

DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-38



Improving the Spatial Resolution of Mechanical LiDAR Systems Using a Virtual Mirror Channel and Automatic Calibration

M.R. Vishnevskiy, ORCID: 0009-0009-4873-674X <m1803104@edu.misis.ru>

I.Y. Fedorov, ORCID: 0000-0002-7235-4823 <i_fedorov@bk.ru>

NUST MISIS, 4, Leninskiy pr., Moscow, 119333, Russia.

Повышение пространственного разрешения механических LiDAR-систем с использованием виртуального зеркального канала и автоматической калибровки

M.P. Вишнеvский, ORCID: 0009-0009-4873-674X <m1803104@edu.misis.ru>

И.Ю. Фёдоров, ORCID: 0000-0002-7235-4823 <i_fedorov@bk.ru>

НИТУ МИСИС, Россия, 119333, г. Москва, Ленинский пр., д. 4.

Аннотация. Работа посвящена разработке новаторского подхода к улучшению плотности и точности облаков точек, формируемых механическими системами LiDAR, посредством внедрения регулируемого пассивного оптического компонента – специального зеркала. Анализируется воздействие положения зеркала на точность и детализацию результатов лазерного сканирования поверхностей объектов. Экспериментально продемонстрировано, что применение зеркального усиления в сочетании с предложенным алгоритмом автоматической калибровки (GPC – Ground Plane Consistency) позволяет существенно увеличить плотность точек и обеспечить высокую геометрическую точность данных. Предложенный метод не требует использования специальных калибровочных паттернов, сохраняя конструктивную простоту сенсора. Представленное практическое исследование и численное моделирование подтверждает высокую эффективность и перспективы предлагаемого решения.

Ключевые слова: LiDAR; облака точек; зеркальное сканирование; плотность точек.

Для цитирования: М. Вишнеvский, И. Фёдоров Повышение пространственного разрешения механических LiDAR-систем с использованием виртуального зеркального канала и автоматической калибровки. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 3, часть 3, 2026 г., стр. 101–114. DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-38.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке кафедры инженерной кибернетики НИТУ «МИСИС».

Abstract. This paper proposes an approach to increase the density and quality of point clouds produced by mechanical LiDAR by introducing an adjustable passive optical element—a mirror. We analyze how the mirror position affects accuracy and geometric detail of scanned objects. Experiments show that mirror-assisted augmentation combined with the proposed automatic calibration algorithm (GPC – Ground Plane Consistency) significantly increases point density while preserving high geometric accuracy. The method does not require dedicated calibration targets and keeps the sensor design simple. Practical experiments and simulation results demonstrate the effectiveness of the approach.

Keywords: LiDAR; point clouds; mirror-assisted scanning; point density.

For citation: M. Vishnevskiy, I. Fedorov Improving the Spatial Resolution of Mechanical LiDAR Systems Using a Virtual Mirror Channel and Automatic Calibration. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 38, issue 3, part 3, 2026, pp. 101-114 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-38.

Acknowledgements. The research was supported by the Department of Engineering Cybernetics at NUST MISIS.

1. Введение

Современные робототехнические системы активно интегрируются в сложные аппаратно-программные комплексы, основанные на методах искусственного интеллекта (ИИ) [1]. Эффективность применяемых алгоритмов глубокого обучения напрямую зависит от качества и полноты сенсорных данных. Несмотря на рост вычислительных мощностей, существуют физические ограничения, связанные с разрешающей способностью датчиков, их взаимным расположением и ограниченным полем зрения.

В этом контексте задача повышения плотности пространственного сканирования становится критически важной для адаптации робота к динамичным условиям среды [2]. Это диктует всё возрастающие требования к производительности LiDAR-сенсоров, которые играют ключевую роль в формировании трёхмерной картины мира. Высокая плотность облака точек необходима для повышения ситуационной осведомленности, надежного распознавания мелких объектов и обеспечения безопасной навигации [3].

Однако механические LiDAR-устройства, являющиеся наиболее распространенными сенсорами в мобильной робототехнике, имеют существенные ограничения по пространственному разрешению и однородности покрытия сцены. В последние годы задача повышения плотности и качества облаков точек становится всё более актуальной для широкого спектра приложений – от обнаружения и классификации объектов [4-5] до создания высокодетализированных трёхмерных моделей и инспекции инфраструктурных объектов [6-9].

В данной работе представлен метод повышения плотности LiDAR-сканирования с помощью пассивного зеркала, создающего дополнительный «виртуальный канал» обзора. В отличие от существующих активных решений, данный подход не требует сложной аппаратной модификации сенсора. Ключевой особенностью предлагаемого метода является применение алгоритма автоматической безмаркерной калибровки (Ground Plane Consistency, GPC), использующего геометрические инварианты сцены для устранения искажений без ручной настройки.

Целью работы является экспериментальная верификация простого и воспроизводимого метода повышения плотности и качества облаков точек для механических LiDAR-сенсоров за счёт использования пассивной зеркальной оптики.

Статья структурирована следующим образом: в Главе 2 выполнен подробный анализ современных подходов к повышению плотности сканирования и выявлены их ключевые ограничения; в Разделе 3 представлена разработанная математическая модель виртуального лидара и описан предлагаемый алгоритм калибровки; в Разделе 4 представлены результаты моделирования и эксперимента на реальном оборудовании; в Разделе 5 сформулированы выводы проведенного исследования.

2. Обзор существующих методов

Проблема недостаточной плотности сканирования механических лидаров решается различными способами, которые можно разделить на активные (внедрение новых технологий излучения) и пассивные (использование оптических элементов).

