

УДК 004.93+004

## Метод оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей

**Шабakov Евгений Иванович** — канд. техн. наук, доцент кафедры оптико-электронных средств контроля. Научные интересы: обработка изображений, машинное зрение, диагностика железнодорожной инфраструктуры. E-mail: eish@bk.ru

**Куренков Никита Олегович** — курсант кафедры оптико-электронных средств контроля. Научные интересы: обработка изображений, оценка качества данных ДЗЗ, машинное зрение. E-mail: kurenkov\_2003@list.ru

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

**Для цитирования:** Шабakov Е. И., Куренков Н. О. Метод оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 33–40. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-33-40

**Аннотация.** Рассматривается применение двумерного преобразования Уолша — Адамара для оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей. **Цель:** анализ неравномерности распределения интенсивности пиксельного спектра по диагонали, позволяющий количественно оценивать степень выраженности линейных искажений на изображениях объектов ОАО «РЖД». **Методы:** анализ спектра изображения посредством преобразования Уолша — Адамара. **Результаты:** продемонстрирована применимость предложенного метода для оценки степени выраженности линейных искажений. **Практическая значимость:** применение предложенного метода для выявления различных типов линейных искажений с возможностью последующего внедрения в алгоритмы автоматического обнаружения.

**Ключевые слова:** оценка качества изображений, преобразование Уолша — Адамара, двумерный спектр изображения, оператор Собеля, дистанционный контроль, подвижной состав, железнодорожные пути, дефекты, диагностика

**1.2.1** — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки); **2.9.8** — интеллектуальные транспортные системы (технические науки); **2.3.1** — системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

### Введение

Дистанционный контроль состояния подвижного состава и железнодорожных путей играет ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности железнодорожного транспорта. Автоматизированные системы, использующие оптические изображения, позволяют выявлять дефекты

и повреждения элементов инфраструктуры и подвижного состава, предотвращая аварии и снижая затраты на обслуживание.

Однако качество получаемых изображений может существенно влиять на эффективность работы таких систем. Различные факторы, такие как освеще-

щение, погодные условия и технические характеристики съемочного оборудования, могут приводить к искажениям, затрудняющим обнаружение и классификацию линейных искажений. В частности, на изображениях могут возникать следующие типы искажений [1]:

- размытость границ объектов, вызванная вибрацией камеры или движением объекта;
- неравномерность освещения, приводящая к потере деталей в темных или пересвеченных областях;
- атмосферные искажения, влияющие на общую резкость снимка.

Эти искажения могут приводить к следующим проблемам:

- снижение точности автоматизированного обнаружения;
- увеличение вероятности ложных срабатываний систем контроля;
- затруднение визуальной интерпретации данных операторами.

Традиционные методы оценки качества изображений, такие как пиковое отношение сигнал/шум (peak signal-to-noise ratio, PSNR) и среднеквадратичная ошибка (Mean Squared Error, MSE), ориентированы на измерение отклонений между исходным и искаженным изображением на уровне пикселей. Эти методы не всегда хорошо коррелируют с субъективным восприятием качества изображения человеком, особенно в случае структурных искажений, вызванных дефектами [2].

В статье предлагается новый метод оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей, основанный на анализе с помощью оператора Собеля спектра изображения, полученного с помощью преобразования Уолша — Адамара. Этот метод позволяет более эффективно выявлять линейные искажения и обеспечивает более точную оценку качества изображений для задач диагностики и мониторинга.

