

◆ В ПОМОЩЬ ИССЛЕДОВАТЕЛЮ И РАЗРАБОТЧИКУ ◆

УДК 621.396.988.6
DOI 10.17285/0869-7035.0066

А. А. ГОЛОВАН

ИНТЕГРАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ «БИНС–ОДОМЕТР»: ПОЗИЦИОННЫЙ ВАРИАНТ

Рассматривается задача построения интеграционного решения в навигационном комплексе, в состав которого входят бескарданная инерциальная навигационная система (БИНС) и одометр. Предполагается, что первичное измерение одометра заключается в регистрации приращения пройденного пути вдоль «измерительной» оси одометра. Описываются модели интеграционного решения для трехмерной навигации. В их основе лежат модели инерциального автономного и кинематического одометрического счисления, модели соответствующих уравнений погрешностей, позиционной коррекции БИНС при помощи данных одометрического счисления и, возможно, позиционных и скоростных данных приемника сигналов спутниковой навигационной системы (СНС). В описываемых моделях выделяются объективные составляющие, не зависящие от типа используемых инерциальных датчиков и класса их точности, и вариативные, которые учитывают свойства используемых датчиков навигационной информации. Интеграционное решение не требует организации режима коррекции по нулевой скорости (ZUPТ-коррекции), традиционно применяемой в такой задаче.

Ключевые слова: БИНС, одометр, позиционное измерение одометра, интеграция «БИНС–одометр».

Введение

Рассматривается задача построения интеграционного решения в навигационном комплексе, где основными его составляющими являются БИНС и одометр. При этом

Голован Андрей Андреевич. Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией управления и навигации механико-математического факультета, МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID: 0000-0001-5628-248X.

Статья по докладу на 13-й Мультиконференции по проблемам управления, 2020 г.

первичное измерение одометра заключается в регистрации приращения пройденного пути вдоль его «измерительной» оси. Такая задача актуальна для систем навигации дефектоскопов нефтяных и газовых трубопроводов; наземных объектов на колесной, гусеничной тяге; объектов железнодорожного транспорта.

В России исследованием задачи построения интеграционного решения занимается ряд научно-образовательных организаций, в том числе Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет – для разработки железнодорожных приложений [1–3]; МГТУ им. Баумана [4] и Московский авиационный институт – для автомобильных приложений [5]; Красноярский государственный технический университет – для создания внутритрубных инспекционных снарядов [6–7]; МГУ им. Ломоносова [8–12]. Кроме того, можно также назвать Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал», Пермскую научно-производственную приборостроительную компанию; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» [13], АО «ЦНИИАГ», Гиrolаб (Пермь) [14] и др.

Из зарубежных компаний, занимающихся решением задачи интеграции БИНС и одометра, следует выделить французские Sagem и SBG Systems, немецкую iMAR Navigation GmbH, австралийскую Advanced Navigation, английскую Datron Technology и др.

Из зарубежных публикаций следует отметить работы, посвященные описанию алгоритмов повышения точности комплексного позиционного решения «БИНС/GPS/одометр». В [15–17] решаются задачи повышения точности в периоды неопределенности или недостоверности GPS-сигнала. Помимо набора перечисленных измерительных систем, в качестве дополнительной информации могут использоваться привязка к цифровой карте [16] и данные дополнительных датчиков, таких как магнитометр [5] и датчик курса [18, 4]. В некоторых работах описывается калибровка погрешности масштабного коэффициента одометра в движении по данным GPS [19]. Используются также два варианта формирования корректирующих БИНС измерений по показаниям одометра: по скоростной [15, 18, 20–21] и позиционной информации [22, 23, 17, 5].

Измерение одометра чаще всего интерпретируется (формируется) как скоростное измерение, применяемое далее для коррекции БИНС. В случае если используется кинематическое одометрическое счисление, то оно и является решением навигационной задачи. Автору настоящей статьи неизвестны работы, описывающие применение результатов одометрического счисления для коррекции БИНС с помощью трехмерного счисления и полных моделей уравнений погрешностей БИНС. Следует отметить, что информационно родственными задачами являются коррекция морской БИНС с использованием показаний лага и коррекция БИНС воздушного судна с использованием показаний системы воздушно-скоростных сигналов.

В данной статье описываются составляющие интеграционного решения «БИНС–одометр» для случая трехмерной навигации и именно для позиционной интерпретации измерений одометра. При этом, как это принято в интегрированных навигационных комплексах, в состав которых входит БИНС, остальные источники дополнительной навигационной информации служат средствами ее коррекции. Выделим объективную и вариативную составляющие интеграционного решения. Первая основана на объективных моделях:

- алгоритмов инерциального автономного счисления, включая вертикальный канал БИНС. Здесь под автономностью счисления понимается тот факт, что

в выработке навигационных решений БИНС участвуют только показания акселерометров и ДУС;

- алгоритмов трехмерного кинематического одометрического счисления;
- уравнений погрешностей БИНС,
- уравнений погрешностей одометрического счисления,
- уравнений позиционной коррекции БИНС с использованием позиционных данных одометрического счисления;
- уравнений позиционной коррекции БИНС и одометрического счисления с использованием доступных данных СНС или известных координат маркерных (реперных) точек в задачах внутритрубной дефектоскопии.