Существующие активные решения включают микрорелектромеханические системы (MEMS) [10-11] и оптические фазированные решетки (OPA-LiDAR) [12-13]. Они обладают рядом достоинств, среди которых высокая точность измерений, надежность, возможность управления направлением луча и отсутствие механических движущихся элементов [14-15]. В частности, OPA-LiDAR предусматривает интеграцию лазерного источника, схем распределения мощности, фазовращателей, амплитудных модуляторов, массива излучателей и волноводных соединений, занимая при этом площадь всего несколько квадратных миллиметров [16]. Тем не менее, достижение высокой плотности размещения элементов OPA сопряжено с рядом технических трудностей, таких как перекрестные помехи, тепловыделение и потери мощности [17]. Несмотря на активное развитие, сложность производства, высокая стоимость и чувствительность к внешним воздействиям [12, 15, 18-20] пока ограничивают массовое внедрение таких сенсоров в мобильных и бюджетных системах.

Альтернативой является использование мульти-лидарных систем, где увеличение числа сенсоров ведет к росту плотности данных, нократно увеличивает стоимость и усложняет синхронизацию [21]. В этом контексте применение пассивных схем с использованием зеркал и призм [22-24] представляется перспективным решением. Подобные схемы позволяют расширить область сканирования и создать виртуальные каналы без вмешательства в конструкцию сенсора. Такой подход может обеспечить увеличение пространственной информативности и детализации облаков точек при минимальном усложнении аппаратной конструкции, что особенно важно для задач, требующих высокой точности и однородности восприятия окружающей среды (например, автономная навигация роботов, точное картирование и реконструкция сложных объектов).

Однако в большинстве работ по пассивной оптике акцент делается на аппаратную часть, а точность часто ограничивается ошибками ручной настройки зеркала [25-26]. В настоящем исследовании предлагается решить эту проблему с помощью алгоритмической автокалибровки. Для наглядного сопоставления предложенного подхода с альтернативами в табл. 1 приведено сравнение ключевых характеристик.

3. Методы и алгоритмы

Предлагаемый метод повышения плотности сканирования LiDAR основан на формировании дополнительного виртуального канала L' , создаваемого с помощью стационарного плоского зеркала M . Для корректного совмещения данных прямого и отраженного каналов разработана процедура калибровки – алгоритм Ground Plane Consistency (GPC). Данный алгоритм выполняет безмаркерную оценку внешних параметров установки (ориентации и положения зеркала) по геометрическому инварианту опорной плоскости пола Π_{floor} .

Табл. 1. Сравнение подходов к увеличению плотности облака точек.
Table 1. Comparison of approaches to increasing point cloud density.

Признак	MEMS/OPA	Multi-LiDAR	Зеркало + GPC
Стоимость	Высокая	Высокая ($N \times$ цена)	Низкая (оптика + крепление)
Сложность	Высокая (драйверы, теплоотвод)	Средняя (синхронизация)	Низкая (механика + ПО)
Надежность	Средняя (сложная микроэлектроника)	Средняя (N точек отказа)	Высокая (пассивный элемент)
Калибровка	Заводская	Требует перекрытия полей	Автоматическая (по сцене)

В основе GPC лежат два ключевых компонента: (i) математическая модель отражения плоским зеркалом [23] и (ii) процедура устойчивого оценивания параметров плоскости пола методом RANSAC [27]. Применение RANSAC в данном контексте необходимо для надежной фильтрации точек объектов сцены, не принадлежащих поверхности пола (выбросов), что критически важно для высокоточного определения параметров нормали зеркала в зашумленных облаках точек.

Алгоритм калибровки позволяет автоматически определить пространственное положение M относительно оптического центра сенсора, обеспечивая прецизионное совмещение облаков точек \mathcal{P}_{dir} и $H(\mathcal{P}_{ref})$ в итоговое облако \mathcal{P}_{total} .

Соответствующие геометрические соотношения представлены на рис. 1. В качестве базового сенсора L выбран LiDAR Velodyne VLP-16, обладающий подтвержденными характеристиками точности для задач навигации [28-29] (см. табл. 2).

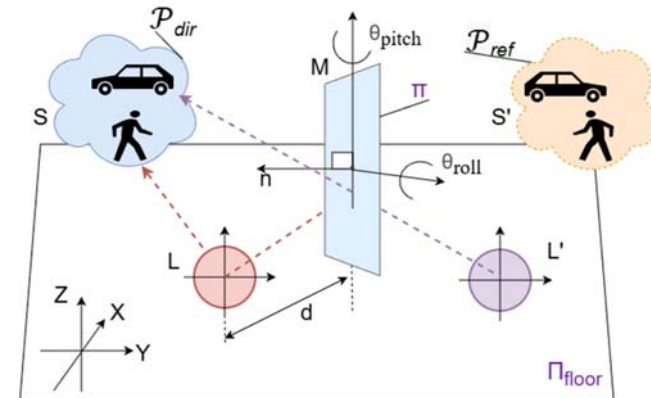


Рис. 1. Схема формирования виртуального канала. Расположение лидара (L) и его виртуального образа (L'), n – нормаль к плоскости π зеркала M , ориентированная углами θ_{pitch} и θ_{roll} . Опорная плоскость в глобальных координатах (X, Y, Z) – Π_{floor} , реальная и виртуальная сцены – S и S' , облака точек в прямом и отраженном луче – \mathcal{P}_{dir} и \mathcal{P}_{ref} , d – расстояние от оптического центра L до π .
Fig. 1. Virtual channel formation scheme. Positions of the LiDAR sensor (L) and its virtual image (L'); n is the normal to the mirror plane π of mirror M , parameterized by angles θ_{pitch} and θ_{roll} . The reference plane in global coordinates (X, Y, Z) is Π_{floor} ; the real and virtual scenes are S and S' ; the point clouds in the direct and reflected beams are \mathcal{P}_{dir} and \mathcal{P}_{ref} ; d is the distance from the optical center L to plane π .

