

Научная статья

УДК 621.391.1

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-4-125-131>

EDN:WUAEDQ



Текущее оценивание импульсной характеристики для системы OFDM в каналах с межсимвольной интерференцией

Кристина Сергеевна Слипенчук, k.slipenchuk@psuti.ru

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, 443010, Российская Федерация

Аннотация

Нахождение импульсной характеристики канала связи необходимо для организации оптимальной обработки принимаемых сигналов, что говорит об **актуальности** исследования систем OFDM и их модификаций для каналов с межсимвольной интерференцией. С учетом этих обстоятельств **цель** исследования сформулирована как оценивание импульсной характеристики канала связи с минимизацией ошибки оценивания.

В работе использованы **методы** наименьших квадратов и регуляризация для вычисления импульсной характеристики, при этом оценивание происходит с подбором оптимальных тестовых сигналов OFDM. На начальном этапе оценивание импульсной характеристики выполняется методом наименьших квадратов при известных тестовых сигналах OFDM. Важным аспектом вычислительного процесса является правильный выбор величины параметра регуляризации для минимизации систематического смещения регуляризованных оценок.

В ходе решения научной задачи получены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность предложенной методики оценивания импульсной характеристики в комплексе с наилучшими тестовыми сигналами, показывая небольшое отклонение оцененных значений.

Научная новизна работы определяется предложенным алгоритмом для динамически меняющихся каналов связи текущего оценивания, обеспечивающим постоянное уточнение импульсной характеристики канала и улучшающий качество приема сигналов.

Практическая значимость разработанного алгоритма состоит в том, что он может быть использован для оценивания импульсной характеристики систем OFDM и модификаций: N-OFDM, предусматривающая использование техники неортогонального распределения каналов; технология COFDM (аббр. от англ. Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing), реализующая дополнительное кодирование с прямой коррекцией ошибок; технология OFDMA (аббр. от англ. Orthogonal Frequency Division Multiple Access), обеспечивающая совместное использование одной частоты одновременно несколькими пользователями сети при наличии межсимвольной интерференции в канале связи.

Полученные экспериментальные результаты демонстрируют значительное улучшение качества когерентного приема сигналов при предложенных алгоритмах оценивания импульсной характеристики в совокупности с подобранными тестовыми комбинациями в системах OFDM с межсимвольной интерференцией.

Ключевые слова: OFDM, начальное оценивание импульсной характеристики, текущее оценивание импульсной характеристики, метод наименьших квадратов, метод регуляризации, канал связи с межсимвольной интерференцией

Ссылка для цитирования: Слипенчук К.С. Текущее оценивание импульсной характеристики для системы OFDM в каналах с межсимвольной интерференцией // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 4. С. 125–131. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-4-125-131. EDN:WUAEDQ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-4-125-131>

EDN:WUAEDQ

Current Estimation of Impulse Response for OFDM Systems in Channels with Intersymbol Interference

 Kristina S. Slipenchuk, k.slipenchuk@psuti.ru

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Samara, 443010, Russian Federation

Annotation

The determination of the impulse response of a communication channel is necessary for organizing optimal processing of received signals, which indicates the **relevance** of studying OFDM systems and their modifications for channels with intersymbol interference. Taking these circumstances into account, the **purpose** of the study is formulated as estimation of the impulse response of the communication channel with minimization of the estimation error.

In this work, **methods** of least squares and regularization are used to compute the impulse response, while the estimation is performed with the selection of optimal OFDM test signals. At the initial stage, estimation of the impulse response is carried out by the least squares method for known OFDM test signals. An important aspect of the computational process is the proper choice of the regularization parameter value to minimize the systematic bias of the regularized estimates.

Results. In the course of solving the scientific problem experimental studies have been obtained that confirm the effectiveness of the proposed method for estimating the impulse response in combination with optimal test signals, demonstrating a small deviation of the estimated values.

Scientific novelty of the work is determined by the proposed algorithm for dynamically varying communication channels with on-line estimation, which provides continuous refinement of the channel impulse response and improves the quality of signal reception.

The practical significance of the developed algorithm lies in the fact that it can be used to estimate the impulse response in OFDM systems and their modifications: N-OFDM, which involves the use of non orthogonal channel allocation techniques; COFDM technology (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing), which implements additional coding with forward error correction; OFDMA technology (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), which ensures joint use of a single frequency simultaneously by several network users in the presence of intersymbol interference in the communication channel.

