

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ВОДНЫХ КАНАЛОВ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛИДАРА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-2-4-11

Manuscript received 10 December 2025;
Accepted 175 February 2026

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 "Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга".

Ненашев Вадим Александрович,
ГУАП, Санкт-Петербург, Россия,
nenashev@guap.ru

Ненашев Сергей Александрович,
ГУАП, Санкт-Петербург, Россия,
nenashev_sergey178@mail.ru

Ключевые слова: воздушное лазерное сканирование, цифровые модели рельефа, обнаружение водных каналов, автономная навигация, техническое зрение

В задачах автономной навигации малых летательных аппаратов и наземных робототехнических платформ требуется формирование семантической модели местности, включающей выделение препятствий и зон риска. В природных и сельскохозяйственных ландшафтах водные каналы и водотоки являются критически важными объектами, поскольку задают границы проходимости, ограничения при планировании маршрутов и условия выбора площадок аварийной посадки. Традиционные подходы, основанные на потоковых алгоритмах по цифровым моделям рельефа, демонстрируют снижение устойчивости в условиях равнинного рельефа и слабых высотных градиентов, а также при частичном экранировании каналов растительностью. Воздушное лазерное сканирование обеспечивает получение плотных облаков точек и позволяет наблюдать элементы микрорельефа, однако существующие методы фильтрации "земля/не земля" и выделения русловых форм часто требуют настройки параметров под конкретный ландшафт и не гарантируют стабильность результата. Цель исследования – разработать методику автоматизированного обнаружения водных каналов по данным воздушного лидара, обеспечивающую формирование навигационно значимых параметров на цифровой карте местности, а именно осевой линии канала и границ берегов, необходимых для последующего внедрения в систему автономной навигации. В работе применяется робастное выделение земной поверхности методом RANSAC с локально-адаптивной статистической калибровкой порогов, восстановление цифровой модели рельефа с использованием сглаживания/интерполяции методом Безье, вычисление дифференциально-геометрических характеристик поверхности на основе первой и второй фундаментальных форм и определение главных кривизин, классификацию типов рельефа с выделением долинообразных структур, геометрическую верификацию гипотез каналов по поперечным профилям (ширина, глубина, площадь сечения). В данной работе разработана методика выделения водных каналов, демонстрирующая высокую точность классификации устойчивую к сложным условиям равнинной местности и плотной растительности. Для методики была разработана программно-алгоритмическая система на языке Python и выполнено тестирование на полевых данных воздушного лазерного сканирования, полученных бортовым лидаром DJI Zenmuse L1 на платформе DJI Matrice 300 RTK. Показана работоспособность методики на участках с различным типом растительности и характером русловых форм; получены осевые линии каналов и границы берегов/бровок. Предложенная методика обеспечивает автоматическое формирование на цифровой карте местности осевых линий, границ берегов/бровок. Эти данные позволяют в системах автономной навигации формировать карты зон риска при планировании безопасных траекторий (в том числе при выборе зон посадки/аварийной посадки МЛА). Методика позволит регулярно и автоматически обновлять навигационные карты по данным воздушного лидара.

Информация об авторах:

Ненашев Вадим Александрович, д.т.н., доцент, заведующий лабораторией машинного обучения проектно-технологического офиса инженерной школы, доцент кафедры "Конструирования и технологий электронных и лазерных средств" ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Ненашев Сергей Александрович, заведующий лабораторией промышленной электроники проектно-технологического офиса инженерной школы, младший научный сотрудник кафедры "Конструирования и технологий электронных и лазерных средств" ГУАП, аспирант ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Ненашев В.А., Ненашев С.А. Автоматическое обнаружение водных каналов по данным воздушного лидара на основе методов технического зрения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №2. С. 4-11.

For citation:

V.A. Nenashev, S.A. Nenashev, "Automatic detection of water channels based on aerial lidar data based on technical vision methods," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 2, pp. 4-11. (in Russian)

Введение

Автономная навигация малых летательных аппаратов (МЛА) и наземных робототехнических комплексов вне подготовленной инфраструктуры требует построения достоверной семантической модели местности: выделения препятствий, границ безопасной зоны движения, потенциально опасных участков (размывы, овраги, канавы, водные преграды), а также устойчивых ориентиров для привязки и коррекции траектории [1]. В природных и сельскохозяйственных ландшафтах одной из наиболее критичных категорий объектов являются водные каналы и водотоки (естественные и искусственные). Они одновременно выступают физическими барьерами и зонами риска для наземных платформ, ограничениями и запретными зонами при выборе аварийной площадки посадки МЛА, структурными ориентирами для построения карты и сопоставления с априорной геоинформацией [2].

Классические методы выделения дренажной сети и каналов обычно сформированы на анализе цифровой модели рельефа (ЦМР) и потоковых алгоритмах (направление/накопление стока), предполагающих движение воды по направлению наибольшего уклона [2]. В навигационных системах эти подходы часто оказываются недостаточно устойчивыми по двум причинам. Во-первых, на равнинных территориях с малыми высотными градиентами ошибки ЦМР, шумы интерполяции и антропогенные микронеровности приводят к ложным водосборным структурам и разрывам сети. Во-вторых, для автономных систем важно обнаруживать не только «гидрологическую» сеть, но и геометрически выраженную форму препятствия (берега, бровки, тальвег, ширина/глубина), поскольку именно эти параметры используются для оценки проходимости, планирования траектории и назначения зон безопасности.

