

Р. А. Дьяченко¹, А. Н. Заколпина¹, С. А. Ярутин²✉

Подход к формированию данных лазерного сканирования городской застройки на основе синтетических сцен

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация

²Кубанский государственный технологический университет,
г. Краснодар, Российская Федерация
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

Аннотация. Активное развитие методов дистанционного зондирования открывает новые возможности для анализа городской среды. Так в последние годы появилась потребность в автоматизированных системах и алгоритмах решений задач сегментации городской застройки, реконструкции фасадов зданий и построения цифровых двойников городской местности. Основным источником данных для решения перечисленных выше задач служат облака точек, которые получают методом наземного и воздушного лазерного сканирования. Однако внедрение алгоритмов лазерного сканирования осложняется такими факторами, как дефицит размеченных облаков точек городской среды, высокая стоимость полевого лазерного сканирования и ограниченная управляемость параметрами съемки (погода, освещенность, доступность объектов). В данной работе рассмотрен подход к формированию данных лазерного сканирования городской застройки на основе синтетических сцен.

Ключевые слова: лазерное сканирование, облака точек, городская среда, синтетические данные

R. A. Dyachenko^{1,2}, A. N. Zakolpina¹, S. A. Yarutin²✉

An approach to generating laser scanning data for urban development based on synthetic scenes

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Moscow, Russian Federation

²Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

Abstract. The rapid development of remote sensing methods is opening up new possibilities for analyzing urban environments. In recent years, the need has arisen for automated systems and algorithms for solving problems of urban development segmentation, reconstructing building facades, and constructing digital twins of urban areas. The primary source of data for solving these problems is point clouds obtained by terrestrial and airborne laser scanning. However, the implementation of laser scanning algorithms is complicated by factors such as the shortage of labeled urban point clouds, the high cost of field laser scanning, and limited control over survey parameters (weather, illumination, and object accessibility). This paper examines an approach to generating laser scanning data for urban development based on synthetic scenes.

Keywords: laser scanning, point clouds, urban environment, synthetic data

Введение

Активное развитие методов дистанционного зондирования открывает новые возможности для анализа городской среды. В последние годы возросла потребность в автоматизированных алгоритмах решения таких задач, как сегментация городской застройки, реконструкция фасадов зданий и построение цифровых двойников городов [1,2].

Основным источником данных для перечисленных задач служат облака точек, полученные методами наземного и воздушного лазерного сканирования [3]. Однако широкое внедрение алгоритмов обработки сдерживается рядом фундаментальных проблем:

- дефицит размеченных облаков точек городской среды – аннотация реальных данных требует значительных трудозатрат экспертов [4];
- высокая стоимость полевого лазерного сканирования – аренда оборудования, логистика, повторные съёмки [5];
- ограниченная управляемость параметрами съёмки – погодные условия, освещённость, доступность объектов, окклюзии.
- В связи с этим перспективным направлением становится использование синтетических данных, генерируемых в виртуальных средах с учётом физических моделей работы LiDAR-сканеров [6, 7]. Такой подход позволяет:
 - получать данные с идеальной семантической разметкой «из коробки»;
 - варьировать параметры сцены и сканирования в широких пределах;
 - моделировать редкие или опасные сценарии без полевых работ.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Проанализировать особенности облаков точек городской среды (фасады, дороги, инфраструктура).
2. Сформировать параметрическую модель городской сцены.
3. Разработать метод процедурной генерации экстерьеров городской застройки.
4. Реализовать имитацию процесса лазерного сканирования с использованием Blensor.
5. Сгенерировать размеченные облака точек и оценить их применимость для обучения алгоритмов.

Разработка и применение подобного подхода позволит автоматизировать процесс сбора данных, возможность генерации датасетов под конкретные задачи, применение в обучении моделей сегментации и тестировании алгоритмов.

Методы и материалы

Генерация синтетических городских сцен выполнялась в среде трёхмерного моделирования Blender 2.79 с использованием языка программирования Python для автоматизации процедурного моделирования.

