

УДК 629.7.05
EDN HJLEKR

Н. Б. ВАВИЛОВА, А. А. ГОЛОВАН, Д. А. САФИН, В. Г. НАЗАРОВ

ИНФОРМАЦИОННАЯ ИНТЕГРАЦИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ОДОМЕТРА С УЧЕТОМ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ СМЕЩЕНИЙ ПРИБОРОВ

Рассматривается задача информационной интеграции показаний акселерометров и датчиков угловой скорости бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и данных одометра. Решение основано на использовании трехмерного инерциального и трехмерного кинематического одометрического счислений при непрерывной коррекции БИНС с помощью вычисляемых одометрических координат. Выделены значимые для точности интеграции факторы: неизвестные юстировочные углы, характеризующие ориентацию продольной оси объекта по отношению к приборным осям БИНС; линейные смещения приведенного центра БИНС относительно точки привязки данных одометра; погрешность масштабного коэффициента одометра; а также возможная рассинхронизация во времени первичных данных приборов. Описывается алгоритм комплексной обработки информации, где эти параметры включены в состав оцениваемых переменных. На основе результатов обработки представительных экспериментальных данных показана необходимость и эффективность предложенных алгоритмических решений.

Статья написана в развитие предыдущих публикаций авторов, посвященных рассматриваемой задаче.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, одометр, комплексная обработка информации, фильтр Калмана, точность оценивания.

1. Введение

В работе приводятся результаты исследования задачи информационной интеграции БИНС и одометра при навигации наземного транспортного средства и описывается разработанный алгоритм комплексной обработки информации (КОИ). Задача определения координат, составляющих вектора скорости и параметров ориентации

Вавилова Нина Борисовна. Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория управления и навигации, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва).

Голован Андрей Андреевич. Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией управления и навигации, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Действительный член общественного объединения «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0001-5628-248X.

Сафин Данияр Айратович. Аспирант, кафедра прикладной механики и управления, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

Назаров Виктор Георгиевич. Полковник, начальник ВУЦ, Московский государственный университет геодезии и картографии (Москва).

корпуса объекта востребована в таких областях, как навигация дорожных диагностических лабораторий, нефтяных и газовых внутритрубных инспекционных снарядов, беспилотных автомобилей и сельскохозяйственной техники и др.

Цель исследования – построить алгоритм КОИ, обосновать и показать с помощью обработки экспериментальных данных его эффективность при невозможности использования информации глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Статья является развитием и обобщением предыдущих публикаций авторов по рассматриваемой задаче для так называемого позиционного варианта [5] ее решения.

Первичной информацией для построения алгоритма КОИ служат показания инерциальных датчиков БИНС – акселерометров и датчиков угловой скорости (ДУС), а также данные одометра, регистрирующего число парциальных углов поворота измерительного колеса [8], которое при помощи масштабного коэффициента переводится в длину пройденного объектом пути. Для повышения точности решения в алгоритме предлагается учитывать следующие факторы (называемые далее возмущающими): смещение центра блока акселерометров БИНС относительно точки, к которой относятся данные одометра; погрешность масштабного коэффициента одометра; неизвестные юстировочные углы, характеризующие ориентацию объекта по отношению к приборным осям БИНС; запаздывание данных одометра относительно БИНС.

Здесь следует отметить, что упомянутые факторы уже учитываются в задачах авиационной и морской навигации (см., например, [24, 25]). В ряде публикаций по навигации наземной колесной техники они также рассматриваются (за исключением возможной рассинхронизации информационных потоков). В настоящей статье на основе обработки экспериментальных данных показаны эффективность и, как следствие, необходимость учета возмущающих факторов в алгоритмах КОИ.

При построении алгоритма КОИ используется подход, предложенный в [4–8]. Его суть состоит в том, что на основе первичной одометрической информации и данных БИНС об углах ориентации объекта вычисляются его координаты (эта операция называется здесь одометрическим счислением). Избыточность полученной позиционной информации в совокупности с данными БИНС о координатах дает возможность рассчитать оценки погрешностей БИНС в определении координат, составляющих вектора скорости и углов ориентации корпуса; погрешностей одометрического счисления координат; инструментальных погрешностей БИНС (смещений нулевых сигналов акселерометров и ДУС); масштабного коэффициента одометра; геометрических параметров взаимного положения БИНС и одометра; а также рассинхронизации их информационных потоков. В качестве алгоритма оценивания используется фильтр Калмана. На основе компенсации выработанных оценок формируются скорректированные параметры траектории – координаты и составляющие вектора скорости, параметры ориентации приборного трехгранника БИНС.

В работе приводится математическое описание алгоритма, учитывающего обозначенные факторы. Представленные экспериментальные данные получены от автомобиля-лаборатории, в котором была установлена БИНС навигационного класса точности. Путем обработки данных и при использовании ковариационного анализа исследуется оцениваемость параметров интеграционного алгоритма на типовых траекториях колесного транспортного средства, где присутствуют участки разгона, торможения, разворотов и движения задним ходом. Результаты обработки данных

эксперимента демонстрируют важность и эффективность учета параметров угловых и линейных смещений датчиков.

Задача учета этих факторов при навигации наземного объекта не нова. Так, например, работы [15, 16] посвящены оценке некоторых из них (смещение центра блока акселерометров БИНС относительно точки привязки данных одометра, погрешность масштабного коэффициента одометра, неизвестные юстировочные углы, определяющие ориентацию продольной оси объекта по отношению к приборным осям БИНС). Однако в этих работах предполагается обязательное использование данных ГНСС, что ограничивает применимость результатов при отсутствии спутниковой информации. В публикации [15] накладываются ограничительные условия на характер движения автомобиля (только по прямой), а информация от одометра интерпретируется как измерение продольной скорости объекта.

В работах [12–14] также затрагивается тема интеграции БИНС и одометра именно в случае, когда данные одометра трактуются как информация о продольной скорости объекта. В некоторых работах в вектор оцениваемых параметров включаются погрешность масштабного коэффициента одометра и углы несоосности системы «БИНС – одометр». В статье [12] учитывается разнесение мест крепления БИНС и одометра, которое считается известным фиксированным параметром, не подлежащим оцениванию. Однако эти публикации описывают разные схемы интеграции данных БИНС/ГНСС с дополнительными датчиками, в том числе и с одометром, и в них не анализируются преимущества учета факторов, влияющих на точность интеграции БИНС и одометра.

Работа [18] посвящена методу комплексирования информации БИНС и одометра с оцениванием погрешности масштабного коэффициента одометра и углов несоосностей системы «БИНС – одометр», при этом в качестве корректирующих измерений используются данные одометра о скорости. Здесь рассмотрены не все факторы, влияющие на точность интеграции: ничего не говорится о линейных смещениях приведенного центра БИНС относительно точки привязки данных одометра, а также о возможной рассинхронизации во времени первичных данных приборов.

В статье [21] рассматривается задача повышения точности интегрированной системы «БИНС – ГНСС» с помощью одометра в случае, когда его данные интерпретируются как информация о скорости. Предложены методы оценки погрешности масштабного коэффициента одометра и несоосностей системы «БИНС – одометр», а также компенсации заранее известного вектора разнесения БИНС и одометра. Результаты обработки данных эксперимента приведены только для случая устойчивого сигнала ГНСС или его кратковременных пропаданий.