Вторая, вариативная составляющая призвана учитывать инструментальные свойства конкретных датчиков навигационной информации: акселерометров, датчиков угловой скорости (ДУС), одометра, используемых в конкретном навигационном комплексе.

Представляемое интеграционное решение не требует организации режима ZUPT-коррекции, традиционно применяемой в этой задаче.

Для определенности будем считать, что интеграционное решение «БИНС–одометр» основано на алгоритме калмановской фильтрации с введением обратных связей по оценкам в алгоритм счисления БИНС и одометрического счисления.

Настоящая статья является продолжением методических публикаций [10, 11]. В этих работах была предложена классификация возможных функциональных схем решения задачи интеграции БИНС и одометра, которая коррелирует с известной классификацией задач интеграции инерциальных и спутниковых навигационных систем, выделяющей четыре уровня интеграции: отдельные системы, слабосвязанные системы, тесно связанные системы и глубоко интегрированные системы (см., например, [28]). Соответственно, под слабосвязанной интеграцией «БИНС–одометр» понимается построение интеграционного решения, когда БИНС предоставляет угловую информацию для осуществления одометрического счисления. Под тесно связанной интеграцией «БИНС–одометр» понимаются решения, когда показания одометра (интерпретируемые как позиционная либо скоростная информация) служат корректирующими измерениями для БИНС. Под глубоко связанной интеграцией «БИНС–одометр» понимаются решения, когда измерения одометра или производные от них счисляемые координаты служат корректирующими измерениями, а реализация алгоритмов коррекции БИНС осуществляется в варианте введения обратных связей в алгоритмы счисления БИНС.

Данная статья также носит методический характер, ее цель заключается в том, чтобы описать объективные составляющие интеграционного решения «БИНС–одометр» и основные составляющие вариативных моделей. Представленные ниже модели будут использовать частично и форму дифференциальных уравнений для компактности их представления, и дискретную там, где это уместно. Кроме того, не будут обсуждаться такие вопросы очевидных упрощений приводимых моделей, основанных на специфике рассматриваемых наземных приложений, как относительно малые скорости движения объекта, особенно вертикальной ее составляющей и т.п. В некоторой степени это связано с тем, что часть приводимых ниже моделей также используется в других проектах лаборатории управления и навигации МГУ, например в задачах автокалибровки и довыставки [27, 33], авиационной гравиметрии [31].

Модель автономного счисления БИНС

В качестве модели автономного счисления БИНС на практике чаще всего выбирается вариант, когда опорным навигационным трехгранником служит географический трехгранник с тем или иным законом азимутальной ориентации: географической координатной сеткой, абсолютно либо относительно свободной ориентацией в азимуте [24]. Для определенности рассмотрим вариант с географической координатной сеткой.

Выходная информация БИНС такова:

- географические координаты – долгота λ' , широта φ' , высота h' ;
- компоненты вектора V' линейной относительной скорости – восточная V'_E , северная V'_N , вертикальная V'_{UP} составляющие;
- углы истинного курса ψ' , тангажа υ' , крена γ' .

Здесь знаком «'» отмечена выходная информация БИНС, аналогичные параметры без штриха соответствуют их истинным значениям.

Модельные уравнения инерциального счисления могут быть реализованы в разных формах, которые эквивалентны друг другу, в частности используются матрицы ориентации или кватернионы, счисление осуществляется непосредственно в географических координатах и т.п., применяются разные численные методы интегрирования «быстрых» уравнений ориентации. Литература по этим вопросам весьма обширна: см., например, работы [24] и [26].

Ниже приведем дифференциальную форму только уравнений вертикального канала, поскольку часто авторы публикаций ограничиваются моделями счисления для горизонтальных каналов БИНС. Имеем:

$$\dot{h}' = V'_{UP}, \quad (1)$$

$$\dot{V}'_{UP} = (\Omega'_E \Omega'_N + 2u \cos \varphi') V'_E - \Omega'_E V'_N + f'_{UP} - g(\varphi', h').$$

Здесь $\Omega'_E \Omega'_N$ – восточная и северная компоненты модельного вектора относительной угловой скорости опорного географического трехгранника, u – угловая скорость вращения Земли, f'_{UP} – данные «вертикального» акселерометра, полученные путем проецирования показаний акселерометров на оси упомянутого трехгранника, g – абсолютное значение удельной силы тяжести, вычисляемое, например, при помощи формулы Гельмерта [24].

Модель кинематического одометрического счисления

Кинематическое одометрическое счисление географических координат использует углы истинного курса ψ' , тангажа υ' , крена γ' , предоставляемые БИНС; измерения одометра – приращение пройденного пути вдоль его «измерительной» оси. При этом предполагается, что на объекте проведены соответствующие юстировочные работы, цель которых – обеспечить с максимально возможной точностью соосность продольной оси объекта, одной из приборных осей БИНС, далее называемой также продольной, и направления «измерительной» оси одометра. Уравнения счисления можно представить следующим образом [11] (приведем дискретную форму уравнений счисления, имеется в виду дискретный характер позиционного измерения одометра):

$$\Delta S'_{j+1} = \begin{pmatrix} \Delta s'_{Ej+1} \\ \Delta s'_{Nj+1} \\ \Delta s'_{UPj+1} \end{pmatrix} = A'_j \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta s'_{j+1} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\lambda_{j+1}^0 = \lambda_j^0 + \frac{\Delta s'_{Ej+1}}{(R_E + h_j^0) \cos \varphi_j^0}, \quad \varphi_{j+1}^0 = \varphi_j^0 + \frac{\Delta s'_{Nj+1}}{(R_N + h_j^0)}, \quad h_{j+1}^0 = h_j^0 + \Delta s'_{UPj+1}.$$

