 © Авторы статьи / Authors of the article

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ/COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.56 EDN: JNWNDQ

СЕМАНТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ 3D-ФОТОГРАММЕТРИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Научная статья

Хомоненко А.Д.[1, *]
[1] ORCID : 0000-0003-0411-258X;
[1] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (khomonenko[at]pgups.ru)

Предложена: 17.10.2026; Принята: 12.11.2026; Опубликована: 17.11.2026

Аннотация

Мониторинг безопасности железных дорог требует от трёхмерного восприятия очень разной точности. Контактный провод нужно измерять с точностью до миллиметра. А для балласта и земляного полотна хватит и сантиметра. Существующие методы обработки фотограмметрических облаков точек работают с глобальными параметрами. Они не могут одновременно выполнить такие разные требования. Из-за этого тонкие структуры безвозвратно теряются уже на этапе предварительной обработки. В работе предлагается семантически управляемая методика 3D-фотограмметрии. Главная идея в том, что априорная семантическая информация о железнодорожных объектах используется как ограничение на геометрическую обработку, а не как финальная метка. Построена трёхуровневая система методов. Первый — семантически управляемая адаптивная фильтрация на основе геометрических признаков железнодорожных элементов с доказательством сходимости итерационной схемы. Второй — алгоритм упрощения, сохраняющий топологию протяжённых тонких структур, с выводом верхней границы геометрической ошибки. Третий — критерий оценки точности при комплексировании фотограмметрических и лидарных данных. Эксперименты показывают, что в задаче измерения высоты контактного провода предлагаемый метод снижает геометрическую ошибку с 12,4 мм до 3,7 мм. Традиционный подход даёт 12,4 мм. При этом степень сжатия данных сохраняется на уровне 94,1%. Оценка эффекта дополнительно выявляет, что семантически управляемая стратегия увеличивает эффективную плотность точек на тонких структурах примерно в 4,8 раза. Это даёт количественно измеримый технологический выигрыш для мониторинга безопасности железных дорог.

Ключевые слова: мониторинг железнодорожной инфраструктуры, 3D-фотограмметрия, семантически управляемая обработка, упрощение облаков точек, контактная сеть.

SEMANTICALLY-DRIVEN 3D PHOTOGRAMMETRY FOR MONITORING THE SAFETY OF RAILWAY INFRASTRUCTURE

Research article

Khomonenko A.D.[1, *]
[1] ORCID : 0000-0003-0411-258X;
[1] Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (khomonenko[at]pgups.ru)

Suggested: 17.10.2026; Accepted: 12.11.2026; Published: 17.11.2026

Abstract

Monitoring railway safety requires very different levels of accuracy from 3D data. The contact wire must be measured to the nearest millimetre. For ballast and the subgrade formation, however, a centimetre of accuracy is sufficient. Existing methods for processing photogrammetric point clouds operate on global parameters. They cannot simultaneously meet such diverse requirements. As a result, fine structures are irretrievably lost as early as the pre-processing stage. The work proposes a semantically-guided 3D photogrammetry method. The main idea is that a priori semantic information about railway objects is used as a constraint on geometric processing, rather than as a final label. A three-level system of methods has been developed. The first is semantically-driven adaptive filtering based on the geometric features of railway elements, with a proof of convergence for the iterative scheme. The second is a simplification algorithm that preserves the topology of extended thin structures, with a derivation of the upper bound for geometric error. The third is an accuracy assessment criterion for the integration of photogrammetric and LiDAR data. Experiments show that, when measuring the height of the contact wire, the proposed method reduces the geometric error from 12.4 mm to 3.7 mm. The traditional approach yields 12.4 mm. At the same time, the data compression ratio remains at 94.1%. The effect analysis further shows that the semantically-driven strategy increases the effective density of points on thin structures by approximately 4.8 times. This provides a quantifiable technological advantage for railway safety monitoring.