В публикации [22] анализируется КОИ БИНС, одометра, лидара и дорожных карт. Предлагается методика коррекции показаний одометра с привлечением дорожных карт, что ограничивает применимость результатов в их отсутствие.

В работе [23] обсуждается задача интеграции данных БИНС и одометра. Приводится методика оценивания углов их несоосности, погрешности масштабного коэффициента одометра и компонент вектора разнесения БИНС и одометра, основанная на использовании двух фильтров. Результаты обработки экспериментальных данных приведены только для случая постоянно доступной информации ГНСС либо непродолжительной потери сигнала. Без ГНСС система задействует последние уточненные значения.

Следует еще раз подчеркнуть, что во всех упомянутых выше работах одометр рассматривается исключительно как источник информации о скорости объекта.

Статья [26] содержит результаты исследования интеграции данных БИНС и одометра при наиболее полном варианте учета возмущающих факторов. Рассмотрены также случаи, когда одометр измеряет либо пройденный путь, либо значение модуля скорости объекта. Авторы ограничиваются решением задачи только для горизонтальных координат, возможность вычисления параметров движения объекта в вертикальной плоскости не обсуждается.

Авторы данной статьи также опубликовали ряд работ в этой предметной области. Например, в [27–30] приведены результаты исследования задачи при скоростной интерпретации показаний одометра и использовании БИНС низкого класса точности, а также описано практическое применение алгоритмов. Работы [5–8] посвящены задаче в позиционном варианте, когда измерения одометра интерпретируются как приращения пройденного пути. При помощи первичной одометрической информации и данных БИНС вычисляются координаты объекта. Разработаны и реализованы для обработки экспериментальных данных алгоритмы коррекции БИНС. Основная идея их построения в [5–8] заключается в применении результатов кинематического одометрического счисления для позиционной коррекции БИНС при движении. Вывод коррекционных моделей и уравнений погрешностей счисления координат по одометру сделан с использованием системы обозначений механики корректируемых ИНС. В качестве возмущающих факторов, влияющих на точность интеграции, рассмотрены только параметры несоосности системы «БИНС – одометр» и погрешность масштабного коэффициента одометра.

В работах [24, 31], не связанных с задачей интеграции БИНС и одометра, анализируются возмущающие факторы задачи коррекции БИНС в случае, когда ее приведенный центр и источник позиционной и/или скоростной коррекции разнесены на корпусе объекта и допускается рассинхронизация их информационных потоков. Это достаточно типовая ситуация для прикладных задач навигации, поэтому базовые модели учета указанных факторов были рассмотрены также при интеграции БИНС и одометра.

Настоящая работа является развитием публикаций [5–8] для позиционного варианта решения задачи интеграции БИНС и одометра, основанного на привлечении результатов трехмерного кинематического одометрического счисления. Дополнительно в разделе 3 описано оценивание в реальном времени линейных смещений приведенного центра БИНС относительно точки привязки данных одометра, а также возможной рассинхронизации информации от БИНС и одометра. Пересмотрен подход к описанию юстировочных углов, определяющих ориентацию продольной оси объекта по отношению к приборным осям БИНС. Все значимые параметры оцениваются в совокупности, а эффективность применения предложенных моделей доказывается в разделе 4 итогами обработки экспериментальных данных с учетом и без учета указанных выше параметров и результатами ковариационного анализа.

Отметим, что проскальзывание и отрыв колес от поверхности дороги также являются важными факторами для рассматриваемой задачи, снижающими точность интегрированной системы «БИНС – одометр», поскольку они нарушают предположения о кинематических связях, лежащих в основе модели одометрического счисления координат некоторой точки объекта. Отдельные примеры исследований детектирования и компенсации последствий проскальзывания или подпрыгивания колес содержатся в публикациях [19–21]. В данной работе эти вопросы не рассматриваются.

2. Первичная информация

Далее используются представления об инерциальной навигации, терминология и обозначения, принятые в [9].

Предполагается, что на борту объекта имеется вычислитель, в который поступает информация от датчиков БИНС и одометра. В нем решается задача интеграции данных в реальном времени. Первичная информация БИНС и одометра также дополнительно регистрируется для возможной постобработки.

Данные БИНС

Приборной основой БИНС служит блок из трех акселерометров и трех ДУС, жестко связанных с корпусом объекта. Предполагается, что БИНС откалибрована должным образом и, соответственно, оси чувствительности датчиков близки к осям ортогонального правого трехгранника $Mz^0(Mz_1^0 z_2^0 z_3^0)$, называемого приборным (точка M – приведенная чувствительная масса блока акселерометров; ось Mz_1^0 направлена в сторону правого борта, ось Mz_3^0 – вверх, Mz_2^0 параллельна продольной оси объекта).

В проекциях на оси приборного трехгранника БИНС измеряются его абсолютная угловая скорость ω_{z^0} и внешняя сила f_{z^0} , действующая на точку M :

$$f_{z^0}' = f_{z^0} + \Delta f_{z^0}, \omega_{z^0}' = \omega_{z^0} - v_{z^0},$$

где f_{z^0}', ω_{z^0}' – результаты измерений инерциальных датчиков;

$\Delta f_{z^0} = (\Delta f_{z^0}^1, \Delta f_{z^0}^2, \Delta f_{z^0}^3)^T$, $v_{z^0} = (v_{z^0}^1, v_{z^0}^2, v_{z^0}^3)^T$ – векторы погрешностей измерений акселерометров и ДУС соответственно.

Данные одометра

Следуя [8], будем считать, что одометр регистрирует число парциальных углов поворота N_j измерительного колеса. Таким образом, первичными данными являются целые числа N_j – значения счетчика углов в интервале опроса $[t_0, t_j]$, где t_0 – начальное время, t_j – текущее время; $N_0 = 0$ (индекс j соответствует моменту времени t_j).

Введем точку M^d , к которой привязаны показания одометра, и отождествим ее с центром измерительного колеса. Предположим, что проскальзывание, отрыв колеса от поверхности дороги и его снос отсутствуют, касательная линия к траектории точки M^d лежит в плоскости колеса и совпадает по направлению с продольной осью объекта, а измерения одометра относятся к ненулевым колесам. Тогда пройденный точкой M^d путь s в интервале времени $[t_0, t_j]$ будет равен

$$s(t_j) = KN_j,$$

где K – масштабный коэффициент одометра, переводящий значения N_j в пройденный путь, м.

В интервале $[t_j, t_{j+1}]$ одометр измеряет приращение пройденного пути $\Delta s(t_{j+1})$, которое определяется соотношением

$$\Delta s'(t_{j+1}) = K' \Delta N_{j+1}, \Delta N_{j+1} = N_{j+1} - N_j,$$

где K' – известное числовое значение масштабного коэффициента одометра, которое может отличаться от его истинного значения K . Таким образом, $K' = (1 + \kappa)K$, где κ – погрешность масштабного коэффициента, т. е. инструментальная погрешность одометра.