Таблица 1. Архитектура параметрической модели

Компонент	Параметры генерации	Диапазон значений
Здания	Этажность, форма плана, геометрия фасадов, текстуры	1–30 этажей; прямоугольные, Г-образные, сложные конфигурации
Улично-дорожная сеть	Ширина проезжей части, тип покрытия, наличие тротуаров	8–40 м; асфальт, брусчатка, грунт
Инфраструктура	Тип и плотность размещения (фонари, знаки, скамейки)	5–50 объектов/км ²
Растительность	Вид, высота, плотность крон	Деревья, кустарники; 1–20 м

Процедурная генерация реализована через набор модульных скриптов, позволяющих варьировать параметры сцены через конфигурационные файлы формата JSON. Это обеспечивает массовое создание разнообразных вариантов застройки без ручной доработки

Для обеспечения максимального покрытия сцены при минимальном числе позиций сканирования разработан эвристический алгоритм выбора точек обзора.

Имитация работы LiDAR-сканера выполнялась с использованием дополнения Blensor 1.0.18, интегрированного в Blender.

Таблица 2. Настроенные параметры сканера

Параметр	Значение	Обоснование
Тип сканера	Velodyne HDL	Моделирование съёмки с движущейся платформы
Угол обзора	360°	Соответствует характеристикам коммерческих сканеров
Максимальная дальность	100 м	Ограничение для городских условий
Плотность лучей	0,05°	Баланс между детализацией и объёмом данных
Шум измерений	$\sigma = 1\text{ см}$ (гауссов)	Учёт инструментальной погрешности

Неоднородность плотности: учёт угловой зависимости разрешения сканера.

Для каждой сгенерированной сцены и выбранного набора позиций сканирования выполнялось:

1. Последовательное «сканирование» сценария в Blensor;
 2. Объединение полученных фрагментов облаков точек в единый датасет.
- Форматы экспорта:
- PLY/XYZ – облака точек с координатами и интенсивностью;
 - CSV – таблица соответствия «точка → класс»;
 - JSON – метаданные сцены (параметры генерации, позиции сканера).

Разработка выполнена на Python 3.10 с использованием:

- Blender API – для управления сценой и экспорта данных;
- Blesor – для симуляции сканирования.

Результаты и обсуждение

Разработанный вычислительный конвейер позволил сформировать открытый синтетический датасет, состоящий из набора уникальных сцен с контролируемым варьированием плотности и типологии застройки.

Пространственное распределение точек характеризуется умеренной гетерогенностью, обусловленной различиями в площади сцен и плотности объектов, и демонстрирует ожидаемое убывание плотности с увеличением дистанции до позиции сканирования, что полностью согласуется с физической моделью углового разрешения LiDAR-систем и подтверждает корректность реализованной симуляции.

Геометрический анализ облаков точек выявил логнормальный характер распределения расстояний до ближайших соседей, типичный для нерегулярных пространственных структур, а также минимальную долю изолированных точек, свидетельствующую о низком уровне артефактов генерации.

Важным результатом исследования стала автоматизированная процедура семантической разметки на уровне отдельных точек с использованием таксономии из шести классов городской среды, обеспечивающая точность, внутреннюю согласованность и детальность аннотации, превосходящие возможности ручной разметки.

Наблюдаемый дисбаланс классов отражает реальную морфологию городских пространств с преобладанием вертикальных и горизонтальных поверхностей и может быть компенсирован на этапе обучения нейросетевых моделей посредством взвешивания функции потерь. Высокая вариативность генерируемых сцен обеспечена на морфологическом уровне за счёт охвата четырёх основных типов городской застройки, статистически различающихся по плотности и высоте, что гарантирует репрезентативность датасета для обучения алгоритмов, устойчивых к структурному разнообразию среды.

Визуальный и количественный анализ показывает, что синтетические облака воспроизводят ключевые структурные и статистические свойства реальных данных. Незначительное расхождение в распределении шумов объясняется упрощённой моделью атмосферных эффектов (дождь, туман, аэрозоль), которые не учитывались в текущей версии симулятора. Тем не менее, наблюдаемое сходство подтверждает пригодность сгенерированных данных для обучения и тестирования алгоритмов 3D-компьютерного зрения.

