

М. ЭЛЬ-ТОХЕИ, М. ЭЛЬХАБИБИ, Т. ХАССАН

КАЛИБРОВКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ «ОДОМЕТР – ЛИДАР – ГИРОСКОП» В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРТ В ОТСУТСТВИЕ СИГНАЛОВ ГНСС

В последнее время значительное количество исследований сосредоточено на решении проблемы достоверного определения местоположения объектов в режиме реального времени в сложной окружающей обстановке. Решение этой задачи – важнейшее условие для разработки разного рода интеллектуальных транспортных систем (ИТС). С учетом ограничений функционирования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в условиях города и пригородов, где пропадание сигнала – обычное явление, создание независимой системы позиционирования, обеспечивающей непрерывную выработку точных данных о местоположении объектов в отсутствие сигналов ГНСС, становится все более актуальной задачей. Для ее решения были проведены эксперименты в целях изучения комбинации лазерного дальномера (лидара), гироскопов и одометров. В настоящей работе с опорой на данные предыдущих исследований рассматривается коррекция показаний одометров с использованием дорожных карт, а также методика сегментирования дороги в режиме реального времени. Для оценки нового метода моделировалось отсутствие сигнала ГНСС в течение трех пятиминутных интервалов. При этом использовались реальные данные, полученные от движущегося объекта, обработка которых выполнялась в моделируемом режиме реального времени. Результаты экспериментов показали заметное улучшение точности навигации. В частности, применение метода калибровки в реальном времени снизило погрешность позиционирования на 0,9, 1,0 и 0,2 м в каждом из эпизодов пропадания сигнала ГНСС соответственно. Повышение точности во втором и третьем эпизодах было достигнуто за счет получения более точных данных о параметрах дороги. В работе предложен упрощенный алгоритм обработки данных лидара, благодаря которому достигнутые средние значения погрешности позиционирования составили 1,8 и 1,8 м, а ее максимальные значения – 4,0 и 3,8 м соответственно.

Ключевые слова: навигация, одометр, лидар, гироскоп, ИТС.

Введение

В последние годы многие исследовательские проекты были посвящены эффективности навигационных алгоритмов в условиях городской и пригородной застройки

Эль-Тохеи Мохамед. Профессор, Инженерный факультет, Университет Аин Шамс (Каир, Египет).

Эльхабиби Мохамед. Профессор, Инженерный факультет, Университет Аин Шамс.

Хассан Тарек. Доктор наук, доцент, Инженерный факультет, Университет Аин Шамс.

Научный редактор перевода д.ф.-м.н. А.А. Голован.

ки. Интерес к этой теме связан с текущими разработками в области интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и сопутствующих приложений, где требуется наличие навигационных систем, способных решать задачу определения местоположения с необходимым уровнем состоятельности и точности. Такие системы должны быть достаточно точны, чтобы соответствовать требованиям применимости в ИТС: в критически ответственных приложениях погрешность не должна превышать нескольких метров и выходить за пределы одной полосы дороги, когда речь идет о жизни людей. Ко второму типу применений относятся, в частности, системы предупреждения столкновений, управления экстренными службами и контроля полосы движения, неучтенные навигационные погрешности которых могут создавать угрозу жизни людей. Примерами применений первого типа являются системы «умного страхования», уличной парковки автомобилей, электронные системы платежей за пользование платными дорогами и т.п. – здесь последствиями неучтенных навигационных погрешностей могут быть ошибочные юридические или финансовые решения [1, 2]. В некоторых сферах применения ИТС требуются навигационные системы, которые могут обеспечить наблюдение за окружающей обстановкой и адаптироваться к меняющимся условиям дорожного движения, гарантируя при этом точность и непрерывность работы [3]. Речь идет о случаях, когда высока вероятность возникновения недопустимых ситуаций (например, конфликтов и столкновений), которые важно выявлять наряду с другими параметрами процесса навигации.

В условиях городской и пригородной застройки ГНСС не могут обеспечивать непрерывное решение задачи навигации из-за частой блокировки сигнала, поэтому разработка и развертывание некоторых видов ИТС вызывают затруднения в связи с невозможностью соблюдения соответствующих требований. Чтобы решить задачу обеспечения непрерывного позиционирования в случае пропадания сигнала ГНСС, приемную аппаратуру ГНСС комбинируют с дополнительными датчиками: одометрами, цифровыми камерами, приемниками сигналов 5G, ультразвуковыми датчиками, инерциальными измерительными модулями (ИИМ), радиолокационной аппаратурой (радары) и лазерными локаторами (лидарами) [4–6]. В рамках данной работы рассматривается комбинация одометрического датчика с гироскопом и лидаром, которая обеспечивает непрерывное решение задачи навигации в случае пропадания сигнала ГНСС.

В некоторых публикациях предложены алгоритмы для комплексирования показаний одометров, ИИМ и лидаров. Так, в работе [7] представлена система, объединяющая данные лидара, ИИМ и одометра в режиме реального времени и обеспечивающая решение навигационной задачи с использованием функции стоимости с учетом невязок ИИМ и лидара. При этом накопленная погрешность уменьшается путем замыкания обратной связи и позиционно-графовой оптимизации (pose graph optimization). В ходе экспериментов абсолютные значения погрешности позиционирования варьировались от 0,92 до 31,33 м. В исследовании [8] была предложена похожая схема комплексирования с применением комплементарного фильтра Калмана (ФК). Оценка переменных состояния и распределение вероятности, полученные по измерениям ИИМ, применяются для оценки свойств дорожной поверхности. Затем производится оптимизация сильносвязанной схемы комплексирования посредством настройки соответствующих параметров. Описываемый метод был задействован для трех различных массивов данных, в результате были получены среднеквадратические значения погрешности 1,21, 2,80 и 2,60% пройденного пути. В работе [9]

данные трех датчиков комплексировались с использованием обобщенного ФК после сопоставления облака точек, сформированного лидаром, с известным облаком точек при помощи итеративного алгоритма ближайших точек (Iterative Closest Point – ICP). Этот метод продемонстрировал эффективность на прямолинейных траекториях при ограниченной скорости движения (около 2 м/с). Авторы [10] предложили метод сопоставления сканов на основе преобразования нормального распределения (Normal Distributions Transform – NDT) для повышения точности оценивания местоположения интегрированной системой. Для инициализации этой системы комплексировались данные датчика положения и ИИМ, а метод тестировался при участии робота. Погрешность оценивания местоположения составила порядка 5 м при длине траектории около 600 м, а суммарная угловая погрешность достигала 15° при скорости движения 0,5 м/с.

Другой подход [11] был разработан на основе итеративного комплементарного ФК для рекуррентной коррекции оценки состояния за счет выработки новых соответствий элементов на каждой итерации. Чтобы избежать расхождения фильтра во времени, задействуется роботоцентрическая постановка, в которой переменные состояния представлены в локальной подвижной системе координат. В процессе натурных испытаний после первых 600 м пути погрешности выработки координат составляли лишь несколько метров, однако после прохождения следующих 400 м пути они превысили 25 м. В [12] в аналогичных условиях применяется алгоритм ICP после формирования смещенных объединенных точечных облаков. Данные сверхширокополосной навигационной системы при комплексировании с координатами, выработанными ИИМ, используются в качестве одномерного ограничения. По результатам испытаний этого метода на дороге погрешность позиционирования достигала 5,78 м после прохождения всего 85 м пути. Сильносвязанная схема интегрирования лидара и ИИМ с использованием гауссовского фильтра частиц описывается в [13]. В статье [14] аналогичные измерения были комплексированы по слабосвязанной схеме с помощью фильтра Калмана пониженного ранга. Оба эти метода были созданы для роботов и продемонстрировали хороший уровень точности на ограниченных дистанциях внутри помещений.