Keywords: railway infrastructure monitoring, 3D photogrammetry, semantically-driven processing, point cloud simplification, catenary system.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Введение

Трёхмерное восприятие железнодорожной инфраструктуры упирается в фундаментальное противоречие точности. Мониторинг безопасности требует, чтобы допустимые отклонения таких параметров, как износ рельса, высота контактного провода, ослабление скреплений, лежали в миллиметровом диапазоне. А крупномасштабные фотограмметрические методы даже в идеальных условиях дают точность лишь порядка 1–2 см [1], [2]. Особенно остро это противоречие проявляется на протяжённых тонких структурах. Ширина проекции контактного провода на изображении обычно составляет всего 1–3 пикселя. Стандартные алгоритмы плотного стереосопоставления не формируют устойчивых соответствий на его поверхности. Восстановленное облако точек оказывается разрывным или систематически смещённым [3].

Принципиальное ограничение существующих методов лежит не в недостаточной точности отдельного алгоритма. Проблема в несоответствии архитектуры обработки структуре задачи. Железнодорожная сцена состоит из компонентов, которые различаются по функции, масштабу и геометрии. Рельс — это непрерывная протяжённая структура. Контактный провод — тонкая нить в форме цепной линии. Балласт — квазиплоское тело. Скрепление — дискретный маломасштабный элемент. Универсальный конвейер обработки облаков точек (фильтрация, упрощение, сегментация, измерение) применяет к ним единые параметры [4], [5]. Поэтому он неизбежно либо разрушает тонкие структуры, либо сохраняет избыточные данные на массивных поверхностях.

В настоящей работе развивается подход, в котором семантическая информация о типе железнодорожного элемента встраивается в геометрическую обработку с самого начала. Центральная гипотеза состоит в том, что априорное знание структуры объекта позволяет сформулировать ограничения на допустимые преобразования облака точек. Эти ограничения обеспечивают сохранение критически важных геометрических признаков при существенном сокращении объёма данных. Далее последовательно излагаются математическая модель семантически управляемой фильтрации, алгоритм упрощения с сохранением топологии тонких структур, процедура комплексирования разнородных данных и результаты вычислительных экспериментов с количественной оценкой эффекта.

Математическая модель семантически управляемой обработки

Облако точек фотограмметрического происхождения представим как конечное множество

$$P = \{p_i = (x_i, a_i)\}_{i=1}^{N},$$

где $x_i \in \mathbb{R}^3$ — координаты точки, a_i — набор атрибутов (цвет, нормаль, интенсивность), N — общее число точек.

Введём отображение семантической стратификации

$$\sigma : P \to \{1, \dots, K\},$$

ставящее в соответствие каждой точке номер функциональной страты. Для железнодорожной задачи достаточно K=4:

Страта 1 — несущие элементы пути (рельс, скрепления).

Страта 2 — протяжённые тонкие структуры (контактный провод, несущий трос).

Страта 3 — массивные поверхности (балласт, земляное полотно, иск усственные сооружения).

Страта 4 — фоновая и переходная зоны.

Обработка облака рассматривается как параметризованное отображение

$$P' = F_{\Theta}(P), \quad \Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_K\},$$

где θ_k — набор параметров обработки, соответствующий страте k. В отличие от традиционного подхода параметры не являются глобальными: выбираются независимо для каждой страты.

Локальный дескриптор и адаптивный порог

Для каждой точки $x_i \in P$ рассмотрим множество k-ближайших соседей $N_k(x_i)$. Локальный дескриптор определяется как среднее расстояние до точек окрестности:

$$d_i = \frac{1}{k} \sum_{x_j \in N_k(x_i)} \left\| x_i - x_j \right\|.$$

Этот дескриптор характеризует локальную плотность. В плотных областях его значения малы. В разреженных и зашумлённых — возрастают [6], [7].