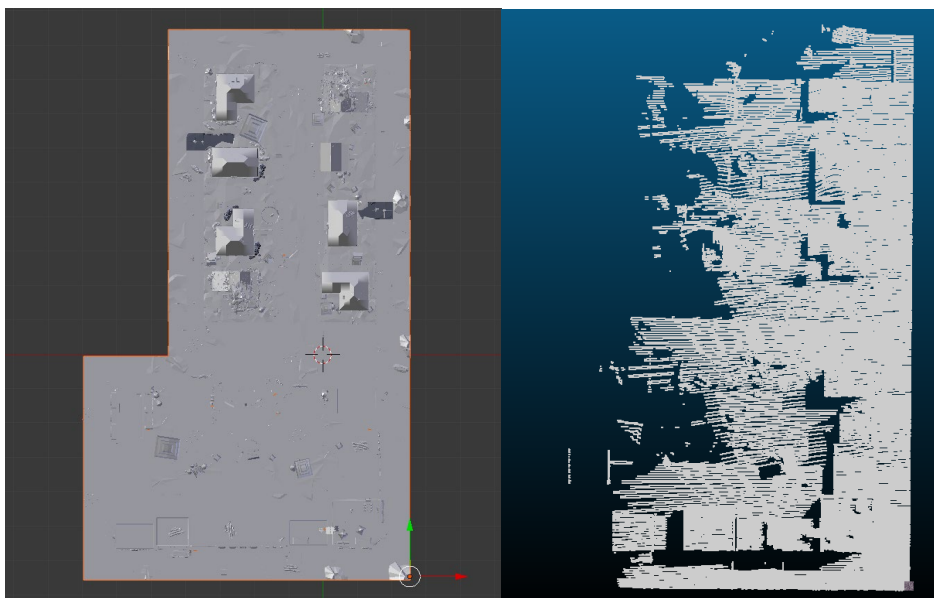


Рис. 1. Трёхмерная модель городской сцены, сгенерированная в среде Blender (слева), и соответствующее синтетическое облако точек, полученное при моделировании лазерного сканирования (справа, проекция сверху)