Применение метода воздушного лазерного сканирования (ВЛС) бортовым лидаром обеспечивает формирование плотных трехмерных облаков точек и частичное сканирование сквозь растительный полог. При плотностях порядка 8-15 точек/м² становятся наблюдаемыми элементы микрорельефа, включая узкие канавы и бровки каналов. Однако практическое применение лидарных данных в автономной навигации осложняется необходимостью надежно отделять отражения от грунта от растительности и других надземных объектов, сохраняя при этом микрорельеф, критичный для распознавания каналов [3, 4]. Типовые методы фильтром «земля»/«не-земля» требуют настройки под конкретную сцену и часто либо «срезают» слабовыраженные русловые формы, либо оставляют артефакты низкой растительности, порождающие ложные долины. Для автономной навигации это приводит к ошибкам карты: ложным запретам движения либо, наоборот, к недетектированным препятствиям.

Целью настоящей работы является разработка методики автоматизированного обнаружения водных каналов на цифровой карте, формируемой по данным воздушного лазерного сканирования бортовым лидаром, установленным на МЛА и работающим на высотах порядка 100-400 м. Методика ориентирована на формирование осевой линии канала, границ берегов/бровок, пригодных для дальнейшего внедрения интеграции в системы автономной навигации.

Анализ методов классификации рельефа и выделения водных объектов в навигационных задачах

При анализе методов выделения водных границ и каналов можно условно разделить на две группы: прямые (обнаружение водной поверхности) и косвенные (обнаружение русловой формы как геометрическую форму на ЦМР, независимо от наличия воды).

1. Потоковые алгоритмы на ЦМР ($D8/D\infty$, накопление стока). Класс методов, основанных на моделировании направления и накопления стока на ЦМР (например, схемы $D8$ и $D\infty$), широко применяется для автоматического построения дренажной сети и определения тальвегов. Основным преимуществом потоковых алгоритмов является интерпретируемость результата и возможность получения связной сети линий стока. Вместе с тем для навигационных систем ограничением является высокая чувствительность к качеству исходной ЦМР и к малым высотным градиентам, характерным для равнинных территорий. В таких условиях шумы интерполяции и артефакты восстановления поверхности могут приводить к ложным направлениям стока, разрывам сети и смещению извлекаемых осевых линий относительно реальных бровок и берегов. В результате формально корректная с точки зрения потоковой модели сеть не всегда обеспечивает точность обнаружения препятствий.

2. Методы классификации форм рельефа по геоморфометрическим признакам. Другой распространённый метод связан с использованием геоморфометрических производных ЦМР: уклона, экспозиции, профильной и плановой кривизн, показателей вогнутости/выпуклости, шероховатости и локальной вариативности высот. Эти признаки удобны для построения карт стоимости движения (*cost map*), где каждому элементу поверхности сопоставляется «штраф» за прохождение, и для первичной сегментации форм рельефа. Однако при вычислении на зашумлённой ЦМР геоморфометрические производные могут демонстрировать повышенную вариативность на масштабе дискретизации, что приводит к пространственной фрагментации классов и нестабильности границ между «проходимыми» и «непроходимыми» областями. Для автономной навигации данное свойство нежелательно, поскольку вызывает локальные ложные препятствия и неустойчивое поведение планировщика траектории при последовательных обновлениях карты.

3. Методы дифференциально-геометрического анализа по главным кривизнам. Перспективным направлением для выделения русловых форм является анализ локальной формы поверхности на основе коэффициентов главных кривизн, вычисляемых по аналитическому или локально-аппроксимированному представлению $z(x,y)$.

Преимуществом данного подхода является ориентационная инвариантность, где долинообразные структуры выявляются независимо от направления их простираения в плане. Для каналов в равнинной местности типична геометрия, при которой вдоль оси канала поверхность близка к планарной, а в поперечном направлении выражена вогнутость. Для задач навигации наличие устойчивой поперечной вогнутости является информативным признаком потенциального барьера и границы проходимости. В отличие от потоковых методов, данный подход не опирается на глобальное направление

уклона и сохраняет работоспособность при слабовыраженных градиентах, при условии робастного восстановления ЦМР и контроля сглаживания.

4. Семантической сегментации водных объектов и прибрежных зон методами машинного обучения по многоканальным признакам. В данном классе методов задача формулируется как классификация пикселей в классы «вода», «берег/прибрежная зона», «суша», «растительность» с использованием признаков, полученных из лидара и оптической камеры. В качестве входных данных применяются многоканальные карты (например, высота ЦМР, уклон, кривизны, шероховатость, плотность точек, интенсивность, текстурные признаки оптического изображения), а решение строится на основе обучаемых моделей (градиентный бустинг, случайный лес, либо сверточные сети для сегментации). Результатом является маска водных объектов и прибрежных зон, пригодная для построения навигационных параметров для последующего извлечения границ и осевых линий водного канала.

Таким образом, методы обнаружения воды по оптическим признакам не всегда обеспечивают непрерывное и однозначное выделение водной поверхности, а методы, опирающиеся только на потоковые модели или отдельные геоморфометрические производные, не гарантируют корректной локализации берегов/бровок в условиях равнинного рельефа и шумов ЦМР. Кроме того, обучаемые методы семантической сегментации требуют репрезентативной обучающей выборки и контроля при применении новые сцены, что затрудняет их применение как универсального решения в составе бортовых систем.

В связи с указанными особенностями представляется целесообразным разработать собственную методику автоматического обнаружения речных каналов по облаку точек, сформированному бортовым лидаром.

3. Методика обнаружения речных каналов на облаке данных, сформированных бортовым лидаром

Для достижения поставленной цели была предложена методика автоматического обнаружения речных каналов на облаке точек, описанная в схеме на рисунке 1.