В идеале направления продольных осей объекта и БИНС, установленной на его корпусе, должны совпадать. Это достигается с определенной точностью при проведении специальной технологической процедуры – юстировки посадочных мест БИНС. Опишем несовпадение направлений продольных осей БИНС и объекта при помощи двух углов поворота χ_3, χ_1 вокруг осей Mz_3^0, Mz_1^0 приборного трехгранника. Их приближенные значения χ'_1, χ'_3 известны с точностью до погрешностей $\Delta\chi_1, \Delta\chi_3$: $\chi'_1 = \chi_1 + \Delta\chi_1, \chi'_3 = \chi_3 + \Delta\chi_3$.

Примечание. Предполагается, что при установке БИНС на корпусе объекта угол поворота приборного трехгранника БИНС вокруг продольной оси системы координат, связанной с корпусом объекта, мал.

Начальные координаты объекта – географические широта φ_0 , долгота λ_0 и высота h_0 – считаются известными.

Введем также не известные заранее параметры, характерные для задачи КОИ БИНС и одометра.

Несовпадение центра блока акселерометров БИНС M с точкой, к которой привязаны измерения одометра M^d , зададим при помощи вектора l_{z0} от точки M к M^d с координатами в трехграннике M_{z0} : $l_{z0} = (l_{z1}, l_{z2}, l_{z3})^T$. При угловых движениях объекта разнесение этих двух точек вызывает эффект относительного орбитального движения, который необходимо учитывать при построении алгоритмов комплексирования.

Поскольку навигационные данные БИНС и измерения одометра поступают от независимых источников, допускается небольшая рассинхронизация информационных потоков. Пусть данные БИНС относятся к моменту времени t , а измерения одометра – к моменту $t - \tau$. Тогда величина τ также становится оцениваемым параметром задачи.

Итак, исходная информация включает следующие данные: f'_{z^0}, ω'_{z^0} – результат измерений акселерометров и ДУС; $\Delta s'$ – приращение пройденного пути по данным одометра; χ'_1, χ'_3 – известные параметры ориентации продольной оси объекта относительно продольной оси БИНС; f'_{z^0}, ω'_{z^0} – начальные координаты.

Параметры, оцениваемые и учитываемые в алгоритме КОИ: $\Delta f'_{z^0}, v_{z0}$ – погрешности измерений f'_{z^0}, ω'_{z^0} инерциальных датчиков; κ – погрешность масштабного коэффициента одометра; $\Delta\chi_1, \Delta\chi_3$ – погрешности данных χ'_1, χ'_3 об априорных значениях углов юстировки; l_{z1}, l_{z2}, l_{z3} – параметры смещения точек M и M^d ; τ – запаздывание информации одометра относительно данных БИНС.

3. Математическое описание алгоритма КОИ

Трехгранники (системы координат), используемые в алгоритме:

- гринвичский трехгранник $O\eta$ жестко связан с вращающейся Землей; ось $O\eta_3$ – ось вращения Земли, плоскость $O\eta_1, \eta_2$ совпадает с плоскостью экватора, плоскость $O\eta_1, \eta_3$ – плоскость Гринвичского меридиана;
- опорный трехгранник Mx^0 ориентирован в географической координатной сетке; ось Mx_3^0 – направление географической вертикали, ось Mx_1^0 лежит в плоскости параллели и направлена на восток, ось Mx_2^0 лежит в плоскости меридиана и направлена на север.

Ориентация произвольного географического трехгранника Mx относительно Mx^0 определяется азимутальным углом χ : переход от Mx^0 к Mx осуществляется поворотом против часовой стрелки на угол χ вокруг оси Mx_3 . Закон изменения угла χ может быть задан различным образом, например так, что проекция абсолютной или относительной угловой скорости трехгранника на вертикальную ось равна нулю (это часто используется в авиационных приложениях).

Матрица ориентации $B_{x\eta}$ географического трехгранника Mx относительно гринвичского $O\eta$ имеет вид

$$B_{x\eta} = \begin{pmatrix} -\sin \lambda \cos \chi - \cos \lambda \sin \varphi \sin \chi & -\sin \lambda \sin \varphi \sin \chi + \cos \lambda \cos \chi & \cos \varphi \sin \chi \\ \sin \lambda \sin \chi - \cos \lambda \sin \varphi \cos \chi & -\sin \lambda \sin \varphi \cos \chi - \cos \lambda \sin \chi & \cos \varphi \cos \chi \\ \cos \lambda \cos \varphi & \sin \lambda \cos \varphi & \sin \varphi \end{pmatrix},$$

где φ, λ – географические широта и долгота точки M .

Компоненты матрицы ориентации $C_{z^0x} = C_{xz^0}^T$ приборного трехгранника Mz^0 относительно опорного Mx зависят от углов ориентации корпуса объекта – угла гироскопического курса ψ_g , крена γ и тангажа ϑ , вырабатываемых БИНС:

$$C_{xz^0} = \begin{pmatrix} \cos \psi_g \cos \gamma + \sin \psi_g \sin \vartheta \sin \gamma & \sin \psi_g \cos \vartheta & \cos \psi_g \sin \gamma - \sin \psi_g \sin \vartheta \cos \gamma \\ -\sin \psi_g \cos \gamma + \cos \psi_g \sin \vartheta \sin \gamma & \cos \psi_g \cos \vartheta & -\sin \psi_g \sin \gamma - \cos \psi_g \sin \vartheta \cos \gamma \\ -\cos \vartheta \sin \gamma & \sin \vartheta & \cos \vartheta \cos \gamma \end{pmatrix},$$

где $\psi_g = \psi + \chi$, ψ – угол истинного курса.

Трехгранник My^0 – это модельное представление приборного трехгранника Mz^0 , где $\omega_{y^0} = \omega_{z^0}$ – абсолютная угловая скорость My^0 по информации ДУС (в дальнейшем все модельные параметры отмечаются верхним индексом «штрих»). Вектор малого поворота β_{y^0} определяет ориентацию My^0 относительно Mz^0 .

Аналогично трехгранник My – модельное представление опорного географического трехгранника Mx . В проекциях на оси My в бортовом вычислителе рассчитывается вектор скорости модельной точки M' относительно Земли, а с использованием матрицы ориентации $B'_{x\eta}$ вычисляются географические координаты точки M' и угол χ' .

C'_{z^0x} – матрица ориентации трехгранника My^0 относительно My . Вектор малого поворота β_y в осях трехгранника My принимает вид $\beta_y = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T = C'_{z^0x} \beta_{y^0}$.