The obtained experimental results demonstrate a significant improvement in the quality of coherent signal reception when using the proposed algorithms for impulse response estimation in combination with the selected test signal combinations in OFDM systems with intersymbol interference.

Keywords: OFDM, initial impulse response estimation, current impulse response estimation, least squares method, regularization method, memory channel

For citation: Slipenchuk K.S. Current Estimation of Impulse Response for OFDM Systems in Channels with Intersymbol Interference. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026; 12(4):125–131. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-4-125-131. EDN:WUAEDQ

Введение

В современных беспроводных коммуникациях широко используется передача информационных потоков с применением множественных параллельных ортогонально разделенных несущих частот, известная как технология OFDM (аббр. от

англ. Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Базовая концепция OFDM породила ряд специализированных модификаций, среди которых выделяются технология N-OFDM, предусматривающая использование техники неортогонального распределения каналов; технология COFDM (аббр. от англ.

Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing), реализующая дополнительное кодирование с прямой коррекцией ошибок; технология OFDMA (аббр. от англ. Orthogonal Frequency Division Multiple Access), обеспечивающая совместное использование одной частоты одновременно несколькими пользователями сети.

Однако известные ограничения OFDM [1] ставят задачи дальнейшего совершенствования базовых технологий, что способствует улучшению аналоговых модификаций (N-OFDM, COFDM, OFDMA).

Современные условия, в которых работают беспроводные системы передачи сигналов, характеризуются высокими уровнями внешнего шума и помех, вызванных многочисленными посторонними сигналами. Главной проблемой является межсимвольная интерференция (МСИ), которая возникает из-за ограниченности полосы частот и многолучевого распространения.

Борьба с МСИ алгоритмическими методами основана на использовании принципа «приема в целом» (например, алгоритм «приема в целом» с элементарным принятием решений (ПЦППР)), реализация которого при когерентном приеме требует знания импульсной характеристики канала связи. Техническое противодействие с МСИ связано с внедрением в структуру канального сигнала всевозможных защитных (временных) промежутков, что не требует использования методов оптимального приема и снижает пропускную способность канала.

Ниже для определения импульсной характеристики в рамках технологии OFDM предлагается метод наименьших квадратов, адаптированный с учетом специфики конкретной технологии. Для быстро изменяющихся параметров канала связи рекуррентно вычисляется уточненная оценка импульсной характеристики при комбинировании начального и текущего алгоритмов оценивания этого параметра при наличии МСИ в реальном канале связи для технологии OFDM. Результатом использования описанных методов оценивания импульсной характеристики является повышение помехоустойчивости приема сигналов OFDM.

Постановка задачи

Разрабатывая алгоритм оценки импульсной реакции каналов связи с МСИ, целесообразно выделить два основных подхода: начальное и текущее оценивание. Начальное оценивание осуществляется на основании идеально классифицированной выборки, тогда как текущее оценивание проводится по условно классифицированной выборке, применяемой непосредственно в системах OFDM с использованием механизма обратной связи по оценке (ОСО) [2].

Рассмотрим принятый сигнал $\mathbf{Z}$ на входе устройства приема, представленный в матричной форме следующим образом:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{H} + \mathbf{W}, \quad (1)$$

где $\mathbf{U}$ – матрица отсчетов огибающей OFDM:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \dot{u}_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dot{u}_1 & \dot{u}_0 & & \dots & 0 \\ \dot{u}_2 & \dot{u}_1 & \dot{u}_0 & \dots & 0 \\ & & & \dots & 0 \\ \dot{u}_{N-1} & \dot{u}_{N-2} & & \dots & \dot{u}_0 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{H} = [h_0 \ h_1 \ \dots \ h_{M-1}]^T$ – неизвестный вектор отсчетов импульсной характеристики канала связи с памятью; $\mathbf{W} = [\dot{w}_0 \ \dot{w}_1 \ \dots \ \dot{w}_{N-1}]^T$ – вектор значений комплексного белого гауссовского шума.

В реальных условиях системы OFDM и ее модификаций N-OFDM, COFDM, OFDMA победить вычислительные трудности по оценке вектора $\mathbf{H}$ предлагается, используя метод наименьших квадратов, в комплексе с алгоритмами начального и текущего оценивания.