Вопрос калибровки показаний одометра ранее рассматривался в различных работах, например в [15–17]. Представленные в них методы самокалибровки основываются на принципе комплексирования имеющихся данных ГНСС с измерениями ИИМ и одометра. При этом следует учитывать, что сигналы ГНСС подвержены дополнительным воздействиям в условиях городской и пригородной среды, которые способны нарушить непрерывность описываемых процедур калибровки и снизить их надежность. Даже если принимается достаточное количество сигналов ГНСС, точность и надежность определения местоположения в таких случаях не гарантированы [18].

В настоящей статье предложен новый алгоритм калибровки измерений одометра в режиме реального времени на основе заранее определенных по картам сегментов дороги. Поскольку этот метод совершенно не зависит от данных ГНСС, он может обеспечить надежную и непрерывную навигацию в отсутствие спутниковых сигналов. Данные лидара, гироскопа и одометра комплексировуются путем сопоставления сканов по линейным элементам. При этом ошибочно опознанные на последовательных сканах линии выявляются и отбраковываются с помощью алгоритма обнаружения и исключения ошибок (Fault Detection and Exclusion – FDE). Встроенная

процедура сегментирования дороги позволяет уменьшить возможное накопление погрешности и скорректировать угол азимута движущегося объекта. В основе предложенного метода лежит предположение, что при движении объекта углы его крена и тангажа крайне малы, что характерно для движения по асфальтированным дорогам, поэтому ими можно пренебречь. При испытаниях алгоритма использовались фактические данные о траектории и моделировалось пропадание сигналов ГНСС в течение пятиминутных интервалов.

Статья имеет следующую структуру. В разделе 1 описывается применяемый алгоритм комплексирования данных. Предлагаемый способ калибровки одометра в режиме реального времени приведен в разделе 2. Процедура испытаний рассматривается в разделе 4, а результаты экспериментов и соответствующая оценка эффективности обсуждаются в разделе 5. Выводы по итогам проделанной работы представлены в заключительной части.

1. Алгоритм комплексирования данных

Предлагаемый в настоящей статье алгоритм комплексирования данных основан на подходе, представленном в [19]. На первом этапе в качестве входных данных принимаются измерения, полученные от лидара, гироскопа и одометра. Эти измерения привязаны к системе координат объекта, в которой ось y направлена вдоль объекта, ось x – поперечно объекту, а ось z – перпендикулярно. Начальными условиями алгоритма являются последние значения координат и угла азимута, полученные от ГНСС. Для решения задачи навигации начальные координаты, задаваемые во всемирной геодезической системе WGS-84, проецируются на оси универсальной поперечной проекции Меркатора (UTM). Угол азимута отсчитывается по часовой стрелке между направлением на север и направлением движения объекта и позволяет перейти из связанной с объектом системы координат xuz (в ее нулевой точке располагается лидар после совмещения его осей, показанных на плоскости его основания, с корпусом объекта) в локальную систему координат «восток–север–вверх» (ENU), нулевая точка которой совпадает с нулевой точкой системы UTM. Начальный угол азимута движущегося объекта вычисляется с учетом значений скорости, полученных из доплеровских измерений ГНСС, по формуле $A = \arctan(v_e/v_n)$, в которой v_e и v_n – восточная и северная компоненты вектора скорости соответственно. Таким образом, чтобы обеспечить точность расчетного угла азимута, объект должен двигаться прямолинейно, без маневрирования. Следует подчеркнуть, что алгоритм запускается только при движении объекта, поскольку в противном случае угол его азимута не определяется. После запуска алгоритма объект может перемещаться и останавливаться без ущерба для его работы, так как она совершенно не зависит от данных ГНСС.

В основе предлагаемого алгоритма комплексирования лежит метод сопоставления сканов по линейным элементам [20, 21], т.е. определения так называемых «нормальных» точек на двух последовательных сканах (облаках точек). Под «нормальной» понимается точка пересечения линии, обнаруженной лидаром, с нормалью к этой линии. Разница в расположении нормальных точек в разных системах координат используется для расчета изменения местоположения и курса.

Как показано на рис. 1, нормальные точки для сканов i и j характеризуются двумя полярными координатами: дальностью r и углом θ . Оси системы координат i обозна-

чены как X_i и Y_i , оси системы координат j – как X_j и Y_j , изменение местоположения при сравнении двух сканов в системе координат объекта i – как Δx_i и Δy_i , ΔA – изменение курса против часовой стрелки при переходе из системы координат i в j .

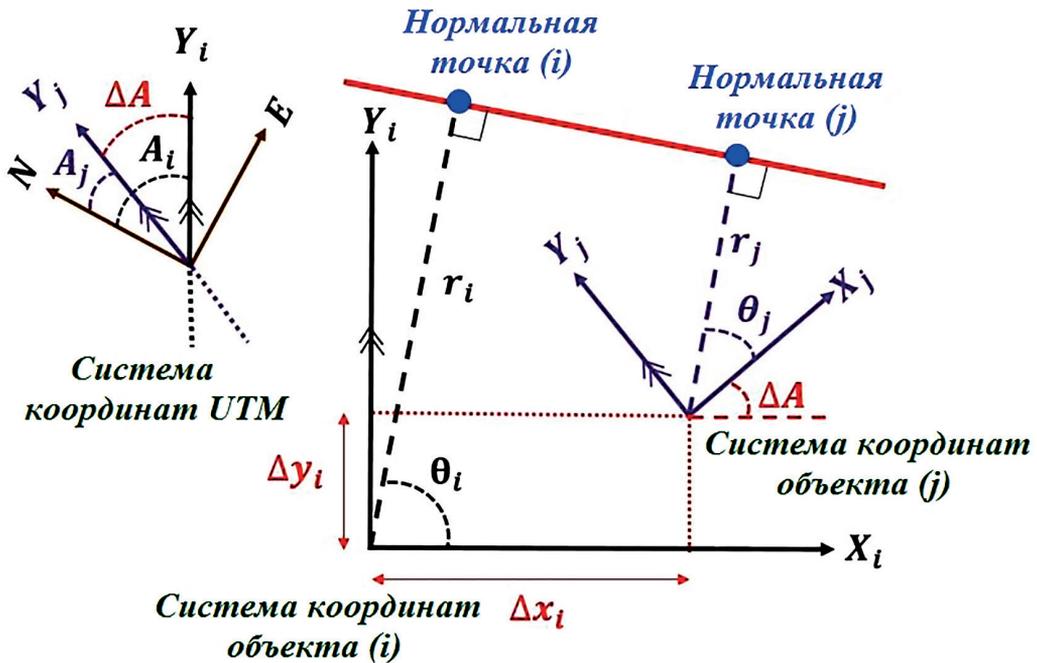


Рис. 1. Нормальные точки и системы координат для двух последовательных отсчетов, полученных от лидара

После получения данных от лидара начинается процесс выделения линий путем соединения первых двух точек, затем производится расчет их полярных координат r и θ . Далее добавляются последующие точки, причем после добавления каждой из них происходит перерасчет полярных параметров линии методом наименьших квадратов. Точки присоединяются к текущей линии, если они соответствуют заданной геометрической конфигурации и интенсивности [19]. Когда все линии будут сформированы, проверяется наличие сливающихся линий, чтобы повысить эффективность алгоритма на его последующих этапах. Если число линий равно U , то линии u и u' считаются сливающимися при следующих двух условиях:

$$r_i^u - r_i^{u'} \leq r_{\text{порог}}, \quad (1)$$

$$\theta_i^u - \theta_i^{u'} \leq \theta_{\text{порог}}, \quad (2)$$

где r_i^u , $r_i^{u'}$ – обновленные полярные дальности линий u и u' ; θ_i^u , $\theta_i^{u'}$ – их обновленные полярные углы; $r_{\text{порог}}$ и $\theta_{\text{порог}}$ – заданные пороговые значения для обоих условий.