Инерциальное навигационное счисление и решение задачи ориентации осуществляются на основе опорных уравнений, записанных в осях географического трехгранника Mx с относительно свободной ориентацией в азимуте ($\Omega'_3 = 0$). Такая форма уравнений движения традиционна для алгоритмов серийно выпускаемых авиационных ИНС. Отличительная особенность предлагаемого варианта заключается во всеширотности алгоритмов инерциального счисления. Например, в [9] приводится замкнутая система уравнений для такого счисления:

$$\begin{aligned} \dot{V}'_1 &= 2u'_3 V'_2 - (\Omega'_2 + 2u'_2) V'_3 + f'_1, \\ \dot{V}'_2 &= -2u'_3 V'_1 + (\Omega'_1 + 2u'_1) V'_3 + f'_2, \\ \dot{V}'_3 &= -(2u_1 + \Omega_1) V'_2 + (2u_2 + \Omega_2) V'_1 + f'_3 - g + k_2 (h' - h^{d'}), \\ \dot{h}' &= V'_3 + k_1 (h' - h^{d'}), \end{aligned} \quad (1)$$

где V'_1, V'_2, V'_3 – компоненты вектора линейной скорости модельной точки M' относительно Земли V'_x ; $f_x = (f_1, f_2, f_3)^T = C'_{xz0} f_{z0}$; h'^d – высота, полученная с использованием одометрического счисления; $\Omega'_x = (\Omega'_1, \Omega'_2, 0)^T$ – относительная угловая скорость трехгранника $Mу$,

$$\begin{aligned}\Omega'_1 &= -\frac{V'_2}{R_E} - \frac{e^2}{a} b'_{23} [b'_{13} V'_1 + b'_{23} V'_2]; \\ \Omega'_2 &= \frac{V'_1}{R_E} + \frac{e^2}{a} b'_{13} [b'_{13} V'_1 + b'_{23} V'_2]; \\ \Omega'_3 &= 0,\end{aligned}$$

где b'_{ij} – компоненты матрицы $B'_{x\eta}$; $u'_x = (u'_1, u'_2, u'_3)^T$ – вектор угловой скорости вращения Земли в осях трехгранника Mx , $u'_x = (ub'_{13}, ub'_{23}, ub'_{33})^T$; g – абсолютное значение удельной силы тяжести; e^2 и a – квадрат первого эксцентриситета и большая полуось земного эллипсоида; R_E, R_N – радиусы кривизны меридионального сечения и первого вертикала,

$$\begin{aligned}R_E &= \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi'}}; \\ R_N &= \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi')^{\frac{3}{2}}}}.\end{aligned}$$

Значения k_1, k_2 в (1) выбираются на основе упрощенной двумерной модели уравнений погрешностей вертикального канала таким же образом, как при построении простейшего алгоритма демпфирования вертикального канала БИНС/ИНС при помощи показаний баровысотомера [9].

Численное решение задачи ориентации БИНС основывается на уравнениях Пуассона:

$$\begin{aligned}\dot{B}'_{x\eta} &= \hat{\Omega}'_x B'_{x\eta}; \\ \dot{C}'_{xz^0}{}^T &= \hat{\omega}'_{z^0} C'_{xz^0}{}^T - C'_{xz^0}{}^T (\hat{u}'_x + \hat{\Omega}'_x),\end{aligned}$$

где индексом $\wedge$ обозначена кососимметрическая матрица, составленная по определенному правилу из компонент соответствующего вектора.

Например, для вектора $u'_x = (u'_1, u'_2, u'_3)^T$

$$\hat{u}'_x = \begin{pmatrix} 0 & u'_3 & -u'_2 \\ -u'_3 & 0 & u'_1 \\ u'_2 & -u'_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

В данном алгоритме автономной навигации выходные параметры (автономные координаты, углы курса, крена и тангажа) определяются из уравнений

$$\begin{aligned}\lambda' &= \arctg \frac{b'_{32}}{b'_{31}}; \varphi' = \arctg \frac{b'_{33}}{\sqrt{b'^2_{13} + b'^2_{23}}}; \chi' = \arctg \frac{b'_{13}}{b'_{23}}; \\ \psi' &= \arctg \frac{c'_{21}}{c'_{22}} - \chi'; \gamma' = -\arctg \frac{c'_{31}}{c'_{33}}; \vartheta' = \arctg \frac{c'_{32}}{\sqrt{c'^2_{33} + c'^2_{31}}}.\end{aligned}$$

При кинематическом одометрическом счислении географических координат используются: углы истинного курса ψ' , тангажа ϑ' и крена γ' , полученные с помощью алгоритма инерциального счисления; приращение пройденного пути точки M^d , измеренное одометром; априорные значения углов несоосности $\varkappa'_1, \varkappa'_3$ продольных осей объекта и БИНС (если они неизвестны, то в нижеследующих соотношениях их нужно приравнять к нулю).

Далее предполагается, что модуль вектора перемещения точки M^d на интервале $[t_j, t_{j+1}]$ приблизительно равен величине $\Delta s_{(t_{j+1})}$, тогда вектор перемещения точки M^d на интервале $[t_j, t_{j+1}]$ в осях географического трехгранника $\Delta s_{x^0}^{d'}$ вычисляется на основе одометрической информации:

$$\Delta s_{x^0}^{d'} = \begin{pmatrix} \Delta s_E^{d'} \\ \Delta s_N^{d'} \\ \Delta s_{UP}^{d'} \end{pmatrix} = C'_{x^0 y^0} \Delta s_{z^0}^{d'}(t_{j+1}) = C'_{x^0 y^0} \begin{pmatrix} -\cos \varkappa'_1 \sin \varkappa'_3 \\ \cos \varkappa'_1 \cos \varkappa'_3 \\ \sin \varkappa'_1 \end{pmatrix} \Delta s'(t_{j+1}). \quad (2)$$

Здесь

$$C'_{x^0 y^0} = \begin{pmatrix} \cos \psi' \cos \gamma' + \sin \psi' \sin \vartheta' \sin \gamma' & \sin \psi' \cos \vartheta' & \cos \psi' \sin \gamma' - \sin \psi' \sin \vartheta' \cos \gamma' \\ -\sin \psi' \cos \gamma' + \cos \psi' \sin \vartheta' \sin \gamma' & \cos \psi' \cos \vartheta' & -\sin \psi' \sin \gamma' - \cos \psi' \sin \vartheta' \cos \gamma' \\ -\cos \vartheta' \sin \gamma' & \sin \vartheta' & \cos \vartheta' \cos \gamma' \end{pmatrix}.$$

Запишем уравнения для одометрических географических координат $\lambda^{d'}(t_{j+1})$, $\varphi^{d'}(t_{j+1})$, $h^{d'}(t_{j+1})$ [8]:

$$\begin{aligned} \lambda^{d'}(t_{j+1}) &= \lambda^{d'}(t_j) + \frac{\Delta s_E^{d'}}{(R_E + h^{d'}) \cos \varphi^{d'}}; \\ \varphi^{d'}(t_{j+1}) &= \varphi^{d'}(t_j) + \frac{\Delta s_N^{d'}}{R_N + h^{d'}}; \\ h^{d'}(t_{j+1}) &= h^{d'}(t_j) + \Delta s_{UP}^{d'}. \end{aligned} \quad (3)$$

Заметим, что в инерциальном и одометрическом счислении используются разные опорные трехгранники – соответственно географический Mx с относительно свободной ориентацией в азимуте и географический $M^{d x^0}$ с ориентацией по сторонам света. Подчеркнем, что на свойства погрешностей обоих счислений не влияет выбор системы координат, в которой их уравнения записываются.