Начальное оценивание методом наименьших квадратов

Суть метода наименьших квадратов [3–5] при использовании выражения (1) заключается в минимизации формы:

$$J(\hat{\mathbf{H}}) = \|(\mathbf{U}\hat{\mathbf{H}} - \mathbf{Z})\|^2 \rightarrow \min_{\mathbf{H}}, \quad (2)$$

где вектор $\hat{\mathbf{H}}$ является решением задачи.

Умножая в выражении (1) правую и левую часть на матрицу $\mathbf{U}^T$, получим формулу:

$$\mathbf{U}^T \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{H} = \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{Z}, \quad (3)$$

которая упрощает реализацию минимизации (2) с введением матрицы штрафов $\mathbf{R}$.

Рекомендуемый алгоритм по подбору коэффициентов весовой матрицы основан на применении теоремы Гаусса – Маркова [4]. Пусть ранг матрицы отсчетов огибающей OFDM равен $r(\mathbf{U}) = n$. Если помехи $\dot{w}_0, \dot{w}_1, \dots, \dot{w}_m$, составляющие вектор $\mathbf{W}$, являются некоррелированными и имеют $E(w_i^2) = v > 0$, оптимальную несмещенную оценку $\mathbf{H}$ по (1) $\mathbf{Z} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{H} + \mathbf{W}$ можно получить методом наименьших квадратов для поставленной задачи (1). В общем случае, когда помехи $\dot{w}_0, \dot{w}_1, \dots, \dot{w}_m$ коррелированы, весовая матрица выбирается как $\mathbf{R} = \mathbf{V}^{-1}$, где $\mathbf{V}$ – матрица корреляции отсчетов шума [4].

Тогда метод наименьших квадратов с весовой матрицей представляет собой минимизацию формы:

$$\|(\mathbf{U}\hat{\mathbf{H}} - \mathbf{Z})\|_{\mathbf{R}}^2 \rightarrow \min_{\mathbf{H}}.$$

Используя весовую матрицу, выражение (3) можно преобразовать к следующему виду:

$$\dot{\mathbf{U}}^T \cdot \mathbf{R} \cdot \dot{\mathbf{U}} \cdot \mathbf{H} = \dot{\mathbf{U}}^T \cdot \mathbf{R} \cdot \dot{\mathbf{Z}}.$$

Тогда, согласно методу наименьших квадратов, оценки импульсной характеристики запишутся как:

$$\hat{\mathbf{H}} = ((\dot{\mathbf{U}})^T \cdot \mathbf{R} \cdot \dot{\mathbf{U}})^{-1} (\dot{\mathbf{U}})^T \cdot \mathbf{R} \cdot \dot{\mathbf{Z}}. \quad (4)$$

На начальном этапе для технологии OFDM, когда после прохождения канала связи с МСИ произведено только первое измерение принятых сигналов (вектор $\mathbf{Z}$), осуществляется оценивание импульсной характеристики по формуле (4) методом наименьших квадратов с применением известных значений испытательных комбинаций системы OFDM.

Использование регуляризации в методе наименьших квадратов

Для случая, когда при вычислении матрицы $\mathbf{U}^T \mathbf{U}$ полученная матрица близка к вырожденной, целесообразно использовать регуляризацию решения задачи (2):

$$J_\alpha(\hat{\mathbf{H}}) \triangleq \|(\dot{\mathbf{U}}\hat{\mathbf{H}} - \dot{\mathbf{Z}})\|^2 + \alpha \cdot \|\mathbf{H} - \hat{\mathbf{H}}_0\|^2 \rightarrow \min_{\mathbf{H}},$$

где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации; $\hat{\mathbf{H}}_0$ – известные значения импульсной характеристики на предыдущем шаге оценивания.

