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/2456363_Simultaneous_Measurement_of_Impulse_Response_and_Distortion_With_a_Swept-Sine_Technique. Дата обращения 15.02.2025. / Accessed February 15, 2025.
22. Халиуллин Р.Ф., Сулимов А.И. Моделирование оценки импульсной характеристики ММО-радиосистемы с многолучевым эффектом. *Радиотехника*. 2023;87(12):99–109. <https://www.elibrary.ru/pteaii>
23. Халиуллин Р.Ф., Сулимов А.И., Галиев А.А. Применение программно-определяемого радио для определения импульсной характеристики многолучевого радиоканала. В сб.: *Распространение радиоволн: сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции*, Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 г. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет; 2023. С. 261–264. <https://www.elibrary.ru/qivpqk>
24. Полевода Ю.А., Куликов Г.В., Чистяков Е.А. Компенсация многолучевости в канале связи с КАМ сигналом. В сб.: *Космические технологии – 2024. Сборник научных статей Международной межведомственной научно-технической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2024. С. 236–241. <https://www.elibrary.ru/yriksc>

REFERENCES

1. Kubanov V.P., Ruzhnikov V.A., Spodobae M.Yu., Spodobae Yu.M. *Osnovy teorii anten i rasprostraneniya radiovoln (Fundamentals of the Theory of Antennas and Radio Wave Propagation)*. Samara: OFORT; 2016, 258 p. (In Russ.).
2. Vendik I.B., Vendik O.G., Kozlov D.S., Munina I.V. *Diagrammoobrazovanie v antenykh reshetkakh (Diagram Formation in Antenna Arrays)*. Moscow: Fizmatlit; 2020, 112 p. (In Russ.).
3. Proakis J. *Digital Communications*. N.Y.: McGraw-Hill Publ.; 2001, 1002 p.
4. Nazarov S.N., Shagarova A.A. Techniques of diversified reception in systems of mobile communication and broadband access. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of Control Processes*. 2010;3:88–94 (in Russ.). <https://elibrary.ru/muonlj>
5. Krinitsky G.V., Leonova M.D., Yurasova E.N. Multipath mitigation techniques in satellite navigation for precise landing. *Nauchnyi vestnik MGTU GA = Civil Aviation High Technologies*. 2015;222:98–102 (in Russ.).
6. Kulikov G.V., Plevoda Yu.A., Kostin M.S. Use of spatially distributed in-phase antenna to increase the noise immunity of signal reception. *Russian Technological Journal*. 2023;11(6):39–46. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-39-46>

7. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive Signal Processing*. Prentice-Hall; 1985, 474 p.
8. Fal'ko A.I. *Adaptivnyi priem signalov (Adaptive Reception of Signals)*: Monograph. Novosibirsk: SibGUTI; 2015, 328 p. (In Russ.).
9. Fuqin Xiong. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House, Inc.; 2006, 1039 p.
10. Sklar B., Harris F.J. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 3rd ed. Pearson Education, Inc.; 2021, 1105 p.
11. Troitskaya A.E., Polevoda Yu.A., Kulikov G.V. Noise immunity of signal reception with multiple frequency-shift keying against retransmitted interference. *Russian Technological Journal*. 2024;12(5):33–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-33-41>
12. Ermolaev V.T., Flaksman A.G. *Teoreticheskie osnovy obrabotki signalov v besprovodnykh sistemakh svyazi (Theoretical Bases of Signal Processing in Wireless Communication Systems)*: Monograph. Nizhny Novgorod: N.I. Lobachevsky NNGU; 2011, 368 p. (In Russ.).
13. Golubev A.G., Molchanov P.A. Estimation algorithms for impulse response of multibeam communication channel with transformation of the working frequency band. *Nauchno-tekhnichestkiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskoye nauki = St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. 2014;1(189):150–156 (in Russ.).
14. Nechaev Yu.B., Malyutin A.A. Methods for estimating the multipath channel parameters using the iterative reception algorithms. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi = Radio Communication Theory and Technology*. 2009;2:13–25 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/mwnirh>
15. Nechaev Yu.B., Malyutin A.A., Radko P.N. Interference immunity of iterative reception algorithms in multipath channels with not precisely defined parameters. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi = Radio Communication Theory and Technology*. 2009;4:23–28 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/muukjn>
16. Korenoi A.V., Mezhuiev A.M., Revin V.S. Adaptive algorithm receiving multipath signals in the high frequency communication channel based on the estimation of its impulse response. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2017;10(2):200–210 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/yhssll>
17. Anikin A.S. Impulse responses variability of the terrestrial paths of propagation of centimeter radio waves in ten-second intervals. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki (Doklady TUSUR) = Proceedings of TUSUR University*. 2017;20(2):10–14 (in Russ.). <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2017-20-2-10-14>, <https://www.elibrary.ru/zgqmap>
18. Kolmonen V.-M., Kivinen J., Vuokko L., Vainikainen P. 5.3-GHz MIMO Radio channel sounder. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2006;55(4):1263–1269. <https://doi.org/10.1109/TIM.2006.877724>
19. Molina-Garcia-Pardo J.-M., Rodriguez J.-V., Juan-Llacer L. MIMO Channel Sounder Based on Two Network Analyzers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2008;57(9):2052–2058. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.922091>
20. Kalachikov A.A., Shchelkunov N.S. Methods of MIMO radio channel sounding. *Vestnik SibGUTI = The Herald of Siberian State University of Telecommunication and Information Science*. 2015;3(31):66–72 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vnvxfb>
21. Farina A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. *Audio Engineering Society. AES Convention Papers Forum*. February 2000. Papers Number 5093, 21 p. Available from URL: https://www.researchgate.net/publication/2456363_Simultaneous_Measurement_of_Impulse_Response_and_Distortion_With_a_Swept-Sine_Technique. Accessed February 15, 2025.
22. Khaliullin R.F., Sulimov A.I. Simulation of the impulse response estimation for a MIMO radio system with multipath effect. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2023;87(12):99–109 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j00338486-202312-11>, <https://www.elibrary.ru/pteaii>
23. Khaliullin R.F., Sulimov A.I., Galiev A.A. Using software-defined radio for estimation of impulse response of multipath channel. In: *Radio Wave Propagation: Proceedings of the 28th All-Russian Open Scientific Conference*, Yoshkar-Ola, May 16–19, 2023. Yoshkar-Ola: Volga State Technological University; 2023. P. 261–264 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/qivpqk>
24. Kulikov G.V., Polevoda Yu.A., Chistyakov E.A. Methods of adaptive rejection of signal audio interference. In: *Space Technologies – 2024: Proceedings of the International Interdepartmental Scientific and Production Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2024. P. 230–235 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/yriksc>

Об авторах

Полевода Юрий Александрович, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт 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>

About the Authors

Yuriy A. Polevoda, 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: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

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>