По значениям d_j для точек окрестности вычисляются локальные статистики – среднее μ_i и стандартное отклонение σ_i. Адаптивный порог задаётся выражением

$$T_i = \mu_i + \alpha_{\sigma(i)} \sigma_i,$$

где $a_{\sigma(i)}$ — коэффициент жёсткости, зависящий от страты. Решение о сохранении точки принимается по критерию

$$x_i \in P_f \Leftrightarrow d_i \le T_i.$$

Схема адаптивной фильтрации настраивает порог T локально, но оставляет фиксированными для всего облака число соседей k и коэффициент жёсткости α. Это неприемлемо для железнодорожной сцены. Её элементы различаются по характерному масштабу на порядки. От 10–12 мм у контактного провода до метров у балластной призмы. Единая окрестность либо теряет устойчивость на рельсе, либо собирает случайную статистику на балласте. А единый коэффициент α либо разрушает кромки рельса, либо не подавляет шум на поверхностях. Поэтому возникает

 © Авторы статьи / Authors of the article

необходимость перейти от единой схемы к семейству схем с параметрами $\{(k_m, \alpha_m)\}_{m=1}^{K}$, применяемых к функционально однородным стратам [8].

3.1. Дифференциация параметров по стратам

Выбор параметров для каждой страты опирается на геометрические характеристики соответствующих элементов.

Страта 1 (рельс, скрепления). Характерный поперечный размер головки рельса составляет 70–75 мм. При типичной плотности фотограмметрического облака это соответствует 15–30 точкам в поперечном сечении. Для устойчивой оценки локальной геометрии при сохранении избирательности необходимо k ∈ [12, 20]. Пониженный коэффициент жёсткости α ∈ [0,6, 0,9] предотвращает удаление точек на кромках и в зонах сопряжения рельса с подкладками.

Страта 2 (контактный провод, трос). Поперечный размер провода диаметром 10–12 мм при плотности облака, характерной для аэрофотосъёмки с высоты 30–50 м, соответствует 1–3 точкам [6]. Стандартная оценка локальной плотности здесь неприменима. Окрестность оказывается вытянутой вдоль провода. Требуется модификация дескриптора с учётом анизотропии.

Страта 3 (балласт, земляное полотно). Допустимо агрессивное сглаживание с k ∈ [30, 50] и α ∈ [1,0, 1,5].

3.2. Дескриптор с учётом анизотропии окрестности

Для страты 2 введём ковариационную матрицу локальной окрестности

$$C_i = \frac{1}{k} \sum_{x_j \in N_k(x_i)} \left(x_j - x_i^c\right) \left(x_j - x_i^c\right)^\top,$$

где x_i^c — центр окрестности. Собственные значения $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ характеризуют вытянутость окрестности. Для протяжённой тонкой структуры выполняется $\lambda_1 >> \lambda_2 \approx \lambda_3$.

Определим коэффициент анизотропии

$$\kappa_i = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_3 + \varepsilon},$$

Модифицированный дескриптор задаётся как

$$d_i^M = \frac{d_i}{1 + \beta \log(1 + \kappa_i)},$$

где $\beta > 0$ — параметр, ослабляющий штраф за разреженность вдоль главного направления. При $k_i \to 0$ (изотропная окрестность) $d_i^M \to d_i$ и критерий переходит в стандартный [9].

Утверждение 1. Пусть облако конечно, правило формирования окрестностей $N_k(x_i)$ фиксировано, а порог вычисляется детерминированно. Тогда итерационная процедура фильтрации

$$P^{(t+1)} = \left\{ x_i \in P^{(t)} : d_i^{M(t)} \leq T_i^{(t)} \right\}$$

достигает неподвижной точки за конечное число шагов.

Доказательство. Мощность множества P не возрастает, поскольку удаление точек не может привести к их появлению. Множество P конечно, поэтому последовательность его мощностей – невозрастающая последовательность натуральных чисел, ограниченная снизу нулём. Следовательно, она стабилизируется за конечное число шагов, не превышающее N. В состоянии стабилизации $P^{(i+1)} = P^{(i)}$, что и означает достижение неподвижной точки.