Математические модели инструментальных погрешностей

В дальнейшем будем полагать, что инструментальные погрешности акселерометров содержат систематическую составляющую $\Delta f_{z^0}^0 = (\Delta f_{z^1}^0, \Delta f_{z^2}^0, \Delta f_{z^3}^0)^T$ и высокочастотную $\Delta f_{z^0}^s = (\Delta f_{z^1}^s, \Delta f_{z^2}^s, \Delta f_{z^3}^s)^T$, которая считается белым шумом. С учетом сказанного вектор инструментальных погрешностей $\Delta f_{z^0} = f_{z^0}' - f_{z^0}^0$ принимает вид

$$\Delta f_{z^0} = \Delta f_{z^0}^0 + \Delta f_{z^0}^s. \quad (4)$$

Погрешности ДУС записываются аналогично:

$$v_{z^0} = v_{z^0}^0 + v_{z^0}^s, \quad (5)$$

где $v_{z^0}^0 = (v_{z^1}^0, v_{z^2}^0, v_{z^3}^0)^T$ – систематические составляющие погрешностей;
 $v_{z^0}^s = (v_{z^1}^s, v_{z^2}^s, v_{z^3}^s)^T$ – белый шум.

Систематические составляющие считаются константами:

$$\begin{aligned} \dot{v}_{z_i}^0 &= 0; \\ \Delta \dot{f}_{z_i}^0 &= 0, i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (6)$$

Постоянными величинами предполагаются также параметры запаздывания данных и смещения точек M, M^d :

$$\dot{t} = 0; \quad \dot{l}_{z_i} = 0, i = 1, 2, 3. \quad (7)$$

Будем считать, что k может изменяться, например, из-за упругой деформации колеса транспортного средства при торможении или ускорении, а величины $\Delta \mathcal{U}_1, \Delta \mathcal{U}_3$ меняются, в частности, при угловых движениях корпуса относительно подвески. Для параметров $k, \Delta \mathcal{U}_1, \Delta \mathcal{U}_3$ принимаем модель случайных блужданий:

$$\dot{k} = q_k; \quad \Delta \dot{\mathcal{U}}_{1,3} = q_{\mathcal{U}_{1,3}}, \quad (8)$$

где $q_k, q_{\mathcal{U}_1}, q_{\mathcal{U}_3}$ – белые шумы с нулевым математическим ожиданием и заданными интенсивностями.

Уравнения погрешностей БИНС

Запишем уравнения погрешностей БИНС в осях модельного географического трехгранника M_u с относительно свободной ориентацией в азимуте [9]:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_1 &= \delta V_1 + \beta_3 V_2' - \left(\alpha_2 - \frac{\Delta y_1}{a} \right) V_3' - \Omega_2' \Delta y_3; \\ \Delta \dot{V}_2 &= \delta V_2 - \beta_3 V_1' + \left(\alpha_1 + \frac{\Delta y_2}{a} \right) V_3' + \Omega_1' \Delta y_3; \\ \Delta \dot{h} &= \delta V_3 + \alpha_2 V_1' - \alpha_1 V_2' - k_1 (\Delta h - \Delta h^d); \\ \delta \dot{V}_1 &= 2u_3' \delta V_2 - (\Omega_2' + 2u_2') \delta V_3 + \Delta f_1 - \alpha_2 g_e; \\ \delta \dot{V}_2 &= -2u_3' \delta V_1 + (\Omega_1' + 2u_1') \delta V_3 + \Delta f_2 + \alpha_1 g_e; \\ \delta \dot{V}_3 &= (\Omega_2' + 2u_2') \delta V_1 - (\Omega_1' + 2u_1') \delta V_2 + \Delta f_3 + 2\omega_0^2 \Delta h^d - k_2 (\Delta h - \Delta h^d); \\ \dot{\alpha}_1 &= -\frac{\delta V_2}{a} + \omega_3' \alpha_2 - \beta_3 u_2' - \frac{\Delta y_1}{a} u_3' + v_1 - \Omega_1' \frac{\Delta y_3}{a}; \\ \dot{\alpha}_2 &= \frac{\delta V_1}{a} - \omega_3' \alpha_1 + \beta_3 u_1' - \frac{\Delta y_2}{a} u_3' + v_2 - \Omega_2' \frac{\Delta y_3}{a}; \\ \dot{\beta}_3 &= \omega_2' \left(\alpha_1 + \frac{\Delta y_2}{a} \right) - \omega_1' \left(\alpha_2 - \frac{\Delta y_1}{a} \right) + v_3, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta h$ (или Δy_3) – погрешности определения местоположения объекта; $\delta V_1, \delta V_2, \delta V_3$ – динамические погрешности определения составляющих относительной скорости; α_1, α_2 – угловые погрешности построения приборной вертикали; β_3 – азимутальная кинематическая погрешность.

Векторы погрешностей измерений:

$$v_x = (v_1, v_2, v_3)^T = C'_{xz^0} v_{z^0};$$

$$\Delta f_x = (\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3)^T = C'_{xz^0} \Delta f_{z^0}.$$

Полную систему уравнений погрешностей получаем при помощи формирующих уравнений для параметров инструментальных погрешностей датчиков БИНС (4)–(6).

Уравнения погрешностей одометрического счисления

Особенность уравнений погрешностей одометрического счисления состоит в том, что в правые их части входят угловые погрешности БИНС, поскольку данные об ориентации объекта, полученные от БИНС, используются в одометрическом счислении:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{y}_E^d &= \Delta y_E^d \left(-\frac{V'_N}{a} \tan \varphi^{d'} + \frac{V'_{up}}{a} \right) + \Delta y_N^d \frac{V'_E}{a} \tan \varphi^{d'} - \Delta h^d \frac{V'_E}{a} + \\ &+ \Delta y_1 \frac{\cos \chi' \tan \varphi' V'_N}{a} - \Delta y_2 \frac{\sin \chi' \tan \varphi' V'_N}{a} - \sin \chi' V'_{up} \alpha_1 - \\ &- \cos \chi' V'_{up} \alpha_2 + \beta_3 V'_N + c_{13} V_{s_2}^d \Delta \chi_1 - c_{11} V_{s_2}^d \Delta \chi_3 + c_{12} V_{s_2}^d \kappa; \\ \Delta \dot{y}_N^d &= \Delta y_N^d \frac{V'_{up}}{a} - \Delta h^d \frac{V'_N}{a} - \Delta y_1 \frac{\cos \chi' \tan \varphi' V'_E}{a} + \Delta y_2 \frac{\sin \chi' \tan \varphi' V'_E}{a} + \\ &+ \cos \chi' V'_{up} \alpha_1 - \sin \chi' V'_{up} \alpha_2 - \beta_3 V'_E + c_{23} V_{s_2}^d \Delta \chi_1 - c_{21} V_{s_2}^d \Delta \chi_3 + c_{22} V_{s_2}^d \kappa, \\ \Delta \dot{h}^d &= -\alpha_1 V'_2 + \alpha_2 V'_1 + c_{33} V_{s_2}^d \Delta \chi_1 - c_{31} V_{s_2}^d \Delta \chi_3 + c_{32} V_{s_2}^d \kappa. \end{aligned} \quad (10)$$

где $V_{s_2}^d$ – скорость объекта вдоль продольной оси;

$\Delta y_E^d, \Delta y_N^d, \Delta h^d$ (или Δy_{up}^d) – погрешности определения местоположения объекта в осях модельного географического трехгранника, ориентированного в географической сетке;

c_{ij} – компоненты матрицы $C'_{x^0, z^0}(\psi', \vartheta', \gamma')$.

Полную систему уравнений погрешностей (10) получаем при помощи формирующих уравнений (8).