Здесь индекс j соответствует моменту времени t_j ; $\Delta s'_{j+1}$ – измерение одометра в [м] на интервале $[t_j, t_{j+1}]$ съема этого измерения одометром; $A'_j = A'_j(\psi'_j, \vartheta'_j, \gamma'_j)$ – модельная матрица ориентации приборного трехгранника Mz БИНС (первая ось Mz_1 направлена в сторону правого борта объекта, вторая ось Mz_2 – продольная, третья ось Mz_3 направлена вверх, точка M – приведенный центр блока акселерометров) относительно опорного географического трехгранника (с ориентацией осей 1, 2, 3 на восток, север, вверх), вычисляемая при помощи значений углов истинного курса ψ'_j , тангажа ϑ'_j , крена γ'_j ; $\Delta s'_{j+1} = (\Delta s'_{Ej+1}, \Delta s'_{Nj+1}, \Delta s'_{UPj+1})^T$ – вектор пройденного пути в восточном, северном, вертикальном направлениях; R_E, R_N – радиусы кривизны первого вертикала и меридианального сечений навигационного эллипсоида (для наземных приложений можно вместо $R_E + h_j^0, R_N + h_j^0$ использовать значение a большой полуоси эллипсоида); $\lambda_{j+1}^0, \varphi_{j+1}^0, h_{j+1}^0$ – географические координаты, полученные одометрическим числением.

Другой, «скоростной» вариант записи соотношений (2) такой [11]:

$$V_{j+1}^0 = \begin{pmatrix} V_{Ej+1}^0 \\ V_{Nj+1}^0 \\ V_{UPj+1}^0 \end{pmatrix} = A'_j \begin{pmatrix} 0 \\ V_{sj+1}^0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad V_{sj+1}^0 = \frac{\Delta s'_{j+1}}{\Delta t}, \quad \Delta t = t_{j+1} - t_j, \quad (3)$$

$$\lambda_{j+1}^0 = \lambda_j^0 + \frac{V_{Ej+1}^0}{(R_E + h_j^0) \cos \varphi^0} \Delta t, \quad \varphi_{j+1}^0 = \varphi_j^0 + \frac{V_{Nj+1}^0}{(R_N + h_j^0)} \Delta t, \quad h_{j+1}^0 = h_j^0 + V_{UPj+1}^0 \Delta t.$$

Здесь $V_{j+1}^0 = (V_{Ej+1}^0, V_{Nj+1}^0, V_{UPj+1}^0)^T$ – вектор «одометрической» скорости в осях географического трехгранника.

Отметим, что «одометрическая» высота h_j^0 может использоваться для коррекции экспоненциально неустойчивого автономного вертикального канала (1) БИНС, например, следующим стандартным способом:

$$\begin{aligned} \dot{h}' &= V'_{UP} - q_1 (h' - h^0), \\ \dot{V}'_{UP} &= (\Omega'_N + 2u \cos \varphi') V'_E - \Omega'_E V'_N + f'_{UP} - g(\varphi^0, h^0) - q_2 (h' - h^0), \end{aligned} \quad (4)$$

где q_1, q_2 – коэффициенты обратной связи, обеспечивающие устойчивость вертикального канала БИНС [24].

Необходимо подчеркнуть, что при формировании в (4) абсолютного значения удельной силы тяжести g можно использовать как значение h' (что, собственно, и приводит именно к экспоненциальной неустойчивости автономного вертикального канала БИНС помимо вклада инструментальных погрешностей инерциальных датчиков), так и значение h^0 «одометрической» высоты. Соответствующая модификация уравнений погрешностей вертикального канала БИНС для этого случая описывается ниже.

Достаточно очевидно, что построенное таким способом решение для вертикального канала БИНС будет «отслеживать» поведение «одометрической» высоты без экспоненциального накопления ее погрешности.

Модель уравнений погрешностей БИНС

Ниже приводится модель, получившая распространение в авиационных приложениях (см., например, [27]). Ее особенность заключается в том, что полные погрешности определения относительной линейной скорости разделяются на динамическую и кинематическую составляющие [24], а в качестве угловых погрешностей БИНС принимаются две угловые погрешности построения приборной вертикали и кинематическая азимутальная погрешность географического трехгранника. Эта модель представляет одну из объективных составляющих интеграционного решения «БИНС–одометр». В правых частях этой модели присутствуют параметры инструментальных погрешностей инерциальных датчиков – акселерометров, ДУС, что относится уже к ее вариативной составляющей. Для упрощения в моделях инструментальных погрешностей ниже учитываются только смещения нулевых сигналов и шумовые составляющие. Разработчик конкретного навигационного комплекса может воспользоваться здесь своей моделью, учитывающей специфику применяемых инерциальных датчиков.