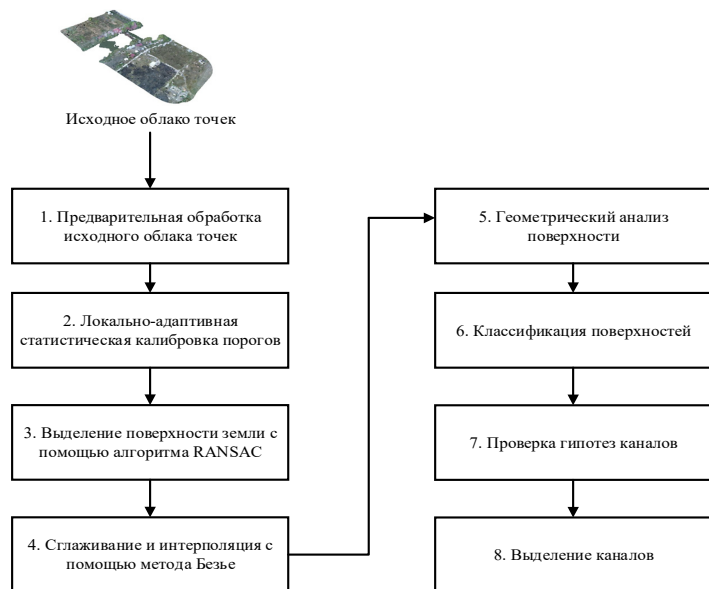


Рис. 1. Схема, описывающая методику обнаружения речных каналов на облаке точек

Представленная на схеме (рис. 1) методика состоит из последовательных 8 шагов:

Шаг 1. Предварительная обработка исходного облака точек.

Шаг 2. Локально-адаптивная статистическая калибровка порогов.

Шаг 3. Выделение поверхности земли с помощью алгоритма RANSAC.

Шаг 4. Сглаживание и интерполяция с помощью метода Безье.

Шаг 5. Геометрический анализ поверхности.

Шаг 6. Классификация поверхностей.

Шаг 7. Проверка гипотез каналов.

Шаг 8. Выделение каналов.

Далее рассмотрим каждый шаг подробнее.

Шаг 1. Предварительная обработка исходного облака точек

Предварительная обработка лидарных данных начинается с работы над исходным облаком точек (рис. 2), где каждая точка описывается координатами (x,y,z) и интенсивностью I . На данном шаге удаляются выбросы с помощью статистических методов, таких как медианное абсолютное отклонение и межквартильный размах, чтобы повысить устойчивость к шуму [5, 6].

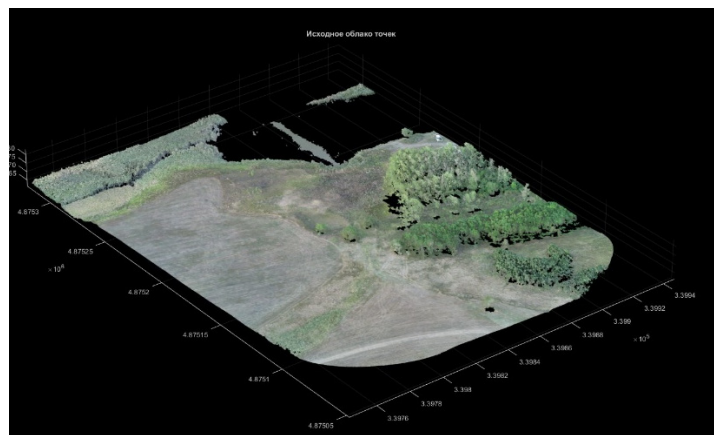


Рис. 2. Исходное облако точек с водным ресурсом

К тому же, на данном шаге нормализуется интенсивность с учетом расстояния до объекта, для дальнейшей фильтрации без искажений от вариаций сигнала.

Шаг 2. Локально-адаптивная статистическая калибровка порогов

Вводится блок локально-адаптивной статистической калибровки порогов перед RANSAC, поскольку фиксированный порог невязки δ ухудшает переносимость между сценами с разной плотностью точек и уровнем растительности. Блок выводит адаптивный $\delta = c \cdot \text{MAD}(\epsilon)$ из медианной абсолютной девиации невязек по предварительной квадратичной аппроксимации в локальном окне каждой ячейки сетки, где $c \approx 2.5$ обеспечивает согласование с нормальным распределением. Полученный порог стабилизирует выделение земных точек и устраняет ручную настройку, повышая воспроизводимость геометрического анализа. Локальные δ передаются в шаг 3, стабилизируя выделение земли и повышая переносимость.

Шаг 3. Выделение поверхности земли с помощью алгоритма RANSAC.

После шага 2 выделяется земная поверхность с помощью алгоритма RANSAC для отделения земли от растительности [7-10]. На основе адаптивных порогов δ в каждой ячейке регулярной сетки размером 2×2 метра, независимо строят локальную квадратичную полиномиальную модель рельефа:

$$z(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6xy \quad (1)$$

Коэффициенты $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$ определяются методом наименьших квадратов для случайно выбранного подмножества точек в окрестности радиуса r (2-5 метров). Точка классифицируется как принадлежащая земной поверхности, при одновременном выполнении трех условий:

- 1) остаточное расстояние до модели не превышает пороговое значение δ (0.1-0.5 м, отсекает кусты);
- 2) локальный наклон поверхности $|\nabla z| < \tan(\alpha_{\max})$, около 5-15° (исключает крутые склоны);
- 3) доля инлайеров в окрестности превышает минимальное значение ρ_{\min} .