Табл. 2. Спецификация VLP-16.
Table 2. VLP-16 specifications.

Модель	Velodyne VLP-16
Каналов	16
λ , нм	903
Точность, см	± 3
Дальность, м	200
Angle of View (AOV), °	360×30
Гор. разрешение, °	0.1 – 0.4
Верт. разрешение, °	2
Поток данных, млн/сек	0.3

Зеркало M располагается таким образом, чтобы расширить угол поля зрения основного сенсора L , обеспечивая увеличение покрытия сцены S и плотности итогового облака точек. Позиционирование зеркала подбирается из условий охвата сцены S и задается углами положения нормали n плоскости π в соответствии с θ_{roll} , θ_{pitch} , а также расстоянием d до оптического центра L . Получаемое после отражения от M облако точек \mathcal{P}_{ref} объединяется с исходным прямым \mathcal{P}_{dir} , образуя расширенное облако точек сцены S , используя виртуально расширенное пространство наблюдаемой сцены S' . \mathcal{P}_{ref} представляет собой отражение реальных объектов, расположенных вне зоны прямого наблюдения сенсора. Чтобы объединить прямое и отражённое облака точек, необходимо провести коррекцию пространственных координат с учётом искажений, вызванных M . Это осуществляется посредством построения модели отражения и применения её к каждому измерению (точке) \mathcal{P}_{ref} .

3.1 Математическая модель отражения

Глобальная Система Координат (ГСК) ориентирована относительно оптического центра L . Исходное облако точек обозначается множеством $\mathcal{P} = \{p_i \in R^3 \mid i = 1 \dots N\}$. Каждая точка $p = [x, y, z]^T$ описывается в пространстве однородных координат вектором $\tilde{p} = [x, y, z, 1]^T$. M задана плоскостью π , заданной единичной нормалью $n = [n_x, n_y, n_z]^T$, где $\|n\| = 1$, и удаленную от оптического центра сенсора на расстояние d вдоль направления нормали. При попадании луча L на поверхность M возникает отражение, вследствие которого точка измерения в локальном представлении $p_{meas} \in \mathcal{P}_{ref}$ должна быть преобразована в точку в ГСК p_{world} . Такое преобразование описывается с помощью матрицы отражения Хаусхолдера [23] $H \in R^{4 \times 4}$ в виде:

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} - 2nn^T & -2dn \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $I_{3 \times 3}$ – единичная матрица. H – оператор зеркального отражения относительно заданной плоскости. Применяя выражение (1) к вектору \tilde{p}_{meas} (однородному представлению точки p_{meas}), получаем координаты в ГСК.

$$\tilde{p}_{world} = H \cdot \tilde{p}_{meas}. \quad (2)$$

Данное преобразование применяется покомпонентно ко всем измерениям отражённого канала $p_{meas} \in \mathcal{P}_{ref}$, формируя преобразованное множество $H(\mathcal{P}_{ref})$ в ГСК. Выражение (2)

задаёт зеркальное отражение относительно плоскости π , сохраняя метрические свойства (расстояния) сцены. Таким образом, каждое измерение p_i корректируется в соответствии с (2), что позволяет реконструировать истинную геометрию и сформировать единое плотное облако точек, объединяя прямые и отраженные данные.

3.2 GPC

GPC выполняет автоматическую калибровку параметров зеркала M за счёт согласования отражённого канала с геометрией сцены. На первом шаге по прямому каналу \mathcal{P}_{dir} оценивается опорная плоскость пола Π_{floor} (определяются её параметры n_{floor} и d_{floor}) с помощью метода RANSAC [27]. На втором шаге параметры зеркала ξ подбираются так, чтобы отражённые точки после преобразования $H(\xi)$ имели минимальное среднеквадратичное отклонение от плоскости Π_{floor} в смысле расстояния «точка–плоскость» (см. (7)).

Для объединения прямых и отраженных данных необходимо определить параметры зеркала (вектор нормали n и расстояние d), обеспечивающие геометрическую согласованность сцены. На первом этапе калибровки исходное облако точек \mathcal{P} сегментируется на множество прямых измерений \mathcal{P}_{dir} и множество отраженных измерений \mathcal{P}_{ref} :

$$\mathcal{P}_{dir}, \mathcal{P}_{ref} = \text{split}(\mathcal{P}). \quad (3)$$

Введём вектор параметров зеркала $\xi \in R^3$ в виде вектора-столбца:

$$\xi = \begin{bmatrix} \theta_{roll} \\ \theta_{pitch} \\ d \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где θ_{roll} и θ_{pitch} задают ориентацию плоскости зеркала, а d – определяет расстояние от оптического центра L до плоскости π вдоль направления её нормали. Плоскость зеркала задаётся единичной нормалью $n(\xi) = [n_x(\xi), n_y(\xi), n_z(\xi)]^T$, вычисляемой по углам $(\theta_{roll}, \theta_{pitch})$:

$$n(\xi) = \begin{bmatrix} \sin \theta_{roll} \cos \theta_{pitch} \\ \sin \theta_{pitch} \\ \cos \theta_{roll} \cos \theta_{pitch} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой параметризацию единичной нормали через два угла наклона при выборе оси Z направленной вверх: базовый вектор $n_0 = [0, 0, 1]^T$ последовательно поворачивается на угол $-\theta_{pitch}$ вокруг оси X и на θ_{roll} вокруг Y то есть

$$n(\xi) = R_y(\theta_{roll}) R_x(-\theta_{pitch}) n_0, \quad (6)$$

что при раскрытии произведения даёт компоненты (5). Нормаль $n(\xi)$ является единичной по построению.