После преобразований, согласно [4], получаем единственное решение:

$$\hat{\mathbf{H}}_\alpha = ((\dot{\mathbf{U}})^T \cdot \dot{\mathbf{U}} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \cdot ((\dot{\mathbf{U}})^T \cdot \dot{\mathbf{Z}} + \alpha \hat{\mathbf{H}}_0) = \hat{\mathbf{H}}_0 + ((\dot{\mathbf{U}})^T \cdot \dot{\mathbf{U}} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \cdot (\dot{\mathbf{U}})^T \cdot (\mathbf{Z} + \dot{\mathbf{U}}\hat{\mathbf{H}}_0), \quad (5)$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

При начальном оценивании, когда данные об импульсной характеристике $\hat{\mathbf{H}}_0$ отсутствуют, формула (5) приобретает вид:

$$\hat{\mathbf{H}}_\alpha = ((\dot{\mathbf{U}})^T \cdot \dot{\mathbf{U}} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \cdot (\dot{\mathbf{U}})^T \cdot \dot{\mathbf{Z}}. \quad (6)$$

Этот вариант (6) метода наименьших квадратов будем считать методом регуляризации решения выражения (1) для каналов с МСИ. Данная регуляризация совпадает с регуляризацией по Тихонову [2].

Когда в реальных системах передачи с технологией OFDM возникает необходимость описания состояния быстроизменяющегося канала связи с МСИ, переходят к задаче текущего оценивания. Этот алгоритм формирует оценку на следующем шаге по мере поступления новых данных выборки; обозначим этот шаг $0 + 1$. Тогда, согласно [3], текущая оценка импульсной характеристики для технологии OFDM можно описать следующим уравнением:

$$\hat{\mathbf{H}}_\alpha^{0+1} = \hat{\mathbf{H}}_0 + ((\dot{\mathbf{U}}^{0+1})^T \cdot (\alpha \mathbf{I} + (\dot{\mathbf{U}}^{0+1})(\dot{\mathbf{U}}^{0+1})^T)^{-1} (\dot{\mathbf{Z}} - (\dot{\mathbf{U}}^{0+1})\hat{\mathbf{H}}_0)). \quad (7)$$

Таким образом, для системы OFDM при наличии МСИ «новое» значение на следующей выборке после оценки импульсной характеристики канала связи методом регуляризации вычисляется с использованием «старой» оценки $\hat{\mathbf{H}}_0$, получаемой на предыдущей выборке.

Моделирование оценивания импульсной характеристики при обработке сигналов OFDM

Для любого из методов оценивания импульсной характеристики (4–7) при начальном и текущем алгоритмах необходимо знание отсчетов векторов $\dot{\mathbf{U}}$ и $\dot{\mathbf{U}}^{0+1}$, что реализуется при вставке тестовых комбинаций для формирования передаваемого сигнала OFDM.

Проведено моделирование на ЭВМ по формированию специализированных тестовых комбинаций, существенно влияющих на точность измерения импульсной характеристики. Моделирование предлагаемого алгоритма оценивания импульсной характеристики канала с МСИ по методу наименьших квадратов осуществлено на примере сигналов OFDM-KAM-16. Отсчеты огибающей сигналов OFDM формируются операцией быстрого преобразования Фурье идентичными специально вставляемыми тестовыми комбинациями КАМ-16. Это дает матрицу $\dot{\mathbf{U}}$, обладающую устойчивой диагональю, что способствует улучшению результатов оценивания [1, 2].

Формирование комбинаций OFDM для первого квадранта сигнального созвездия КАМ-символов (рисунок 1) $\dot{d}_8, \dot{d}_9, \dot{d}_{12}, \dot{d}_{13}$, где вычисляются значения $\{\dot{d}_i\}$, осуществляется следующим образом:

– $\dot{d}_8 = \sqrt{1^2 + 3^2}(\cos(\frac{\pi}{3}) + j \cdot \sin(\frac{\pi}{3})) = 1 + 3j$, при 16 одинаковых «четверках» кодовых символов $b_8 = 1000$;

– $\dot{d}_9 = \sqrt{1^2 + 1^2}(\cos(\frac{\pi}{4}) + j \cdot \sin(\frac{\pi}{4})) = 1 + 1j$, при 16 одинаковых «четверках» кодовых символов $b_9 = 1001$;

– $\dot{d}_{12} = \sqrt{3^2 + 3^2}(\cos(\frac{\pi}{4}) + j \cdot \sin(\frac{\pi}{4})) = 3 + 3j$, при 16 одинаковых «четверках» кодовых символов $b_{12} = 1100$;

– $\dot{d}_{13} = \sqrt{3^2 + 1^2}(\cos(\frac{\pi}{6}) + j \cdot \sin(\frac{\pi}{6})) = 3 + 1j$, при 16 одинаковых «четверках» кодовых символов $b_{13} = 1101$.