Для обеспечения непрерывности поверхности используются ограничения на соседние участки. Разность высот и углы между нормальными поверхностями в перекрывающихся областях не должны превышать заданных пороговых значений. Алгоритм выполняется итеративно с постепенным ослаблением критериев от строгих к более мягким для покрытия сложных участков рельефа [11].

Шаг 4. Сглаживание поверхности с помощью метода Безье

Сглаживание поверхности итеративным методом Безье применяется для заполнения пробелов после метода RANSAC. Поверхность Безье определяется набором контрольных точек и обеспечивает гладкое восстановление рельефа с контролируемой степенью сглаживания.

Параметры интерполяции адаптируются к локальным условиям рельефа. Расстояние между контрольными точками составляет 1,5 м при коэффициенте гладкости 5, что обеспечивает сохранение узких каналов. В первых 3-4 итерациях пороговое расстояние для включения точек составляет 30 см, затем увеличивается до 40 см для захвата оставшихся точек поверхности [12-14].

Шаг 5. Геометрический анализ поверхности.

Геометрический анализ поверхности выполняется после получения цифровой модели рельефа (ЦМР) из предыдущих шагов и представляет собой вычисление дифференциальных характеристик поверхности для каждой ячейки сетки $s \times s$. Этот анализ опирается на две фундаментальные формы поверхности, определённые в классической дифференциальной геометрии, чтобы количественно описать локальную форму рельефа – его метрику и кривизну – без предположений о направлении уклона или ориентации каналов.

Сначала вычисляют первую фундаментальную форму, которая задаёт метрические свойства поверхности в параметрическом виде

$$I = E dx^2 + 2F dx dy + G dy^2 \quad (2)$$

Коэффициенты этой формы получаются из частных производных модели $z(x, y)$, полученной на шаге RANSAC:

$$E = 1 + (\partial z / \partial x)^2 = 1 + a_2^2 \quad (3)$$

где $\partial z / \partial x = a_2 + 2a_4x + a_6y$, но для упрощения используют приближения на основе коэффициентов полинома $E = 1 + a_2^2$ аналогично $F = (\partial z / \partial x)(\partial z / \partial y) = a_2a_3$ и $G = 1 + (\partial z / \partial y)^2 = 1 + a_3^2$.

Эта форма описывает, как расстояния и углы искажаются на поверхности, позволяя строить матрицу A для дальнейших расчётов.

Затем определяют вторую фундаментальную форму

$$II = e dx^2 + 2f dx dy + g dy^2 \quad (4)$$

которая характеризует кривизну путём сравнения поверхности с касательной плоскостью. Коэффициенты вычисляются как

$$e = \frac{2a_4}{\sqrt{(1+a_2^2+a_3^2)}} \quad (5)$$

для кривизны по x ,

$$f = \frac{a_6}{\sqrt{(1+a_2^2+a_3^2)}} \quad (6)$$

для смешанной компоненты и

$$g = \frac{2a_5}{\sqrt{(1+a_2^2+a_3^2)}} \quad (7)$$

для кривизны по y , где знаменатель нормализует вторые производные $\partial^2 z / \partial x^2 = 2a_4$ и т.д., учитывая наклон поверхности через градиент $p^2 + q^2$ с $p = \partial z / \partial x \approx a_2$, $q = \partial z / \partial y \approx a_3$.

На основе этих форм формируют матрицы

$$A = [[E, F], [F, G]] \text{ и } B = [[e, f], [f, g]], \quad (8)$$

после чего главные кривизны k_1 и k_2 находят как собственные значения обобщённой задачи на собственные векторы $(B - kA)V = 0$, решая характеристическое уравнение $\det(B - kA) = 0$. Это даёт две ортогональные кривизны: максимальную и минимальную в главных направлениях. Дополнительно рассчитывают гауссову кривизну $K = k_1 k_2$ (положительная для эллиптических точек, отрицательная для гиперболических долин) и среднюю кривизну $H = (k_1 + k_2)/2$ (положительная для выпуклостей, отрицательная для вогнутостей).

Все вычисления проводят локально в каждой ячейке сетки, используя коэффициенты полинома $z(x, y)$ как аналитические производные, что обеспечивает эффективность на больших объёмах лидарных данных (8-15 точек/м²). Такой подход позволяет независимо от глобального уклона выявлять долинообразные структуры, где типичны $k_1 \approx 0$ (планарность вдоль канала) и $k_2 < 0$ (вогнутость поперёк), что критично для равнинных лесостепных зон [15].

Шаг 6. Классификация типов поверхности

Классификация типов поверхности опирается на значения главных кривизн, где долинообразные участки определяют

по условию $k_1 \approx 0$ и $k_2 < 0$, указывающему на цилиндрическую вогнутость в одном направлении. Дополнительно вычисляются гауссова $K = k_1 k_2$ и средняя $H = (k_1 + k_2)/2$ кривизны для уточнения классификации [16-18].

Классификация всех типов поверхности можно описать следующим образом:

- плоская поверхность (планарная): $k_1 \approx 0, k_2 \approx 0, K \approx 0, H \approx 0$. Характерно для равнин, болот, аэродромов;
- холм/вершина (эллиптическая выпуклость): $k_1 > 0, k_2 > 0, K > 0, H > 0$. Положительные кривизны в обоих направлениях, как купол;
- гребень/седло (гиперболическая выпуклость): $k_1 > 0, k_2 < 0, |k_1| \approx |k_2|, K < 0, H \approx 0$. Выпуклость вдоль гребня, вогнутость поперек;
- склон (цилиндрическая): одна кривизна ≈ 0 , другая малая. Промежуточный класс между плоскостью и гребнем;
- долина/желоб (гиперболическая вогнутость): $k_1 \approx 0, k_2 < 0, K < 0, H < 0$;
- впадина/кратер (эллиптическая вогнутость): $k_1 < 0, k_2 < 0, K > 0, H < 0$.

