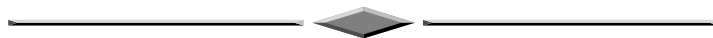


ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ



УДК 528.44:528.721.221.6

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-5-89-100

Методика построения оптимального маршрута при проведении работ по сканированию территории

Д. А. Гура^{1, 2}, Р. А. Дьяченко¹, С. А. Ярутин¹, А. С. Макарян¹

¹Кубанский государственный технологический университет,
г. Краснодар, Российская Федерация

²Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Российская Федерация
e-mail: gda-kuban@mail.ru

Аннотация. В работе представлена методика оптимального обхода участка с использованием наземного лазерного сканера, реализованная на основе модифицированного алгоритма Кристофидеса и модели целочисленного линейного программирования (ILP). Предлагаемый подход решает NP-трудную задачу, сводимую к модифицированной версии задачи коммивояжера, с учетом дополнительных геометрических ограничений, обусловленных наличием препятствий на территории. Методика включает дискретизацию участка, генерацию облаков точек вокруг вершин препятствий и построение графа допустимых позиций сканирования. Экспериментальная проверка на синтетических и реальных данных показала, что предложенный алгоритм позволяет снизить количество необходимых сканирующих окружностей и суммарную длину маршрута обхода на 12–18 % по сравнению с традиционными эвристическими подходами, при сохранении полного покрытия границы. Кроме того, проведенный сравнительный анализ выявил, что, несмотря на возрастание вычислительной сложности ILP-модели с увеличением числа препятствий, предложенная методика обладает высокой точностью и применима в задачах геодезии, кадастра, картографии и инженерной диагностики. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются динамическая адаптация маршрута и интеграция гибридных методов оптимизации для повышения масштабируемости решения.

Ключевые слова: кадастр, лазерное сканирование, маршрут, алгоритм Кристофидеса, оптимизация, NP-трудная задача

Для цитирования:

Гура Д. А., Дьяченко Р. А., Ярутин С. А., Макарян А. С. Методика построения оптимального маршрута при проведении работ по сканированию территории // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 5. – С. 89-100. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-5-89-100

Введение

Современные задачи трехмерной идентификации территориальных объектов требуют высокой точности геодезических и картографических работ, особенно в условиях плотной

застройки и наличия природных барьеров [1, 2]. Одной из ключевых проблем является обеспечение полного и равномерного покрытия исследуемой территории с использованием информации о диапазоне измерения расстояний наземным лазерным сканером (далее – радиус

сканирования). Каждая скан-позиция при этом формирует область обзора в виде круга, радиус которого соответствует максимальной дальности измерений данного прибора, что позволяет учитывать аппаратные ограничения и влияние препятствий, блокирующих прямую видимость между точками съемки. Достижение высокого уровня дискретности сканирования при минимизации «пустых» зон на поверхности объекта является критически важным условием для последующей надежной трехмерной идентификации и моделирования объектов недвижимости.

В существующих исследованиях обход территории при лазерном сканировании обычно реализуется через эвристические алгоритмы решения задачи коммивояжера (TSP) [3, 4]. При этом в ряде работ предложены более специализированные подходы к размещению скан-позиций, учитывающие взаимную видимость, геометрические и топологические характеристики объектов [5, 6]. Так, в диссертации Ш. Х. Мухаммада [7] разработан метод анализа зон перекрытия видимости и геодезических параметров, позволяющий сокращать количество точек съемки на 15–20 %. Тем не менее эмпирические испытания демонстрируют, что классические TSP-эвристики порождают до 30–35 % избыточных скан-позиций, что приводит к увеличению времени съемки на 20–25 % и росту материальных затрат до 15–20 %. Кроме того, присутствие препятствий в пространстве сканирования еще более снижает эффективность традиционных методов из-за необходимости введения дополнительных ограничений в модель маршрутизации.

Цель настоящего исследования заключается в разработке эффективной методики обхода границы участка, основанной на модифицированном алгоритме Кристофидеса для решения задачи TSP с учетом сканирующих радиусов наземного лазерного сканера. Данный подход позволяет оптимизировать маршрут обхода, минимизировать количество необходимых сканирующих зон и обеспечить максимально возможное покрытие территории, что критически важно для повышения точности 3D-идентификации объектов [8, 9].

Экономическое обоснование исследования связано с потенциалом значительного сокращения затрат времени и ресурсов, требуемых для проведения полевых работ. Оптимизация маршрутов сканирования позволяет снизить эксплуатационные расходы организаций, профессионально занимающихся наземным лазерным сканированием, за счет уменьшения числа необходимых станций стояния прибора и сокращения времени работы на объекте. Это приводит к повышению эффективности проектов в области архитектурных обмеров, гражданского строительства, управления городским хозяйством и многих других отраслей, использующих облака точек как информационную основу объектов в пространстве [10].

Материалы и методы

2.1. Формализация задачи.

Задача оптимального обхода границы участка наземным лазерным сканером формулируется как модифицированная версия задачи коммивояжера (TSP) с дополнительными геометрическими и логистическими ограничениями. Дано множество точек вдоль границы участка, представляющих возможные позиции сканирования, а также набор препятствий, ограничивающих доступные зоны размещения сканирующих позиций. Требуется определить маршрут, минимизирующий общее расстояние обхода при условии полного покрытия границы участка окружностями фиксированного радиуса.