Сводный фазовый вектор погрешностей БИНС и инструментальных погрешностей инерциальных датчиков в данном случае имеет 15-й порядок и содержит следующие параметры:

$$\Delta r_E, \Delta r_N, \Delta h, \delta V_E, \delta V_N, \delta V_{UP}, \alpha_E, \alpha_N, \beta_3, v_1^0, v_2^0, v_3^0, \Delta f_1^0, \Delta f_2^0, \Delta f_3^0, \quad (5)$$

где $\Delta r_E, \Delta r_N$ – погрешности определения местоположения [м] в горизонтальной плоскости в восточном и северном направлениях; Δh – погрешность определения инерциальной высоты; $\delta V_E, \delta V_N, \delta V_{UP}$ – динамические погрешности определения восточной, северной, вертикальной составляющих относительной линейной скорости; α_E, α_N – восточная, северная угловые погрешности построения приборной вертикали; β_3 – азимутальная кинематическая погрешность; $v_i^0, \Delta f_i^0, (i = 1, 2, 3)$ – погрешности нулей ДУС и акселерометров.

Разделение полных погрешностей систем инерциальной навигации на сумму двух фракций – динамической и кинематической – представлено еще в классической работе [29], где они обозначались как погрешности первой и второй групп. В [30] они стали называться динамическими и кинематическими погрешностями инерциальной навигационной системы. Если говорить кратко, кинематические уравнения отражают вклад погрешностей ДУС (в случае БИНС) в полные погрешности навигационной системы, динамические погрешности – вклад погрешностей акселерометров в погрешности, порождаемые интегрированием динамических уравнений БИНС.

В приводимых ниже моделях уравнений погрешностей БИНС такое разделение было выполнено для скоростных погрешностей: вместо полных погрешностей ΔV_E , ΔV_N , ΔV_{UP} скорости используются соответствующие динамические погрешности δV_E , δV_N , δV_{UP} . Удобство применения δV_E , δV_N , δV_{UP} состоит в том, что, во-первых, в правых частях уравнений для этих переменных нет показаний акселерометров (детальный вывод соответствующих уравнений погрешностей приведен в [24]) – в отличие от уравнений для полных погрешностей скорости, что, несомненно, удобно для приложений, работающих в режиме реального времени. Во-вторых, для датчиков навигационной информации, таких как лаг, система воздушно-скоростных сигналов, одометр в качестве датчика скорости и др., измеряющих скорость объекта вдоль его продольной оси, соответствующие скоростные корректирующие измерения представляют измерения именно динамических погрешностей скорости. Это видно, например, по формулам, приведенным в [26] в разделе, касающемся моделей коррекции БИНС с использованием показаний лага (формулы (2.4.11), (3.4.1)).

Имеют место следующие уравнения погрешностей [24] (дифференциальная форма с несущественными упрощениями):

$$\begin{aligned} \dot{\Delta r}_E &= \delta V_E + \frac{V'_{UP}}{a} \Delta r_E + \Omega'_{UP} \Delta r_N - \Omega'_N \Delta h - V'_{UP} \alpha_N + V'_N \beta_3, \\ \dot{\Delta r}_N &= \delta V_N - \Omega'_{UP} \Delta r_E + \frac{V'_{UP}}{a} \Delta r_N + \Omega'_E \Delta h + V'_{UP} \alpha_E - V'_E \beta_3, \\ \dot{\Delta h} &= \delta V_{UP} - V'_N \alpha_E + V'_E \alpha_N, \\ \delta \dot{V}_E &= (\Omega'_{UP} + 2u \sin \varphi') \delta V_N - (\Omega'_N + 2u \cos \varphi') \delta V_{up} - g_e \alpha_N + \sum_{i=1}^3 a_{1i} (\Delta f_i^0 + \Delta f_i^s), \\ \delta \dot{V}_N &= -(\Omega'_{UP} + 2u \sin \varphi') \delta V_E + \Omega'_E \delta V_{up} + g_e \alpha_E + \sum_{i=1}^3 a_{2i} (\Delta f_i^0 + \Delta f_i^s), \\ \delta \dot{V}_{UP} &= 2\omega_0^2 \Delta h^* + (\Omega'_N + 2u \cos \varphi') \delta V_E - \Omega'_E \delta V_N + \sum_{i=1}^3 a_{3i} (\Delta f_i^0 + \Delta f_i^s), \\ \dot{\alpha}_E &= -\frac{u \sin \varphi'}{a} \Delta r_E - \frac{1}{a} \delta V_N + (\Omega'_{UP} + u \sin \varphi') \alpha_N - u \cos \varphi' \beta_3 + \sum_{i=1}^3 a_{1i} (v_i^0 + v_i^s), \\ \dot{\alpha}_N &= -\frac{u \sin \varphi'}{a} \Delta r_N + \frac{1}{a} \delta V_E - (\Omega'_{UP} + u \sin \varphi') \alpha_E + \sum_{i=1}^3 a_{2i} (v_i^0 + v_i^s), \\ \dot{\beta}_3 &= \frac{\Omega'_E}{a} \Delta r_E + \frac{(\Omega'_N + u \cos \varphi')}{a} \Delta r_N + (\Omega'_N + u \cos \varphi') \alpha_E - \Omega'_E \alpha_N + \sum_{i=1}^3 a_{3i} (v_i^0 + v_i^s). \end{aligned} \tag{6}$$