Шаг 7. Проверка гипотез каналов

Потенциальные местоположения каналов определяются случайным выбором из ячеек, классифицированных как "долина". Для каждой гипотезы строится поперечное сечение в направлении максимальной кривизны и анализируется его геометрия:

1. Определяется точка минимальной высоты (талвег) в сечении;
2. Находятся максимальные отметки по обе стороны от тальвега;
3. Вычисляется глубина канала d как разность между минимальной максимальной отметкой и высотой тальвега.
4. Определяется ширина канала w по соответствующему местоположению на противоположной стороне гипотеза принимается как действительный канал при выполнении критериев:

- отношение ширины к глубине

$$w/d < 40 \text{ м/м} \quad (9)$$

- глубина канала

$$d > 0,3 \text{ м} \quad (10)$$

- площадь сечения

$$A = wd > 5,2 \text{ м}^2 \quad (11)$$

Шаг 8. Выделение канала

От каждой подтвержденной точки канала выполняется двустороннее отслеживание в направлении минимальной кривизны. Направление отслеживания перпендикулярно к поперечному сечению и определяется собственным вектором, соответствующим минимальной кривизне [19, 20].

На каждом шаге отслеживания строится новое поперечное сечение и проверяются критерии канала. Процесс продолжается до нарушения геометрических критериев канала или достижения границ данных. Обнаруженные сегменты каналов исключаются из дальнейшего поиска гипотез.

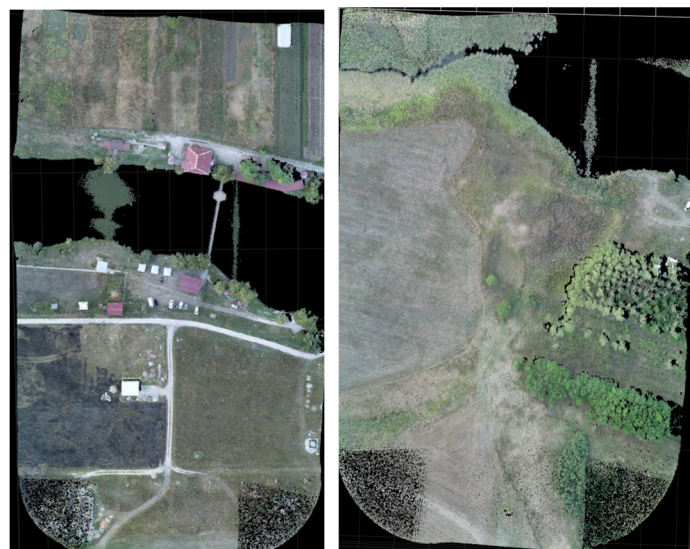
Таким образом, последовательность обработки от исходного облака точек до построения сети речных каналов завершает разработанную методику. Для подтверждения ее эффективности на практике и оценки устойчивости к реальным условиям съемки проведено тестирование на полевых данных, собранных бортовым лидаром.

Тестирование предложенной методики на «полевых» данных

Для тестирования предложенной методики автоматического обнаружения водных каналов по данным воздушного лазерного сканирования создана программно-алгоритмическая система на языке Python. Входными данными являлось трехмерное облако точек (x, y, z) с атрибутом интенсивности I , полученное при съемке бортовым лидаром DJI Zenmuse L1, установленным на беспилотной платформе DJI Matrice 300 RTK.

Тестирование методики проведено на двух тестовых участках, различающихся характером рельефа и типом растительного покрова. Участок 1 (рис. 3а) включает искусственные каналы с выраженной геометрией русла при умеренной растительности. Участок 2 (рис. 3б) характеризуется природными водотоками, частично экранированными камышовой растительностью, что усложняет выделение русловых форм.

Следует отметить, что водная поверхность в лидарных данных часто сопровождается отсутствием устойчивых возвышений и локальными «провалами» по дальности вследствие зеркального отражения и переотражений лазерного излучения, на цифровой карте местности такие области отображаются темным цветом (рис. 3) [21-23].



а) первый участок

б) второй участок

Рис. 3. Исходное облако точек

По результатам обработки для участка с водной поверхностью оценен уровень воды, который составил 569,13 м над уровнем моря. Выделенная водной поверхности составила 18,2% площади исследуемой территории (рис. 4а).

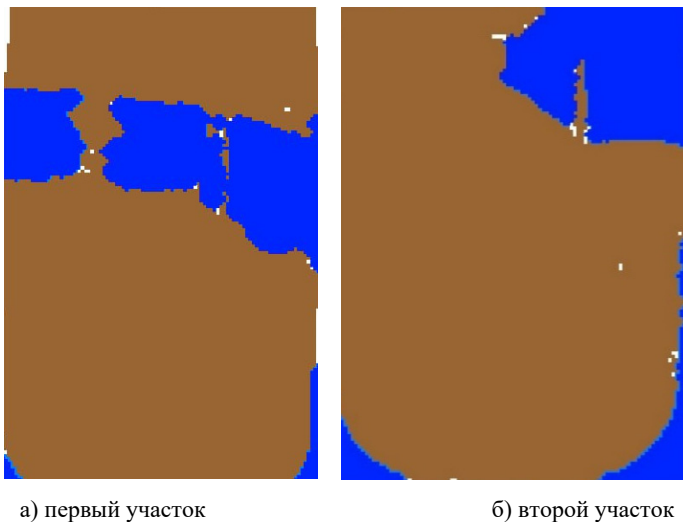


Рис. 4. Обнаружение водной поверхности в облаке точек

Для выделенного водного объекта выполнен последующий анализ русловой формы с оценкой береговых линий и параметров канала. Длина канала по центральной линии составила 784,5 м, средняя ширина – 140,5 м.

