EDN: ABMHAX DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.22.3.008
УДК 004.932 *2.2.6*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ФИЛЬТРАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ПОМЕХ В ОБЛАКАХ ТОЧЕК ЛИДАРНЫХ СИСТЕМ

И. Е. Зеленский

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева–КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Выполнена экспериментальная проверка адаптивного алгоритма фильтрации атмосферных помех в облаках точек лидарных систем на данных датасета Boreas. Алгоритм сравнён с методами SOR, DSOR и LIOR по плотности шумовых точек, доле сохранённых отражений на дальности свыше 100 м, проценту удалённых точек и времени обработки кадра. В условиях сильного снегопада плотность атмосферного шума снижена более чем в 15 раз при сохранении около 58 % точек дальней зоны. Показано преимущество адаптивного подхода перед статическими и динамическими фильтрами без ручной перенастройки параметров.

Ключевые слова: адаптивный алгоритм, фильтрация облаков точек, атмосферные помехи, лидар, датасет Boreas, экспериментальная проверка

Введение

Лидарные системы остаются одним из основных источников трёхмерной информации в задачах автономного вождения, локализации и картографирования. В условиях атмосферных осадков (дождь, снег, туман) качество облаков точек существенно ухудшается [1, 2].

Для компенсации указанных помех применяются геометрические (SOR, ROR), динамические (DROR, DSOR) и интенсивностные (LIOR, LIDSOR) фильтры [3, 4, 5]. Большинство из них требует ручной настройки параметров под конкретные погодные условия либо демонстрирует компромисс между полнотой очистки и сохранением дальних отражений [2, 6].

Ранее построена математическая модель адаптивного алгоритма, основанного на оценке показателя уровня плотности атмосферного шума, автоматическом выборе режима обработки и пространственном зонировании облака. Модель обеспечивает дифференцированную фильтрацию без ручной перенастройки параметров.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка указанного алгоритма на реальных данных датасета Boreas [7] и сравнительный анализ с методами SOR, DSOR и LIOR. В качестве метрик используются плотность шумовых точек, доля сохранённых отражений на дальности свыше 100 м, процент удалённых точек и время обработки кадра.

Материалы и методы

Экспериментальная проверка выполнена на открытом датасете Boreas [7]. Датасет содержит записи, полученные при многократном прохождении одного и того же маршрута в течение года, что обеспечивает сопоставимость сцен при различных погодных условиях (ясная погода, дождь, снегопад).

В качестве источника трёхмерных данных использован лидар Velodyne Alpha Prime (128 каналов, горизонтальное поле зрения 360°, вертикальное – 40°, максимальная дальность до 245-300 м). Данные хранятся в бинарном формате: каждая точка представлена координатами (x, y, z), интенсивностью отражённого сигнала, номером лазерного канала и временной меткой.

Для оценки алгоритма отобраны последовательности, соответствующие четырём режимам погоды:

- сильный снегопад;
- умеренный снегопад;
- дождь;
- ясная погода.

Выбор Boreas обусловлен наличием реальных атмосферных осадков (в отличие от синтетических наборов) и единым маршрутом записи, что позволяет объективно сравнивать результаты фильтрации при изменении только погодных условий.

Для сравнительной оценки выбраны три распространённых алгоритма, представляющих основные классы подходов: SOR (Statistical Outlier Removal) [3], DSOR (Dynamic Statistical Outlier Removal) [4] и LIOR (Low-Intensity Outlier Removal) [5].

Параметры базовых методов приняты по рекомендациям исходных работ либо подобраны экспериментально на последовательностях Boreas. Предложенный адаптивный алгоритм во всех испытаниях работал с фиксированным набором внутренних порогов без ручной перенастройки под конкретный тип осадков:

- режим мягкой очистки при плотности атмосферного шума < 9 %;
- режим умеренной очистки при плотности атмосферного шума ≥ 9 % и < 50 %;
- режим агрессивной очистки при плотности атмосферного шума ≥ 50 %;
- радиус ближней зоны, где проводится основная очистка, равен 45 м.

Для количественной оценки результатов фильтрации использованы четыре метрики.