Задача оптимального обхода границы участка с учетом препятствий и покрытия окружностями фиксированного радиуса является NP-сложной. Это следует из того, что она представляет собой модификацию задачи коммивояжера (TSP), которая принадлежит классу NP-сложной задачи оптимизации [11]. Включение дополнительных ограничений, таких как необходимость полного покрытия границы участка, учет препятствий и оптимизация размещения сканирующих позиций, лишь усложняет задачу, переводя ее в категорию комбинированных NP-сложных проблем [12].

Формально даже упрощенная версия задачи без препятствий сводится к дискретной оптимизации на графах, а ее полная версия

требует решения целочисленного линейного программирования (ILP), которое известно своей вычислительной сложностью. Более того, добавление условий на покрытие окружностями эквивалентно задаче дискретного покрытия множества, которая также принадлежит к классу NP-сложных задач.

Следовательно, для решения задачи на практике необходимо использовать либо эвристические алгоритмы, либо приближенные методы оптимизации, такие как модифицированный алгоритм Кристофидеса, который позволяет получить решение с гарантированной оценкой качества [13].

2.2. Определение входных данных.

Входными данными являются множества:

$$\langle P, O, R, G(V, E) \rangle - \quad (1)$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множество опорных точек границы участка, подлежащих сканированию;

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$ – множество препятствий, моделируемых в виде ограниченных полигонов;

R – фиксированный радиус окружности, соответствующий области охвата лазерного сканера;

$G(V, E)$ – взвешенный граф возможных перемещений сканера, где V – множество вершин, соответствующих допустимым позициям сканирования, а E – ребра, задающие возможные пути перемещения с весами, соответствующими расстоянию между точками.

2.3. Ограничения на построение маршрута.

Оптимизация маршрута сканирования осуществляется с учетом следующих ограничений.

1. Полное покрытие границы участка, где каждая точка $p_i \in P$ должна быть охвачена хотя бы одной сканирующей окружностью радиуса R .

2. Обход препятствий, где центры сканирующих окружностей $\vartheta_i \in V$ не могут располагаться внутри области препятствий O .

3. Минимизация расстояния обхода, где суммарная длина маршрута, заданного как

путь в графе $G(V, E)$, должна быть минимальной.

4. Сохранение связности маршрута, где решение должно представлять собой единственный связный цикл, обеспечивающий непрерывность перемещения сканера по доступным точкам.

2.4. Используемые алгоритмы.

Для решения задачи обхода участка с учетом пространственных ограничений используется модифицированный алгоритм Кристофидеса для задачи коммивояжера. Стандартный алгоритм обеспечивает аппроксимационное решение с отношением $\frac{3}{2}$ к опти-

мальному, если для графа $G=(V, E)$, где V – множество вершин, а E – множество ребер с функцией расстояния $d: E \rightarrow \mathbb{R}^+$, последовательно выполняются следующие операции.

Первым этапом строится минимальное остовное дерево $T \subseteq G$ с суммарным весом $\omega(T)$.

Вторым этапом определяется совершенное паросочетание M для множества вершин $V_0 \subset V$ с нечетной степенью в T , что приводит к объединению $T \cup M$ в эйлеров граф.

Из этого графа извлекается эйлеров цикл C_E , который после процедуры сокращения повторяющихся вершин преобразуется в гамильтонов цикл C_H , удовлетворяющий неравенству

$$\omega(C_H) \leq \frac{3}{2} \cdot OPT, \quad (2)$$

где OPT обозначает вес оптимального цикла.

В рамках модификации для задачи обхода границы участка вводится ограничение на допустимое множество позиций, обозначаемое как $V' \subset V$, где

$$V' = \{\vartheta \in V \mid \vartheta \notin O\}, \quad (3)$$

в котором O представляет совокупность областей, соответствующих препятствиям.

При построении графа $G'=(V', E')$ веса ребер корректируются с учетом простран-

ственных ограничений посредством функции

$$d'(\vartheta, v) = d(\vartheta, v) + \alpha \cdot \delta(\vartheta, v), \quad (4)$$

где $\delta(\vartheta, v)$ – штрафное расстояние, отражающее влияние препятствий;

α – эмпирически подобранный коэффициент.

Следующим шагом, после построения исходных множеств, является построение минимального остовного дерева T' для G' .

Алгоритм определяет совершенное паросочетание M' для множества вершин $V_o' \subset V'$ с нечетной степенью в T' . Объединение $T' \cup M'$ формирует эйлеров граф, из которого извлекается эйлеров цикл C_E' .

После применения процедуры сокращения повторяющихся вершин получается гамильтонов цикл C_H' , удовлетворяющий условию покрытия: для каждой точки p границы участка существует такая точка $v \in C_H'$, что

$$\|p - v\| \leq R, \quad (5)$$

где R – фиксированный радиус сканирования, определяющий зону охвата лазерного сканера.

Для учета препятствий при построении маршрута обхода границы участка предлагается генерация облака точек вокруг каждой вершины препятствия. Это позволяет детализировать геометрию ограничений и адаптировать путь обхода с учетом реальных условий местности.