Проведено исследование оценивания импульсной характеристики методом регуляризации при различных сигналах тестовых комбинаций. Использовано шестнадцать возможных сформированных матриц тестовых комбинаций сигналов

OFDM для всех вариантов квадранта сигнального созвездия КАМ-16 (см. рисунок 1) с целью определения наилучших испытательных комбинаций по критерию минимума среднеквадратической ошибки.

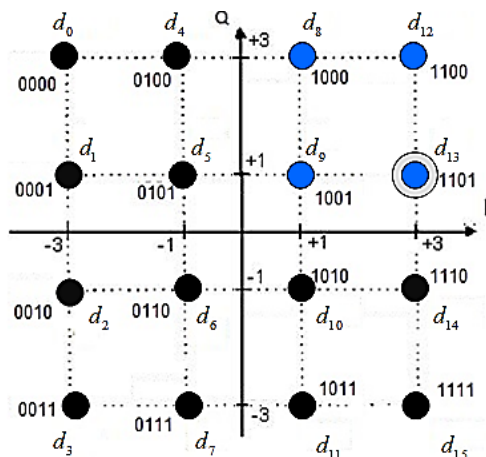


Рис. 1. Сигнальное созвездие модуляции КАМ-16

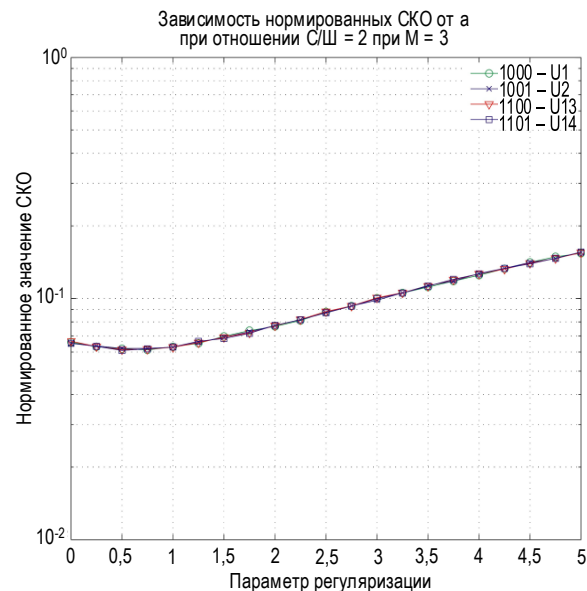
Fig. 1. 16-QAM Constellation Diagram

На рисунке 2 показаны зависимости нормированных среднеквадратических ошибок (СКО) оценки импульсной характеристики канала, рассчитанной с использованием метода регуляризации, применительно к четырем наилучшим наборам тестовых выборок огибающих символов OFDM матриц. Ими являются матрицы $\hat{U}1$, $\hat{U}2$, $\hat{U}13$, $\hat{U}14$ отсчетов огибающей символов OFDM:

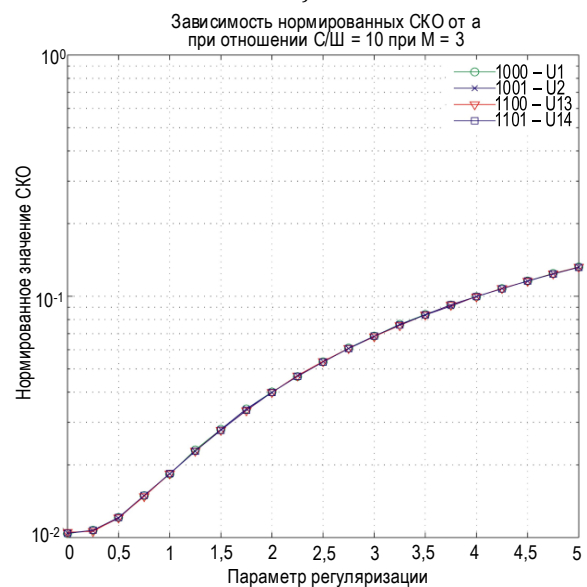
$$\begin{aligned} \hat{U}1 &= \begin{bmatrix} -3+1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -3+1j \end{bmatrix}, \\ \hat{U}2 &= \begin{bmatrix} -3-1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -3-1j \end{bmatrix}, \\ \hat{U}13 &= \begin{bmatrix} 3+1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 3+1j \end{bmatrix}, \\ \hat{U}14 &= \begin{bmatrix} 3-1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 3-1j \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