1. Плотность шумовых точек (точек/м²) – отношение числа точек, классифицированных как статистические выбросы, к площади проекции облака. Поскольку датасет Boreas не содержит покадровой разметки атмосферных помех, данная величина используется как прокси-оценка плотности шума. В отличие от показателя уровня плотности атмосферного шума модели, метрика вычисляется глобально по всему кадру (без ограничения радиусом 45 м) до и после фильтрации и характеризует общую степень очистки.
2. Доля сохранённых точек на расстоянии свыше 100 м (%) – отношение числа точек дальней зоны после фильтрации к их числу до фильтрации. Показатель отражает способность алгоритма сохранять структурную информацию на больших дальностях.
3. Процент удалённых точек (%) – отношение числа удалённых точек к исходному числу точек облака. Характеризует общую агрессивность фильтрации.
4. Время обработки одного кадра (с) – среднее время выполнения алгоритма на одном облаке точек (процессор без ускорения на GPU).

Все метрики вычислялись на одних и тех же кадрах для адаптивного алгоритма, SOR, DSOR и LIOR, что обеспечивает сопоставимость результатов.

Результаты эксперимента

Замеры для каждого типа погодных условий были произведены на нескольких кадрах и усреднены.

Количественные результаты сравнительных испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение существующих методов фильтрации и разработанного адаптивного алгоритма при разных уровнях зашумления

Погодные условия	**Метод**	**Плотность шумовых облаков (до/после), точек/м²**	**Сохранено точек дальше 100 м, %**	**Удалено точек, %**	**Время обработки, сек**
Сильный снегопад	SOR	0.064/0.203	4.66	4.62	0.13
	DSOR	0.064/0.024	35.88	9.16	0.44
	LIOR	0.062/0.012	100	12.84	0.97
	Разработанный алгоритм	0.065/0.004	57.82	19.58	0.96
Умеренный снегопад	SOR	0.031/0.039	16.3	4.8	0.13
	DSOR	0.031/0.022	65.5	4.9	0.42
	LIOR	0.032/0.023	100.0	7.0	0.99
	Разработанный алгоритм	0.031/0.012	93.6	10.1	0.88
Дождь/Ясно	SOR	0.021/0.033	8.7	5.0	0.12
	DSOR	0.021/0.016	69.0	3.8	0.44
	LIOR	0.021/0.020	100.0	4.4	0.98
	Разработанный алгоритм	0.021/0.021	98.8	0.1	0.55

В условиях сильного снегопада адаптивный алгоритм снизил плотность шумовых точек более чем в 15 раз (с 0,065 до 0,004 точек/м²) при сохранении 57,8 % точек дальней зоны. LIOR полностью сохранил дальние отражения, но оставил более высокую остаточную плотность шума. DSOR и особенно SOR уступили по совокупности показателей.

При умеренном снегопаде адаптивный алгоритм обеспечил снижение плотности до 0,012 точек/м² и сохранение 93,6 % дальних точек, превосходя DSOR и SOR.

В условиях дождя и ясной погоды алгоритм автоматически перешёл в мягкий режим: удаление точек составило лишь 0,1 %, дальняя зона сохранена на 98,8 %. SOR и DSOR продолжали избыточно удалять точки даже при слабом шуме.

По времени обработки адаптивный алгоритм (0,55–0,96 с) сопоставим с LIOR и медленнее SOR (~0,13 с), что обусловлено вычислением нормалей и оценкой уровня плотности атмосферного шума. Для задач восприятия это время остаётся приемлемым.

Таким образом, адаптивный алгоритм демонстрирует наилучший баланс очистки ближней зоны и сохранения дальних отражений в условиях снегопада, а в слабо зашумлённых сценах работает в щадящем режиме.

Пример визуального результата фильтрации при сильном снегопаде приведён на рисунке 1.