3.3. Устойчивость к возмущениям входных данных

Утверждение 2. Пусть возмущение координат таково, что состав локальных k-окрестностей не изменяется. Тогда изменение локального дескриптора ограничено

$$\left| d_i^M\left(\{x_i + \delta x_i\}\right) - d_i^M\left(\{x_i\}\right) \right| \leq 2\delta \cdot \frac{1}{1 + \beta \log(1 + \kappa_i)}.$$

Доказательство. При неизменном составе окрестностей каждое слагаемое $\|x_i - x_j\|$ изменяется не более чем на 2δ в силу неравенства треугольника. Среднее по k слагаемым изменяется не более чем на 2δ. Деление на множитель $(1 + \beta \log(1 + k_i)) \geq 1$ лишь уменьшает оценку.

Следствие. Решение о сохранении или удалении точки остаётся неизменным вне узкой приграничной области $|d_i - T_i| \leq 2\delta$. Это обеспечивает контролируемую чувствительность модели к фотограмметрическим погрешностям восстановления координат.

Алгоритм упрощения с сохранением топологии тонких структур

4.1. Постановка задачи разрежения

Пусть P_f – облако после фильтрации, M — максимально допустимое число точек. Требуется выбрать подмножество $S^* \subset P_f$ такое, что

$$S^* = \arg\min_{S \subseteq P_f, |S| \leq M} J(S),$$

где функционал качества

$$J(S) = \frac{1}{|P_f|} \sum_{x \in P_f} \min_{y \in S} \|x - y\|_2$$

характеризует среднее расстояние от точек исходного облака до ближайших точек выбранного подмножества [10].

 © Авторы статьи / Authors of the article

Прямой перебор подмножеств имеет комбинаторную сложность и неприменим при больших N. Предлагается приближённый метод, адаптированный к структуре железнодорожной сцены.

4.2. Воксельная дискретизация с переменным размером ячейки

Стандартная воксельная дискретизация использует фиксированный размер ячейки V. Для страты 2 (тонкие структуры) это неприемлемо. При V, превышающем диаметр провода, структура исчезает. При V, меньшем диаметра, сокращение объёма оказывается недостаточным [11].

Введём переменный размер ячейки

$$v_k = v_{\min} \cdot \gamma^{k-1}, \quad k = 1, \ldots, K,$$

где k — номер страты, $\gamma > 1$ — коэффициент роста. Для страты 2 используется минимальный размер $v_2 = v_{min}$, для страты 3 — увеличенный $v_3 = v_{min}\,\gamma$.

4.3. Алгоритм упрощения тонких структур

Для страты 2 воксельная дискретизация заменяется процедурой выбора представителей вдоль главного направления структуры.

Алгоритм 1. Упрощение тонкой структуры:

1. Выполнить кластеризацию точек страты 2 методом DBSCAN с параметрами (ε, m) [10].

2. Для каждого кластера C вычислить главную ось u как собственный вектор ковариационной матрицы, соответствующий максимальному собственному значению. Упорядочить точки кластера по проекции на u. Выбрать подмножество точек с шагом ΔS вдоль оси, где ΔS задаётся требованиями к последующему анализу.

3. Объединить результаты по всем кластерам.

Утверждение 3. Пусть кластер C аппроксимируется отрезком прямой длины L с поперечным разбросом ρ. Тогда после применения Алгоритма 1 с шагом ΔS число сохраняемых точек удовлетворяет условию

$$S_C \Big| \leq \frac{L}{\Delta s} + 1 \ ,$$

а максимальное отклонение любой точки кластера от ближайшей сохранённой не превышает

$$\max_{x \in C} \min_{y \in S_C} \|x - y\|_2 \leq \sqrt{(\Delta s/2)^2 + \rho^2}.$$

Доказательство. Первое утверждение следует из того, что точки выбираются с шагом ΔS вдоль оси длины L. Второе — из геометрических соображений. Проекция произвольной точки на ось находится на расстоянии не более ΔS/2 от ближайшей выбранной точки. Поперечное отклонение ограничено ρ. Расстояние в трёхмерном пространстве не превышает евклидовой нормы суммы продольной и поперечной составляющих.

Следствие. При $\Delta S \ll \rho$ геометрическая ошибка упрощения определяется поперечным разбросом ρ. Для контактного провода он имеет порядок его диаметра. Это означает, что предложенный алгоритм обеспечивает сохранение геометрии тонкой структуры с точностью, ограниченной физическим размером самой структуры, а не шагом упрощения.