Корректирующие измерения

Для позиционной коррекции БИНС используются географические координаты точки M^d , полученные путем одометрического счисления.

Сформируем вектор $z^{i-o} = (z_1^{i-o}, z_2^{i-o}, z_3^{i-o})^T$ позиционных корректирующих измерений:

$$\begin{aligned} z_1^{i-o}(t_j) &= (\lambda'(t_j) - \lambda^{d'}(t_j)) R'_E \cos \varphi'; \\ z_2^{i-o}(t_j) &= (\varphi'(t_j) - \varphi^{d'}(t_j)) R'_N; \\ z_3^{i-o}(t_j) &= (h'(t_j) - h^{d'}(t_j)). \end{aligned} \quad (11)$$

Запишем математическую модель измерений с учетом смещения точек M и M^d и запаздывания информации одометра:

$$\begin{aligned} z_1^{i-o} &= \Delta y_1 \cos \chi' - \Delta y_2 \sin \chi' - \Delta y_E^d + \tau V'_E - c_{11} l_{z_1} - c_{12} l_{z_2} - c_{13} l_{z_3} + r_\lambda^*; \\ z_2^{i-o} &= \Delta y_1 \sin \chi' + \Delta y_2 \cos \chi' - \Delta y_N^d + \tau V'_N - c_{21} l_{z_1} - c_{22} l_{z_2} - c_{23} l_{z_3} + r_\varphi^*; \\ z_3^{i-o} &= \Delta h - \Delta h^d + \tau V'_{UP} - c_{31} l_{z_1} - c_{32} l_{z_2} - c_{33} l_{z_3} + r_h^*, \end{aligned} \quad (12)$$

где $r_\lambda^*, r_\varphi^*, r_h^*$ – остаточные погрешности измерений (белые шумы).

Задача оценивания

С использованием алгоритма КОИ решается задача оценивания вектора состояния

$$\begin{aligned} x &= (\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \alpha_1, \alpha_2, \beta_3, v_{z_1}^0, v_{z_2}^0, v_{z_3}^0, \\ &\Delta f_{z_1}^0, \Delta f_{z_2}^0, \Delta f_{z_3}^0, \Delta y_E^d, \Delta y_N^d, \Delta y_{UP}^d, \kappa, \Delta \kappa_1, \Delta \kappa_3, l_{z_1}, l_{z_2}, l_{z_3}, \tau)^T, \end{aligned}$$

удовлетворяющего уравнениям (4)–(10), при помощи измерений (11), линейно зависящих (12) от компонент x .

В соответствии с гипотезами о погрешностях $v_{zi}^s; \Delta f_{zi}^s; q_\kappa, q_{\kappa 1}, q_{\kappa 3}; r_\lambda^*, r_\varphi^*, r_h^*$ в качестве алгоритма оценивания применяется фильтр Калмана размерности 25.

4. Результаты обработки экспериментальных данных

Для демонстрации эффективности алгоритма комплексирования данных БИНС и одометра, учитывающего угловые и линейные смещения приборов и запаздывание информации, приведем пример обработки экспериментальных данных в случае, когда информация от ГНСС в алгоритме КОИ не использовалась. Данные получены во время поездки по маршруту длиной 7 км по Москве. БИНС имеет навигационный класс точности – дрейфы ДУС порядка 0,02 град/ч; минимальное приращение показаний одометра («цена» одного парциального угла) – 16 см.

Во время движения автомобиль останавливался в одних и тех же точках несколько раз с фиксацией их координат. Точность полученного решения оценивалась путем сравнения координат на повторных остановках. Измерялось также отклонение траектории, нанесенной на карту Google Maps, от реальной.

В процессе обработки данных коррекция БИНС осуществлялась только по позиционным измерениям одометра. Для начальной выставки БИНС в условиях неконтролируемых угловых движений ее корпуса использовался алгоритм конусной выставки [17].

На рис. 1 показана вычисленная траектория движения автомобиля, нанесенная на карту Москвы. В конце поездки погрешность определения местоположения составила 1 м (менее 0,02% от пройденного пути), погрешность определения высоты – не более 1 м.