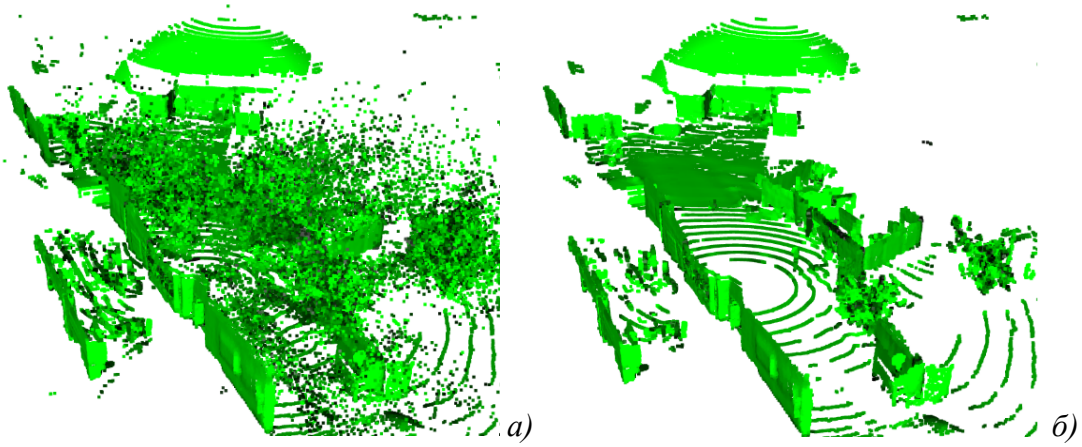

Рис. 1. Облако точек *а*) до фильтрации и *б*) после фильтрации адаптивным алгоритмом в условиях сильного снегопада

Результат работы разработанного алгоритма на рисунке 1 показывает эффективность удаления им атмосферного шума при большом количестве шумовых точек без критических повреждений важных структур облака.

Пример визуального результата фильтрации при низком уровне зашумления приведён на рисунке 2.

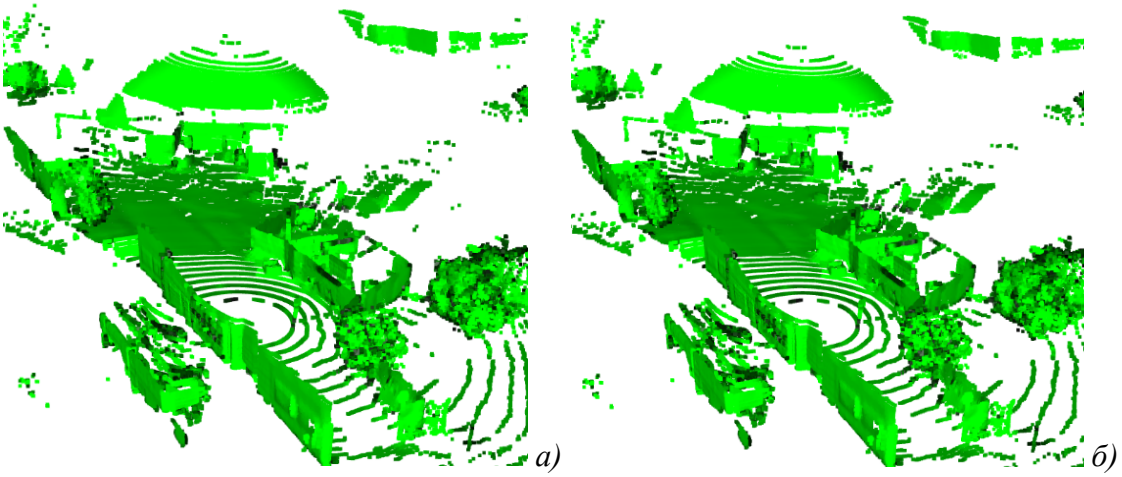

Рис. 2. Облако точек *а*) до фильтрации и *б*) после фильтрации адаптивным алгоритмом в условиях низкой зашумлённости (дождь или ясная погода)

Результат фильтрации на рисунке 2 демонстрирует способность разработанного алгоритма к автоматической подстройке мощности фильтрации в зависимости от уровня шума на исходном облаке. Выражается это в минимальных изменениях на облаке после фильтрации по причине отсутствия целевого количества шума.

Сравнительный вид результатов обработки одного кадра с сильным зашумлением методами SOR, DSOR, LIOR и адаптивным алгоритмом представлен на рисунке 3.