Здесь a – большая полуось навигационного эллипсоида; g_e – номинальное абсолютное значение удельной силы тяжести; ω_0^2 – квадрат частоты Шулера; $\Omega'_{UP} = \Omega'_N \tan \varphi'$ – вертикальная составляющая вектора относительной угловой скорости опорного географического трехгранника; $v_i^s, \Delta f_i^s, (i = 1, 2, 3)$ – шумовые составляющие погрешностей ДУС и акселерометров; $\Delta h^* = \Delta h$ при не корректируемом по «одометрической» высоте

вертикальном канале БИНС, $\Delta h^* = \Delta h^0$ – погрешность «одометрической» высоты при коррекции вертикального канала БИНС по «одометрической» высоте.

Замечание. Уравнения (6), конечно, можем упростить, учитывая специфику наземных приложений и пренебрегая малыми по уровню членами, например содержащими множитель $(\Omega'_{UP} + u \sin \varphi')$.

К уравнениям (6) в соответствии с принятой упрощенной для иллюстрации моделью погрешностей инерциальных датчиков добавляются формирующие уравнения:

$$\dot{v}_i^0 = \Delta \dot{v}_i^0 = 0, \quad (i = 1, 2, 3). \quad (7)$$

Модель уравнений погрешностей кинематического одометрического счисления

Объективно параметрами модели являются вектор $\Delta r^0 = (\Delta r_E^0, \Delta r_N^0, \Delta h^0)^T$ позиционной погрешности одометрического счисления, а также угловые погрешности БИНС, поскольку в одометрическом счислении используется угловая информация (курс, крен, тангаж), предоставляемая БИНС. В модель уравнений погрешностей кинематического одометрического счисления входят также погрешности масштабного коэффициента одометра и двух углов перекосов «измерительной» оси одометра по каналам курса и тангажа. С одной стороны, эти три параметра относятся и к объективной части модели уравнений погрешностей одометрического счисления, поскольку в задаче они присутствуют как остаточные погрешности масштабного коэффициента и углов перекосов после проведения калибровочных и юстировочных работ с одометром. С другой стороны, эти параметры можно отнести и к вариативной части, когда разработчик комплекса осуществляет нюансировку моделей этих погрешностей, как это было сделано, например, для модели погрешности масштабного коэффициента одометра в [3].

Остановимся более подробно на составляющих погрешностей одометра. Рассмотрим одометр как устройство, измеряющее число N_j ($N_0 = 0$) парциальных углов поворота измерительного колеса на интервале времени $[t_0, t_j]$, без учета аппаратной реализации. Пусть n – число равномерно установленных по окружности колеса меток, тогда величина парциального угла поворота $\Delta a = 2\pi/n$. Обозначим через R радиус колеса. В этом случае пройденный путь s точкой контакта W колеса с поверхностью на интервале времени $[t_0, t_j]$ будет равен:

$$s_j = \frac{2\pi R N_j}{n} = K N_j, \quad K = \frac{2\pi R}{n}, \quad (8)$$

где K – масштабный коэффициент одометра, переводящий измерения N_j в пройденный путь, а разность $\Delta N_{j+1} = N_{j+1} - N_j$ характеризует пройденный путь Δs_{j+1} на интервале $[t_j, t_{j+1}]$: $\Delta s_{j+1} = K \Delta N_{j+1}$.

Идеализированная модель одометра. Воспользуемся априорной идеализированной моделью одометра. Она предполагает, что, во-первых, движение объекта происходит без проскальзывания, во-вторых, измерительное колесо одометра постоянно сцеплено с поверхностью контакта.

Это позволяет перейти от скалярной интерпретации измерения одометра к векторной. Вектор приращения пути в осях связанной с корпусом объекта системы координат Ws – это вектор с двумя нулевыми компонентами (проекциями на боковую Ws_1 и вертикальную Ws_3 оси) и одной ненулевой компонентой Δs_{j+1} (при движении объекта) по продольной оси Ws_2 :

$$\Delta S_{j+1} = \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta s_{j+1} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Реалистичная модель одометра. Реалистичная модель измерений одометра должна учитывать по крайней мере следующие факторы:

- 1) погрешность масштабного коэффициента k , переводящего первичное измерение в пройденное расстояние:

$$K' = K + kK', \quad (10)$$

где K – истинное значение масштабного коэффициента, K' – используемое значение для вычислений;

- 2) «измерительная» ось одометра Ws_2 и продольная приборная ось БИНС Mz_2 могут быть несоосными. Данный случай формально описывается путем введения вектора малого поворота (если погрешности юстировки малы) $\delta = (\delta_1, \delta_2, \delta_3)^T$, характеризующего взаимную ориентацию приборного трехгранника Mz БИНС и связанной с корпусом объекта системы координат Ws :

$$l_z = (I + \hat{\delta})l_s, \quad \hat{\delta} = \begin{pmatrix} 0 & \delta_3 & -\delta_2 \\ -\delta_3 & 0 & \delta_1 \\ \delta_2 & -\delta_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где l – один и тот же вектор в проекциях на соответствующие оси, I – единичная (3×3) матрица, $\hat{\delta}$ – кососимметрическая матрица, поставленная в соответствие вектору δ .