Множество препятствий, обозначаемое как $O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$, где каждое препятствие O_i представляется в виде множества вершин $V_i \subset R^2$. Для каждой вершины $v \in V_i$ генерируется облако точек

$$P(v) = \{p_j \mid p_j \in R^2, \|p_j - v\| \leq \rho\}, \quad (6)$$

где ρ – радиус локального распределения точек, отражающий геометрические особенности препятствия.

На основе сгенерированного облака точек формируется дополнительный граф

$$G_p = (V_p, E_p), \text{ где } V_p = \bigcup_{i=1}^m \bigcup_{v \in V_i} P(v). \text{ Связи}$$

между вершинами $p_j \in V_p$ определяются по критерию

$$(p_j, p_k) \in E_p \Leftrightarrow \|p_j - p_k\| \leq d_{\max}, \quad (7)$$

где $d_{\max}$ – допустимое расстояние для построения ребер.

После проведения процедуры генерации облака точек выполняется интеграция G_p в основной граф G' , что позволяет учитывать детали геометрии препятствий при построении маршрута. Для адаптации алгоритма Кристофидеса вводится корректировка функции расстояния

$$d''(\vartheta, v) = d'(\vartheta, v) + \beta \sum_{p_j \in P(u)} \omega(p_j), \quad (8)$$

где $\omega(p_j)$ – вес точки облака, определяющий ее значимость при обходе препятствия, а β – регулирующий коэффициент.

На основе модифицированного алгоритма Кристофидеса строится маршрут, который проходит по вершинам границы участка, исключая попадание в запрещенные зоны и обеспечивая эффективный обход препятствий.

Следующим шагом после построения остовного дерева по модифицированному алгоритму Кристофидеса является оптимизация расстановки точек обхода участка.

Это осуществляется в виде решения задачи целочисленного линейного программирования (ILP). Задача включает в себя определение позиций сканирования, обеспечение полного покрытия границы участка и минимизацию суммарного пути обхода при наличии препятствий.

Введем обозначения:

$$x_i \in \{0, 1\} \text{ – бинарная переменная, равная}$$

1, если точка s_i выбрана в качестве позиции сканирования, и 0 в противном случае;

$y_{ij} \in \{0,1\}$ – бинарная переменная, равная 1, если путь проходит между точками s_i и s_j ;
 d_{ij} – расстояние между точками s_i и s_j .

Необходимо минимизировать общую длину маршрута обхода:

$$\min \sum_i \sum_{j \neq i} d_{ij} y_{ij}. \quad (9)$$

Каждая точка p на границе участка Ω должна быть покрыта хотя бы одной окружностью радиуса r :

$$\forall p \in \Omega, \sum_i x_i \cdot \mathbb{I}(\|p - s_i\| \leq r) \geq 1 \quad (10)$$

Позиции сканирования s_i не могут пересекаться с препятствиями O :

$$\forall s_i \in S, s_i \notin O. \quad (11)$$

Каждая выбранная точка сканирования должна быть посещена ровно один раз:

$$\sum_{j \neq i} y_{ij} = x_i, \quad \forall i. \quad (12)$$

$$\sum_{i \neq j} y_{ij} = x_j, \quad \forall j. \quad (13)$$

Вводятся вспомогательные переменные u_i для предотвращения образования подциклов:

$$u_i - u_j + |S| y_{ij} \leq |S| - 1, \quad \forall i \neq j, j \neq 1. \quad (14)$$

Таким образом, предложенная ILP-модель позволяет оптимизировать размещение точек сканирования с учетом препятствий и минимизации общей длины маршрута обхода.

2.5. Программная реализация.

Для реализации предложенной методики разработана программная система, реализованная на языке Python, которая объединяет обработку геометрических данных, оптимизацию маршрута и визуализацию результатов. Основой системы служат библиотеки Shapely, PuLP, NetworkX и Matplotlib.

Ниже приведена диаграмма `idf0`, иллюстрирующая функциональную структуру

алгоритма, а также соответствующее описание (рис. 1).

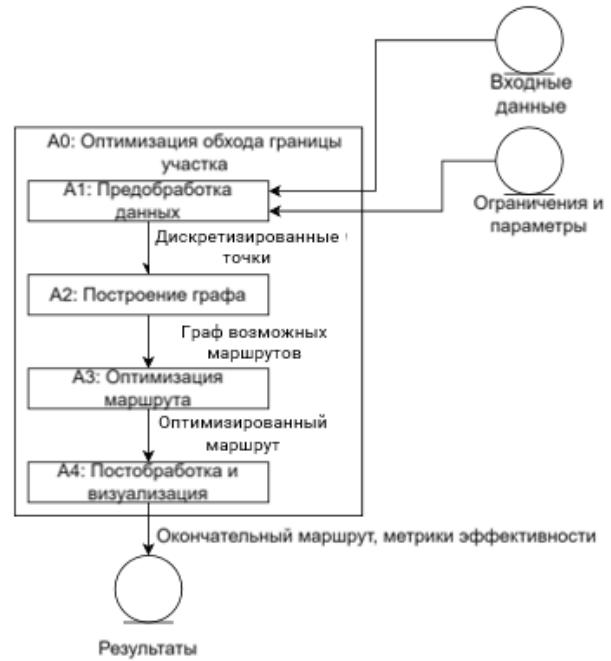


Рис. 1. Диаграмма функциональной структуры алгоритма

Входными данными являются полигон, задающий границы участка, полигоны-препятствия, фиксированный радиус сканирования r и разрешенные зоны для размещения сканирующих позиций (рис. 2).

