

УДК 004

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ КАРТ МЕСТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА LIO-SAM

Семенова Е.В., студентка гр. ИИМ-241, II курс

Научный руководитель: Сыркин И.С., к.т.н., доцент

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Задача построения точных трехмерных карт местности является одной из ключевых при создании систем автономного движения наземных платформ, в том числе в условиях горных выработок. Традиционные методы картографирования на основе одного типа сенсора - например, только лидара или только инерциальной навигации - не обеспечивают приемлемой точности на протяженных маршрутах вследствие накопления дрейфа. Совместная обработка данных разнородных датчиков (sensor fusion) позволяет компенсировать недостатки каждого из них и получить более устойчивую оценку траектории.

Алгоритм LIO-SAM (Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping) объединяет измерения лидара, инерциального измерительного блока (IMU) и глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в единую оптимизационную задачу на основе факторного графа. Подобный подход обеспечивает высокую точность оценки траектории и качество карты даже при длительных съемочных маршрутах и резких маневрах платформы. Алгоритм активно применяется при построении высокоточных 3D-карт для беспилотной техники, включая карьерные самосвалы.

Успешное применение LIO-SAM требует решения двух взаимосвязанных задач: корректной настройки конфигурационного файла `params.yaml` и точного задания пространственного преобразования между системами координат датчиков. В настоящей статье рассматриваются теоретические основы алгоритма, структура конфигурационных параметров и математический аппарат калибровки на примере аппаратной конфигурации, включающей лидар Ouster, инерциальный навигационный блок GyroNav и приемники ГНСС с двумя антеннами.

Алгоритм LIO-SAM построен на основе факторного графа - вероятностной модели, в которой состояния системы являются узлами, а измерения датчиков задают факторы (ребра), связывающие эти узлы. Оптимизация факторного графа методом сглаживания позволяет находить глобально согласованную оценку траектории с учетом всей накопленной истории измерений.

В алгоритме используются четыре типа факторов. Факторы IMU формируются на основе прединтеграции инерциальных измерений между соседними ключевыми кадрами лидара; они обеспечивают высокочастотную оценку движения и связывают последовательные состояния системы. Факторы лидарной одометрии вычисляются путем сопоставления облаков точек с использованием краевых и плоскостных геометрических признаков; результатом является инкрементальная оценка относительного смещения между кадрами. Факторы ГНСС вводят абсолютные координатные ограничения, предотвращая глобальный дрейф траектории. Факторы замыкания петель позволяют корректировать накопленную ошибку при повторном посещении уже картографированных участков.

Ключевым отличием LIO-SAM от более ранних алгоритмов семейства LOAM является жесткая (tightly-coupled) интеграция данных IMU непосредственно в оптимизацию факторного графа, а не использование IMU лишь для предварительного выравнивания сканов. Это обеспечивает корректную обработку сценариев с высокодинамичным движением и кратковременными потерями геометрических признаков.

Конфигурационный файл `params.yaml` содержит все управляющие параметры алгоритма, сгруппированные по функциональному назначению. Корректное заполнение каждого блока является обязательным условием работоспособности системы.

Входные топики ROS2. Параметры `pointCloudTopic`, `imuTopic` и `gpsTopic` задают имена топиков, из которых алгоритм получает данные лидара, IMU и ГНСС соответственно. Несовпадение указанных имен с фактическими именами топиков в записанных данных полностью блокирует получение входных данных. Для лидара Ouster параметр `pointCloudTopic` принимает значение `/ouster/points` вместо стандартного `/points`, если драйвером не задано иное. Корректность топиков удобно проверять командой `ros2 topic echo` до запуска алгоритма.

Особого внимания требует тип сообщений ГНСС. Стандартная конфигурация LIO-SAM предполагает формат `nav_msgs/Odometry`, содержащий координаты в локальной декартовой системе координат с ковариационной матрицей. В случае если приемник ГНСС публикует данные в формате `sensor_msgs/NavSatFix` (геодезические координаты: широта, долгота, высота), требуется промежуточный узел-конвертер, выполняющий пересчет координат и формирование ковариационных матриц. При использовании ГНСС-одометрии параметр `useImuHeadingInitialization` рекомендуется устанавливать в значение `true` для согласования начальной ориентации по углу рыскания.