Далее для вывода уравнений погрешностей одометрического счисления потребуется модель приращения пройденного пути $\Delta s_z = (\Delta s_{z1}, \Delta s_{z2}, \Delta s_{z3})^T$ в осях приборного трехгранника Mz БИНС. Учитывая модели (11), (12), (2), получим

$$\Delta S'_{j+1} = \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta s'_{j+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta s_{z1} \\ \Delta s_{z2} \\ \Delta s_{z3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\delta_3 \\ k \\ \delta_1 \end{pmatrix} \Delta s'_{j+1} + \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta s^s_{j+1} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где Δs^s_{j+1} – случайная погрешность измерения одометра.

Можно показать, что для позиционных погрешностей $\Delta r^0 = (\Delta r^0_E, \Delta r^0_N, \Delta h^0)^T$ одометрического счисления в восточном, северном, вертикальном направлениях будет справедлива следующая модель уравнений погрешностей (дифференциальная форма) [10–12]:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{r}_E^0 \\ \Delta \dot{r}_N^0 \\ \Delta \dot{h}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \Omega_{UP}^0 & -\Omega_N^0 \\ -\Omega_{UP}^0 & 0 & \Omega_E^0 \\ \Omega_N^0 & -\Omega_E^0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r_E^0 \\ \Delta r_N^0 \\ \Delta h^0 \end{pmatrix} + k \begin{pmatrix} V_E^0 \\ V_N^0 \\ V_{UP}^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \beta_3 & -\beta_N \\ -\beta_3 & 0 & \beta_E \\ \beta_N & -\beta_E & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_E^0 \\ V_N^0 \\ V_{UP}^0 \end{pmatrix} + A'_{xz} V_s^0 \begin{pmatrix} -\delta_3 \\ 0 \\ \delta_1 \end{pmatrix} + \Delta V^s. \quad (14)$$

Здесь $\Omega_i^0, (i = E, N, UP)$ – компоненты относительной угловой скорости сопровождающего «одометрического» географического трехгранника, вычисленные по известным формулам с использованием значений «одометрических» координат $\lambda^0, \varphi^0, h^0$ и вектора относительной «одометрической» скорости $V^0 = (V_E^0, V_N^0, V_{UP}^0)^T$; ΔV^s – случайная погрешность «одометрической» скорости.

В (14) фигурируют так называемые кинематические погрешности $\beta_E, \beta_N, \beta_3$ БИНС, которые связаны с компонентами фазового вектора (5) погрешностей БИНС следующим образом [24]:

$$\beta_E = \alpha_E + \frac{\Delta r_N}{a}, \quad \beta_N = \alpha_N - \frac{\Delta r_E}{a}. \quad (15)$$

Представим один из возможных вариантов модели (вариативная часть) для погрешности масштабного коэффициента одометра и перекосов его «измерительной» оси:

$$k = k^0 + k^s, \quad \dot{k}^0 = 0, \quad \delta_i = \delta_i^0 + \delta_i^s, \quad \dot{\delta}_i^0 = 0, \quad i = 1, 2. \quad (16)$$

Модель (16) отражает наличие двух фракций: постоянных номинальных составляющих $k^0, \delta_1^0, \delta_3^0$ и вариативных $k^s, \delta_1^s, \delta_3^s$, моделируемых случайными процессами с априори задаваемыми характеристиками. Последние представляют собой наименее формализованные элементы математической модели, характеристики которых подбираются исходя из опыта обработки экспериментальных данных конкретного технического комплекса.

Сводный вектор состояния рассматриваемой задачи интеграции «БИНС–одометр» состоит из двух подвекторов. Первый, «объективный», содержит следующие компоненты:

$$\Delta r_E, \Delta r_N, \Delta h, \delta V_E, \delta V_N, \delta V_{UP}, \alpha_E, \alpha_N, \beta_3, \Delta r_E^0, \Delta r_N^0, \Delta h^0. \quad (17)$$

Второй, «вариативный», состоит из параметров принятых в статье иллюстративных моделей инструментальных погрешностей инерциальных датчиков и одометра:

$$v_1^0, v_2^0, v_3^0, \Delta f_1^0, \Delta f_2^0, \Delta f_3^0, k^0, \delta_1^0, \delta_3^0. \quad (18)$$

Модель автономной коррекции БИНС с использованием данных одометрического счисления

В качестве сигналов коррекции БИНС применяется разность географических координат (долготы, широты, высоты), определяемых БИНС и одометрическим счислением:

$$\begin{aligned} z_\lambda &= \lambda' - \lambda^0 = (\lambda' - \lambda) - (\lambda^0 - \lambda) = \Delta\lambda - \Delta\lambda^0, \\ z_\varphi &= \varphi' - \varphi^0 = (\varphi' - \varphi) - (\varphi^0 - \varphi) = \Delta\varphi - \Delta\varphi^0, \\ z_h &= h' - h^0 = (h' - h) - (h^0 - h) = \Delta h - \Delta h^0. \end{aligned} \tag{19}$$