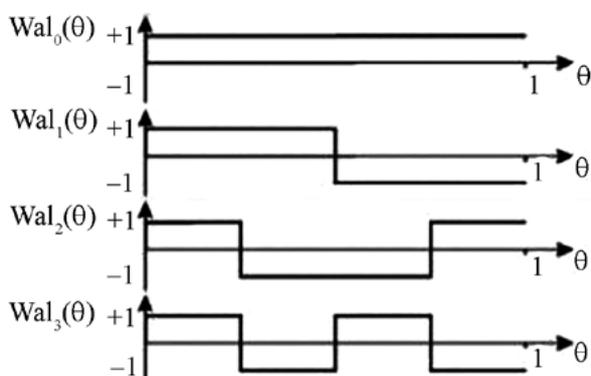
### Математическая постановка задачи преобразования Уолша — Адамара

Понятие «частота» для синусоидальных функций является аналогом понятия «частотность» для функций Уолша — Адамара [3, 4]. Частотность определяется числом изменений знака функции на определенном интервале времени и характеризует обратное пространство, которое отличается от частотного пространства в гармоническом анализе [5].

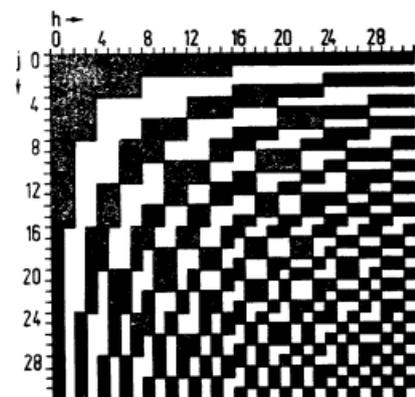
Сигнал изображения является несинусоидальным сигналом, и естественно, что для описания систем, в которых происходит преобразование несинусоидальных сигналов, более правильно использовать секвентный анализ, а не гармонический.

Функции Уолша  $Wal_i(i, j)$  определяются с помощью функций Радемахера  $r_j(\theta)$  следующим образом:

$$Wal(i, j)(\theta) \equiv 1;$$



а



б

Рис. 1. Представление системы функций Уолша — Адамара

а — графики первых четырех функций Уолша — Адамара; б — функции Уолша, упорядоченные по Адамару

$$\text{Wal}_i(i, j)(\theta) = \prod_{j=1}^n [r_j(\theta)]^{i_j}.$$

В статье применена система функций Уолша с упорядочением по Адамару, где базисные функции классифицируются по частотным характеристикам: их порядок определяется количеством пересечений нулевого уровня на заданном интервале, то есть по частотности. На рис. 1 представлено графическое изображение функций Уолша — Адамара.

Получение двумерного спектра Уолша — Адамара изображения происходит в 4 этапа:

1. Вычисление одномерного спектра Уолша  $B(i, j)$  путем умножения матрицы Уолша — Адамара  $\text{Wal}(i, j)$  на матрицу исходного изображения  $A(i, j)$ ;  $i, j = \overline{(0, N-1)}$ ;  $N = 2^n$ ;  $n$  — натуральное число:

$$B(i, j) = \text{Wal}(i, j)A(i, j).$$

2. Вычисление транспонированной матрицы  $C(i, j)$ :

$$C(i, j) = B^T(i, j).$$

3. Вычисление ненормированного двумерного спектра Уолша-Адамара  $D(i, j)$ :

$$D(i, j) = C(i, j)\text{Wal}(i, j).$$

4. Нормирование полученной матрицы:

$$F(i, j) = \frac{D(i, j)}{N}.$$

Математический аппарат преобразования Уолша — Адамара, адаптированный для анализа аэро съемки земной поверхности, закладывает основу для количественной оценки линейных искажений через анализ спектральных характеристик.

### Алгоритм оценки линейных искажений изображения

Предлагаемый в статье алгоритм оценки линейных искажений изображения основан на анализе диагонального распределения спектра Уолша — Адамара. Проведенный анализ секвентных спектров различных изображений показал, что существует корреляция между субъективным

восприятием линейных искажений и характером распределения яркости пикселей вдоль главной диагонали спектрального представления изображения. В частности, изображения с выраженными искажениями демонстрируют менее равномерное снижение диагональных значений интенсивности, что позволяет использовать данный признак в качестве количественного индикатора искажений.