На рис. 2 также приведена условная визуализация: красные точки соответствуют углам зданий, зеленые – позициям стояния сканера.



Рис. 2. Нанесение начальных параметров на карту

Предобработка включает дискретизацию границы участка с выбором точек с шагом d , обеспечивающим полное покрытие, а также генерацию облаков точек для каждой вершины препятствия с целью детальной аппроксимации геометрии ограничений.

После этапа предобработки формируется граф $G = (S, E)$, где S – множество допустимых позиций сканирования, а E – ребра, определяемые евклидовыми расстояниями между точками. В этот граф интегрируются дополнительные вершины, полученные из облаков точек, что позволяет учесть влияние препятствий на маршрут обхода.

Окончательный оптимизированный маршрут визуализируется с помощью Matplotlib, что позволяет наглядно оценить расположение сканирующих позиций, траекторию обхода и влияние препятствий. Полученные результаты демонстрируют возможность существенного сокращения времени сканирования и снижения материальных затрат за счет оптимизации маршрута и уменьшения числа необходимых станций для сканирования.

Результаты и их обсуждение

В рамках исследования была разработана программная система на языке Python, включающая модули для обработки данных, построения геометрических моделей исследуемой области, дискретизации пространства возможных позиций установки лазерного сканера и оптимизации размещения точек измерений методом целочисленного линейного программирования (ILP).

Экспериментальные измерения проводились в двух различных средах: городской застройке и лесной местности [14]. На примере застройки города Барселона (Испания), представленной на рис. 3, были выполнены измерения на участках, имеющих различную площадь [15]. Каждый участок имел одинаковую плотность застройки, что позволило исследовать влияние городской инфраструктуры на оптимальное распределение точек установки лазерного сканера.

На рис. 3, 4 приведена условная визуализация: красные точки обозначают углы зданий (в городской среде) или вершины препят-

ствий (в лесной среде), зеленые точки – позиции установки сканера, окружности – радиусы сканирования, соответствующие максимальной дальности измерений.

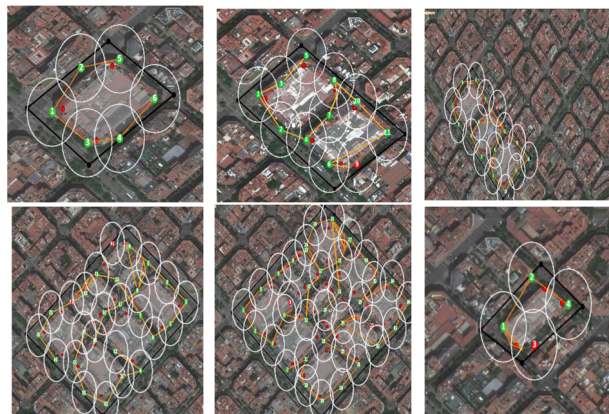


Рис. 3. Результаты эксперимента в городской местности

На примере участка, находящегося в Тюменской области (Россия), как показано на рис. 4, измерения были проведены в лесной местности. Здесь участки также имели идентичную плотность препятствий, но в отличие от городской среды, на этих участках отсутствовала застройка и пространство было более открытым, что позволило изучить влияние природных факторов, таких как рельеф и растительность, на результат тестов. Для каждой среды было выполнено по шесть тестов, что обеспечило репрезентативность данных для анализа [16, 17].

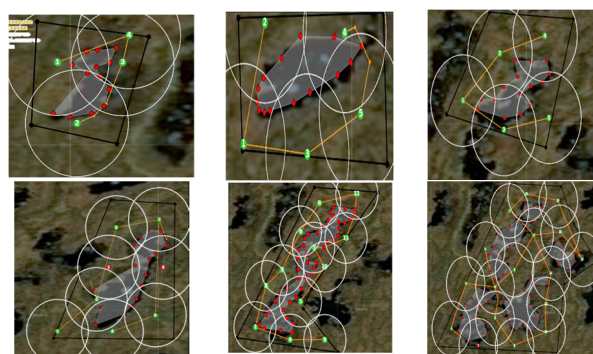


Рис. 4. Результаты эксперимента в лесной местности

В каждом эксперименте фиксировался радиус действия сканера и плотность препят-

ствий (здания и строения, водоемы и другие объекты, влияющие на конфигурацию покрытия). В базовом случае (отсутствие препятствий) формировался равномерный набор точек размещения, тогда как в сложных сценариях (с наличием препятствий) оптимизация позволяла минимизировать число необходимых установок [18, 19].

В табл. 1 приведены результаты вычислений для различных участков в городской среде.

Таблица 1

Результаты вычислений для различных участков в городской среде

Измерения	Найденное количество окружностей	Длина маршрута (м)	Время расчета (с)
A	6	483,31	0,35
B	11	1 007,95	2,91
C	16	1 804,68	8,26
D	26	2 849,37	115,06
E	36	4 059,16	3 423,07
F	4	353,04	0,30

Анализ полученных данных показывает, что при увеличении площади участка происходит нелинейное увеличение длины маршрута. Время вычислений существенно возрастает в сложных случаях (измерения D и E), что обусловлено увеличением количества окружностей и необходимостью решения более сложной оптимизационной задачи [20, 21].