Процедура калибровки и коррекции координат выполняется в соответствии с алгоритмом, включающим этапы сегментации, детектирования опорной плоскости и нелинейной оптимизации (рис. 2). Алгоритм GPC состоит из трёх этапов: (1) сегментации исходного облака \mathcal{P} на прямой и отражённые каналы \mathcal{P}_{dir} и \mathcal{P}_{ref} ; (2) оценки параметров опорной плоскости пола Π_{floor} по \mathcal{P}_{dir} ; (3) нелинейной оптимизации параметров зеркала ξ , минимизирующей сумму квадратов расстояний от трансформированных точек $(H(\xi)\tilde{p})_{xyz}, p \in \mathcal{P}_{ref}$, до плоскости Π_{floor} . Ручная настройка параметров зеркала, как правило, сопряжена с погрешностями [30-31], приводящими к пространственному рассогласованию («расслоению») облака точек. Преимуществом метода GPC является возможность автоматического определения параметров M без применения специальных калибровочных маркеров [32].

Require: Облако точек \mathcal{P} , порог разделения по азимуту α_0 , начальные параметры $\xi^{(0)}$, максимум итераций K , порог сходимости ε

Ensure: Оценка параметров зеркала $\xi = [\theta_{roll}, \theta_{pitch}, d]^T$

1: **Сегментация:** разделить \mathcal{P} на прямой и отражённый каналы по азимуту $\alpha: \mathcal{P}_{dir} = \{p \in \mathcal{P} \mid \alpha(p) \leq \alpha_0\}, \mathcal{P}_{ref} = \{p \in \mathcal{P} \mid \alpha(p) > \alpha_0\}$.

2: **Оценка опорной плоскости:** робастно оценить плоскость пола Π_{floor} по \mathcal{P}_{dir} методом RANSAC, получив параметры (n_{floor}, d_{floor}) .

3: **Инициализация:** $\xi \leftarrow \xi^{(0)}$.

4: **Оптимизация параметров зеркала:**

5: **for** $k = 0 \dots K - 1$ **do**

6: Вычислить нормаль $n(\xi)$ по (5) и нормировать её: $n(\xi) \leftarrow \frac{n(\xi)}{|n(\xi)|}$.

7: Сформировать матрицу отражения $H(\xi)$ по (1).

8: Вычислить $E(\xi)$ по (7) для точек $p \in \mathcal{P}_{ref}$.

9: Выполнить один шаг численной минимизации $E(\xi)$ и получить обновление $\Delta\xi$.

10: Обновить параметры: $\xi \leftarrow \xi + \Delta\xi$.

11: **if** $|\Delta\xi| < \varepsilon$ **then**

12: **break**

13: **end if**

14: **end for**

15: **return** ξ

Рис. 2. Алгоритм калибровки параметров зеркала (GPC).
Fig. 2. Mirror parameters calibration (GPC) algorithm.

В процессе калибровки минимизируется функция ошибки согласования отражённого канала с опорной плоскостью пола $E(\xi)$, задающая сумму квадратов расстояний от точек отражённого канала после трансформации $H(\xi)$ до опорной плоскости пола Π_{floor} :

$$E(\xi) = \sum_{p \in \mathcal{P}_{ref}} (n_{floor}^T (H(\xi)\tilde{p})_{xyz} + d_{floor})^2. \quad (7)$$

Здесь $p \in \mathcal{P}_{ref}$ – точка отражённого канала в декартовых координатах, $\tilde{p} = [x, y, z, 1]^T$ – соответствующий ей вектор в однородных координатах, $H(\xi) \equiv H(n(\xi), d)$ – матрица отражения Хаусхолдера, параметризованная положением зеркала. Оператор $(\cdot)_{xyz}$ означает обратный переход к декартовым координатам (извлечение первых трёх компонент вектора). Параметры (n_{floor}, d_{floor}) задают уравнение опорной плоскости пола Π_{floor} . Минимизация функционала (7) позволяет определить оптимальное положение зеркала и устранить геометрические артефакты (двоение объектов). Для обеспечения численной устойчивости алгоритма нормаль $n(\xi)$ нормируется на каждой итерации оптимизации.

3.3 Влияние точности калибровки на итоговое качество реконструкции

Рассмотрим, как ошибка ориентации зеркала влияет на пространственную ошибку отражённых измерений. Пусть истинная единичная нормаль зеркала равна n , а оценка содержит малую угловую ошибку $\delta\theta$ (в радианах), так что для малых углов справедливо приближение $\|\delta n\| \approx \delta\theta$, где δn – возмущение единичной нормали. Пусть R – дальность (range) до наблюдаемой точки, то есть $R \approx \|p\|$. Направление отражённого луча выражается через закон отражения в векторной форме:

$$\hat{v}_{ref} = \hat{v} - 2(\hat{v}^T n)n, \quad (8)$$

где \hat{v} и \hat{v}_{ref} – единичные векторы направления падающего и отражённого луча. При малом отклонении нормали $n \rightarrow n + \delta n$ изменение направления отражённого луча имеет порядок

$$\|\delta \hat{v}_{ref}\| \approx 2 \|\delta n\| \approx 2|\delta\theta|, \quad (9)$$

то есть угловая ошибка отражённого направления примерно вдвое превышает ошибку ориентации зеркала. Соответственно, пространственная ошибка точки на дальности R оценивается как смещение, вызванное ошибкой направления:

$$\|\delta p\| \approx R \cdot \|\delta \hat{v}_{ref}\| \approx 2R \cdot |\delta\theta|. \quad (10)$$

Таким образом, даже небольшая угловая погрешность калибровки приводит к линейному росту пространственной ошибки с увеличением дальности.