На основе вышеизложенного предложен количественный абсолютный показатель линейных искажений QILD (Quantitative Indicator of Linear Distortion), который измеряет степень неравномерности диагонального распределения интенсивности пикселей на основе вычисления плавности градиента спектра изображения.

Метрика QILD рассчитывается на основе градиентного представления изображения, полученного с помощью оператора Собеля [6]. Алгоритм предполагает свертку исходных данных с ортогональными ядрами (горизонтальным и вертикальным), что позволяет вычислить аппроксимации частных производных ( $G_x, G_y$ ) в каждой точке. Результирующие градиентные карты отражают локальные изменения яркости по соответствующим направлениям, формируя основу для количественной оценки пространственных искажений.

$$G_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * F(i, j);$$

$$G_y(i, j) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * F(i, j),$$

где знак «\*» обозначает операцию двумерной свертки;

$F(i, j)$  — спектр исходного изображения;

$G_x(i, j)$  и  $G_y(i, j)$  — частные производные по горизонтали и вертикали соответственно.

Амплитуда градиента  $G$  в каждой точке определяется через евклидову норму частных производных  $G_x(i, j)$  и  $G_y(i, j)$ :

$$G(i, j) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}.$$

Для количественной оценки линейных искажений применяется метод кумулятивного усреднения, при котором среднее значение градиентов вычисляется последовательно с накоплением данных вдоль главной диагонали изображения. Кумулятивное усреднение предполагает, что на каждом шаге рассчитывается среднее всех градиентных значений от начальной до текущей точки диагонали. Это позволяет постепенно интегрировать информацию о локальных изменениях яркости. Формально процесс описывается выражением

$$H[i] = \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i G[k],$$

где  $G[k]$  — амплитуда градиента в  $k$ -й точке диагонали;

$H[i]$  — текущее среднее значение для первых  $i+1$  точек;

$N$  — общее количество точек на диагонали;

$k = \overline{0, N-1}$ .

Итоговый показатель качества изображения QILD определяется как финальное значение вектора  $H$ :  $QILD = H[N-1]$ , где  $N$  — общее количество точек на диагонали.

На рис. 2 представлено математическое описание ключевых вычислительных операций, которое формализует логику работы метода, включая построение градиентной карты спектра, расчет усредненного диагонального значения и определение количественного показателя линейных искажений изображения с целью строгого обоснования корректности его работы на основе математических выражений. Математическое описание реализовано в виде программы, разработанной на языке Python [7]. Предложенный алгоритм оценки линейных искажений использует анализ диагонального распределения спектра Уолша — Адамара через метрику QILD. На основе оператора Собеля вычисляются градиенты яркости, преобразуемые в амплитудные карты, что позволяет количественно оценить неравномерность изменений вдоль главной диагонали. Метод кумулятивного усреднения интегрирует локальные отклонения, формируя итоговый показатель QILD, коррелирующий с визуальным восприятием искажений.

## Результаты моделирования

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма было проведено моделирование, в процессе которого вычислялись значения предложенного показателя QILD для изображений с различными уровнями искажений, а также проводился сравнительный анализ значений яркости пикселей спектра изображения. На рис. 3 и 4 представлен результат применения преобразования Уолша — Адамара к неискаженному и искаженному изображениям.

Результаты исследования свидетельствуют, что высококачественные изображения характеризуются плавным градиентом яркости вдоль диагонали спектра, в то время как искаженные данные проявляют выраженную блочную структуру. Указанные различия позволяют использовать спектральные паттерны в качестве объективного индикатора уровня артефактов. Нарушение плавности диагонального градиента и усиление «блочности» при увеличении размытия демонстрируют прямую корреляцию с деградацией визуального качества.

Зависимость визуального восприятия качества изображения от степени искажений представлена на графике (рис. 5) сплошной синей кривой, соответствующей метрике QILD. Метрика QILD является количественной оценкой качества анализируемого изображения, измеряемой в процентах. Для верификации результатов красной пунктирной линией обозначена интегральная субъективная оценка, полученная с помощью тестирования. Сопоставление кривых подтверждает согласованность объективных расчетов с визуальным восприятием.