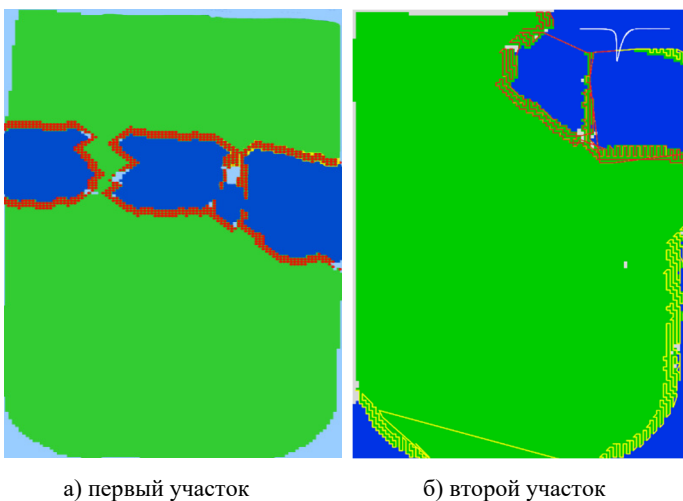


Рис. 5. Обнаружение речного канала

На рисунке 5 представлена цифровая модель рельефа, где границы канала показаны красным цветом, водная поверхность – синим, неопределенный класс – белым. Дополнительно исследовано влияние параметров сглаживания/интерполяции методом Безье на качество восстановления микрорельефа. При коэффициенте гладкости 2 и расстоянии между контрольными точками 1,5 м поверхность сохраняет мелко-масштабные детали, однако наблюдаются артефакты, обусловленные остаточными отражениями от низкой растительности.

Увеличение коэффициента гладкости до 10 приводит к эффективному подавлению шумов, но может сопровождаться потерей узких каналов. В качестве компромиссных, обеспечивающих устойчивое восстановление рельефа при сохранении каналов шириной более 3-4 м, выбраны параметры: расстояние между контрольными точками 1,5 м, коэффициент гладкости 5.

Заключение

Предложенная методика автоматического обнаружения водных каналов по данным воздушного лидара предназначена для формирования на цифровой карте местности осевой линии канала и границ берегов. Методика показала преимущество в условиях равнинного рельефа и плотной растительности, где традиционные потоковые алгоритмы по ЦМР и методы с фиксированными порогами фильтрации демонстрируют недостаточную устойчивость.

Научная новизна работы для задач автономной навигации состоит в том, что локализация каналов выполняется как выявление геометрической формы препятствия на основе дифференциально-геометрических характеристик поверхности (главных кривизн и фундаментальных форм), а достоверность результатов обеспечивается проверкой гипотез по интерпретируемым геометрическим критериям (ширина, глубина и площадь поперечного сечения). Методика позволяет преобразовывать лидарные данные в навигационные параметры, а именно границы препятствий, осевые линии и параметры, необходимые для оценки проходимости и планирования траектории.

Практическая значимость методики заключается в возможности автоматического обновления цифровой карты местности, что повышает безопасность автономных миссий: обеспечивает корректное планирование маршрутов вблизи каналов, исключение потенциально опасных зон посадки над водными преградами и мониторинг изменений русловых форм.

Проведенное тестирование на «полевых» данных подтвердили применимость методики для построения указанных навигационных объектов и ее устойчивость при изменении растительного покрова и параметров микрорельефа.

Литература

1. Ненашев В.А., Бестугин А.Р., Ненашев С.А. Киришина И.А., Куркова О.П. Контроль наземных объектов на основе нейросетевого распознавания авиационных системах технического зрения // Датчики и системы №2 (274) 2024 С. 57-61 <https://elibrary.ru/item.asp?id=67853940>.
2. Валиев В.С., Иванов Д.В. Градиентный алгоритм семантической сегментации изображений земной поверхности и его использование для выделения границ водных объектов // Российский журнал прикладной экологии. 2025. № 1. С. 19-26.
3. Li B. On enhancing ground surface detection from sparse lidar point cloud // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2019. С. 4524-4529.
4. Новиков В.В. Опыт применения воздушного лазерного сканирования на базе БПЛА для исследования средневековых памятников IX - XII вв. На территории Европейской части России // Труды VI (XXII) Всероссийского археологического съезда в Самаре: Труды съезда. В 3-х томах, Самара, 01-02 октября 2020 года. Том III. Самара: Самарский государственный социально-педагогический университет, 2020. С. 177-179.
5. Цай С.С. Использование материалов лидарной съемки участков лесного фонда, полученных с беспилотных летательных аппаратов, для определения углов наклона местности // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024. № 2 (282). С. 30-37.
6. Михеев А.В. Современная технология очистки закрытых дренажных систем // Вестник аграрной науки Дона. 2014. Т. 2. № 26. С. 41-47.