Представленные кривые (см. рисунок 2) отражают изменение нормированной СКО регуляризованных оценок импульсной характеристики, полученных для указанных наборов, состоящих из подобранных значений КАМ-символов, выбранных для каждого квадранта сигнального созвездия с целью формирования сигнала OFDM. Результаты показали абсолютное совпадение кривых нормированных значений СКО для исследуемых наилучших наборов $\hat{U}1$, $\hat{U}2$, $\hat{U}13$, $\hat{U}14$ при любом значении параметра регуляризации, а также при отношении сигнал / шум, равном 2 и 10 дБ. Отметим, что при наличии регуляризирующего параметра, значения которого превышают $\alpha > 0,25$, увеличивается погреш-

ность. Любая из матриц $\hat{U}1$, $\hat{U}2$, $\hat{U}13$, $\hat{U}14$ применима для методов оценивания наименьших квадратов с регуляризацией. Далее используется матрица $\hat{U}1$.



а)



б)

Рис. 2. Графики нормированного СКО для разных отношений сигнал / шум при рекомендованных тестовых комбинациях OFDM

Fig. 2. Normalized RMSE vs. SNR Plots for the Recommended OFDM Test Combinations

На следующем этапе исследования показано влияние точности вычисления импульсной характеристики на вероятность возникновения ошибок при приеме алгоритмом ПЦППР сигналов в системах OFDM, функционирующих в условиях каналов связи, подверженных эффекту МСИ (рисунок 3).

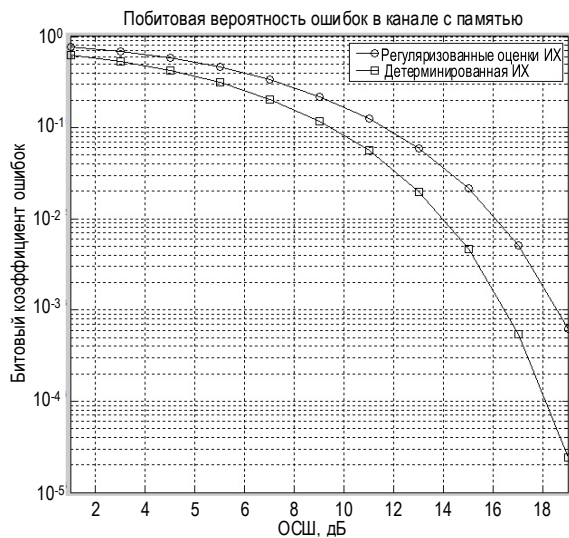


Рис. 3. Графики битового коэффициента ошибок от отношения сигнал / шум

Fig. 3. Bit Error Rate (BER) vs. Signal-to-Noise Ratio (SNR) Plots for the Regularized Estimation Method and the Case of Exactly Known Impulse Response

При малом отношении сигнал / шум, равном 5 дБ, разница между оцененными значениями с тестовой комбинацией ($\mathbf{U}1$) импульсной характеристики и точной известной в месте приема составляет 0,16, согласно кривым рисунка 3. Наблюдается снижение энергетической эффективности порядка 2 дБ в интервале вероятностей битовой ошибки от 0,01 до 0,001. Графики битового коэффициента ошибок когерентной обработки отсчетов OFDM получены при начальном оценивании импульсной характеристики методом регуляризации (6) и наилучших тестовых комбинаций $\mathbf{U}1$ (8).