Эти разности в линейном приближении характеризуют разность позиционных погрешностей БИНС и одометрического счисления:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta r_E}{a \cos \varphi'}, \Delta\varphi = \frac{\Delta r_N}{a}, \Delta\lambda^0 = \frac{\Delta r_E^0}{a \cos \varphi^0}, \Delta\varphi^0 = \frac{\Delta r_N^0}{a}. \tag{20}$$

На основе (19) строится объективная модель позиционного измерения z_{pos} :

$$z_{pos} = (z_\lambda, z_\varphi, z_h)^T = Hy + r, \tag{21}$$

$$\begin{aligned} y = (\Delta r_E, \Delta r_N, \Delta h, \delta V_E, \delta V_N, \delta V_{UP}, \alpha_E, \alpha_N, \beta_3, \Delta r_E^0, \Delta r_N^0, \Delta h^0, v_1^0, v_2^0, v_3^0, \\ \Delta f_1^0, \Delta f_2^0, \Delta f_3^0, k^0, \delta_1^0, \delta_3^0)^T, \end{aligned} \tag{22}$$

$$H = \left(H_{pos}, 0_{(3 \times 6)}, -H_{pos}, 0_{(3 \times 3)} \right), \quad H_{pos} = \begin{pmatrix} \frac{1}{a \cos \varphi'} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{23}$$

Здесь $0_{(n \times m)}$ – нулевые матрицы указанной размерности, r – вводимая в модель измерения (20) шумовая составляющая его погрешности, обусловленная возможными погрешностями синхронизации данных БИНС и одометра, характерной величиной минимального приращения измеряемого одометром пройденного пути и т.п. Настройка характеристик шума r осуществляется на основе опыта обработки экспериментальных данных.

Таким образом, измерение (19) позволяет осуществлять непрерывную автономную коррекцию БИНС при помощи «одометрических» координат. При этом не возникает необходимости организовывать специальный режим остановок объекта для ZURP-коррекции БИНС. Кроме того, появляется возможность автокалибровки по функционированию инструментальных погрешностей инерциальных датчиков, инструментальных (k^0) и геометрических (перекосы δ_1, δ_3) погрешностей одометра, поскольку упомяну-

тые параметры входят в вектор состояния соответствующей задачи оценивания. Качественные и количественные свойства оцениваемости этих параметров являются предметом отдельного исследования, которое выходит за рамки данной статьи.

Использование внешней информации для коррекции системы «БИНС–одометр»

Возможна ситуация, когда доступна дополнительная внешняя навигационная информация, предоставляемая приемником сигналов спутниковых навигационных систем (позиционные λ^{CHC} , φ^{CHC} , h^{CHC} , скоростные V_E^{CHC} , V_N^{CHC} , V_{UP}^{CHC} данные); информация о координатах λ^{ref} , φ^{ref} , h^{ref} маркерных, реперных точек в задачах дефектоскопии нефтяных и газовых трубопроводов; позиционная картографическая информация.

Наличие внешних позиционных данных позволяет осуществлять именно одномоментную коррекцию как БИНС, так и одометрического счисления с помощью объективных моделей измерений:

$$\begin{aligned} z_\lambda &= \lambda' - \lambda^{CHC} = \Delta\lambda + r_\lambda, \quad z_\varphi = \varphi' - \varphi^{CHC} = \Delta\varphi + r_\varphi, \quad z_h = h' - h^{CHC} = \Delta h + r_h, \\ z_\lambda^0 &= \lambda^0 - \lambda^{CHC} = \Delta\lambda^0 + r_\lambda, \quad z_\varphi^0 = \varphi^0 - \varphi^{CHC} = \Delta\varphi^0 + r_\varphi, \quad z_h^0 = h^0 - h^{CHC} = \Delta h^0 + r_h, \end{aligned} \quad (24)$$

где r_λ , r_φ , r_h – погрешности позиционных данных приемника сигналов СНС, для которых в задачах интеграции «БИНС–СНС» обычно используется модель дискретного белого шума заданной интенсивности.

Очевидно, что модель (24) справедлива и при использовании информации о координатах λ^{ref} , φ^{ref} , h^{ref} реперных точек.

Привлечение внешней скоростной информации также позволяет сформировать корректирующие измерения и представить соответствующие им объективные модели [24]:

$$\begin{aligned} z_{V_E} &= V_E' - V_E^{CHC} = \delta V_E + (\beta_3 + \Delta\lambda \sin \varphi) V_N' - \alpha_N V_{UP}' + r_{V_E}, \\ z_{V_N} &= V_N' - V_N^{CHC} = \delta V_N - (\beta_3 + \Delta\lambda \sin \varphi) V_E' + \alpha_E V_{UP}' + r_{V_N}, \\ z_{V_{UP}} &= V_{UP}' - V_{UP}^{CHC} = \delta V_{UP} + \alpha_N V_E' - \alpha_E V_N' + r_{V_{UP}}, \end{aligned} \quad (25)$$

где r_{V_E} , r_{V_N} , $r_{V_{UP}}$ – погрешности скоростных данных приемника сигналов СНС, для которых в задачах интеграции «БИНС–СНС» также обычно используется модель дискретного белого шума заданной интенсивности.

Замечание. Уравнения (25) можно упростить с учетом специфики наземных приложений и за счет пренебрежения малыми по уровню членами, содержащими множитель V_{UP}' .