7. Селезнева Е.В. Применение лазерного сканирования в геоморфологических исследованиях // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2013. № 2. С. 47-53.
8. Nenashev V.A., Nenashev S.A. Search and Study of Marked Code Structures for a Spatially Distributed System of Small-Sized Airborne Radars. *Sensors* 2023, 23, 6835. <https://doi.org/10.3390/s23156835>.
9. Петрушин А.Ф. и др. Определение местоположения закрытого дренажа с помощью нейросети по данным дистанционного зондирования // Рисоводство. 2024. Т. 23. № 1 (62). С. 88-93.
10. Ненашев В.А. и др. Формирование трехмерных моделей местности на основе лидарной съемки для выявления структурных изменений земной поверхности // Труды МАИ. 2023. № 131.
11. Выстрчил М.Г. и др. Алгоритм выделения точек земной поверхности из данных воздушного лазерного сканирования // Геодезия и картография. 2024. № 2. С. 2.
12. Сай С.В., Зинкевич А.В. Метод семантической сегментации данных воздушного лазерного сканирования водоохранных зон // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25. № 1. С. 68-77.
13. Хмельнов А.Е., Гаченко А.С. Источники информации о подводном, прибрежном и наземном рельефе и их применение для построения совмещенных моделей рельефа // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 5. С. 55-68.
14. Хмельнов А.Е., Гаченко А.С. Возможные источники информации о подводном и прибрежном рельефах и построение комплексной модели на основе этих данных // Региональные проблемы дистанционного зондирования земли. 2022. С. 163-166.
15. Сулейменов Б.У., Танирберген С.И. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в точном земледелии: обзор // Почвоведение и агрохимия. 2018. № 2. С. 85-100.
16. Али Б., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. № 4 (119). С. 87-105.
17. Юдин Д.А., Кольцов К.В. Навигация с применением RANSAC фильтрации точечных особенностей // Труды конференции "Графикон-2013". М.: МГУ, 2013. С. 271-274.
18. Ненашев В.А., Рыжов К.Ю., Ненашев С.А. и др. Разработка и исследование интеллектуальной пространственно-распределенной многосенсорной системы мониторинга земной и морской поверхности, реализуемого средствами малой корабельной авиации // Тр. Крыловского государственного научного центра. 2023. №1. С. 45-56.
19. Медведев А. А. и др. Мультивременной анализ состояния акватории и прибрежной зоны озера севан на основе высокодетальных пространственных данных // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование. 2019. С. 467-471.
20. Ефимов А.И., Колчаев Д.А., Новиков А.И. Итерационный алгоритм совмещения трехмерных облаков точек // Методы и средства обработки и хранения информации. Рязань, РИЦ РГРТУ. 2018. С. 139-142.
21. Антохин Е.А., Залищук А.А., Ненашев В.А., Ненашев С.А. Сравнительный анализ нейросетевых моделей для классификации зон земной поверхности по оптическим изображениям // Радиотехника. Т. 88. № 8. С. 35-44. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202408-04>.
22. Морев К.И. Метод сопоставления облаков особых точек изображений для задач трекинга, основанный на интуиционистской нечеткой логике // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 293-306.
23. Мсаллам М., Сырякин В.И. Методика регистрации 3д облаков точек с использованием коррекции плоскостей и корреляции гистограмм // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2023. № 1 (61). С. 73-89.

AUTOMATIC DETECTION OF WATER CHANNELS BASED ON AERIAL LIDAR DATA ON TECHNICAL VISION METHODS

Vadim A. Nenashev, SUAI, Saint-Petersburg, Russia, nenashev@guap.ru
Sergey A. Nenashev, SUAI, Saint-Petersburg, Russia, nenashev_sergey178@mail.ru

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. FSRF-2023-0003 "Fundamental principles for building interference-proof systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring".

Abstract

The tasks of autonomous navigation of small aircraft and ground-based robotic platforms require the formation of a semantic model of the terrain, including the identification of obstacles and risk zones. In natural and agricultural landscapes, water channels and watercourses are critically important objects, since they set the boundaries of passability, restrictions on route planning, and conditions for choosing emergency landing sites. Traditional approaches based on streaming algorithms based on digital terrain models demonstrate reduced stability in conditions of flat terrain and weak elevation gradients, as well as with partial shielding of channels by vegetation. Aerial laser scanning provides dense clouds of dots and allows you to observe microrelief elements, however, existing methods of filtering "ground/not ground" and highlighting channel shapes often require adjusting parameters to a specific landscape and do not guarantee the stability of the result. To develop a methodology for automated detection of water channels based on aerial lidar data, which ensures the formation of navigationally significant parameters on a digital terrain map, namely the centerline of the channel and the boundaries of the banks/brows, necessary for subsequent implementation into the autonomous navigation system. The work uses robust allocation of the earth's surface by the RANSAC method with locally adaptive statistical calibration of thresholds, restoration of a digital relief model using smoothing/interpolation by the Bezier method, calculation of differential geometric characteristics of the surface based on the first and second fundamental shapes and determination of the main curvatures, classification of relief types with the allocation of valley-like structures, geometric verification of hypotheses of channels by cross-section profiles (width, depth, cross-sectional area). In this work, a method for identifying water channels has been developed, demonstrating high classification accuracy and resistance to difficult conditions of flat terrain and dense vegetation. A software and algorithmic system in Python was developed for the technique and field testing was performed on airborne laser scanning data obtained by the DJI Zenmuse L1 onboard lidar on

the DJI Matrice 300 RTK platform. The efficiency of the technique is shown in areas with different types of vegetation and the nature of riverbed forms; the axial lines of channels and the boundaries of banks/brows are obtained. The proposed technique provides for the automatic formation of axial lines and coast/brow boundaries on a digital terrain map. These data will allow autonomous navigation systems to generate maps of risk zones when planning safe trajectories (including when selecting landing/emergency landing zones for UAVs). In addition, the technique will allow for regular and automatic updating of navigation maps based on aerial lidar data.

Keywords: laser scanning, digital terrain models, channel detection, surface curvature, RANSAC, drainage networks, hydrology.