Исследование показало, что увеличение количества окружностей приводит к росту суммарной длины пути, однако оптимальные значения достигаются при сбалансированном распределении точек сканирования.

Результаты измерений в лесной среде представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений в лесной среде

Измерения	Найденное количество окружностей	Длина маршрута (м)	Время расчета (с)
A	4	211,69	0,14
B	5	360,99	0,29
C	5	451,75	0,51
D	8	743,56	0,78
E	12	1 031,97	0,92
F	17	1 738,94	17,78

При анализе результатов в лесной среде важно учитывать влияние плотности растительности на размещение сканирующих окружностей. Более высокая засоренность кроны деревьев и неравномерное распределение стволов создают дополнительные «слепые зоны», в которых линия прямой видимости оказывается заблокирована.

Вследствие этого алгоритм вынужден увеличивать число скан-позиций и, соответственно, число окружностей, чтобы компенсировать недостаток покрытия территории в труднодоступных участках. При этом наблюдается сравнительно более плавный рост длины маршрута по мере наращивания числа окружностей: небольшие отклонения вокруг групп деревьев требуют лишь локального перемещения, а не полного обхода крупных препятствий, как это бывает в городской среде.

Таким образом, плотная растительность приводит к росту вычислительной нагрузки и числа окружностей ($F \rightarrow 17$), но не к столь резкому удлинению маршрута, что особенно важно учитывать при планировании съемки лесных массивов и оптимизации времени работы на местности [22].

Анализ данных показывает, что маршруты в лесной среде в среднем имеют меньшую протяженность, чем в городской, из-за плотности размещения препятствий. Однако увеличение количества точек сканирования приводит к росту времени вычислений.

Сравнительный анализ результатов обеих сред позволяет сделать вывод о значительном влиянии структуры препятствий на эффективность размещения лазерного сканера. В городской среде плотность препятствий увеличивает сложность маршрута и требует более сложной оптимизации. В лесной местности, несмотря на наличие препятствий в виде деревьев и неровностей рельефа, размещение точек сканирования более равномерное и требует меньших вычислительных затрат [23].

Кроме того, было проведено тестирование системы на масштабируемость. При увеличении площади участков наблюдалось экспоненциальное возрастание времени расчетов в городских условиях, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации алгоритмов. В лесной среде данный рост был ме-

нее выражен. Одним из возможных направлений улучшения системы является внедрение адаптивных методов разбиения области и применения более эффективных эвристических подходов к решению ILP-задач [24].

Таким образом, результаты исследования подтверждают эффективность предложенного подхода к оптимизации размещения лазерного сканера с использованием ILP. Однако дальнейшие исследования могут быть направлены на снижение вычислительной сложности алгоритма и адаптацию методики для различных условий эксплуатации.

Заключение

В ходе проведенного исследования была разработана и реализована методика оптимизации размещения точек стояния лазерного сканера, что обеспечивает полное и равномерное покрытие всей территории участка с использованием параметров дальности сканирования.

В рамках исследования был разработан алгоритм, учитывающий ограниченность области сканирования и влияние препятствий, которые могут блокировать прямую видимость между точками измерений установки лазерного сканера для эффективного покрытия исследуемых территорий.

Применение метода целочисленного линейного программирования позволило минимизировать количество точек сканирования при сохранении высокого качества данных. Экспериментальные результаты, полученные для различных типов территорий (городская застройка и лесная местность), подтвердили эффективность предложенного подхода.

Методика, разработанная в рамках данной исследовательской работы, основана на модифицированном алгоритме Кристофидеса для решения задачи TSP, позволила оптимизировать маршрут обхода, минимизировать количество необходимых сканирующих зон и обеспечить максимально возможное покрытие территории, что критически важно для повышения точности 3D-идентификации объектов в пространстве [25].

В дальнейшем планируется расширение исследования с учетом дополнительных факторов, таких как динамические изменения в структуре застройки и природных объектах, а также внедрение адаптивных алгоритмов, учитывающих временные и ресурсные ограничения в реальных условиях.

Благодарности

Исследование проводилось при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № LAB-24.1/2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Christofides, N. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem. Technical Report, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie-Mellon University. – 1976.
2. Шарафутдинова А. А., Брынь М. Я. Опыт применения наземного лазерного сканирования и информационного моделирования для управления инженерными данными в течение жизненного цикла промышленного объекта // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 57–67. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-1-57-67. – EDN UONPQL.
3. Дьяченко Р. А., Борисов С. Н. О возможности использования API геоинформационных систем // Научные чтения профессора Н. Е. Жуковского. Сборник научных статей VIII Международной научно-практической конференции «Научные чтения имени профессора Н. Е. Жуковского». КВБАУЛ им. Героя Советского Союза А. К. Серова, 2018. – С. 299–302. – EDN YPSAUK.
4. Макаров О. О. Анализ метаэвристик для задач многоагентной маршрутизации // Таврический вестник информатики и математики. – 2023. – № 1 (58). – С. 62–87. – EDN CHFQMW.
5. Мартынов А. В., Курейчик В. М. Гибридный алгоритм решения задачи коммивояжера // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 4 (165). – С. 36–44. – EDN TYMNZV.
6. Schneider D., Klein R. Review of scanning station placement strategies in 3D acquisition // Computer Vision and Image Understanding. – 2019. – Vol. 182. – P. 34–50. – DOI 10.1016/j.cviu.2019.03.003.