В табл. 3 приведены оценки по (10), показывающие, что погрешность калибровки $\delta\theta = 0,1^\circ$ (1.7 мрад) даёт существенные метрические искажения на дистанциях, характерных для уличной навигации.

Табл. 3. Зависимость $\|\delta p\|$ от дальности R (при $\delta\theta = 0,1^\circ$).

Table 3. Dependence of $\|\delta p\|$ on range R (for $\delta\theta = 0,1^\circ$).

R [м]	$\ \delta p\ $ [см]	Влияние на навигацию
2,0	0,7	Пренебрежимо малое
20,0	7,0	Критическое искажение
50,0	17,5	Недопустимая ошибка

4. Результаты экспериментов

Целью экспериментального исследования является оценка влияния дополнительного виртуального канала L' на информативность итогового облака точек $\mathcal{P}_{total} = \mathcal{P}_{dir} \cup H(\mathcal{P}_{ref})$, описывающего статическую сцену S . Сравнение характеристик проводилось для базовой конфигурации \mathcal{P}_{dir} (прямой канал) и совмещенного облака \mathcal{P}_{total} как в симуляционной среде Gazebo, так и при сканировании реальных объектов. Перед проведением экспериментов параметры зеркала были откалиброваны методом GPC, после чего формировалась матрица отражения Хаусхолдера $H(\xi)$, используемая для трансформации точек отражённого канала \mathcal{P}_{ref} и получения совмещённого облака \mathcal{P}_{total} .

Для объективной оценки пространственного распределения данных применена процедура дискретизации. Наблюдаемая область разбивается на регулярную трёхмерную сетку вокселей – объёмных элементов с длиной стороны V ($V \in [0,1; 1,0]$ м). Использование воксельного представления является стандартным подходом при анализе качества LiDAR-данных [6, 7] и необходимо для нивелирования эффекта неравномерной плотности измерений [28, 29]. Воксель считается занятым, если в его пределах находится хотя бы одна точка анализируемого множества.

Количественный анализ эффективности проводится на основе двух метрик:

- Плотность заполнения (D): среднее количество точек на один занятый воксель:

$$D = \frac{N_{points}}{N_{occ}}, \quad (11)$$

где N_{points} – общее число точек в облаке, а N_{occ} – количество занятых вокселей.

- Степень заполненности (C): доля занятых вокселей от их общего числа в расчетной сетке:

$$C = \frac{N_{occ}}{N_{total}}. \quad (12)$$

При сравнении используется фиксированная область интереса, одинаковая для \mathcal{P}_{dir} и \mathcal{P}_{total} . Следовательно, при заданном V значение N_{total} совпадает для обоих случаев. Относительный прирост заполненности определяется как

$$\Delta C = \frac{C_{total} - C_{dir}}{C_{dir}} \cdot 100\%, \quad (13)$$

что при фиксированной области интереса эквивалентно относительному приросту числа занятых вокселей N_{occ} .

4.1 Результаты моделирования

Численное моделирование в среде Gazebo (рис. 3) подтверждает, что использование зеркального канала обеспечивает значительное уплотнение данных в целевой области наблюдения. Количественные показатели для различных уровней дискретизации V приведены в табл. 4.

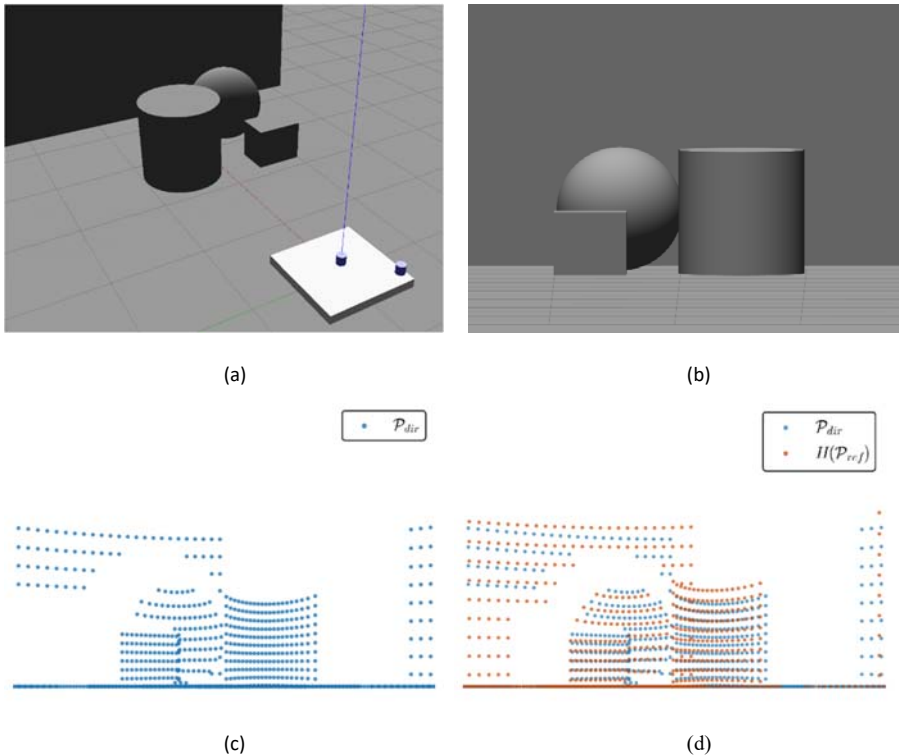


Рис. 3. Сравнение плотности сканирования в Gazebo: (a) – экспериментальная установка; (b) – сцена S ; (c) – проекция \mathcal{P}_{dir} ; (d) – проекция совмещённого облака \mathcal{P}_{total} .
Fig. 3. Comparison of scanning density in Gazebo: (a) – experimental setup; (b) – scene S ; (c) – projection of \mathcal{P}_{dir} ; (d) – projection of the combined point cloud \mathcal{P}_{total} .