References

- [1] V.A. Nenashev, A.R. Bestugin, S.A. Nenashev, I.A. Kirshina, O.P. Kurkova, "Control of ground objects based on neural network recognition in aviation vision systems," *Sensors and systems*, No. 2 (274). 2024, pp. 57-61 <https://elibrary.ru/item.asp?id=67853940>
- [2] V.S., Valiev, D.V. Ivanov, "Gradient algorithm of semantic segmentation of images of the Earth's surface and its use to distinguish the boundaries of water bodies," *Russian Journal of Applied Ecology*. 2025. No. 1, pp. 19-26.
- [3] B. Li, "On enhancing ground surface detection from sparse lidar point cloud," *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2019, pp. 4524-4529.
- [4] V.V. Novikov, "The experience of using airborne laser scanning based on UAVs to study medieval monuments of the IX - XII centuries. On the territory of the European part of Russia," *Proceedings of the VI (XXII) All-Russian Archaeological Congress in Samara: Proceedings of the Congress*. In 3 volumes, Samara, October 01-02, 2020. Vol. III. Samara: Samara State Socio-Pedagogical University, 2020, pp. 177-179.
- [5] S.S. Tsai, "The use of lidar survey materials of forest plots obtained from unmanned aerial vehicles to determine the angles of inclination of the terrain," *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*. 2024. No. 2 (282), pp. 30-37.
- [6] A.V. Mikheev, "Modern technology of cleaning closed drainage systems," *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2014. Vol. 2. No. 26, pp. 41-47.
- [7] E.V. Selezneva, "Application of laser scanning in geomorphological research," *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2013. No. 2, pp. 47-53.
- [8] V.A. Nenashev, S.A. Nenashev, "Search and Study of Marked Code Structures for a Spatially Distributed System of Small-Sized Airborne Radars," *Sensors* 2023, 23, 6835. <https://doi.org/10.3390/s23156835>.
- [9] A.F. Petrushin et al., "Determining the location of a closed drainage using a neural network based on remote sensing data," *Rice farming*. 2024. Vol. 23. No. 1 (62), pp. 88-93.
- [10] V.A. Nenashev et al., "Formation of three-dimensional terrain models based on lidar surveys to identify structural changes in the Earth's surface," *Proceedings of the MAI*. 2023. No. 131.
- [11] M.G. Vystrchil et al., "An algorithm for selecting points on the Earth's surface from aerial laser scanning data," *Geodesy and cartography*. 2024. No. 2, p. 2.
- [12] S.V. Sai, A.V. Zinkevich, "Method of semantic segmentation of aerial laser scanning data of water protection zones," *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2025. Vol. 25. No. 1, pp. 68-77.
- [13] A.E. Khmel'nov, A.S. Gachenko, "Sources of information on underwater, coastal and terrestrial relief and their application for constructing combined relief models," *Computing technologies*. 2022. Vol. 27. No. 5, pp. 55-68.
- [14] A.E. Khmel'nov, A.S. Gachenko, "Possible sources of information on underwater and coastal reliefs and the construction of an integrated model based on these data," *Regional problems of remote sensing of the Earth*. 2022, pp. 163-166.
- [15] B.U. Suleimenov, S.I. Tanirbergenov, "Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in precision agriculture: an overview," *Soil science and agrochemistry*. 2018. No. 2, pp. 85-100.
- [16] B. Ali, R.N. Sadekov, V.V. Tsodokova, "Algorithms for navigation of unmanned aerial vehicles using vision systems," *Gyroscopy and navigation*. 2022. Vol. 30. No. 4 (119), pp. 87-105.
- [17] D.A. Yudin, K.V. Koltsov, "Navigation using RANSAC filtering of point features," *Proceedings of the Graphicon-2013 conference*. Moscow: MSU, 2013, pp. 271-274.
- [18] V.A. Nenashev, K.Yu. Ryzhov, S.A. Nenashev et al., "Development and research of an intelligent spatially distributed multisensory monitoring system for the earth and sea surface, implemented by means of small ship aircraft," *Tr. Krylov State Scientific Center*. 2023. No. 1, pp. 45-56.
- [19] A.A. Medvedev et al., "Multi-time analysis of the condition of the water area and the coastal zone of Lake Sevan based on highly detailed spatial data," *Geodesy, cartography, geoinformatics, and cadastre. Science and education*. 2019, pp. 467-471.
- [20] A.I. Efimov, D.A. Kolchayev, A.I. Novikov, "Iterative algorithm for combining three-dimensional point clouds," *Methods and means of information processing and storage*. Ryazan, RIC RGRTU. 2018, pp. 139-142.
- [21] E.A. Antokhin, A.A. Zalishchuk, V.A. Nenashev, S.A. Nenashev, "Comparative analysis of neural network models for classifying zones of the Earth's surface by optical images," *Radio Engineering*, Vol. 88. No. 8, pp. 35-44. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202408-04>.
- [22] K.I. Morev, "A method for matching clouds of singular image points for tracking tasks based on intuitionistic fuzzy logic," *Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences*. 2019. No. 1 (203), pp. 293-306.
- [23] M. Msallam, V.I. Syryamkin, "A technique for registering 3D point clouds using plane correction and histogram correlation," *Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2023. No. 1 (61), pp. 73-89.

Information about authors:

Vadim A. Nenashev, Ph.D. (Tech.), Head of the machine learning laboratory of the SUAI engineering school, associate professor of the department of "Design and technology of electronic and laser devices" of SUAI, Saint-Petersburg, Russia

Sergey A. Nenashev, Head of the Industrial Electronics Laboratory of the Design and Technology Office of the Engineering School of SUAI, Junior Researcher at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment at SUAI, Postgraduate Student at SUAI, Saint-Petersburg, Russia