Для случаев быстроизменяющегося канала, когда МСИ и воздействие шума существенно увеличивает битовый коэффициент ошибок, предлагается добавить текущее оценивание импульсной характеристики. Таким образом, для начального и текущего оценивания импульсной характеристики для начальной выборки и следующего $0 + 1$ вектора значений отсчетов огибающей $\mathbf{U}$ и $\mathbf{U}^{0+1}$ оказываются равными сформированным значениям матрицы $\mathbf{U}1$. Тогда для системы OFDM алгоритм текущего оценивания импульсной характеристики методом регуляризации принимает вид при $r(\mathbf{U}1) = n$:

$$\hat{\mathbf{H}}_{\alpha}^{k+1} = \hat{\mathbf{H}}_0 + ((\mathbf{U}1)^T(\alpha \mathbf{I} + \mathbf{U}1 \cdot (\mathbf{U}1)^T)^{-1}(\mathbf{Z} - \mathbf{U}1 \cdot \hat{\mathbf{H}}_0)), \quad (9)$$

Список источников

1. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи. М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
2. Карташевский В.Г. Обработка пространственно-временных сигналов в каналах с памятью. М.: Радио и связь, 2000. 272 с. EDN:VKFMZV
3. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. Пер. с англ. М.: Связь, 1976. 496 с.
4. Ряшко Л.Б. Оптимальное рекуррентное оценивание. Екатеринбург: Типолаборатория УрГУ, 1997. 53 с.
5. Тихонов А.Н., Арсеньев В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.

где $\hat{\mathbf{H}}_0$ – значения импульсной характеристики, вычисленные при начальном оценивании параметров канал связи с МСИ.

Такая рекуррентная оценка позволяет следить за быстроизменяющимися каналами связи для системы OFDM и уменьшить битовый коэффициент ошибок приема любым методом обработки OFDM, требующим знания параметров каналов связи при влиянии МСИ.

Заключение

Проблема уменьшения негативного влияния МСИ является актуальной для современных систем ортогонально-частотного мультиплексирования OFDM, N-OFDM, COFDM, OFDMA. Решение данной проблемы требует точной оценки импульсной характеристики канала связи.

На начальном этапе оценивание импульсной характеристики выполняется методом наименьших квадратов при известных тестовых сигналах OFDM. В случае, когда полученная матрица $\mathbf{U}^T \mathbf{U}$ близка к вырожденной, переходят к алгоритму регуляризации оценивания по методу наименьших квадратов.

Текущее оценивание параметров канала связи включает повторное использование предыдущих результатов оценивания («старых») для расчета «новых» значений на последующих шагах. Оптимальные тестовые комбинации сигналов OFDM были подобраны экспериментально таким образом, чтобы минимизировать ошибку оценивания импульсной характеристики методом регуляризации. Важным аспектом вычислительного процесса является правильный выбор величины параметра регуляризации для минимизации систематического смещения регуляризованных оценок. Экспериментальные исследования показали, что при малом отношении сигнал / шум, равном 5 дБ, суммарная СКО при оценивании всех отсчетов импульсной характеристики не превышают 8 %.

Для быстроизменяющегося канала показан алгоритм (9), основанный на постоянном текущем оценивании импульсной характеристики, который учитывает предыдущие результаты ее оценки.

Полученные результаты демонстрируют значительное улучшение качества когерентного приема сигналов при предложенных алгоритмах оценивания импульсной характеристики в совокупности с подобранными тестовыми комбинациями в системах OFDM с МСИ.

References

1. Volkov L.N., Nemirovskiy M.S., Shinakov Ju.S. *Digital Radio Communication Systems*. Moscow: Ehko-Trendz Publ.; 2005. 392 p. (in Russ.)
2. Kartashevskij V.G. *Processing of Space-Time Signals in Memory Channels*. Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 2000. 272 p. (in Russ.) EDN:VKFMZV
3. Sage A.P., Melse J.L. *Estimation Theory with Application to Communication and Control*. N.-Y.: McGraw-Hill, 1972.
4. Ryashko L.B. *Optimal Recursive Estimation*. Yekaterinburg: Typolaboratoriya UrGU Publ.; 1997. 53 p. (in Russ.)
5. Tikhonov A.N., Arsen'ev V.Ya. *Methods for Solving Ill-Posed Problems*. Moscow: Nauka Publ.; 1979. 288 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 25.03.2026; одобрена после рецензирования 20.04.2026; принята к публикации 22.04.2026

The article was submitted 25.03.2026; approved after reviewing 20.04.2026; accepted for publication 22.04.2026

Информация об авторе:

**СЛИПЕНЧУК
Кристина Сергеевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных систем
Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информа-
тики приборостроения
 <https://orcid.org/0009-0002-8161-249X>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.