В качестве критериев сравнения выступают количество занятых элементов N_{occ} и D . Наибольший прирост заполненности ΔC (см. формулу (13)) наблюдается при высоком разрешении сетки ($V = 0,1 \dots 0,25$ м). Так, при $V = 0,1$ м количество занятых вокселей

увеличилось на 50% (с 86 до 129 единиц). При укрупнении шага сетки ($V \geq 0,5$ м) значения N_{occ} выравниваются, так как дополнительные точки виртуального канала попадают в уже занятые ячейки. Тем не менее, плотность D_{total} в этих условиях значительно превышает D_{dir} , что свидетельствует о повышении избыточности данных и росте их достоверности в совмещённом облаке.

Табл. 4 Метрики симуляции для \mathcal{P}_{dir} и \mathcal{P}_{total} .
Table 4. Simulation metrics for \mathcal{P}_{dir} and \mathcal{P}_{total} .

V [М]	N_{occ} (\mathcal{P}_{dir})	N_{occ} (\mathcal{P}_{total})	Прирост ΔC , %	D_{dir} [т/в]	D_{total} [т/в]
0,10	86	129	50,0	3,16	3,18
0,20	46	61	32,6	5,91	6,72
0,25	40	48	20,0	6,80	8,54
0,50	16	16	0,0	17,0	25,6
1,00	4	4	0,0	68,0	102,5

4.2 Натурный эксперимент

Натурный эксперимент проводился для валидации результатов моделирования в условиях реальной сцены. На рис. 4 показана реальная сцена S и размещение элементов стенда. Лидар L установлен на опоре на фиксированной высоте и направлен в сторону сцены; рядом для наглядности показана его локальная система координат (X_L, Y_L, Z_L) . Справа от лидара размещено плоское зеркало M , формирующее виртуальный канал наблюдения; для зеркала обозначена связанная с ним система координат (X_{LM}, Y_{LM}, Z_{LM}) , а также положение зеркальной плоскости относительно сцены. В нижней части кадра выделен вычислительный модуль (ноутбук), который используется для регистрации данных и визуального контроля результатов. Рис. 5 наглядно иллюстрирует прирост плотности облака точек при использовании зеркального канала. Количественная оценка эффекта подтверждается метриками в табл. 5. Для вокселя размером $V = 0,25$ м количество занятых ячеек N_{occ} возросло на 40,5%, а плотность точек D продемонстрировала рост во всем диапазоне исследуемых разрешений. Полученные результаты согласуются с общепринятыми методиками оценки качества 3D-реконструкций [6] и анализа стабильности LiDAR-измерений [28]. Устранение геометрических рассогласований в итоговом облаке \mathcal{P}_{total} косвенно подтверждает корректность выполненной калибровки параметров зеркала (см. раздел 3).

Табл. 5 Метрики натурного эксперимента для облаков \mathcal{P}_{dir} и \mathcal{P}_{total} .
Table 5. Real-world experiment metrics for point clouds \mathcal{P}_{dir} and \mathcal{P}_{total} .

V [М]	N_{occ} (\mathcal{P}_{dir})	N_{occ} (\mathcal{P}_{total})	Прирост ΔC , %	D_{dir} [т/в]	D_{total} [т/в]
0,10	179	230	28,5	10,6	15,1
0,20	44	58	31,8	43,2	59,8
0,25	37	52	40,5	51,4	66,8
0,50	11	11	0,0	172,8	315,6

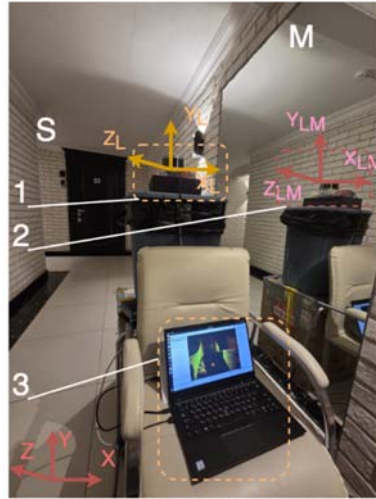


Рис. 4. Экспериментальная установка: 1 – LiDAR-сенсор (\mathcal{P}_{dir}); 2 – зеркало M, формирующее виртуальный канал; 3 – вычислительный модуль; S – наблюдаемая сцена.

Fig. 4. Experimental setup: 1 – LiDAR sensor (\mathcal{P}_{dir}); 2 – mirror M forming the virtual channel; 3 – computing module; S is the observed scene.

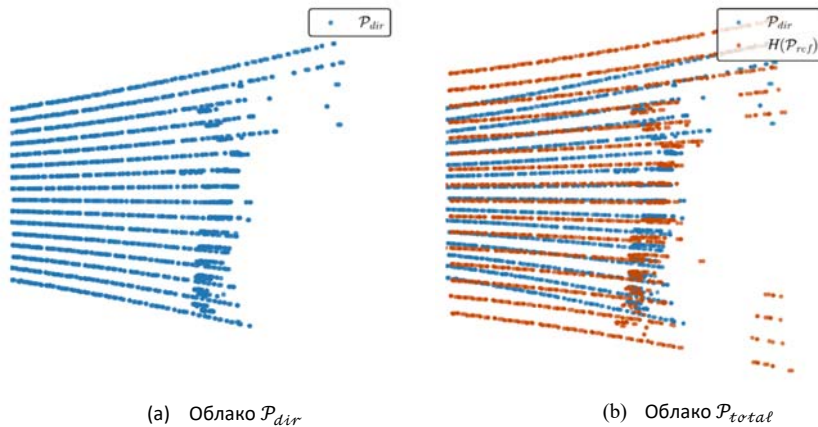


Рис. 5. Облака точек натурального эксперимента (цветом выделены точки прямого и зеркального каналов).