4.4. Комплексный критерий качества обработки

Для количественного сопоставления вариантов обработки введём интегральный показатель

$$Q = w_1 E + w_2 R + w_3 C + w_4 G,$$

где E — геометрическая ошибка (среднее расстояние от точек исходного облака до ближайших точек обработанного), R — коэффициент разрежения (отношение числа точек после обработки к исходному), C — нормированное время обработки, G — отклонение нормалей (характеристика сохранности локальной геометрии).

Весовые коэффициенты выбираются исходя из приоритетов конкретной задачи. Для мониторинга безопасности железнодорожной инфраструктуры целесообразно усилить вес геометрической ошибки и отклонения нормалей. Именно эти показатели отражают сохранность критически важных геометрических признаков.

4.5. Границы применимости фотограмметрии

Фотограмметрическое восстановление опирается на наличие устойчивых соответствий между изображениями. Это предполагает достаточную текстуру наблюдаемой поверхности [3]. В железнодорожной сцене существует класс объектов, для которых это условие систематически нарушается. Контактный провод и несущий трос наблюдаются на фоне неба. Гладкие металлические поверхности элементов контактной сети дают зеркальные блики. Поверхности в глубокой тени имеют низкий контраст.

Количественно условие устойчивости стереосопоставления может быть выражено через локальную дисперсию интенсивности в окне сопоставления

$$D(u, v) = \sum_{(i,j) \in W} (I(i, j) - \bar{I})^2,$$

где W — окно сопоставления, I(i, j) — значение интенсивности (яркости) пикселя с координатами (i, j), $\bar{I}$ — средняя интенсивность. При D < D_min сопоставление становится неустойчивым. Соответствующая область облака точек формируется с большой дисперсией по глубине [12].

4.6. Роль лидарных данных

 © Авторы статьи / Authors of the article

Лазерное сканирование свободно от ограничения текстурности. Оно непосредственно измеряет расстояние до поверхности. Это делает лидарные данные естественным дополнением фотограмметрии в зонах, где последняя теряет устойчивость.

Предлагается стратегия целевого комплексирования. Фотограмметрия обеспечивает плотное покрытие и цветовую информацию для массивных поверхностей и элементов с достаточной текстурой. Лидар обеспечивает геометрическую достоверность для тонких и слаботекстурных структур [1], [2].

4.7. Совмещение разнородных данных

Совмещение облаков выполняется в два этапа.

Этап 1. Начальное совмещение по опорным точкам [13]

$$T_0 = \arg\min_T \sum_{l=1}^{L} \left\| T p_l^{(1)} - q_l^{(2)} \right\|^2 ,$$

где $p_l^{(1)}$, $p_l^{(2)}$ — соответствующие опорные точки.

Этап 2. Уточнение по стратам. Для страты 2 используется модифицированная метрика, не штрафующая за смещение вдоль главного направления структуры

$$\mathcal{L}_2(T) = \sum_i \left\| \left(I - \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^\top \right) \left(T x_i - y_i^* \right) \right\|^2 ,$$

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{thin}}}{L_{\text{thin}}},$$

где $\mathbf{u}_i$ — локальное направление структуры, y_i^* — ближайшая точка второго облака. Такая метрика обеспечивает устойчивое совмещение протяжённых структур, для которых продольное смещение не является информативным.

Постановка вычислительного эксперимента

Экспериментальная проверка выполнялась на реальных данных аэрофотосъёмки участка железнодорожного пути. Съёмка велась с использованием беспилотного летательного аппарата. Исходные изображения обрабатывались в WebODM, развёрнутом в контейнеризированной среде Docker. После этого формировалось плотное облако точек, которое служило входными данными для разработанного программного модуля постобработки.

Вычислительная среда: процессор Intel Core i7-11700, оперативная память 32 ГБ, операционная система Windows 11. Для каждого прогона фиксировались входной файл формата PLY, значения параметров обработки, а также рассчитанные показатели E, R, C, G и Q.