На следующем этапе выполняется поисковая процедура для сопоставления извлеченных линий на текущем скане j и на предыдущем скане i . При этом используются измерения одометра и гироскопа. Сама процедура состоит в прогнозировании значений полярных дальностей и углов линий на текущем скане с помощью спрогнозированных изменений местоположения и курса:

$$r_{j|i} = r_i - (\Delta x_{одо} \cos \theta_i + \Delta y_{одо} \sin \theta_i), \quad (3)$$

$$\theta_{j|i} = \theta_i - \Delta A_{гироскоп}, \quad (4)$$

где $r_{j|i}$, $\theta_{j|i}$ – прогнозные значения полярной дальности и угла нормальной точки; $\Delta x_{одо}$, $\Delta y_{одо}$ – изменения координат в направлениях X_i и Y_i согласно показаниям одометра; $\Delta A_{гироскоп}$ – изменение направления в соответствии с данными гироскопа. Одометры определяют скорость объекта в направлении движения (т.е. в направлении Y_i), поэтому предполагается, что $\Delta x_{одо} = 0$. $\Delta y_{одо}$ можно вычислить путем умножения величины скорости, измеренной одометром, на интервал измерения. Следует отметить, что $r_{j|i}$ и $\theta_{j|i}$ будут соответствовать r_j и θ_j при идеальных значениях $\Delta x_{одо}$, $\Delta y_{одо}$ и $\Delta A_{гироскоп}$.

Совпадение подтверждается, если разница между полярными элементами на текущем скане j и соответствующими расчетными $j|i$ находятся в пределах установленных пороговых значений поискового пространства для полярных дальностей и углов σ_{rn} и $\sigma_{\theta m}$. Предполагается, что эти пространства учитывают погрешности измерений одометра и гироскопа, используемых при прогнозировании полярных дальностей и углов на следующем скане. Эти погрешности содержат неортогональность, рассогласование, масштабный коэффициент, проскальзывание, пробуксовку, изменение диаметра колеса и т.д. Согласно (3) и (4), линейное соотношение, связывающее относительное навигационное решение и полярные параметры для m совпавших линий, формируется так:

$$\begin{bmatrix} r_i - r_{j_i} \\ r_{i_2} - r_{j_2} \\ \vdots \\ r_{i_m} - r_{j_m} \\ \theta_i - \theta_{j_i} \\ \theta_{i_2} - \theta_{j_2} \\ \vdots \\ \theta_{i_m} - \theta_{j_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i_1} & \sin \theta_{i_1} & 0 \\ \cos \theta_{i_2} & \sin \theta_{i_2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \theta_{i_m} & \sin \theta_{i_m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta A_i \end{bmatrix} + e. \quad (5)$$

Соотношение (5) принимает параметрическую форму $l = G\hat{x} + e$, где l и \hat{x} – векторы наблюдений и неизвестных оцениваемых параметров; G – матрица коэффициентов; e – вектор белого шума $[e_1 \ e_2 \ \dots \ e_{2m}]^T$. Следовательно, решение этой системы уравнений методом наименьших квадратов по отношению к начальному кадру выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta A_i \end{bmatrix} = (G^T W G)^{-1} G^T W l = S l, \quad (6)$$

где W – весовая матрица измерений; S – псевдообратная матрица, проецирующая пространство наблюдений на пространство неизвестных оцениваемых параметров. Предполагается, что вес каждой пары совпадающих линий (т.е. разность их полярных параметров) прямо пропорционален количеству точек, составляющих каждую линию на сканах i и j , и обратно пропорционален нормальному расстоянию от датчика лидара до линии. Математически это можно представить в виде

$$W = \text{diag}(W_1, W_2, \dots, W_m, W_1, W_2, \dots, W_m), \quad (7)$$

$$W_M = \frac{n_{iM} + n_{jM}}{D_M}, \quad M = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

где W_M – вес линии M ; D_M – нормальное расстояние от датчика лидара до линии M ; n_{iM} и n_{jM} – количество точек, образующих линию M на кадрах i и j соответственно.

Для получения Δx_i и Δy_i требуется не менее двух совпадающих неколлинеарных линий, а для получения ΔA_i – только одна (рис. 2). Любая избыточность в количестве совпадающих линий используется для проведения FDE-процедуры в координатной области с помощью метода отбраковки решений (Solution Separation, SS), позволяющего выявить ложные совпадения линий на сканах лидара [19].

Относительное навигационное решение вычисляется после устранения ложных совпадений линий. Полученное изменение курса позволяет обновить значение азимута A_i движущегося объекта, а изменение координат преобразуется из связанной с объектом системы координат в локальную (с использованием значения азимута объекта), затем производится обновление координат местоположения объекта. Изменения в восточном ΔE и северном ΔN направлении можно записать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_i \\ \Delta N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A_i & \sin A_i \\ -\sin A_i & \cos A_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Полученные значения ΔE_i и ΔN_i используются для обновления координат объекта, которые вместе с обновленными значениями азимута принимаются начальными данными для следующего временного интервала решения задачи.

Нужно отметить, что привлечение коллинеарных совпадающих линий приводит к сингулярности решения, что может негативно повлиять на расчет обновленных координат. Чтобы этого не произошло, разность полярных углов задействуемых линий должна быть меньше установленного порогового значения $\theta_{\text{порог}}$, которое применяется непосредственно к параллельным линиям на одной и той же полосе дороги. С другой стороны, если параллельные линии находятся на противоположных полосах дороги, в пороговое значение, до компенсации невязки полярных углов, вводится угол 180° . Если относительное решение не может быть получено из-за отсутствия двух неколлинеарных совпадающих линий, данные об изменении курса получают от гироскопа, а об изменении координат – от одометра. При этом предполагается, что $\Delta x_i = 0$. Отсутствие линейных элементов на кадрах может быть связано с их недостаточным количеством в реальной обстановке или с наличием помех – других транспортных средств, деревьев, пешеходов и т.д.

Процедура разбивки дороги на отрезки позволяет предотвратить накопление угловых погрешностей и скорректировать значение угла азимута, которое обновля-

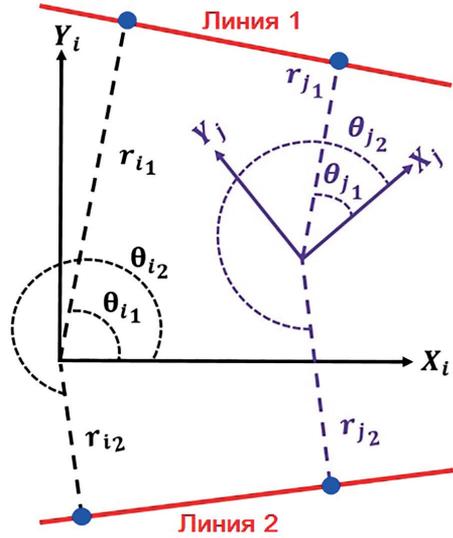


Рис. 2. Пример двух совпадающих линий на двух последовательных интервалах времени

ется только при условии, что объект движется без маневрирования в прямом направлении на заданном отрезке. Об этом можно судить по измерениям гироскопа [19]. Если разность текущего угла азимута и азимута отрезка (согласно карте) превышает установленный предел $\Delta A_{предел}$, то значение угла азимута обновляется в соответствии с заранее известным значением угла азимута сегмента на карте.

2. Новый способ калибровки одометра в реальном времени

Одометры изменяют пройденный путь с помощью датчика и зубчатого колеса, изготовленного из ферромагнитных материалов. При вращении колеса детектируется изменение магнитного поля между постоянным магнитом датчика и колесом. Измеряемые вариации магнитного потока преобразуются в выходное напряжение. Частота этого напряжения пропорциональна частоте вращения колеса. Обозначим измеренную частоту сигнала как f_s , тогда измеренное одометром значение скорости $v_{одо}$ может быть рассчитано по формуле [6]

$$v_{одо} = \frac{2\pi r_v}{N_{tw}} f_s, \quad (10)$$

где N_{tw} – количество зубцов у колеса, а r_v – его радиус.