Fig. 5. Point clouds from the real-world experiment (points from the direct and mirror channels are color-coded).

5. Результаты

Эксперименты показали, что зеркальный канал наиболее эффективен для задач с высокой детализацией (размер вокселя 0,1–0,25 м). В симуляции прирост заполненности падает при укрупнении вокселя, так как зеркало заполняет мелкие детали. В реальном эксперименте эффект сохраняется и при средних разрешениях, что объясняется усреднением шумов измерений при укрупнении ячеек.

Предложенный метод GPC показал устойчивость к начальным ошибкам монтажа до 3° . Применение автоматической калибровки критически важно, так как даже малая угловая ошибка в $0,1^\circ$ (как показано в теоретической оценке, раздел 3.3) приводит к недопустимым смещениям на дистанциях свыше 20 м.

Заключение

Разработан и верифицирован метод повышения плотности LiDAR-сканирования с использованием пассивной оптики. Ключевым вкладом является алгоритм GPC, обеспечивающий автоматическую калибровку системы без использования мишеней. Метод обеспечивает прирост информативности облака точек до 50% (в симуляции) и 40% (в реальных условиях) при сохранении низкой стоимости аппаратной реализации.

Список литературы / References

- [1]. Anand V., Lohani B., Pandey G., Mishra R. Advancing LiDAR intensity simulation through learning with novel physics-based modalities. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025. DOI: 10.1109/TITS.2025.3532687.
- [2]. Bharati V. LiDAR+ camera sensor data fusion on mobiles with AI-based virtual sensors to provide situational awareness for the visually impaired. In *Proc. of the 2021 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2021, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SAS51076.2021.9530102.
- [3]. Shomer A., Avidan S. Prior based sampling for adaptive LiDAR. arXiv preprint arXiv:2304.07099, 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2304.07099>, accessed 01.02.2026.
- [4]. Zhou Y., Sun P., Zhang Y., Angelov D., Gao J., Ouyang T., Guo J., Ngiam J., Vasudevan V. End-to-end multi-view fusion for 3D object detection in LiDAR point clouds. In *Proc. of the Conference on Robot Learning (CoRL)*, 2020, vol. 100, pp. 923-932. Available at: <https://proceedings.mlr.press/v100/zhou20a.html>, accessed 01.02.2026.
- [5]. Schrab K., Hilgerdenaar F., Protzmann R., Radosch I. Improving object detection through multi-perspective LiDAR fusion. In *Proc. of the 11th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS 2025)*, 2025, pp. 448-457. DOI: 10.5220/0013283600003941.
- [6]. Kumar U. R., Coudron I., Puttemans S., Vandewalle P. Quality assessment for 3D reconstruction of building interiors. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2018, vol. 62, issue 1, pp. 010402-1–010402-10. DOI: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2018.62.1.010402.
- [7]. Oude Elberink S. J., Vosselman G. Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, vol. 66, pp. 157-165. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.10.005.
- [8]. Mitka B., Klapa P., Gawronek P. Laboratory tests of metrological characteristics of a non-repetitive low-cost mobile handheld laser scanner. *Sensors*, 2024, vol. 24, issue 18, Art. 6010. DOI: 10.3390/s24186010.
- [9]. Ramlal B., Archibald D., Al-Tahir R., Sutherland M., Davis D. Assessment of multi-perspective and multi-sensor data for urban strata mapping. *Research Square*, 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2599958/v1.
- [10]. Wang D., Watkins C., Xie H. MEMS mirrors for LiDAR: a review. *Micromachines*, 2020, vol. 11, issue 5, Art. 456. DOI: 10.3390/mi11050456.
- [11]. Yang D., Liu Y., Chen Q., Chen M., Zhan S., Cheung N.-K., Chan H.-Y., Wang Z., Li W.J. Development of the high angular resolution 360° LiDAR based on scanning MEMS mirror. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, Art. 1540. DOI: 10.1038/s41598-022-26394-6.
- [12]. Xu W., Yuan Q., Yang Y., Lu L., Chen J., Zhou L. Progress and prospects for LiDAR-oriented optical phased arrays based on photonic integrated circuits. *npj Nanophotonics*, 2025, vol. 2, Art. 14. DOI: 10.1038/s44310-025-00059-4.
- [13]. Fu Y., Chen B., Yue W., Tao M., Zhao H., Li Y., Li X., Qu H., Li X., Hu X., Song J. Target-adaptive optical phased array LiDAR. *Photonics Research*, 2024, vol. 12, issue 5, pp. 904-911. DOI: 10.1364/PRJ.514468.
- [14]. Kasturi A., Milanović V., Lovell D., Hu F., Ho D., Su Y., Ristić Lj. Comparison of MEMS mirror LiDAR architectures. In *Proc. of MOEMS and Miniaturized Systems XIX*, 2020, vol. 11293, pp. 63-79. DOI: 10.1117/12.2556248.
- [15]. Altuntas C. Review of scanning and pixel array-based lidar point-cloud measurement techniques to capture 3d shape or motion. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, issue 11, Art. 6488. DOI: 10.3390/app13116488.