Параметры сенсоров. Параметры `N_SCAN` и `Horizon_SCAN` задают вертикальное и горизонтальное разрешение лидара соответственно. Для Ouster OS1-64 корректные значения составляют `N_SCAN = 64` и `Horizon_SCAN = 512` (допустимы также 1024 и 2048 в зависимости от режима работы датчика). При неверных значениях алгоритм формирует некорректную структуру скана, что

приводит к сбоям при выделении геометрических признаков и ухудшению качества оценки одометрии. Параметры шума IMU - `imuAccNoise`, `imuGyrNoise`, `imuAccBiasN`, `imuGyrBiasN` - используются в процедуре прединтеграции; их значения определяются по паспортным характеристикам IMU либо по результатам калибровки методом Allan Variance.

Параметры картографирования. Пороговые значения `edgeThreshold` и `surfThreshold` определяют принадлежность точек к классам краевых и плоскостных признаков соответственно. Параметры `mappingCornerLeafSize` и `mappingSurfLeafSize` задают размер вокселя при прореживании облака точек перед сопоставлением: для открытой местности рекомендуются значения 0,2-0,4 м, для городской застройки - 0,1-0,2 м. Параметр `mappingProcessInterval` регулирует частоту обновления карты.

Замыкание петель активируется параметром `loopClosureEnableFlag`. Параметры `historyKeyframeSearchRadius` и `historyKeyframeSearchTimeDiff` задают пространственный и временной радиус поиска кандидатов для замыкания. Включение замыкания петель целесообразно для маршрутов с повторным посещением картографированных участков; на маршрутах без петель данный механизм практически не влияет на результат, незначительно увеличивая вычислительную нагрузку.

Точность совместной обработки данных лидара и IMU определяется корректностью жесткого пространственного преобразования между их системами координат. В алгоритме LIO-SAM это преобразование задается тремя параметрами конфигурационного файла: `extrinsicTrans` (вектор трансляции), `extrinsicRot` (матрица вращения для преобразования векторных измерений IMU) и `extrinsicRPY` (матрица вращения для преобразования ориентации IMU).

Для корректного вывода матрицы вращения необходимо установить соответствие между осями датчиков. В рассматриваемой конфигурации оси лидара Ouster направлены следующим образом: X^L - вперед (в сторону, противоположную разъему), Y^L - влево, Z^L - вверх. Оси IMU GyroNav: X^I - вправо, Y^I - вперед, Z^I - вверх. Оба датчика установлены на одной платформе с совпадающими вертикальными осями, однако горизонтальные оси повернуты относительно друг друга.

Матрица вращения R , преобразующая координаты из системы лидара в систему IMU, строится путем записи координат базисных векторов лидара в системе IMU по столбцам:

$$R = [[0, -1, 0], [1, 0, 0], [0, 0, 1]].$$

Данная матрица соответствует повороту на $+90^\circ$ вокруг вертикальной оси Z при наблюдении сверху, что геометрически означает: продольная ось лидара (X^L) совпадает с продольной осью IMU (Y^I), поперечные оси направлены противоположно ($Y^L = -X^I$), вертикальные оси совпадают ($Z^L = Z^I$).

Проверка корректности матрицы. Матрица вращения должна принадлежать специальной ортогональной группе $SO(3)$, что означает

выполнение двух условий: ортогональности и единичного определителя. Первое условие гарантирует сохранение длин векторов и углов между ними; второе - отсутствие инверсии пространства.

Нарушение условия ортонормированности на практике проявляется в накоплении систематической угловой ошибки траектории, которая не может быть устранена оптимизацией факторного графа или механизмом замыкания петель и требует исправления на этапе конфигурирования.

Представление через углы Эйлера. Параметр `extrinsicRPY` допускает задание ориентационного преобразования через углы Эйлера. Для полученной матрицы R эквивалентное представление имеет вид: $\text{roll} = 0$, $\text{pitch} = 0$, $\text{yaw} = +\pi/2$ рад. Параметр принимает значения в радианах; использование градусов является типичной ошибкой конфигурирования.