Методика эксперимента включала следующие этапы:

1. Построение плотного облака в WebODM.
2. Семантическая стратификация облака.
3. Адаптивная фильтрация с параметрами, дифференцированными по стратам.
4. Предварительное воксельное сокращение.
5. Кластерная очистка на основе DBSCAN.
6. Упрощение тонких структур по Алгоритму 1.
7. Финальное разрежение.
8. Расчёт количественных метрик качества.

5.1. Анализ чувствительности параметров

Исследование чувствительности проводилось путём варьирования одного параметра при фиксированных остальных. Установлены следующие области устойчивой настройки.

Для страты 1: k = 12–20, α = 0,6–0,9.

Для страты 2: k = 20–32, β = 0,5–1,0, ΔS = 0,02–0,05 м.

Для страты 3: k = 30–50, α = 1,0–1,5.

Параметры DBSCAN: ε = 0,6–1,0 м, m = 30–80.

Размер финального вокселя: V_min = 0,03–0,07 м.

Показано, что в указанных диапазонах изменение параметров приводит к изменению интегрального показателя Q не более чем на 15%. Это свидетельствует о наличии широкой области устойчивости и снижает требования к точности настройки.

5.2. Результаты обработки

Количественные показатели обработки приведены в таблице.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 1 - Количественные показатели качества обработки облаков точек

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.56.1

Вариант обработки	Число точек	E, мм	R	Время, с	Q
Исходное облако	10 544 295	—	1,00	—	—
После фильтрации и кластерной очистки	9 009 833	1,4	0,85	555,5	12,06
После стандартного разрежения	538 882	1,7	0,05	165,5	13,97
После семантически управляемого упрощения	621 450	1,1	0,05	968,2	10,84

Сравнение последних двух строк показывает, что семантически управляемое упрощение обеспечивает снижение геометрической ошибки на 35% (с 1,7 до 1,1 мм) при незначительном увеличении числа сохраняемых точек (с 538 882 до 621 450, то есть на 15%). Интегральный показатель качества Q при этом улучшается на 22% (с 13,97 до 10,84).

5.3. Оценка эффекта на задаче измерения высоты контактного провода

Наиболее показательная оценка эффекта получена на задаче измерения высоты контактного провода относительно головки рельса. Этот параметр непосредственно влияет на безопасность движения.

Сравнивались три варианта обработки:

1. Вариант A — стандартный конвейер WebODM без специализированной постобработки.
2. Вариант B — стандартная фильтрация и воксельное разрежение с глобальными параметрами.
3. Вариант C — предлагаемая семантически управляемая обработка.

Результаты измерений сопоставлялись с эталонными значениями, полученными контактным методом. В таблице 2 приведена точность измерения высоты контактного провода.

Таблица 2 - Точность измерения высоты контактного провода

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.56.2

Вариант	Средняя ошибка, мм	СКО ошибки, мм	Макс. ошибка, мм	Сохранность провода, %
A	18,2	7,4	34,1	62
B	12,4	5,1	22,8	71
C	3,7	1,6	7,9	96

Предложенный метод снижает среднюю ошибку измерения высоты контактного провода с 12,4 мм (вариант B) до 3,7 мм (вариант C), то есть в 3,35 раза. Максимальная ошибка уменьшается с 22,8 до 7,9 мм. Это переводит задачу из категории «грубая оценка» в категорию «измерение, пригодное для принятия решений о безопасности».

Показатель сохранности провода отражает долю протяжённости провода, для которой в обработанном облаке имеются точки, пригодные для измерения. Для варианта C этот показатель достигает 96%. Для стандартного разрежения он составляет 71%. Для исходного конвейера WebODM – 62%.

5.4. Оценка эффективной плотности на тонких структурах

Дополнительная оценка эффекта выполнена через показатель эффективной плотности точек на тонких структурах

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{thin}}}{L_{\text{thin}}},$$

где N_{thin} — число точек, отнесённых к тонким структурам, L_{thin} — суммарная протяжённость этих структур.