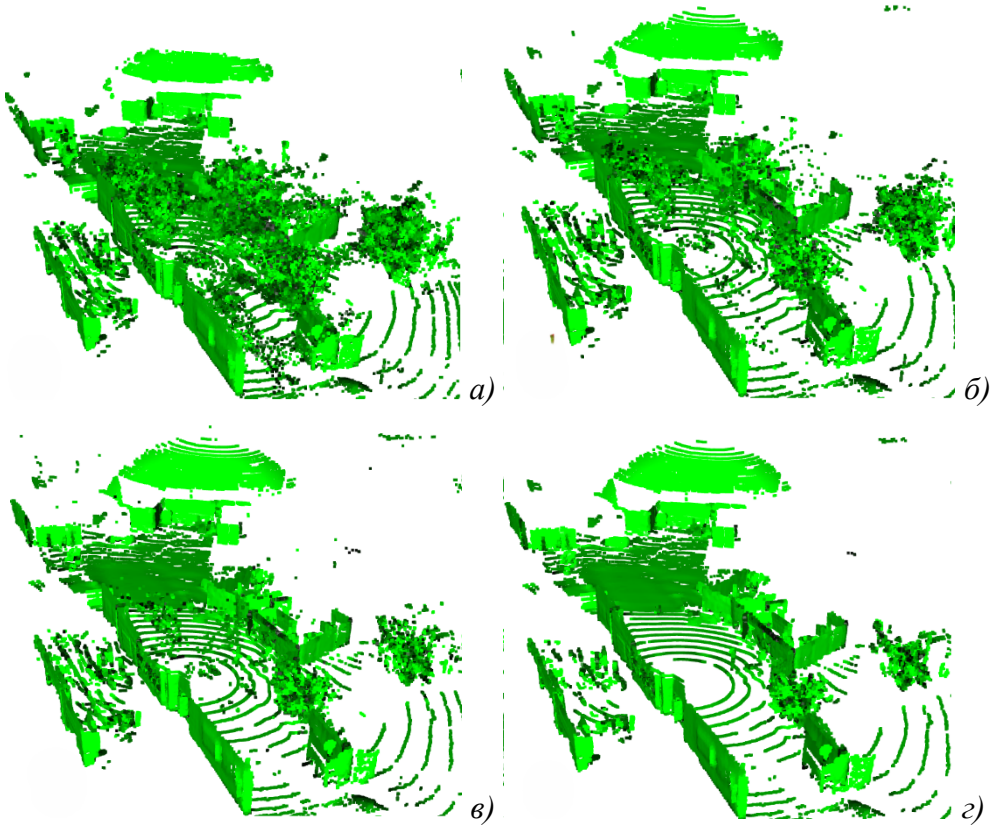

Рис. 3. Сравнение результатов фильтрации: *а*) – SOR; *б*) – DSOR; *в*) – LIOR; *г*) – адаптивный алгоритм; Условия: сильный снегопад

По данным визуального сравнения можно ясно понять, что результат фильтрации разработанного алгоритма отличается от прочих наиболее эффективным удалением шумовых точек при практически полном сохранении важных структур.

Обсуждение результатов

Полученные результаты подтверждают работоспособность адаптивного алгоритма и согласуются с логикой его математической модели. В условиях сильного и умеренного снегопада алгоритм автоматически переходит в режим с зонированием: агрессивно очищает ближнюю зону и сохраняет существенную долю дальних отражений. В слабо зашумлённых сценах (дождь, ясная погода) активируется мягкий режим, практически не затрагивающий структуру облака.

Сравнение с базовыми методами выявляет характерные компромиссы. SOR при фиксированных параметрах либо недостаточно очищает плотный снежный шум, либо удаляет полезные точки на больших дальностях [3]. Рост плотности шумовых точек после применения SOR (от 0,064 до 0,203 при сильном снегопаде) объясняется тем, что метод разрушает локальную структуру облака, после чего пересчёт статистических выбросов фиксирует ещё большее число аномалий. DSOR улучшает сохранение дальней зоны за счёт зависимости порога от расстояния, однако не оценивает глобальный уровень атмосферного шума и требует ручной настройки [4]. LIOR обеспечивает наилучшее сохранение дальних точек (до 100 %), но опирается на канал интенсивности и в ряде кадров оставляет более высокую остаточную плотность шума [5].

Адаптивный алгоритм сочетает преимущества указанных подходов: оценка уровня

плотности атмосферного шума заменяет ручной выбор режима, пространственное зонирование дифференцирует интенсивность фильтрации, а защита поверхностей по пикам распределения нормалей снижает риск удаления структурно значимых точек. Платой за это является увеличение времени обработки (до ≈ 1 с на кадр) по сравнению с SOR.