На практике модель измерений одометра имеет расширенный вид с учетом различных источников погрешностей, например рассогласования оси датчика одометра с осями объекта, гироскопа и датчика лидара из-за некорректно выполненного монтажа. Такая погрешность является систематической, следовательно, она может быть исправлена путем предварительной калибровки, так что в нашей модели измерений ею можно пренебречь. Основную проблему представляют несистематические погрешности, связанные с непредсказуемым поведением колес, обусловленным внешними воздействиями. Верхний предел таких погрешностей спрогнозировать невозможно, и это главный недостаток одометров. К таким явлениям относятся проскальзывание и пробуксовка колес, а также изменение диаметра колес вследствие изменений скорости, давления, температуры и износа протекторов. Таким образом, при использовании измерений одометра необходимо учитывать масштабный коэффициент, который зависит от текущего состояния колес и условий окружающей среды. В результате уравнение (10) можно записать в расширенном виде:

$$v_{одо}^a = S_{одо} \frac{2\pi r_v}{N_{tw}} f_s + M_s + \epsilon_{одо}, \quad (11)$$

где $S_{одо}$ – введенный масштабный коэффициент; M_s – суммарная погрешность скорости, обусловленная рассогласованием оси колеса с осью датчика из-за неправильной установки последнего. Эта погрешность устраняется путем механического изменения углов установки колес для обеспечения их параллельности с направлением прямого движения объекта и друг с другом. Параметр $\epsilon_{одо}$ в формуле (11) обозначает остаточные несистематические погрешности, которые не удалось скомпенсировать с помощью введенного масштабного коэффициента. Сюда входят описанные выше несистематические погрешности, а также погрешности, связанные с ограниченной разрешающей способностью одометра (т.е. нечувствительностью к дробному значению количества зубцов). В контексте данной работы значения M_s и $\epsilon_{одо}$ приняты равными нулю.

На этом этапе предлагаемого алгоритма выполняется вычисление масштабного коэффициента для калибровки дальнейших показаний одометра. Каждому прямолинейному отрезку присваивается свой идентификационный номер, а его угловые координаты определяются до начала выработки навигационных параметров и запуска алгоритма (рис. 3). В процессе калибровки в режиме реального времени используются данные об углах поворота движущегося объекта относительно прямолинейного направления дороги в каждый момент времени. При вычислении этих значений с помощью датчиков лидара изначально предполагается, что здания по сторонам дороги стоят параллельно направлению движения объекта и при недоступности сигналов ГНСС ориентация может осуществляться по ним. Движение объекта в строго прямом направлении на заданном сегменте подтверждается только тогда, когда хотя бы две выявленные линии указывают на такой сценарий, при этом полярный угол одной из них составляет от $(-\Psi)$ до $(+\Psi)$, а второй – от $(180^\circ - \Psi)$ до $(180^\circ + \Psi)$, где Ψ – значение R_v , которым можно пренебречь (рис. 4). Во всех остальных случаях полученные значения полярных углов двух линий означают R_v .



Рис. 3. Выделение прямолинейных отрезков дороги (красные линии)

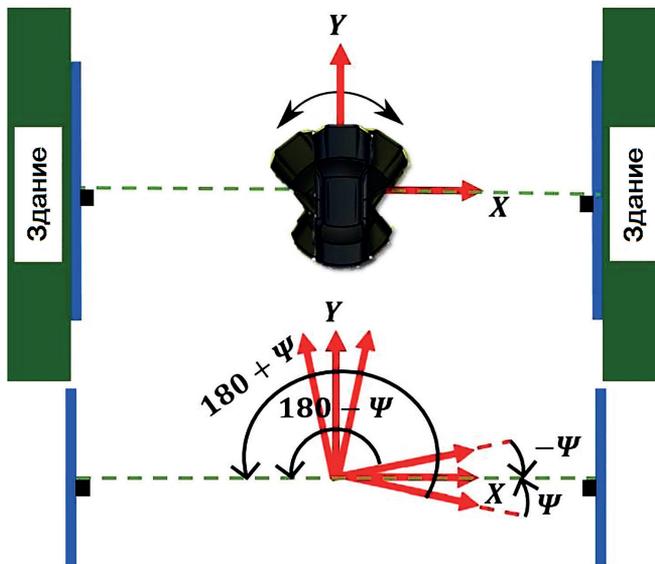


Рис. 4. Соотношение между углом поворота движущегося объекта и выделенными линиями, обозначающими здания

Для каждого прямолинейного отрезка вычисляется пройденное объектом общее расстояние в виде суммы значений Δy_{odo} . Таким образом, протяженность пройденного расстояния (рис. 5) можно вычислить на основании данных одометра L_{odo} по формуле

$$L_{odo} = \sum_{u=1}^U \Delta y_{odo}^u \cos R_v^u, \quad (12)$$

где верхний индекс u – это временной интервал в пределах прямолинейного отрезка; U – общее количество временных интервалов в пределах отрезка z . Следует отметить: допущение о том, что траекторию можно разбить на небольшие прямолинейные отрезки, достоверно в случае использования высокочастотных наблюдений. В настоящей статье эффективность алгоритма предлагается повысить за счет частоты выборки 10 Гц. Протяженность отрезка по данным одометра L_{odo} сравнивают с фактической, определяемой по карте ($L_{карта}$), поскольку расчетных данных о местоположении объекта достаточно для того, чтобы установить моменты начала и окончания движения объекта в пределах отрезка. Расчет масштабного коэффициента S_{odo_z} выполняется для коррекции показаний одометра на последующих интервалах:

$$S_{odo_z} = \frac{L_{карта}}{L_{odo}}. \quad (13)$$

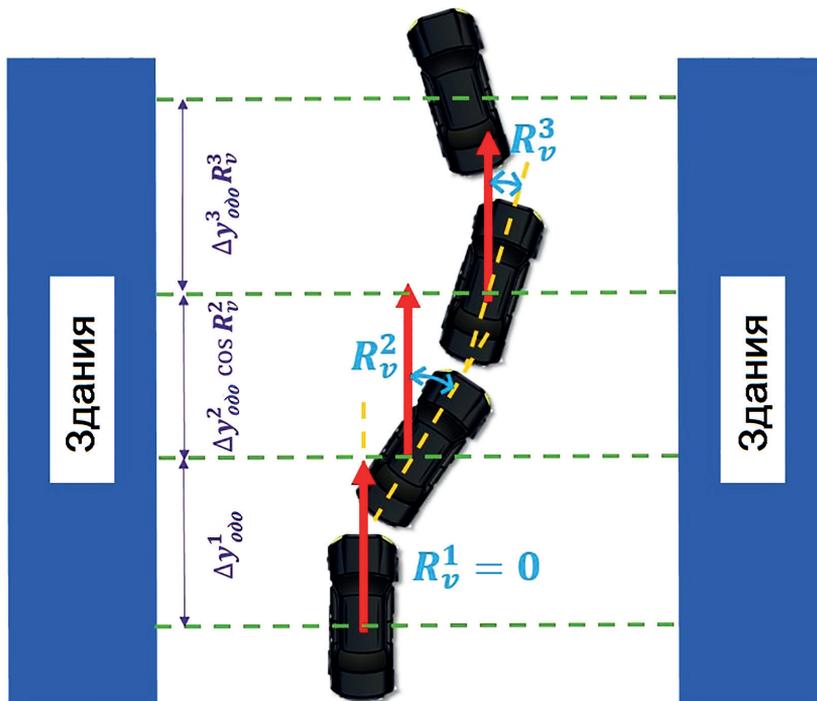


Рис. 5. Определение протяженности прямолинейного участка предложенным методом

Масштабный коэффициент, полученный на первом прямолинейном отрезке, действует в процессе навигации. После прохождения объектом следующего прямолинейного отрезка вычисляется новый масштабный коэффициент, а затем – среднее

арифметическое значение этих двух масштабных коэффициентов, которое используется в последующей навигации. То же самое происходит после прохождения объектом дополнительных прямолинейных участков (метод скользящего среднего значения):

$$S_{одо} = \sum_{z=1}^Z \frac{S_{одо_z}}{Z}, \quad (14)$$

где Z – общее количество пройденных прямолинейных отрезков; $S_{одо_z}$ – расчетный масштабный коэффициент для отрезка z . Следует учесть, что масштабные коэффициенты не должны меняться на кратковременных интервалах, но в алгоритме они обновляются, чтобы увеличить выборку при расчете математического ожидания для масштабного коэффициента. Если на каком-либо интервале две линии зданий на обеих сторонах дороги обеспечивают разные значения R_v (т.е. выходящие за пределы установленного порогового значения T_{R_v} , принятого равным 5°), то их ориентация неодинакова, следовательно, допущение о том, что линии зданий по обеим сторонам дороги параллельны прямому направлению дороги, не верно. В этом случае вычисление масштабных коэффициентов в пределах таких отрезков не выполняется.