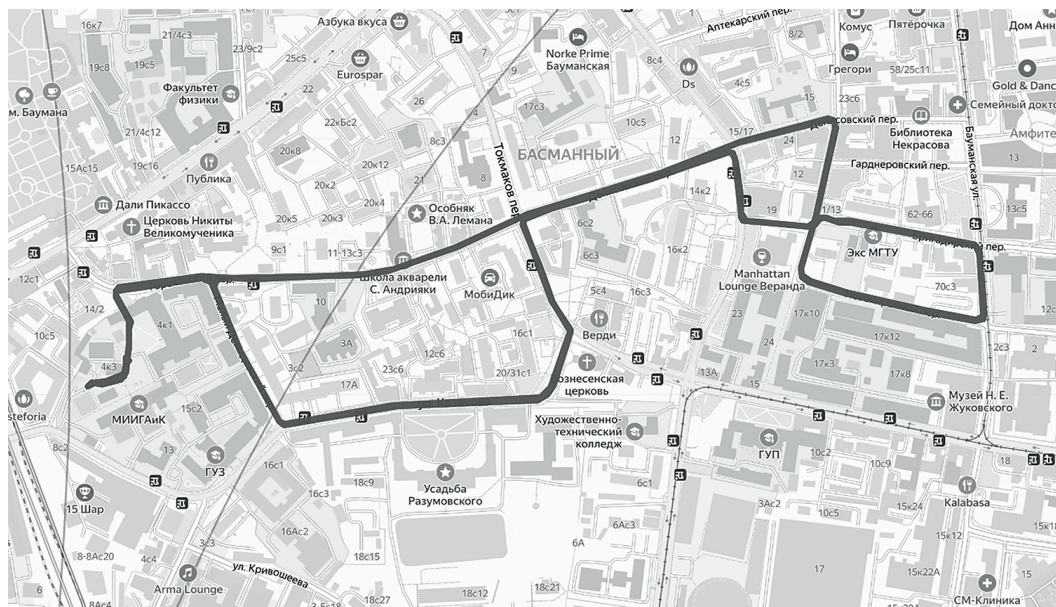


Рис. 1. Траектория, оцененная фильтром при работе в реальном времени

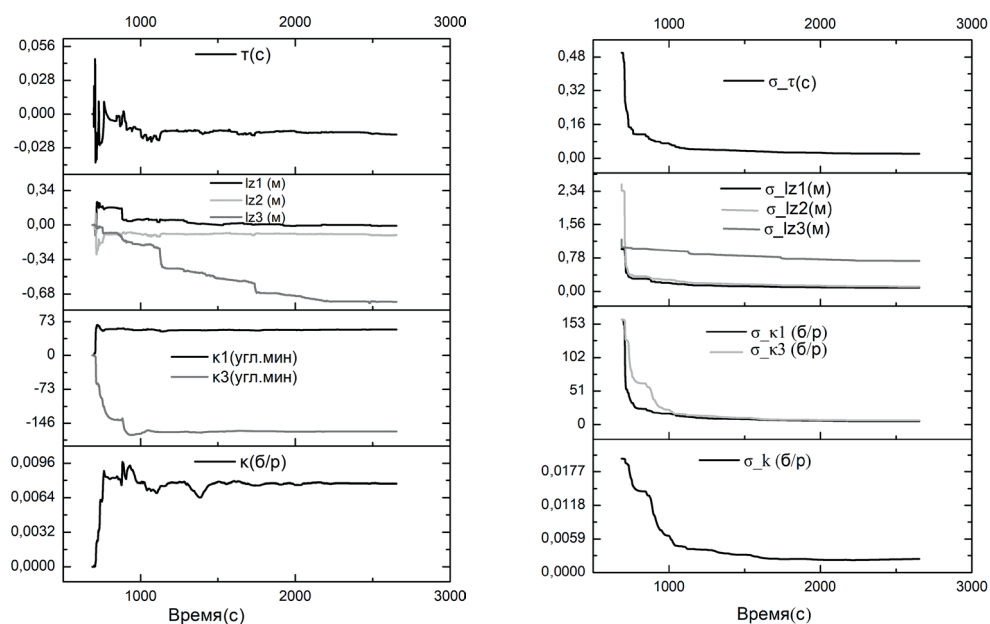


Рис. 2. Оценки погрешности масштабного коэффициента одометра k , перекосов κ_1 , κ_3 (обозначены на рисунке вместо $\Delta\mathcal{U}_1$, $\Delta\mathcal{U}_3$), линейных смещений l_{z1} , l_{z2} , l_{z3} , запаздывания t и ковариационные характеристики погрешностей их оценок

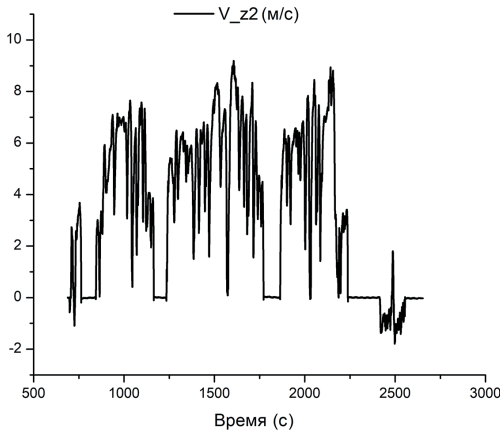


Рис. 3. Проекция вектора линейной скорости объекта относительно Земли на продольную приборную ось БИНС

БИНС навигационного класса точности с помощью алгоритма комплексирования данных БИНС и одометра осуществляется докалибровка масштабного коэффициента одометра, соответствующих угловых погрешностей, вектора параметров разнесения БИНС и одометра, а также параметра запаздывания информационных потоков. При этом специальная калибровочная трасса оказывается ненужной, так как условия поездки по штатной траектории, содержащей участки разгонов и торможения, а также поворотов, вполне позволяют оценить указанные параметры.

При поездке БИНС была установлена в багажнике автомобиля Chevrolet Niva. Выработанная алгоритмом оценка вектора $l_{z0} = (l_{z1}, l_{z2}, l_{z3})^T$ соответствует конструкции данного автомобиля и расположению центра задней оси.

Для задачи КОИ системы «БИНС – одометр» были проведены численные эксперименты по включению/исключению из вектора состояния погрешности масштабного коэффициента одометра и угловых погрешностей $\Delta\mathcal{U}_1, \Delta\mathcal{U}_3$. Результаты представлены на рис. 4. Без учета погрешности масштабного коэффициента точность определения местоположения ухудшалась на 65 м, а без угловых погрешностей – на 530 м. Таким образом, доказана необходимость учета этих параметров в моделях КОИ.

Аналогичные эксперименты проводились для параметра запаздывания τ . Отличие интеграционных решений с учетом/без учета τ составило единицы метров. Несмотря на незначительный эффект от включения этого параметра в состав оцениваемых, представляется целесообразным использовать его для функциональной диагностики качества синхронизации информационных потоков в системе «БИНС – одометр».

Примечание. При обработке экспериментальных данных использовали два варианта построения алгоритма КОИ:

- 1) разомкнутый вариант, или вариант оценивания, когда поправки в инерциальное и одометрическое счисления вносятся в выходную навигационную информацию;
- 2) замкнутый вариант, или вариант введения обратных связей [9] в алгоритмы обоих счислений.

Оба варианта дали практически одинаковый результат. Подчеркнем, что замкнутый вариант адаптирован к построению алгоритмов КОИ для инерциальных датчиков низкого класса точности.

Для этой же поездки приведем оценки погрешности масштабного коэффициента одометра κ ; углов юстировки $\Delta\mathcal{U}_1, \Delta\mathcal{U}_3$; компонент вектора смещения точек M и $M^d - l_{z1}, l_{z2}, l_{z3}$; запаздывания τ и ковариационные характеристики погрешностей этих оценок. Результаты оценивания представлены на рис. 2, профиль скорости – на рис. 3. Графики демонстрируют, что оценки стремятся к установившимся значениям, а стандартное отклонение их погрешностей уменьшается синхронно с моментами изменения вектора скорости.

Результаты обработки экспериментальных данных и соответствующего ковариационного анализа показали, что в случае



Рис. 4. Сравнение обработки результатов эксперимента с учетом и без учета погрешностей юстировочных углов (слева) и масштабного коэффициента одометра (справа)

5. Заключение

1. Описан алгоритм комплексирования данных БИНС и одометра для случая позиционного измерения одометра с учетом угловых и линейных смещений приборов.

2. Алгоритм обеспечивает докалибровку системы «БИНС – одометр» в процессе эксплуатации путем учета в последующих поездках полученных ранее оценок следующих параметров:

- взаимных перекосов системы «БИНС – одометр» по каналам курса и тангажа;
- погрешности масштабного коэффициента одометра;
- разнесения приведенного центра БИНС и одометра;
- величины рассинхронизации информационных потоков.

3. Результаты обработки экспериментальных данных показали:

- работоспособность предложенного алгоритма при использовании БИНС навигационного класса точности;
- высокую точность интегрированных навигационных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев А.Ю. Применение одометров для коррекции интегрированных навигационных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2009. № 4. С. 37–53.
2. Кузнецов И.М., Пронькин А.Н., Веремеенко К.К. Навигационный комплекс аэропортового транспортного средства // Труды МАИ. 2011. Вып. № 47.
3. Андропов А.В. Повышение точности определения местоположения внутритрубных инспекционных снарядов за счет использования спутниковых радионавигационных систем: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2006.
4. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Сафин Д.А., Назаров В.Г. Результаты тестирования на геополигоне навигационного обеспечения подвижных навигационно-геодезических комплексов // Сб. докл. XXXIV конф. памяти Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2024. С. 63–67.
5. Голован А.А., Никитин И.В. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 1 // Вестник московского университета. Математика. Механика. 2015. № 2. С. 69–72.
6. Голован А.А., Никитин И.В. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 2 // Вестник московского университета. Математика. Механика. 2015. № 4. С. 68–72.
7. Никитин И.В. Задача навигации наземного объекта на основе данных БИНС и одометра : дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2015.
8. Голован А.А. Интеграционное решение «БИНС – одометр»: позиционный вариант // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 2 (105). С. 110–125. DOI: 10.17285/0869-7035.0066.
9. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Математические модели инерциальной навигации. М.: Изд-во МГУ, 2020. 162 с.