Ограничения метода связаны с эмпирическим выбором порогов переключения между режимами и области основной массы помех, определённых на данных Boreas. При переносе на другие типы лидаров или иные распределения осадков (в частности, плотный туман с многократным рассеянием) параметры могут потребовать уточнения. К тому же в текущей реализации алгоритм работает в однопоточном режиме, что может ограничивать его потенциальную скорость.

В целом результаты показывают, что предложенный адаптивный подход обеспечивает более устойчивый баланс между очисткой атмосферных помех и сохранением дальности обнаружения, чем статические и полуадаптивные фильтры, не требуя ручной перенастройки под конкретные погодные условия.

Заключение

Выполнена экспериментальная проверка адаптивного алгоритма фильтрации атмосферных помех на данных датасета Boreas. В условиях сильного снегопада алгоритм снизил плотность шумовых точек более чем в 15 раз при сохранении около 58 % отражений на дальности более 100 м. При умеренном снегопаде доля сохранённых дальних точек составила 93,6 %. В слабо зашумлённых сценах алгоритм автоматически переходит в мягкий режим и практически не удаляет точки.

Сравнение с SOR, DSOR и LIOR показало, что адаптивный подход обеспечивает более устойчивый баланс между очисткой ближней зоны и сохранением дальней структуры облака без ручной перенастройки параметров под конкретные погодные условия.

Полученные результаты подтверждают работоспособность математической модели алгоритма. Перспективы дальнейших исследований включают проверку на других датасетах и типах лидаров, оптимизацию через многопоточный процесс обработки, а также оценку влияния фильтрации на точность последующих задач детекции и локализации.

Список литературы

1. Gu Z. Point cloud processing under adverse weather: a survey of datasets, enhancement, and denoising methods / Z. Gu, Z. Wu, C. Zhang, Y. Liang // Signal, Image and Video Processing.– 2025. – Vol. 19. – Article 718. – DOI: 10.1007/s11760-025-04352-9.
2. Gupta H. Evaluating LiDAR Perception Algorithms for All-Weather Autonomy /H.Gupta, A.J. Lilienthal, H. Andreasson // Sensors. – 2025. – Vol. 25, No. 24. – 7436. – DOI: 10.3390/s25247436.
3. Charron N. De-noising of Lidar Point Clouds Corrupted by Snowfall / N. Charron, S. Phillips, S.L. Waslander // 15th Conference on Computer and Robot Vision (CRV). – 2018. – P. 254–261. – DOI: 10.1109/CRV.2018.00043.
4. Kurup A., Bos J. DSOR: A Scalable Statistical Filter for Removing Falling Snow from LiDAR Point Clouds in Severe Winter Weather // arXiv preprint arXiv:2109.07078. – 2021.
5. Park J.-I. Fast and Accurate Desnowing Algorithm for LiDAR Point Clouds / Park J.-I., Park J., K.-S. Kim // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 160202–160212. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3020266.
6. Shin S. Spatially divided outlier removal for LiDAR de-noising in adverse weather conditions / S. Shin, J. Joo, H. Lee, S.C. Kim // Scientific Reports. – 2026. – Vol. 16. – Article 11480. – DOI: 10.1038/s41598-026-38674-6.

7. Burnett K. Boreas: A Multi-Season Autonomous Driving Dataset / Burnett K., Yoon D.J., Wu Y. et al.// arXiv preprint arXiv:2203.10168. – 2022.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR FILTERING ATMOSPHERIC INTERFERENCE IN LIDAR POINT CLOUDS

I. E. Zelenskiy

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. An experimental verification of an adaptive algorithm for filtering atmospheric interference in lidar point clouds was performed on the Boreas dataset. The algorithm was compared with SOR, DSOR, and LIOR in terms of noise point density, the fraction of preserved returns beyond 100 m, the percentage of removed points, and frame processing time. Under heavy snowfall, atmospheric noise density was reduced by more than a factor of 15 while preserving about 58 % of far-zone points. The adaptive approach demonstrated an advantage over static and dynamic filters without manual parameter retuning.

Keywords: adaptive algorithm, point cloud filtering, atmospheric interference, lidar, Boreas dataset, experimental verification

Статья представлена в редакцию 29 августа 2026 г.