3. Испытания представленного метода

В этом разделе описаны испытания предлагаемого алгоритма с использованием реальных данных, собранных в г. Кингстоне (провинция Онтарио, Канада). Эксперименты проводились на транспортном средстве, движущемся по траектории, показанной на рис. 6. Объект был оснащен лидаром, гироскопом и одометром. Был задействован лидар Velodyne Puck VLP-16 со следующими параметрами: вертикальное поле зрения – 30° с разрешением 2° , горизонтальное поле зрения – 360° с разрешением $0,1-0,4^\circ$, погрешность определения дальности – 3 см [22]. Характеристики МЭМС-гироскопа VTI: нестабильность смещения нуля – $1^\circ/\text{ч}$, случайный уход по углу – $0,45^\circ$, масштабный коэффициент – 2000 ppm, рабочий диапазон – $\pm 100^\circ/\text{с}$, уровень доверительной вероятности погрешностей – 99,7%. Одометр имеет 33 зубца. Эталонные координаты объекта определялись посредством комплексирования ИИМ тактического класса NovAtel IMU-KVN1750 с двухчастотным ГНСС-приемником, работающим в режиме высокоточного абсолютного позиционирования (PPP) по сильносвязанной схеме. Выборка измерений лидара и одометра производилась на частоте 10 Гц, а МЭМС-гироскопа VTI – 20 Гц. Соответственно, все полученные измерения синхронизировались на частоте 10 Гц и обрабатывались в смоделированном режиме реального времени. Эталонная система IMU-KVN1750 может обеспечивать скорость передачи информации до 200 Гц, однако она синхронизируется с другими датчиками на частоте 10 Гц с целью сравнения и оценки данных. Все рассчитываемые и сопоставляемые координаты являются абсолютными в системе WGS84 и проецируются в универсальную поперечную систему Меркатора.

Эксперимент длился около 16 мин, в течение этого времени было доступно достаточно данных ГНСС. Минимальное количество спутников, наблюдаемых при прохождении траектории, составляло 6, максимальное – 16, среднее число – 12. Чтобы проверить работу алгоритма на траектории, имитировалось пропадание сигнала ГНСС (рис. 6) в течение трех периодов продолжительностью по 5 минут каждый. Для обработки полученных с помощью предложенного алгоритма данных была создана специальная программа.

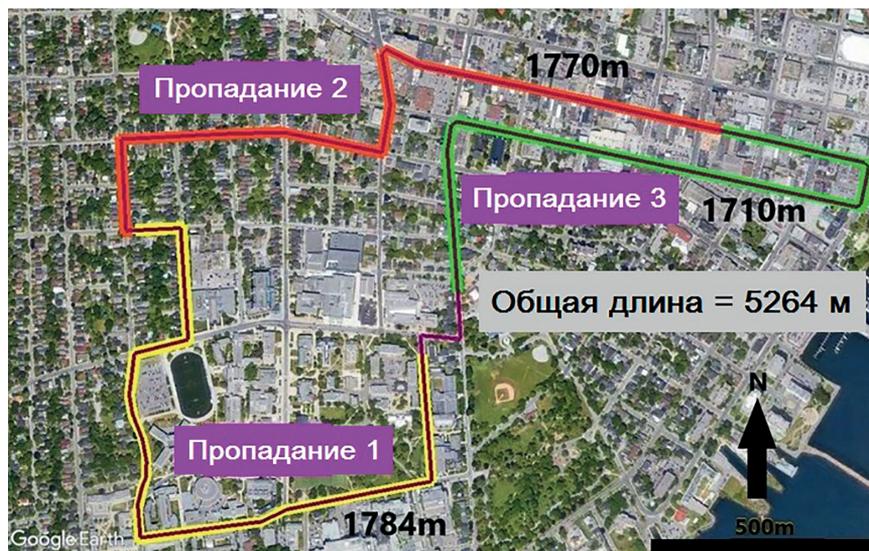


Рис. 6. Траектория объекта (сиреневая линия) и три участка, на которых отсутствует сигнал ГНСС: первый выделен желтым цветом, второй – красным, третий – зеленым (Google Earth)

Как было указано в разделе 2, для алгоритма были заданы различные параметры и пороговые значения. Чтобы оценить повышение точности после калибровки одометра в реальном времени, задействовались те же параметры и пороговые значения, что и в [19], см. табл. 1.

Таблица 1

Параметры и пороговые значения, используемые в алгоритме

Параметр/пороговое значение	Значение
$r_{\text{порог}}$	10 см
$\theta_{\text{порог}}$	0,7°
$\sigma_{r_{\text{поиск}}}$	15 см
$\sigma_{\theta_{\text{поиск}}}$	0,8°
$\Delta A_{\text{предел}}$	10°
Ψ	5°

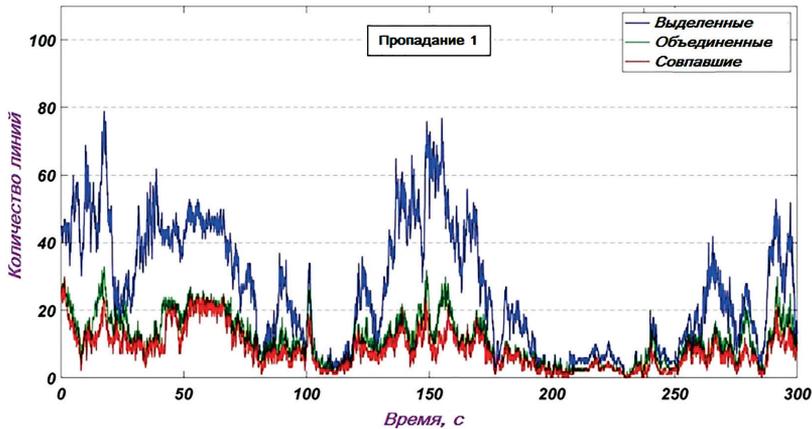
4. Влияние калибровки одометра на точность навигации

Рассмотрим результаты применения предложенного метода к полученным данным и оценки достигнутой точности навигации с учетом интервалов пропадания сигнала ГНСС.

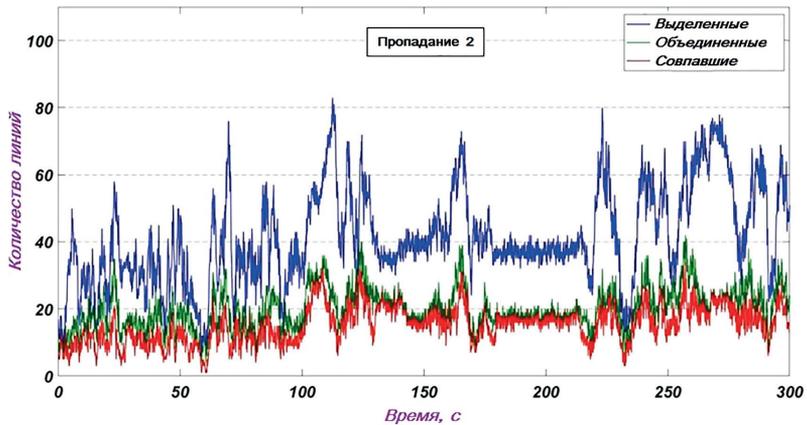
Количество выделенных линий на каждом интервале зависит в первую очередь от окружающей обстановки и используемых алгоритмов. Участки открытой местности менее подходят для извлечения прямых линий, чем территории городской и пригородной застройки. Во время второго и третьего пропадания сигнала удалось выделить и соотнести большее количество линий. Кроме того, на некоторых интервалах наблюдалась нехватка или отсутствие выделенных линий, особенно при пер-

вом пропадании сигнала. В целом среднее количество совпавших линий в периоды второго и третьего пропадания сигнала (15 и 14 линий) оказалось больше, чем при первом пропадании (всего 8 линий), поскольку в первом случае окружающие объекты были более низкой плотности. На рис. 7 показано количество выделенных, объединенных и совпавших линий на каждом из трех интервалов отсутствия сигнала. Дополнительно в табл. 2 приведена статистика по числу линий в трех категориях (выделенные, объединенные и совпавшие) на всех трех интервалах.