Экспериментальные результаты подтвердили эффективность алгоритма: метрика QILD продемонстрировала прямую корреляцию с субъективной оценкой качества изображения. Спектры неискаженных данных отличаются плавным диагональным градиентом яркости, тогда как искаженные изображения проявляют блочную структуру спектра. Сравнение кривых QILD и визуальных оценок выявило высокую согласованность, обосновывая применимость метода для объективного анализа линейных искажений аэроснимков.

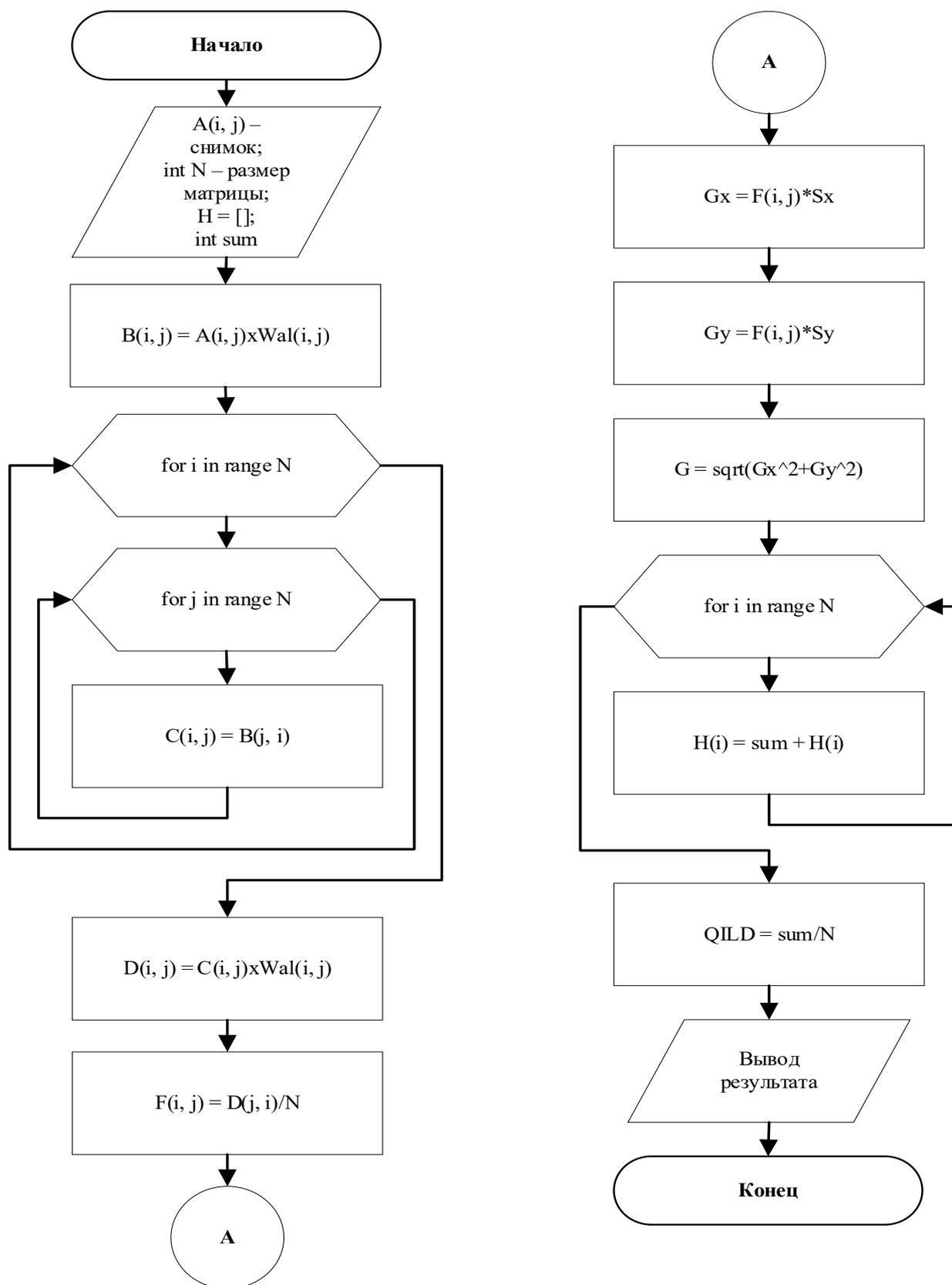


Рис. 2. Алгоритм вычислительных операций

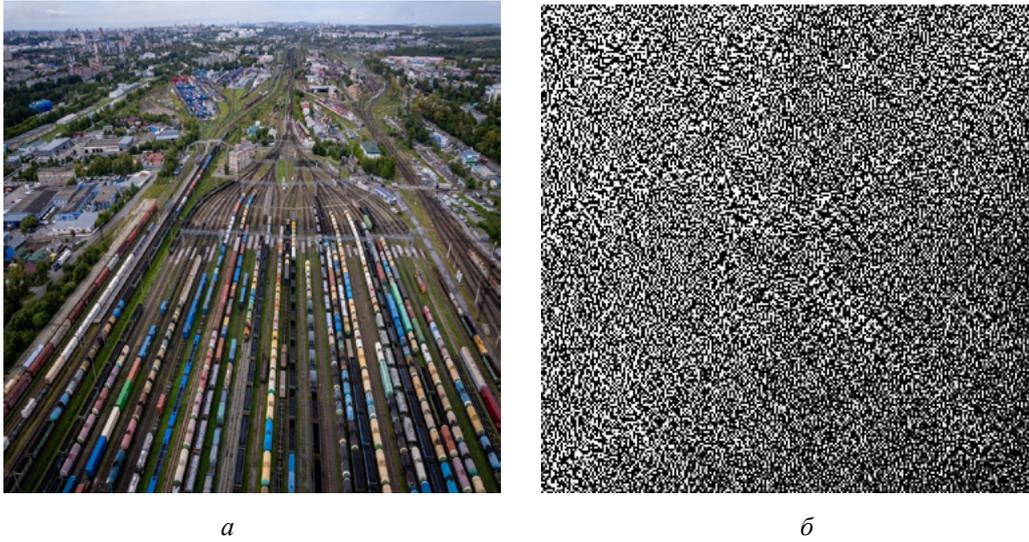


Рис. 3. Применение преобразования Уолша — Адамара к неискаженному изображению: *а* — неискаженное изображение; *б* — яркости пикселей спектра неискаженного изображения