10. Georgy, J., Karamat, T., Iqbal, U., Noureldin, A., Enhanced MEMS-IMU/odometer/GPS integration using mixture particle filter, *GPS Solutions*, 2011, vol. 15, is. 3, pp. 239–252, <https://doi.org/10.1007/s10291-010-0186-4/>.
11. Obradovic, D., Lenz, H., Schupfner, M., and Heesche, K., Multimodal Fusion for Car Navigation Systems. *Signal Processing Techniques for Knowledge Extraction and Information Fusion*, part II, pp. 141–158, Springer US, 2008, https://doi.org/10.1007/978-0-387-74367-7_8/.
12. Wankerl, M., Trommer, G.F., Evaluation of a Segmented Navigation Filter Approach for Vehicle Self-Localization in Urban Environment, *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 98–107.
13. Jianchen Gao, GPS/INS/G Sensors/Yaw Rate Sensor/Wheel Speed Sensors Integrated Vehicular Positioning System, *ION 2006*, Fort Worth TX, 26–29 Sep., Session E3, 2006.
14. Libin Zhu, Wei Wang, CDGPS-Based Calibration of Odometer's Scale Factor with Temperature for Vehicle Navigation System. *Proceedings of the 2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing*, 2010, vol. 1, pp. 317–320, <https://doi.org/10.1109/ICOIP.2010.148/>.
15. Qinghai Wang, Peihui Yan, Jinguang Jiang, Dongpeng Xie, Yuying Li, Qiyuan Zheng, Hongbin Tan and Jiaji Wu., Online Estimation of the Mounting Angle and the Lever Arm for a Low-Cost Embedded Integrated Navigation Module, *Remote Sens.*, 2024, 16, 3064, <https://doi.org/10.3390/rs16163064/>.
16. Yuanxin Wu, Naser El-Sheimy, Self-calibration for IMU/Odometer Land Navigation: Simulation and Test Results, *ION 2010 International Technical Meeting*, January 25–27, 2010, San Diego, CA.
17. Вязьмин В.С., Голован А.А., Говоров А.Д. Начальная и конечная выставки бескарданного аэрогравиметра с определением смещений нулевых сигналов акселерометров // *Гироскопия и навигация*. 2023. Т. 31. № 1 (120). С. 76–88.
18. Wei Jia, XuanXiao and Zhihong Deng, Self-calibration of INS/Odometer Integrated System via Kalman Filter, *2012 IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*, <https://doi.org/10.1109/ICACI.2012.6463156/>.
19. Mirabadi, A., Khodadadi, A., Slip and Slide Detection and Compensation for Odometry System, Using Adaptive Fuzzy Kalman Filter, <https://doi.org/10.1166/sl.2009.1014/>.
20. Brunker, A., Wohlgemuth, T., Frey, M., and Gauterin, F., Odometry 2.0: A Slip-Adaptive EIF-Based Four-Wheel-Odometry Model for Parking, *IEEE Transaction on intelligent vehicles*, <https://doi.org/10.1109/TIV.2018.2886675/>.
21. Mengxue Mu, Zhao Long, A Data Fusion Algorithm of GNSS/INS/Odometer Integrated System, Consideration of Total Odometer Errors, *21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2021, <https://doi.org/10.23919/ICCAS52745.2021.9649816/>.
22. Эль-Тохен М., Эльхабиби М., Хассан Т. Калибровка интегрированной системы «одометр – лидар – гироскоп» в режиме реального времени для определения местоположения с использованием карт в отсутствие сигналов ГНСС // *Гироскопия и навигация*. 2024. Т. 32. № 2 (125). С. 46–65. EDN HUSCUZ.
23. Vasilyuk, N., Tokarev, D., GNSS + inertial + odometer navigation system for land vehicles with an extended odometer's model identification, *Inertial Sensors and Systems*, 2020, Braunschweig, Germany, <https://doi.org/10.1109/ISS50053.2020.9244893/>.
24. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Козлов А.В., Папуша И.А., Зорина О.А., Измайлов Е.А., Кухтевич С.Е., Фомичев А.В. Интеграция спутниковой и инерциальной навигационных систем с учетом рассинхронизации данных и смещения спутниковой антенны. Опыт практической реализации. Вариант // *Гироскопия и навигация*. 2021. Т. 29. № 3. С. 52–68. DOI: 10.17285/0869-7035.0070.
25. Емельянцеv Г.И., Степанов А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / под общ. ред. В.Г. Пешехонова. СПб. : ГНЦ РФ «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 394 с.
26. Ouyang, W., Wu, Y., and Chen, H., INS/Odometer Land Navigation by Accurate Measurement Modeling and Multiple-Model Adaptive Estimation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 57, no. 1, pp. 245–262, Feb. 2021, <https://doi.org/10.1109/TAES.2020.3011998/>.
27. Вавилова Н.Б., Вязьмин В.С., Голован А.А. Результаты разработки и применения алгоритмов интеграции низкоточной БИНС, СНС и одометра в аппаратном комплексе дорожной лаборатории // XXVI С.-Петерб. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 2019.
28. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Козлов А.В., Никитин И.В., Панев А.А., Парусников Н.А., Соловых И.А., Никифоров С.В., Лавырев А.М., Морозов С.В., Афанасьев А.В., Весновский И.В., Конон А.В., Лаптев А.А., Турусиков Д.В. Результаты разработки и тестирования навигационных систем дефектоскопов магистральных нефте- и газопроводов // XXII С.-Петерб. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 2015.

29. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Панев А.А., Лаптев А.А., Конон А.В. Разработка и тестирование алгоритмов навигации внутритрубных диагностических снарядов // XVII С.-Петерб. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 2010.
30. Панев А.А. Задача навигации мобильных диагностических комплексов в режиме постобработки: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2010.
31. Zheleznov, V.M., Smolianov, D.I., Mishin, A.Yu., Fomin, D.M., Belov, R.V., In-flight inertial navigation system alignment under noncontrolled delays in aiding data, *Journal of Physics: Conference*, Series 1864 (2021), 012011, IOP Publishing, 13th Multiconference on Control Problems (MCCP 2020), <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012011/>.

Vavilova N.B., Golovan A.A., Safin D.A., Nazarov V.G. (Lomonosov Moscow State University, Moscow State University of Geodesy and Cartography)

Strapdown Inertial Navigation System and Odometer Data Fusion Using Sensor Angular and Linear Displacements, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 4 (131), pp. 47–63.

Abstract. The paper discusses the data fusion of strapdown inertial navigation system (SINS) accelerometers and gyroscopes and an odometer. Fusion is implemented using three-dimensional inertial and kinematic odometer dead-reckoning, and continuous SINS updates by the computed odometer coordinates. Important factors for the integration accuracy are highlighted: misalignments between the SINS instrument frame and the body frame; linear displacements of the SINS center relative to the odometer reference point; odometer scale factor error, and possible timing skew between raw SINS and odometer data. These parameters are included in the estimated variables in the described data fusion algorithms. Based on the results of experimental data analysis, we demonstrate the necessity and efficiency of the proposed algorithmic solutions.

Key words: strapdown inertial navigation system (SINS), odometer, data fusion, Kalman filter, estimation accuracy.

Материал поступил 17.07.2025