а)



б)



в)

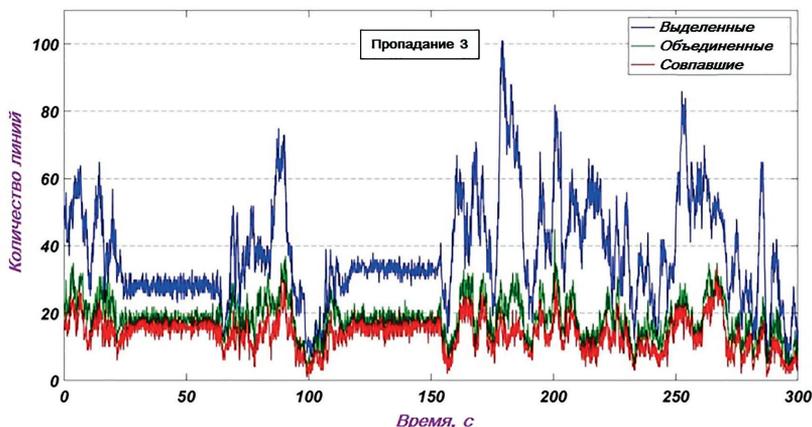


Рис. 7. Количество обнаруженных, объединенных и совпавших линий при первом, втором и третьем пропадании сигнала (а, б, в соответственно)

Калибровка одометра не повлияла на количество выделенных и объединенных линий: оно одинаково до и после нее. Вместе с тем среднее число совпавших линий изменилось после калибровки при каждом пропадании сигнала: сократилось с 9 до 8 и с 16 до 15 при первом и втором пропадании и увеличилось с 13 до 14 при третьем. Чтобы оценить линейную точность после применения предлагаемого метода калибровки в реальном времени, в табл. 3 приведены расчетные и эталонные расстояния при трех пропаданиях сигнала.

Т а б л и ц а 2

Количество линий трех категорий при трех пропаданиях сигнала

Период пропадания	Категория линий	Минимум	Максимум	Среднее кол-во
1	выделенные	0	79	26
	объединенные	0	33	11
	совпавшие	0	30	8
2	выделенные	5	83	42
	объединенные	4	42	20
	совпавшие	1	34	15
3	выделенные	4	101	38
	объединенные	3	45	18
	совпавшие	1	34	14

Т а б л и ц а 3

Расчетные и эталонные расстояния при трех пропаданиях сигнала до и после калибровки одометра

Номер пропадания	Расчетное расстояние (м)		Эталонное расстояние (м)	Погрешность (%)	
	До	После		До	После
1	1794,15	1789,8	1783,85	0,58	0,34
2	1761,9	1766,25	1770,35	0,48	0,23
3	1717,15	1715,15	1710,4	0,39	0,28

Результаты, представленные в табл. 3, демонстрируют значительные улучшения линейной точности после применения предлагаемого алгоритма калибровки одометра в реальном времени. Соотношения между расчетными расстояниями до и после калибровки составили 0,9976, 1,0025 и 0,9988 для трех периодов пропадания сигнала соответственно. Эти соотношения подтверждают влияние расчетных масштабных коэффициентов одометра (S_{ooo}) на процесс навигации. При первом пропадании сигнала масштабный коэффициент 0,9974 был получен на 5 прямых участках дороги, а при втором и третьем пропадании масштабные коэффициенты 0,9978 и 0,9972 рассчитывались на 3 участках.

Затем был выполнен стандартный эксперимент на той же траектории, чтобы сравнить дистанции, измеренные одометром, и опорные расстояния, вычисленные эталонной системой тактического класса точности. Таким образом, оценивалось соответствие между полученными с помощью алгоритма масштабными коэффициентами одометра и эталонным масштабным коэффициентом в условиях испытаний. Эталонный масштабный коэффициент составил 0,9969, следовательно, соответствие полученным с использованием алгоритма расчетным коэффициентам (0,9974, 0,9978 и 0,9972) составило примерно 0,05%, 0,09% и 0,03%.

Наконец, полученные навигационные решения сравнивались с эталонными после применения предлагаемого алгоритма. Рассогласования между ними вызваны горизонтальными погрешностями, которые наблюдались на каждом из трех интервалов отсутствия сигнала. Горизонтальная погрешность для каждого интервала рассчитывается по формуле $\sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2}$, где ΔE и ΔN – рассогласования между полученным навигационным решением и эталонным в восточном и северном направлениях соответственно. Расчетные погрешности демонстрируют уровень навигационной точности, который может быть достигнут с помощью предлагаемого алгоритма при продолжительном пропадании сигнала ГНСС (рис. 8). В табл. 4 приведена статистика горизонтальных погрешностей, включая максимальные, средние и среднеквадратические значения (округлены до 5 см).

Т а б л и ц а 4

Статистика горизонтальных погрешностей после применения алгоритма комплексирования при первом, втором и третьем пропадании сигнала

Интервал пропадания	Максимум (м)	Среднее значение (м)	Среднеквадратическое значение (м)
1	6,85	2,8	3,25
2	4,0	1,8	1,95
3	3,8	1,8	2,0

Из рис. 8 и табл. 4 видно, что предлагаемый алгоритм весьма эффективен, особенно в ситуациях, где можно выделить большое количество линейных элементов. Об этом свидетельствуют результаты, полученные в ходе второго и третьего пропадания сигнала, когда максимальные погрешности позиционирования в течение 5 мин (300 с) составили 4,0 и 3,8 м соответственно. Кроме того, при втором пропадании сигнала средняя погрешность составила 1,80 м, а среднеквадратическая – 1,95 м, а при третьем они были равны 1,8 и 2,0 м соответственно. Ожидалось, что при первом пропадании сигнала эффективность алгоритма будет не так высока, как при двух других, вследствие более низкой плотности окружающих объектов. При первом пропадании погрешность определения местоположения составила 6,85 м, а средняя и среднеквадратическая погрешности – 2,8 и 3,25 м соответственно. Сравнение достигнутых результатов с результатами, полученными в [19] без применения предлагаемого метода, продемонстрировало, что точность позиционирования значительно возросла. На рис. 9 показан достигнутый уровень повышения точности для трех интервалов пропадания сигнала (разница между погрешностями определения местоположения без применения алгоритма калибровки одометра и после его применения). В табл. 5 приведены точности, полученные после калибровки одометра (значения округлены до 5 см).