7. Мухаммад Ш. Х. Геодезическое обеспечение обмерной фиксации объектов культурного наследия на основе применения лазерно-сканирующей съемки : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.35 / Мухаммад Шокер Хуссейн. – СПб., 2022. – 145 с.
8. Конушина Е. Ю., Симашева Д. В. Фотограмметрия, как основополагающая дисциплина современного геодезиста // Перспективные разработки и прорывные технологии в АПК: Сборник материалов национальной научно-практической конференции, Тюмень, 21–23 октября 2020 г. – Тюмень : Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2020. – С. 30–34. – EDN LLOUUI.
9. Красиков А. А. Необходимость интеграции геодезических и BIM-технологий в процессе проектирования зданий // Наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей IX Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 августа 2023 года. – Пенза : Наука и Просвещение, 2023. – С. 185–187. – EDN OQTABM.
10. Литвиненко М. В. Практические аспекты исправления реестровых ошибок при наложении границ нескольких смежных земельных участков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – Т. 62, № 5. – С. 530–535. – DOI 10.30533/0536-101X-2018-62-5-530-535. – EDN YMSADZ.
11. Краснопевцев Б. В. Фотограмметрия. – М. : Репрография МИИГАиК, 2008. – С. 91. – EDN QKNVXH.
12. Гура Д. А., Дубенко Ю. В., Буцацкий П. Ю., Марковский И. Г., Хушт Н. И. Мониторинг сложных объектов инфраструктуры // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. 4. Естественно-математические и технические науки. – 2019. – № 4 (251). – С. 74–80.
13. Аврунев Е. И., Горобцов С. Р. Геодезическое обеспечение кадастровых работ : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – 239 с.
14. Брынь М. Я., Богомолова Н. Н., Журавлев И. Н., Никитчин А. А. Возможности применения лазерного сканирования на стадии изысканий при реконструкции искусственных сооружений // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 1. – С. 43–53. – DOI 10.20295/2223-9987-2020-1-43-53. – EDN IEWCHM.
15. Гура Д. А., Ващенко Д. А., Беспятчук Д. А., Самарин С. В., Пшидаток С. К. Перспективы применения воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки для обеспечения пространственными данными 3D-кадастра // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2023. – № 3. – С. 179–183. – DOI 10.33920/sel-04-2303-07. – EDN QVATCF.
16. Щенявская Л. А., Шалая А. А. Технология объединения пространственных данных, полученных по результатам наземного лазерного сканирования, цифровой аэрофотосъемки и ручного лазерного сканирования // Молодежная наука. Сборник лучших научных работ молодых ученых : материалы LI студенческой научной конференции, Краснодар, 29 февраля 2024 г. – Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, 2024. – С. 509–515. – EDN UCRUHR.
17. Гура Д. А., Дьяченко Р. А., Шалая А. А. Разработка модульной структуры геоинформационной системы пространственного анализа данных // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2024. – Т. 19, № 5 (232). – С. 314–317. – DOI 10.33920/sel-04-2405-07. – EDN NUMDGH.
18. Дьяченко Р. А., Гура Д. А., Осенняя А. В. [и др.] Разработка структуры информационной системы геопро пространственных данных для решения задач территориального планирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2024. – Т. 68, № 4. – С. 87–99. – DOI 10.30533/GiA-2024-013. – EDN YQASPD.
19. Золотухин В. В. Цифровое геодезическое оборудование в археологических исследованиях с применением методов геоинформационных систем // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. История, филология. – 2011. – Т. 10, № 7. – С. 61–66. – EDN OFWUYJ.
20. Волынова М. П. Цифровизация результатов территориального планирования на примере Федеральной государственной информационной системы территориального планирования // Цифровизация землепользования и кадастров: тенденции и перспективы : материалы международной научно-практической конференции 25 сентября 2020 г. – М. : ГУЗ, 2020. – С. 70–74. – EDN RQJJXV.
21. Портнов А. М., Добровольский Д. О. Сравнительная оценка геометрической сложности контуров объектов местности при осуществлении государственного земельного надзора и мониторинга земель на примере объектов капитального строительства // Геодезия и картография. – 2024. – Т. 85, № 3. – С. 50–61. – DOI 10.22389/0016-2024-1005-3-50-61. – EDN HTGACU.

22. Чернов А. В. Исследование вариантов построения 3D-модели объектов недвижимости для целей кадастра // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 192–210. – EDN YAATKP.
23. Богомолова Н. Н. Определение точности геодезических измерений при реконструкции исторических объектов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 693–701. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-693-701. – EDN QLTIEJ.
24. Степанов И. Ю. Использование методов машинного обучения в геоинформационных моделях при решении задач геофизической разведки // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 2. – С. 108–117. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-2-108-117. – EDN BNХСВУ.
25. Гура Д. А. Применение технологий машинного обучения для распознавания крыш объектов недвижимости // Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании : сборник статей Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 01–02 ноября 2023 г. – Брянск : Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского, 2023. – С. 301–309. – EDN OAKNKJ.

Об авторах

Дмитрий Андреевич Гура – кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и геоинженерии Кубанского государственного технологического университета; кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии Кубанского государственного аграрного университета.