- [16]. Hsu C.-P., Li B., Solano-Rivas B., Gohil A. R., Chan P. H., Moore A. D., Donzella V. A review and perspective on optical phased array for automotive lidar. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, vol. 27, issue 1, pp. 1-16. DOI: 10.1109/JSTQE.2020.3022948.
- [17]. Fatemi R., Khachaturian A., Hajimiri A. A nonuniform sparse 2-d large-fov optical phased array with a low-power pwm drive. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, vol. 54, issue 5, pp. 1200-1215. DOI: 10.1109/JSSC.2019.2896767.
- [18]. Yang D., Li W. J., Chen M., Yu X., Chen Q., Zhang G. Enhancing point cloud density using MEMS mirror-based focusing for LiDAR systems. *Research Square*, 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4652241/v1.
- [19]. Raj T., Hashim F. H., Huddin A. B., Ibrahim M. F., Hussain A. A survey on LiDAR scanning mechanisms. *Electronics*, 2020, vol. 9, issue 5, Art. 741. DOI: 10.3390/electronics9050741.
- [20]. Zhou J. A review of LiDAR sensor technologies for perception in automated driving. *Academic Journal of Science and Technology*, 2022, vol. 3, issue 3, pp. 255-261. DOI: 10.54097/ajst.v3i3.2993.
- [21]. Kim T.-H., Park T.-H. Placement optimization of multiple LiDAR sensors for autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 21, issue 5, pp. 2139-2145. DOI: 10.1109/TITS.2019.2915087.
- [22]. Pogačnik M., Munič M. Towards a multi-perspective time of flight laser ranging device based on mirrors and prisms. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, issue 14, Art. 7121. DOI: 10.3390/app12147121.
- [23]. Kibii J. E., Dreher A., Wormser P. L., Gimpel H. Design and calibration of plane mirror setups for mobile robots with a 2D-Lidar. *Sensors*, 2022, vol. 22, issue 20, Art. 7830. DOI: 10.3390/s22207830.
- [24]. Matsubara K., Nagatani K., Hirata Y. Improvement in measurement area of 3D LiDAR for a mobile robot using a mirror mounted on a manipulator. In *Proc. of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020, pp. 9523-9530. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9340822.
- [25]. Shaker A., Yan W. Y., El-Ashmawy N. The effects of laser reflection angle on radiometric correction of the airborne LiDAR intensity data. In *Proc. of ISPRS Archives*, 2011, vol. XXXVIII-5/W12, pp. 213-218. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-213-2011.
- [26]. Goettsche J., Alexopoulos S., Dümmler A., Maddineni S. K. Multi-mirror array calculations with optical error. In *Proc. of SolarPACES 2020 International Conference*, 2020, Paper ID 02005. Available at: <https://www.comsol.com/paper/multi-mirror-array-calculations-with-optical-error-95421>, accessed 01.02.2026.
- [27]. Fischler M. A., Bolles R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 1981, vol. 24, issue 6, pp. 381-395. DOI: 10.1145/358669.358692.
- [28]. Kelly C., Wilkinson B., Abd-Elrahman A., Cordero O., Lassiter H. A. Accuracy assessment of low-cost LiDAR scanners: an analysis of the Velodyne HDL-32E and Livox Mid-40's temporal stability. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, issue 17, Art. 4220. DOI: 10.3390/rs14174220.
- [29]. Schulte-Tiggel J., Förster M., Nikolovski G., Reke M., Ferrein A., Kaszner D., Matheis D., Walter T. Benchmarking of various LiDAR sensors for use in self-driving vehicles in real-world environments. *Sensors*, 2022, vol. 22, issue 19, Art. 7146. DOI: 10.3390/s22197146.
- [30]. Pelka M., Będkowski J. Calibration of planar reflectors reshaping LiDAR's field of view. *Sensors*, 2021, vol. 21, issue 19, Art. 6501. DOI: 10.3390/s21196501.
- [31]. Będkowski J., Pelka M. Affordable robotic mobile mapping system based on LiDAR with additional rotating planar reflector. *Sensors*, 2023, vol. 23, issue 3, Art. 1551. DOI: 10.3390/s23031551.
- [32]. Levinson J., Thrun S. Unsupervised calibration for multi-beam lasers. In *Proc. of Experimental Robotics*. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2014, vol. 79, pp. 179-193. DOI: 10.1007/978-3-642-28572-1_13.

Информация об авторах / Information about authors

Марк Романович ВИШНЕВСКИЙ – аспирант, ассистент кафедры инженерной кибернетики НИТУ МИСИС. Сфера научных интересов: мобильная робототехника, компьютерное зрение, лидарные системы, алгоритмы обработки и фильтрации облаков точек.

Mark Romanovich VISHNEVSKIY – postgraduate student, assistant at the Department of Engineering Cybernetics of the National University of Science and Technology MISIS. Research interests: mobile robotics, computer vision, LiDAR systems, point cloud processing and filtering algorithms.

Игорь Юрьевич ФЁДОРОВ – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры инженерной кибернетики НИТУ МИСИС. Сфера научных интересов: многокамерные системы технического зрения, трехмерная реконструкция объектов, алгоритмы обнаружения объектов на базе нейронных сетей, интеграция искусственного интеллекта в робототехнические комплексы.

Igor Yuryevich FEDOROV – Cand. Sci. (Phys.-Math.), associate professor at the Department of Engineering Cybernetics of the National University of Science and Technology MISIS. Research interests: multi-camera vision systems, 3D reconstruction, neural network-based object detection, and integration of artificial intelligence into robotic systems.