Т а б л и ц а 5

Точности, полученные после калибровки одометра в реальном времени

Интервал пропадания	Максимум (м)	Среднее (м)	Среднеквадратическое (м)
1	0,9	0,3	0,4
2	1,0	0,4	0,45
3	0,2	0,05	0,1

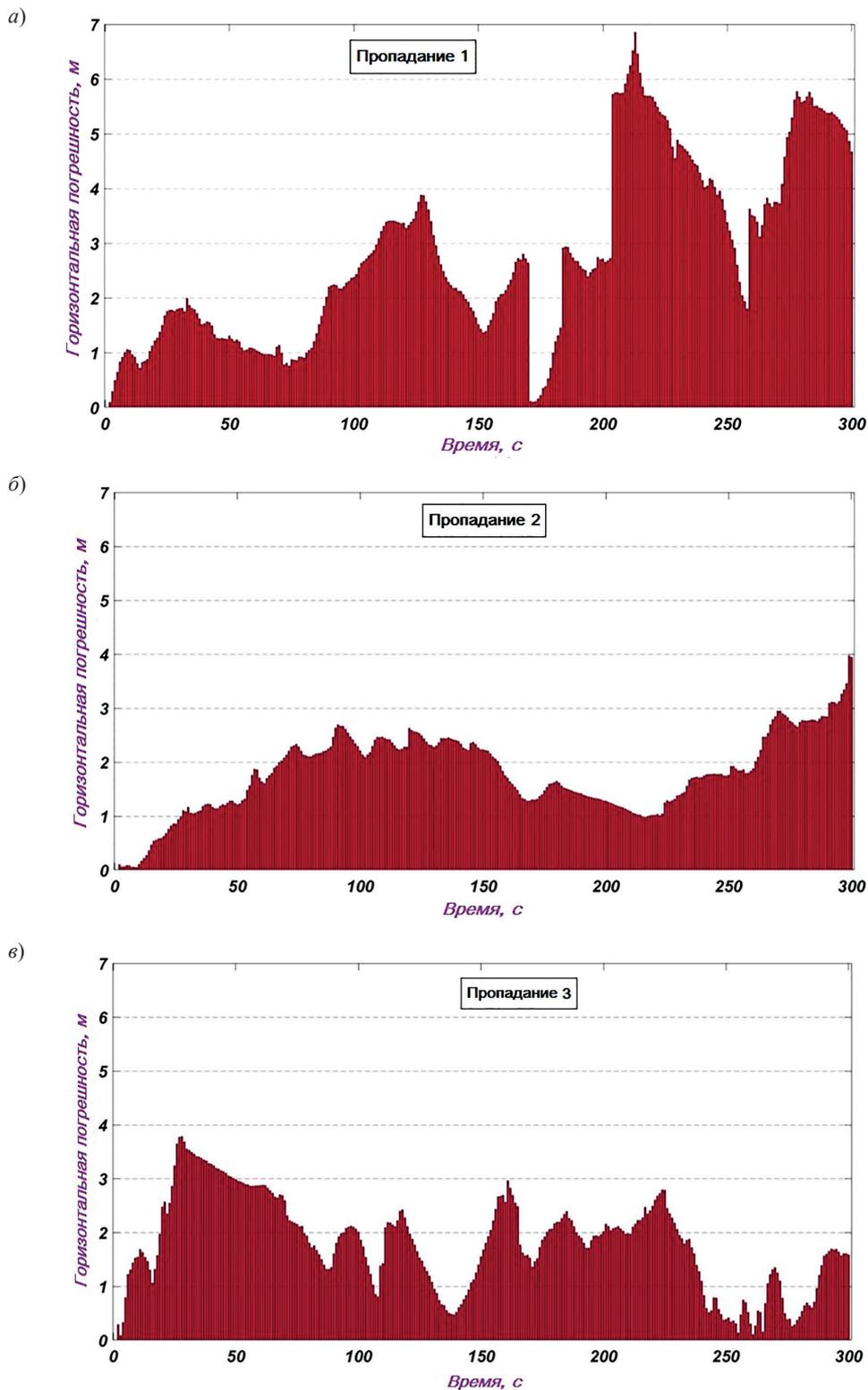


Рис. 8. Горизонтальные погрешности после применения предлагаемого алгоритма комплексирования при первом, втором и третьем пропадании сигнала ГНСС (а, б, в соответственно)

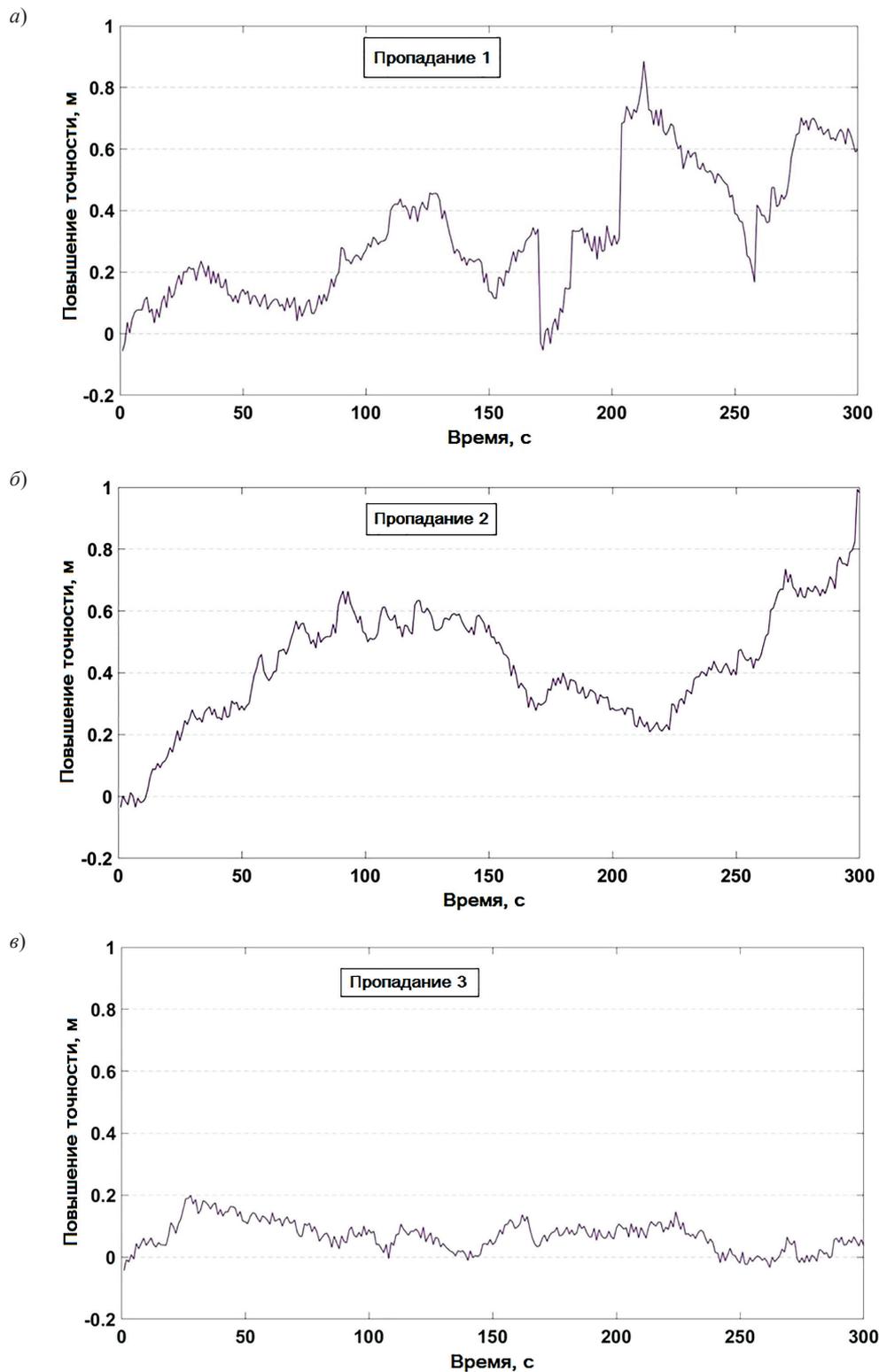


Рис. 9. Повышение точности после калибровки одометра при первом, втором и третьем пропадании сигнала ГНСС (а, б, в соответственно)

Из рис. 9 и табл. 5 следует, что точность навигации при трех пропаданиях сигнала ГНСС достигла соответственно 0,9, 1,0 и 0,2 м. Эти значения свидетельствуют о существенном влиянии калибровки одометра на навигационные решения, полученные в отсутствие сигнала ГНСС.