Роман Александрович Дьяченко – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации производственных процессов.

Сергей Алексеевич Ярутин – студент.

Александр Самвелович Макарян – кандидат технических наук, доцент кафедры кибербезопасности и защиты информации.

Получено 14.04.2025

© Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, С. А. Ярутин, А. С. Макарян, 2025

Optimizing route planning for efficient territory scanning operations

D. A. Gura^{1,2✉}, R. A. Dyachenko¹, S. A. Yarutin¹, A. S. Makarian¹

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

² Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

e-mail: gda-kuban@mail.ru

Abstract. The authors present a novel methodology for optimal site traversal using a terrestrial laser scanner and combining a modified Christofides algorithm with integer linear programming (ILP). This approach tackles the NP-hard problem similar to a variant of the traveling salesman problem, while incorporating geometric constraints caused by obstacles in the scanned area. The method discretizes the terrain, generates point clouds around obstacle vertices, and constructs a graph of feasible scanning positions. Experimental evaluation on both synthetic and real datasets demonstrates that the proposed algorithm reduces the number of necessary scanning bypasses and total route length by 12-18% compared to traditional heuristic approaches, without compromising full boundary coverage. Although the ILP model's computational complexity increases with the number of obstacles, it provides high accuracy and is well suited for surveying, cadastre, cartography, and engineering diagnostics. The study highlights promising areas for future work, including dynamic route adaptation and the integration of hybrid optimization techniques to enhance scalability and efficiency.

Keywords: cadastre, laser scanning, the Christofides algorithm, route, optimization, NP-hard problem

REFERENCES

1. Christofides, N. (1976). Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem. *Technical Report, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie-Mellon University*. No 388. DOI 10.1007/s43069-021-00101-z.

2. Sharafutdinova, A. A., Bryn, M. Ya. (2021). Experience in using terrestrial laser scanning and information modeling for managing engineering data throughout the life cycle of an industrial facility. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 26, No. 1, pp. 57–67. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-1-57-67 [in Russian].
3. Dyachenko, R. A., Borisov, S. N. (2018). On the possibility of using GIS APIs. *Nauchnyye chteniya professora N.Ye. Zhukovskogo. Sbornik nauchnykh statey VIII Mezhdunarod-noy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnyye chteniya imeni professora N. Ye. Zhukovskogo». KVVAVUL im. Geroya Sovetskogo Soyuza A. K. Serova [Proceedings of the 8th International Scientific-Practical Conference "Scientific Readings Named After Professor N. E. Zhukovsky". KVVUUL named after Hero of the Soviet Union A. K. Serov]*, pp. 299–302 [in Russian].
4. Makarov, O. O. (2023). Analysis of metaheuristics for multi-agent routing problems. *Tavricheskiy vestnik informatiki i matematiki [Tavrichesky Bulletin of Informatics and Mathematics]*, No. 1(58), pp. 62–87 [in Russian].
5. Martynov, A. V., Kureychik, V. M. (2015). A hybrid algorithm for solving the traveling salesman problem. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki. [Izvestiya SFU. Engineering Sciences]*, No. 4(165), pp. 36–44 [in Russian].
6. Schneider, D., Klein, R. (2019). Review of scanning station placement strategies in 3D acquisition. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 182, pp. 34–50. DOI 10.1016/j.cviu.2019.03.003 [in Russian].
7. Muhammad, Sh. Kh. (2022). Geodetic support for surveying documentation of cultural heritage objects based on laser scanning: PhD thesis in Technical Sciences, 25.00.35. Saint Petersburg, 145 p. [in Russian].
8. Konushina, E. Yu., Simasheva, D. V. (2020). Photogrammetry as a fundamental discipline for modern surveyors. *Perspektivnyye razrabotki i proryvnyye tekhnologii v APK: Sbornik materialov natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tyumen', 21–23 oktyabrya 2020 goda [Prospective Developments and Breakthrough Technologies in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the National Scientific-Practical Conference, Tyumen, October 21–23, 2020]*. Tyumen: Northern Trans-Ural State Agrarian University, pp. 30–34 [in Russian].
9. Krasikov, A. A. (2023). The necessity of integrating geodetic and BIM technologies in the building design process. *NAUKA i OBRAZOVANIYE: Aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Penza, 25 avgusta 2023 goda. – Penza: Nauka i Prosveshcheniye (IP Gulyayev G.YU.), [Science and Education: Topical Issues, Achievements and Innovations. Proceedings of the 9th International Scientific-Practical Conference, Penza, August 25, 2023]*. Penza: Nauka i Prosveshchenie, pp. 185–187 [in Russian].
10. Litvinenko, M. V. (2018). Practical aspects of correcting cadastral errors when overlapping the boundaries of adjacent land plots. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'yemka [Izvestiya of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography]*, Vol. 62, No. 5, pp. 530–535. DOI 10.30533/0536-101X-2018-62-5-530-535.
11. Krasnopevcev, B. V. (2008). Photogrammetry. *Moscow: Reprography Publishing House, MIIAGiK*, p. 91 [in Russian].
12. Gura, D. A., Dubenko, Yu. V., Buchatsky, P. Yu., Markovsky, I. G., Khusht, N. I. (2019). Monitoring of complex infrastructure facilities. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Yestestvenno-matematicheskiye i tekhnicheskiye nauki [Bulletin of Adyghe State University. Series 4: Natural-Mathematical and Technical Sciences]*, No. 4(251), pp. 74–80 [in Russian].
13. Avrunyev, E. I., Gorobtsov, S. R. (2024). Geodetic Support for Cadastral Works: Monograph. *Novosibirsk: SGUGiT*, 239 p. [in Russian].
14. Bryn, M. Ya., Bogomolova, N. N., Zhuravlev, I. N., Nikitchin, A. A. (2020). Possibilities of using laser scanning during the survey stage in the reconstruction of artificial structures. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Scientific Research Results]*, No. 1, pp. 43–53. DOI 10.20295/2223-9987-2020-1-43-53 [in Russian].
15. Gura, D. A., Vashchenko, D. A., Bespyatchuk, D. A., Samarin, S. V., Pshidatok, S. K. (2023). Prospects for the use of airborne laser scanning and aerial photography to provide spatial data for 3D cadasters. *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel' [Land Management, Cadastre and Land Monitoring]*, No. 3, pp. 179–183 [in Russian].
16. Shchennyavskaya, L. A., Shalaya, A. A. (2024). Technology for merging spatial data obtained by terrestrial laser scanning, digital aerial photography, and handheld laser scanning. *Molodezhnaya*