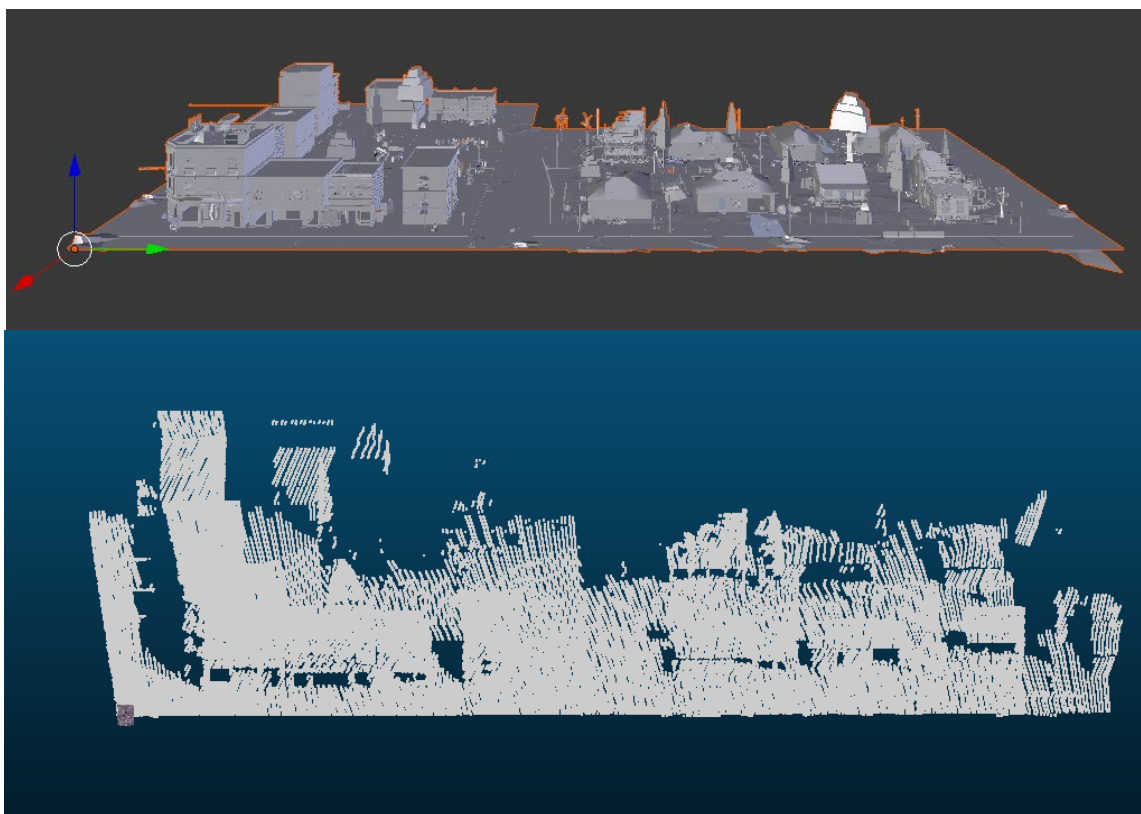


Рис. 2. Трёхмерная модель городской сцены, сгенерированная в среде Blender (вверху), и соответствующее синтетическое облако точек, полученное при моделировании лазерного сканирования (снизу, проекция сбоку)

Ожидается существенный выигрыш в обобщающей способности и устойчивости нейросетевых моделей за счёт явного учёта гауссовской природы пространственных вариаций и инструментальных погрешностей LiDAR-сканеров. Моделирование стохастического шума, отклонений геометрии точек и локальных флуктуаций плотности на основе гауссовских распределений позволяет синтетическим данным статистически аппроксимировать реальные измерительные процессы, что снижает диссонанс между искусственной и натурной выборками. Кроме того, интеграция гауссовских механизмов в процедуру генерации сцен обеспечивает непрерывное и плавное покрытие пространства признаков, предотвращая формирование дискретных артефактов и снижая риск переобучения на ограниченных синтетических паттернах. В совокупности данный подход формирует обучающее множество, распределение характеристик которого асимптотически согласуется с реальными городскими облаками точек, что предопределяет повышение точности семантической сегментации, детекции объектов и геометрического восстановления при последующем переносе алгоритмов на натурные данные.

Заключение

В данной работе предложен комплексный подход к формированию данных лазерного сканирования городской застройки на основе синтетических сцен. Основные результаты исследования могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработана параметрическая модель городской среды, обеспечивающая автоматизированную генерацию сцен с варьируемой плотностью, этажностью и геометрией застройки. Интеграция семантической разметки на уровне меш-объектов исключает необходимость ручной аннотации облаков точек.
2. Предложенный гибридный алгоритм обеспечивает высокое покрытие контрольных поверхностей при сокращении числа позиций по сравнению с традиционными стратегиями размещения.
3. Реализована физически обоснованная имитация LiDAR-сканирования в среде *Blensor* с учётом инструментального шума, окклюзий, неоднородности плотности [8]. Сгенерированные облака точек статистически сопоставимы с реальными данными, что подтверждается метриками распределения расстояний, нормалей и интенсивности.
4. Сформирован размеченный синтетический датасет (5 сцен), пригодный для обучения и валидации алгоритмов 3D-компьютерного зрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yu D., Fang C. Urban remote sensing with spatial big data: A review and renewed perspective of urban studies in recent decades //Remote Sensing. – 2023. – Т. 15. – №. 5. – С. 1307.
2. Pu S., Vosselman G. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2009. – Т. 64. – №. 6. – С. 575-584.
3. Biljecki F. et al. Applications of 3D city models: State of the art review //ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2015. – Т. 4. – №. 4. – С. 2842-2889.

4. Behley J. et al. Semantickitti: A dataset for semantic scene understanding of lidar sequences //Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. – 2019. – С. 9297-9307.
5. Vaaja M. T. Feasibility of mobile laser scanning for mapping and monitoring a riverine environment. – 2014.
6. Wang R., Peethambaran J., Chen D. Lidar point clouds to 3-D urban models \$: \$ A review //IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – Т. 11. – №. 2. – С. 606-627.
7. Gschwandtner M. et al. BlenSor: Blender sensor simulation toolbox //International Symposium on Visual Computing. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. – С. 199-208.
8. Optimal Placement of Laser Scanning Stations for Organizing Work on Three-Dimensional Identification of Objects in Space / D. Gura, R. Dyachenko, S. Yarutin, A. Makaryan // Lecture Notes in Networks and Systems : Advances in Interdisciplinary Approaches for Com-plex Problem Solving, Krasnoyarsk, 02–04 декабря 2024 года. – Krasnoyarsk: Springer Nature, 2025. – P. 518-527. – DOI 10.1007/978-3-031-95649-2_45. – EDN ZVWDSX.

© Р. А. Дьяченко, А. Н. Заколпина, С. А. Ярутин, 2026