Заключение

Предложен новый метод калибровки одометра в режиме реального времени, разработанный на основе соответствующего алгоритма комплексирования данных лидара, гироскопов и одометров. Метод направлен на обеспечение непрерывной выработки навигационных данных, особенно в условиях длительного отсутствия сигналов ГНСС. Алгоритм включает сопоставление линейных элементов на сканируемых изображениях, которая подходит для навигации движущихся объектов с использованием ИТС. Предусмотрена процедура FDE для распознавания и отбраковки ложных совпадений линейных элементов на сканах, а также процедура разбивки трассы на отрезки, чтобы ограничить потенциальное накопление угловых погрешностей. Кроме того, подход предполагает обновление расчетного масштабного коэффициента в реальном времени, что критически важно для калибровки одометра в реальном времени.

Проведена оценка эффективности предложенного метода с использованием данных о фактической траектории движущегося объекта, в том числе путем моделирования пропадания сигнала ГНСС в течение трех пятиминутных периодов. Обработка данных осуществлялась с помощью специально созданного авторами программного обеспечения. Согласно полученным результатам, предложенный алгоритм весьма перспективен с точки зрения эффективности решения навигационной задачи, в частности в условиях городской застройки, где имеется возможность выделения большего количества линейных элементов для сопоставления. Примечательно, что во время второго и третьего периодов пропадания сигнала ГНСС эффективность алгоритма возросла за счет формирования большего числа линейных элементов: средняя погрешность определения координат при использовании предложенного упрощенного алгоритма обработки данных лидара составила соответственно 1,8 м и 1,8 м, а максимальная погрешность – 4,0 м и 3,8 м. Во всех трех случаях отсутствия сигнала ГНСС после калибровки одометра было отмечено существенное повышение точности навигации – на 0,9, 1,0 и 2,0 м соответственно. Полученные результаты указывают на эффективность и надежность предложенного метода в реальном времени для обеспечения устойчивой навигации в условиях отсутствия сигналов ГНСС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Report on the Performance** and Level of Integrity for Safety and Liability Critical Multi-applications, European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2015.
2. **Report on the Technical Analysis** of New Paradigms Increasing EGNSS Accuracy and Robustness in Vehicles, European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2015.
3. **Ninalalov, I., Merkurjev, I., Kubryak, O., and Astakhov, S.**, Methods for improving the accuracy of an autonomous orientation and navigation system based on micromechanical gyroscopes and optoelectronic sensors, *Proc. 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 2022, pp. 1–2.

4. Wang, Z., Wu, Y., and Niu, Q., Multi-sensor Fusion in Automated Driving: A Survey, *IEEE Access*, 2019, 8, pp 2847-2868.
5. Hassan, T., El-Mowafy, A., and Wang, K., A review of system integration and current integrity monitoring methods for positioning in intelligent transport systems, *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 43–60.
6. Golovan, A.A., INS/odometer integration: positional approach, *Gyroscopy and Navigation*, 2021, vol. 12, no. , pp. 186–194.
7. Yang, J.-C., Lin, C.-J., You, B.-Y., Yan, Y.-L., and Cheng T.-H., RTLIO: Real-time LiDAR-inertial odometry and mapping for UAVs, *Sensors*, 2021, 21(12), 3955. <https://doi.org/10.3390/s21123955>
8. Zhao, Z., Zhang, Y., Shi, J., Long, L., and Lu, Z., Robust lidar-inertial odometry with ground condition perception and optimization algorithm for UGV, *Sensors*, 2022, 22(19), 7424. doi: 10.3390/s22197424.
9. Zhang, S., Guo, Y., Zhu, Q., and Liu, Z., Lidar-IMU and wheel odometer based autonomous vehicle localization system, *Proc. 2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2019, pp. 4950–4955.
10. Zhou, B., Tang, Z., Qian, K., Fang, F., and Ma, X., A lidar odometry for outdoor mobile robots using NDT based scan matching in GPS-denied environments, *Proc. 2017 IEEE 7th Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2017, pp. 1230–1235.
11. Qin, C., Ye, H., Pranata, C.E., Han, J., Zhang, S., and Liu, M., LINS: A LiDAR-inertial state estimator for robust and efficient navigation, *Proc. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020, pp. 8899–8906.
12. Zhang, C., Ma, X., and Qin, P., LiDAR-IMU-UWB-based collaborative localization, *World Electric Vehicle Journal*, 2022, vol. 13, no. 2, 32. <https://doi.org/10.3390/wevj13020032>
13. Zhen, W., Zeng, S., and Scherer, S., Robust localization and localizability estimation with a rotating laser scanner, *Proc. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, pp. 6240–6245.
14. Jiang, P., Chen, L., Guo, H., Yu, M., and Xiong, J., Novel indoor positioning algorithm based on LiDAR/inertial measurement unit integrated system, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2021, vol. 18, no. 2, [https://doi.org.10.1177/1729881421999923](https://doi.org/10.1177/1729881421999923).
15. Jiang, L., Cai, B., Jian, W., and Tao, T., Grey theory based odometer scale factor calibration method for integrated navigation system, *Proc. 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2009, vol. 3, pp. 507–510.
16. Li, L., Sun, H., Yang, S., Ding, X., Wang, J., Jiang, J., Pu, X., Ren, C., Hu, N., and Guo, Y., Online calibration and compensation of total odometer error in an integrated system, *Measurement*, 2018, vol. 123, pp. 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.044>
17. Wu, Y., Goodall, C., and El-Sheimy, N., Self-calibration for IMU/odometer land navigation: Simulation and test results, *Proc. 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 2010, pp. 839–849.
18. Hassan, T., Fath-Allah, T., Elhabiby, M., Awad, A., and El-Tokhey, M., Detection of GNSS no-line of sight signals using LiDAR sensors for intelligent transportation systems. *Survey Review*, 2022, vol. 54, no. 385, pp. 301–309. <https://doi.org/10.1080/00396265.2021.1937458>
19. Hassan, T., Fath-Allah, T., Elhabiby, M., Awad, A., and El-Tokhey, M., A real-time algorithm for continuous navigation in intelligent transportation systems using 19 LiDAR-gyroscope-odometer integration, *Journal of Applied Geodesy*, 2023, vol. 17(1), pp. 65–77. DOI: 10.1515/jag-2022-0022
20. Borges, G.A. and Aldon, M.-J., Line extraction in 2D range images for mobile robotics, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2004, vol. 40, no. 3, pp. 267–297.
21. Soloviev, A., Bates, D., and Van Graas, F., Tight coupling of laser scanner and inertial measurements for a fully autonomous relative navigation solution, *Navigation*, 2007, vol. 54, no. 3, pp. 189–205.
22. Velodyne LiDAR Inc., VLP-16 User Manual, 63-9243 Rev. E, 2019.

El-Tokhey, M., Elhabiby, M., Tarek Hassan, T. (Faculty of Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt) Real-time Calibration of Odometer in Integration with LiDAR and Gyroscope for Map-aided Positioning During GNSS Outages, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32, no. 2 (125), pp. 46–65.

Abstract. In recent research, significant efforts have focused on achieving dependable real-time positioning in challenging environments, which is a crucial aspect for the development of various Intelligent Transportation Systems (ITS) applications. Given the limitations of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) in suburban and urban areas, where signal blockage is common, there is a growing need for an independent positioning system to provide accurate and continuous location data during GNSS disruptions. Previous studies have explored the combination of Light Detection and Ranging (LiDAR), gyroscopes, and odometer sensors for this purpose. This research builds upon that foundation by introducing a real-time calibration process for odometer readings, leveraging road maps and a road segmentation technique. To evaluate this method, real-world data collected from a moving vehicle was used, incorporating three five-minute simulated GNSS outages. These data were processed in a simulated real-time mode. The results from these tests are promising, showing notable improvements in navigation accuracy. Specifically, the application of the real-time calibration method led to an enhancement in positioning accuracy by 0.9m, 1.0m, and 0.2m for each of the GNSS outages, respectively, highlighting the critical role of this calibration process. The performance of the algorithm was improved during the second and third outages with the increased availability of line features. The proposed simpler LiDAR data processing algorithm could achieve mean positional errors of 1.8m and 1.8m, with maximum errors of 4.0m and 3.8m, respectively.

Key words: navigation, odometer, LiDAR, gyroscope, ITS.

Материал поступил 25.01.2024