Для стандартного разрежения $\rho_{\text{eff}} \approx 4{,}2$ точек/м. Для семантически управляемого упрощения $\rho_{\text{eff}} \approx 20{,}1$ точек/м. Таким образом, эффективная плотность на тонких структурах увеличивается в 4,8 раза при общем сокращении объёма данных на 94,1%. Этот результат количественно подтверждает основную гипотезу работы. Дифференциация параметров обработки по стратам позволяет перераспределить «бюджет точек» в пользу критически важных элементов.

5.5. Анализ ограничений

 © Авторы статьи / Authors of the article

Проведённые эксперименты позволяют очертить область применимости метода. Наиболее проблемными остаются сцены с водными поверхностями и бликами, низкотекстурные участки, тонкие конструкции и движущиеся объекты. В таких случаях постобработка способна уменьшить количество артефактов, но не заменяет контроля качества исходной фотограмметрической реконструкции.

Существенно, что предложенный метод следует рассматривать как эффективный этап постобработки для статических сцен с достаточной текстурированностью поверхности и умеренным уровнем фотограмметрических искажений. А в сложных условиях — как часть более широкого технологического конвейера, включающего лидарное сканирование.

Заключение

Предложена семантически управляемая методика 3D-фотограмметрии для мониторинга безопасности железнодорожной инфраструктуры. Она отличается встраиванием априорной семантической информации в процесс геометрической обработки на всех этапах. Основные научные результаты состоят в следующем.

1. Разработана математическая модель адаптивной фильтрации, в которой параметры обработки дифференцированы по функциональным стратам железнодорожной сцены. Доказаны сходимость итерационной схемы и её устойчивость к малым возмущениям входных данных.

2. Предложен алгоритм упрощения, сохраняющий топологию протяжённых тонких структур. Получена верхняя граница геометрической ошибки, определяемая поперечным размером структуры, а не шагом упрощения.

3. Сформулирован критерий комплексирования фотограмметрических и лидарных данных, учитывающий различие требований к точности для разных элементов инфраструктуры.

4. Экспериментально подтверждено, что предложенный метод снижает среднюю ошибку измерения высоты контактного провода с 12,4 до 3,7 мм (в 3,35 раза) и увеличивает эффективную плотность точек на тонких структурах в 4,8 раза при общем сжатии данных на 94,1%.

Полученные результаты имеют значение не только для обработки конкретного набора данных. Они важны и для дальнейшего развития методов математического моделирования и численного анализа пространственных данных железнодорожной инфраструктуры. Предложенный подход демонстрирует, что учёт функциональной неоднородности объекта на уровне математической модели обработки позволяет достичь существенно более высоких показателей точности на критически важных элементах без увеличения общего объёма данных.

Перспективы дальнейших исследований связаны с автоматизацией выбора параметров обработки на основе накопленных данных, расширением набора распознаваемых типов дефектов и интеграцией с системами поддержки принятия решений в области эксплуатации железных дорог.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.56.3

Conflict of Interest

None declared.

Review

Community of Reviewers of the International Research Journal

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.56.3

Список литературы / References

1. Airborne and Terrestrial Laser Scanning / Ed. by G. Vosselman, H.-G. Maas. — Dunbeath : Whittles Publishing, 2010. — 318 p.

2. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing / Ed. by J. Shan, C.K. Toth. — Boca Raton : CRC Press, 2018. — 637 p.

3. Nex F. UAV for 3D mapping applications: a review / F. Nex, F. Remondino // Applied Geomatics. — 2014. — Vol. 6. — № 1. — P. 1–15.

4. Козин Е.В. Фотограмметрическая обработка данных дистанционного зондирования / Е.В. Козин, А.Г. Карманов, Н.А. Карманова. — Санкт-Петербург : СПГУГА, 2019. — 142 с.

5.

6. Yarroudh A. Railway reconstruction from 3D point cloud using Deep Learning and Parametric Modeling / A. Yarroudh, A. Kharroubi, I. Jeddoub [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2024. — Vol. 48. — P. 477–482.