nauka. Sbornik luchshikh nauchnykh rabot molodykh uchenykh: Materialy LI studentcheskoy nauchnoy konferentsii, Krasnodar, 29 fevralya 2024 goda. [Youth Science. Best Scientific Works of Young Scientists: Proceedings of the LI Student Scientific Conference, Krasnodar, February 29, 2024]. Krasnodar: Kuban State Technological University, pp. 509–515. EDN UCRUHR [in Russian].

17. Gura, D. A., Dyachenko, R. A., Shalaya, A. A. (2024). Development of a modular structure of a geoinformation system for spatial data analysis. *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel' [Land Management, Cadastre and Land Monitoring]*, Vol. 19, No. 5 (232), pp. 314–317. DOI 10.33920/sel-04-2405-07 [in Russian].

18. Dyachenko, R. A., Gura, D. A., Osenyaya, A. V., et al. (2024). Development of the structure of a geospatial information system for solving territorial planning tasks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"yemka [Izvestiya of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography]*, Vol. 68, No. 4, pp. 87–99. DOI 10.30533/GiA-2024-013 [in Russian].

19. Zolotukhin, V. V. (2011). Digital geodetic equipment in archaeological research using GIS methods. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Istoriya, filologiya [Vestnik of Novosibirsk State University. Series: History, Philology]*, Vol. 10, No. 7, pp. 61–66 [in Russian].

20. Volynova, M. P. (2020). Digitalization of territorial planning results based on the Federal State Information System for Territorial Planning. *Tsifrovizatsiya zemlepol'zovaniya i kadastr: tendentsii i perspektivy: Materialy mezh-dunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 25 sentyabrya 2020 goda [Digitalization of Land Use and Cadastre: Trends and Prospects. Proceedings of the International Scientific-Practical Conference, September 25, 2020].* Moscow: GUZ, pp. 70–74 [in Russian].

21. Portnov, A. M., Dobrovolsky, D. O. (2024). Comparative assessment of the geometric complexity of terrain object contours during state land supervision and land monitoring based on capital construction sites. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, Vol. 85, No. 3, pp. 50–61. DOI 10.22389/0016-2024-1005-3-50-61 [in Russian].

22. Chernov, A. V. (2018). Research on the construction of 3D models of real estate objects for cadastral purposes *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 23, No. 3, pp. 192–210 [in Russian].

23. Bogomolova, N. N. (2022). Determining the accuracy of geodetic measurements in the reconstruction of historical objects. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Izvestiya of Petersburg State Transport University]*, Vol. 19, No. 4, pp. 693–701. DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-693-701 [in Russian].

24. Stepanov, I. Yu. (2024). Application of machine learning methods in geoinformation models for geophysical exploration tasks. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2024, Vol. 29, No. 2, pp. 108–117. DOI 10.33764/2411-1759-2024-2-108-117 [in Russian].

25. Gura, D. A. (2023). Application of machine learning technologies for roof detection of real estate objects. *Tsifrovyye, komp'yuternyye i informatsionnyye tekhnologii v nauke i obrazovanii: Sbornik statey Mezhhregional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, Bryansk, 01–02 noyabrya 2023 goda. [Digital, Computer and Information Technologies in Science and Education: Proceedings of the Interregional Scientific-Practical Conference with International Participation, Bryansk, November 1–2, 2023].* Bryansk: Bryansk State University named after Academician I. G. Petrovsky, pp. 301–309 [in Russian].

Author details

Dmitry A. Gura – Ph. D, Associate Professor of the Department of Cadastre and Geo-Engineering, Kuban State Technological University; Associate Professor of the Department of Geodesy, Kuban State Agrarian University.

Roman A. Dyachenko – D. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Automation of Production Processes.

Sergey A. Yarutin – Undergraduate.

Alexander S. Makaryan – Ph. D., Associate Professor of the Department of Cyber Security and Information Protection.

Received 23.04.2025

© D. A. Gura, R. A. Dyachenko, S. A. Yarutin, A. S. Makarian, 2025