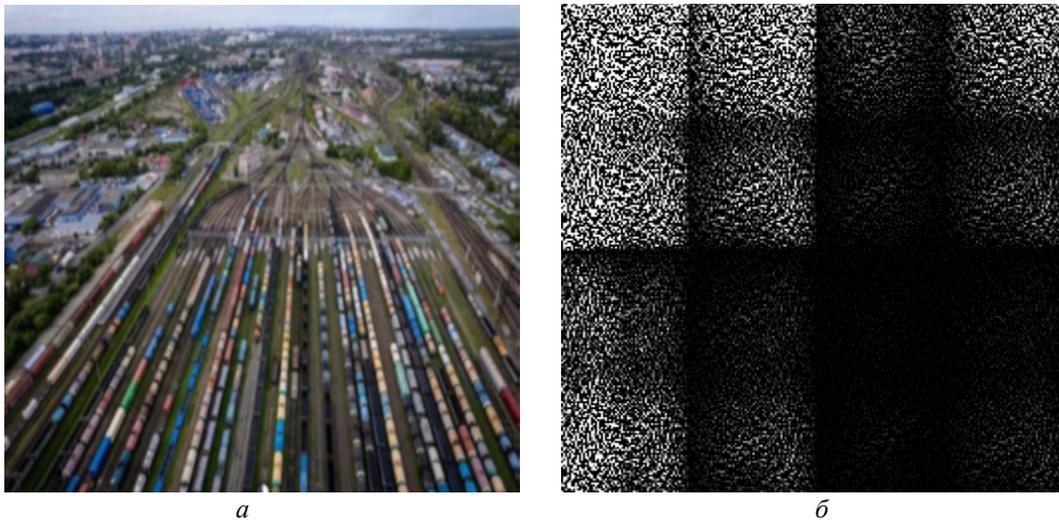


Рис. 4. Применение преобразования Уолша — Адамара к искаженному изображению: *а* — искаженное изображение; *б* — яркости пикселей спектра искаженного изображения

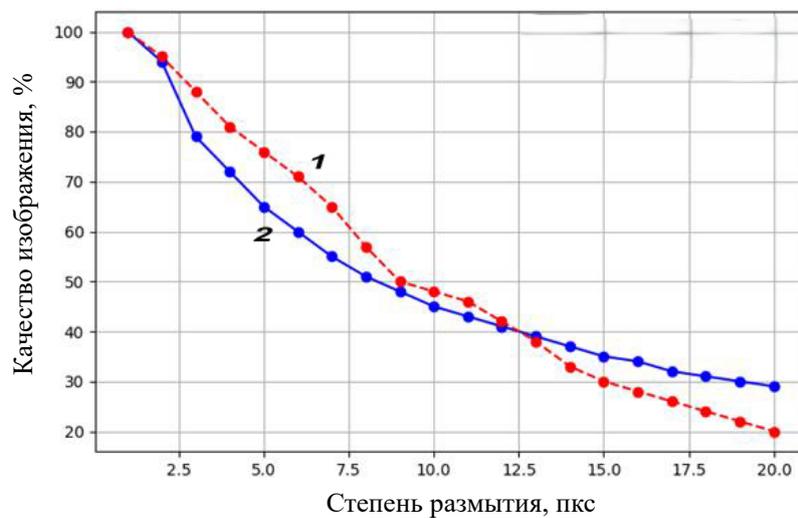


Рис. 5. Анализ зависимости результатов оценки от степени размытия изображения и сравнение результатов с субъективной оценкой качества

## Заключение

В статье предложен алгоритм оценки линейных искажений снимков объектов ОАО «РЖД», основанный на комбинации двумерного преобразования Уолша — Адамара и последующего анализа его спектра. Ключевым элементом метода стал количественный показатель QILD, вычисляемый через оператор Собеля и кумулятивное усреднение амплитуд градиентов вдоль главной диагонали спектра. Это позволило формализовать связь между неравномерностью распределения яркости пикселей и визуальным восприятием артефактов.

Экспериментальная верификация подтвердила, что QILD демонстрирует устойчивую зависимость

от степени линейных искажений: снижение значения метрики коррелирует с усилением блочной структуры спектра и деградацией качества изображения. Сравнение с субъективными оценками выявило высокую согласованность результатов, что подтверждает адекватность подхода для автоматизированного анализа. Реализация алгоритма в среде Python обеспечила воспроизводимость и масштабируемость метода для обработки больших массивов данных.

Дальнейшие исследования направлены на реализацию автоматического обнаружения линейных искажений и дефектов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Головина Л. А., Шляхова М. М. Цифровая обработка изображений: учебное пособие. Новосибирск: Сибирский гос. ун-т геосистем и технологий, 2020. 51 с.
2. Мельканович А. Ф. Основы аэрофотографии. Ч. 2. Принципы построения, анализ и синтез аэрофотоаппаратов. М.: М-во обороны СССР, 1975. 182 с.
3. Хармут Х. Ф. Теория секвентного анализа: основы и применения = Sequency Theory. Foundations and Applications / пер. с англ. Л. М. Сороко. М.: Мир. Редакция литературы по новой технике, 1980. 574 с.
4. Трахтман А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. М.: Советское радио, 1972. 352 с.
5. Юнаковский А. Д. Гармонический анализ. Ряды Фурье, преобразование Фурье и приложения БПФ. Долгопрудный: Интеллект, 2024. 264 с.
6. Оператор Собеля // Википедия. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор\\_Собеля](http://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор_Собеля) (дата обращения: 19.05.2024).
7. Васильев А. Н. Программирование на Python в примерах и задачах. М.: Эксмо, 2021. 619 с.