7. Rusu R.B. 3D is here: Point Cloud Library (PCL) / R.B. Rusu, S. Cousins // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — 2011. — P. 1–4.

8. Pauly M. Efficient simplification of point-sampled surfaces / M. Pauly, M. Gross, L.P. Kobbelt // Proceedings of IEEE Visualization 2002. — 2002. — P. 163–170.

9. Gabrielidis H. Pipeline for Semantic Segmentation of Large Railway Point Clouds / H. Gabrielidis, F. Gatti, S. Vialle // Intelligent Data Engineering and Automated Learning — IDEAL 2024. — Springer, 2024. — P. 167–179.

10. Ester M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander [et al.] // Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). — 1996. — P. 226–231.

 © Авторы статьи / Authors of the article

11. Qiu B. WHU-Railway3D: A Diverse Dataset and Benchmark for Railway Point Cloud Semantic Segmentation / B. Qiu, Y. Zhou, L. Dai [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2024. — Vol. 25. — № 12. — P. 20900–20916.

12. Липанов И.Д. БПЛА и цифровые технологии в оценке ресурсов для восстановления железных дорог в чрезвычайных ситуациях / И.Д. Липанов, А.Д. Хомоненко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2025. — № 9 (159). — С. 1–7.

13. Besl P.J. A method for registration of 3-D shapes / P.J. Besl, N.D. McKay // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 1992. — Vol. 14. — № 2. — P. 239–256.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Airborne and Terrestrial Laser Scanning / Ed. by G. Vosselman, H.-G. Maas. — Dunbeath : Whittles Publishing, 2010. — 318 p.

2. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing / Ed. by J. Shan, C.K. Toth. — Boca Raton : CRC Press, 2018. — 637 p.

3. Nex F. UAV for 3D mapping applications: a review / F. Nex, F. Remondino // Applied Geomatics. — 2014. — Vol. 6. — № 1. — P. 1–15.

4. Kozin E.V. Fotogrammetricheskaya obrabotka dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Photogrammetric processing of remote sensing data] / E.V. Kozin, A.G. Karmanov, N.A. Karmanova. — Saint Petersburg : SPGUGA, 2019. — 142 p. [in Russian]

5.

6. Yarroudh A. Railway reconstruction from 3D point cloud using Deep Learning and Parametric Modeling / A. Yarroudh, A. Kharroubi, I. Jeddoub [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2024. — Vol. 48. — P. 477–482.

7. Rusu R.B. 3D is here: Point Cloud Library (PCL) / R.B. Rusu, S. Cousins // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — 2011. — P. 1–4.

8. Pauly M. Efficient simplification of point-sampled surfaces / M. Pauly, M. Gross, L.P. Kobbelt // Proceedings of IEEE Visualization 2002. — 2002. — P. 163–170.

9. Gabrielidis H. Pipeline for Semantic Segmentation of Large Railway Point Clouds / H. Gabrielidis, F. Gatti, S. Vialle // Intelligent Data Engineering and Automated Learning — IDEAL 2024. — Springer, 2024. — P. 167–179.

10. Ester M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander [et al.] // Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). — 1996. — P. 226–231.

11. Qiu B. WHU-Railway3D: A Diverse Dataset and Benchmark for Railway Point Cloud Semantic Segmentation / B. Qiu, Y. Zhou, L. Dai [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2024. — Vol. 25. — № 12. — P. 20900–20916.

12. Lipanov I.D. BPLA i tsifrovye tekhnologii v otsenke resursov dlya vosstanovleniya zheleznykh dorog v chrezvychaynykh situatsiyakh [UAVs and digital technologies in assessing resources for railway restoration in emergency situations] / I.D. Lipanov, A.D. Khomonenko // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatelskiy zhurnal [International Research Journal]. — 2025. — № 9 (159). — P. 1–7. [in Russian]

13. Besl P.J. A method for registration of 3-D shapes / P.J. Besl, N.D. McKay // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 1992. — Vol. 14. — № 2. — P. 239–256.