Вектор трансляции `extrinsicTrans` задается в метрах и определяет смещение центра измерений лидара относительно центра IMU. При значительном расстоянии между датчиками некорректный вектор трансляции вносит дополнительные ускорительные компоненты при угловых движениях платформы, что ухудшает качество прединтеграции IMU.

Рекомендуемая последовательность настройки конфигурационного файла предполагает поэтапную работу с каждым блоком параметров. На первом этапе выполняется согласование входных топиков и проверка поступления данных через `ros2 topic echo`. На втором этапе задаются характеристики сенсоров (`N_SCAN`, `Horizon_SCAN`, параметры шума IMU). На третьем - выводится и верифицируется матрица вращения, задается вектор трансляции. На четвертом выполняется пробный запуск алгоритма на коротком участке маршрута; при необходимости корректируются параметры картографирования. Качество результата может быть оценено в сравнении с публичными датасетами KITTI, используемыми в качестве эталонных.

К наиболее распространенным ошибкам конфигурирования относятся следующие. Несовпадение имен топиков приводит к тому, что алгоритм запускается без ошибок, однако не получает входных данных и не строит карту. Неверные значения `N_SCAN` и `Horizon_SCAN` вызывают некорректную сегментацию скана: геометрические признаки не выделяются, карта не строится либо строится с артефактами. Несогласованность `extrinsicRot` и `extrinsicRPY` проявляется в зеркальном отображении или произвольном повороте построенной карты. Подача данных ГНСС в формате NavSatFix без предварительного преобразования приводит к игнорированию спутниковых факторов либо к нестабильной работе алгоритма. Задание углов в `extrinsicRPY` в градусах вместо радиан является источником систематической ошибки ориентации.

В настоящей статье рассмотрены теоретические основы алгоритма LIO-SAM и практические аспекты его применения для построения трехмерных карт местности. Описана архитектура факторного графа, объединяющего измерения лидара, IMU и ГНСС в единую оптимизационную задачу. Рассмотрена структура конфигурационного файла `params.yaml` и

функциональное назначение основных групп параметров. Подробно изложен математический аппарат калибровки пространственного преобразования между датчиками: вывод матрицы вращения из соотношений между осями сенсоров, проверка ее принадлежности группе $SO(3)$ и эквивалентное представление через углы Эйлера.

Показано, что корректная конфигурация является необходимым условием работоспособности алгоритма: ошибки в задании топиков или параметров сенсоров приводят к полной остановке построения карты, а некорректная матрица вращения вносит систематическую ошибку, которая не может быть устранена средствами оптимизации факторного графа. Изложенные подходы к настройке и калибровке применимы к широкому классу систем лидарной одометрии и картографирования, реализующих алгоритмы на основе факторного графа.

Список литературы:

1. Shan T., Englot B., Meyers D., Wang W., Ratti C., Rus D. LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping [Электронный ресурс]: arXiv preprint arXiv:2007.00258. - 2020. - Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2007.00258> (дата обращения: 27.03.2026).
2. Дубинкин Д.М. Создание алгоритма обработки данных систем беспилотного управления карьерного самосвала для построения высокоточных 3D-карт местности / Д.М. Дубинкин, В.Ю. Садовец, И.С. Сыркин, Е.В. Коршунова // Уголь. - 2024. - № S11(1187). - С. 116-122. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-116-122.
3. Ouster, Inc. Ouster OS1 Sensor Data Sheet [Электронный ресурс]. - 2022. - Режим доступа: <https://ouster.com/products/hardware/os1-lidar-sensor> (дата обращения: 28.03.2026).
4. Zhang J., Singh S. LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time [Электронный ресурс / PDF]. - 2014. - Режим доступа: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2014/7/Ji_LidarMapping_RSS2014_v8.pdf (дата обращения: 25.03.2026).
5. TixiaoShan (GitHub). LIO-SAM (репозиторий) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://github.com/TixiaoShan/LIO-SAM> (дата обращения: 20.03.2026).