Дата поступления: 25.08.2025

Решение о публикации: 28.08.2025

# Method for Assessing the Quality of Images Generated by Remote Monitoring Devices for Rolling Stock and Railway Tracks

**Evgeny I. Shabakov** — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Optical-Electronic Control Means. Research interests: image processing, machine vision, diagnostics of railway infrastructure. E-mail: eish@bk.ru

**Nikita O. Kurenkov** — Cadet at the Department Optical-Electronic Control Means. Research interests: image processing, remote sensing data quality assessment, machine vision. E-mail: kurenkov\_2003@list.ru

Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, Russia, 197198

**For citation:** Shabakov E. I., Kurenkov N. O. Method for Assessing the Quality of Images Generated by Remote Monitoring Devices for Rolling Stock and Railway Tracks. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 3 (43), Pp. 33–40. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-33-40. (In Russian)

**Abstract.** *The application of the two-dimensional Walsh-Hadamard transform is considered to evaluate the quality of images generated by remote monitoring devices for rolling stock and railway tracks. **Purpose:** to analyze the uneven distribution of the pixel spectrum intensity along the diagonal. This will facilitate a quantitative assessment of the degree of linear distortion in images of facilities belonging to “Russian Railways” JSC. **Methods:** image spectrum analysis by Walsh-Hadamard transformation. **Results:** the applicability of the proposed method for assessing the severity of linear distortions has been demonstrated. **Practical significance:** the proposed method can be applied for detecting various types of linear distortions, with the possibility of its subsequent implementation into automatic detection algorithms.*

**Keywords:** *image quality assessment, Walsh-Hadamard transformation, two-dimensional image spectrum, Sobel operator, remote control, rolling stock, railway tracks, defects, diagnostics*

## REFERENCES

1. Golovina L. A., Shlyakhova M. M. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy: uchebnoe posobie [Digital image processing: a tutorial]. Novosibirsk, Siberian State University of Geosystems and Technologies, 2020, 51 p. (In Russian)
2. Melkanovich A. F. Osnovy aerofotografii. Printsipy postroeniya, analiz i sintez aerofotoapparatov [Fundamentals of aerial photography. Principles of construction, analysis and synthesis of aerial cameras]. Moscow, Ministry of Defense of the USSR, 1975, 182 p. (In Russian)
3. Harmuth H. F. [Sequency Theory. Foundations and Applications]. Moscow, Mir Publishers, 1980, 574 p. (In Russian)
4. Trakhtman A. M. Vvedenie v obobshchennuyu spektralnyu teoriyu signalov [Introduction to the generalized spectral theory of signals]. Moscow, Sovetskoe Radio Publishing House, 1972, 352 p. (In Russian)
5. Yunakovsky A. D. Garmonicheskiy analiz. Ryady Furye, preobrazovanie Furye i prilozheniya BPF [Harmonic analysis. Fourier series, Fourier transform and FFT applications]. Dolgoprudny, Intellect Publishing House, 2024, 264 p. (In Russian)
6. Operator Sobelya [Sobel Operator], *Wikipedia*. Available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор\\_Собеля](http://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор_Собеля) (accessed: May 19, 2024). (In Russian)
7. Vasilyev A. N. Programmirovaniye na Python v primerakh i zadachakh [Programming in Python in examples and tasks]. Moscow, Eksmo Publishing House, 2021, 619 p. (In Russian)

Received: 25.08.2025

Accepted: 28.08.2025