Численная реализация интеграционного алгоритма «БИНС–одометр»

Задача интеграции «БИНС–одометр» решается посредством оценивания вектора состояния u , компоненты которого представлены соотношением (22), линейной динамической системы вида (см. (6), (7), (14), (15))

$$\dot{y} = Ay + v \tag{25}$$

с помощью измерений $z_{pos} = (z_\lambda, z_\phi, z_h)^T$ (см. также (19), (20), (23)) и, при наличии, позиционных (24) и скоростных (25) измерений СНС, а также доступной информации о координатах маркерных точек.

Общую модель для упомянутых измерений можно представить следующим образом:

$$z = Hy + w, \tag{26}$$

где состав вектора измерения z и модель матрицы H определяются упомянутыми выше формулами.

Фигурирующий в (25) вектор v является сводным вектором шумовых погрешностей инерциальных датчиков (см. (6)), измерения одометра (11) его и вариативных параметров (16), w – вектор шумовых погрешностей измерений СНС и одометра.

Для решения задачи (25), (26), записанной в эквивалентной дискретной форме, применяется алгоритм фильтра Калмана (при параметризации соответствующих гипотез). При обработке измерений используется алгоритм обобщенного фильтра Калмана с замыканием оценок в обратной связи на каждом шаге поступления измерений, как это сделано в [26] (см. п. 4.1.1.3 описания задачи совместной обработки данных БИНС и СНС). Обратная связь осуществляется в том числе и по оценкам параметров инструментальных погрешностей БИНС

$$\tilde{\omega}_z = \omega'_z + \tilde{v}_z, \tilde{f}_z = f'_z - \Delta f_z^0, \tilde{v}_z = (\tilde{v}_1^0, \tilde{v}_2^0, \tilde{v}_3^0)^T, \Delta \tilde{f}_z^0 = (\Delta f_1^0, \Delta f_2^0, \Delta f_3^0)^T \tag{27}$$

и одометра

$$\Delta \tilde{S}_{j+1} = \begin{pmatrix} \tilde{\delta}_3 \\ \frac{1}{1+k} \\ -\tilde{\delta}_1 \end{pmatrix} \Delta s'_{j+1}. \tag{28}$$

Здесь ω'_z, f'_z – измерения ДУС и акселерометров БИНС в ее приборных осях Mz , $\tilde{\omega}_z, \tilde{f}_z$ – скорректированные по оценкам смещений нулевых сигналов измерения, $\Delta \tilde{S}_{j+1}$ – скорректированное «векторное» измерение одометра (13).

Несколько слов об экспериментальных работах, связанных с разработкой и применением соответствующего программного обеспечения интеграционного решения «БИНС–одометр». В рамках совместных заказных поисковых работ лаборатории управления и навигации МГУ и предприятий-партнеров (некоторые из них перечислены во введении) было разработано соответствующее программное обеспечение [12, 25, 32]. В этих приложениях использовались инерциально-измерительные блоки на основе МЭМС-датчиков [32], волоконно-оптических гироскопов разного класса точности [12, 25], лазерных гироскопов. Минимальное приращение пройденного пути, измеряемое одометром, варьировалось от первых миллиметров для задач внутритрубной навигации (дефектоскопии) до первых десятков сантиметров для автомобильных приложений. В качестве объектов навигации выступали дефектоскопы нефтяных и газовых труб, автомобиль-лаборатория для диагностики дорожного

полотна, наземный объект на колесной базе [12], железнодорожный носитель навигационного комплекса. В [25] приводятся некоторые результаты навигации на магистральном трубопроводе «Союз» макета дефектоскопа разработки филиала «Саратоворгдиагностика» АО «Газпром энергетика» при использовании описываемого в статье алгоритма интеграции «БИНС–одометр».

Подчеркнем, что в основе интеграционного решения «БИНС–одометр» лежат объективные модели инерциального и одометрического счисления, модели уравнений погрешностей и корректирующих измерений, которые для разного типа приложений и состава инерциальных датчиков оставались неизменными. Модификации подлежали настройки шумов системы и измерений под класс точности используемых инерциальных датчиков и разрешающую способность одометра. Отметим также, что эти объективные модели давно используются лабораторией в других навигационных приложениях, например в задаче автокалибровки и довыставки лазерной БИНС авиационного применения [27, 33].

Заключение

В настоящей статье описаны основные модели интеграционного решения «БИНС–одометр» при позиционной интерпретации показаний одометра. Представлена структуризация интеграционного решения с выделением в нем объективных и вариативных составляющих.

Объективная часть содержит: известную модель автономного инерциального трехмерного счисления БИНС; модель кинематического одометрического счисления; уравнения погрешностей БИНС и одометрического счисления; модели коррекции БИНС с использованием «одометрических» координат и, возможно, доступной дополнительной навигационной информации, предоставляемой приемником сигналов СНС, а также информации о координатах реперных точек.

Вариативную часть составляют модели инструментальных погрешностей инерциальных датчиков, модель позиционного измерения одометра конкретного навигационного комплекса.

Данная структуризация позволила легко осуществлять модификацию базового программного обеспечения интеграционного решения «БИНС–одометр» для разных приложений: навигации дефектоскопов нефтяных и газовых трубопроводов, автомобиля, объекта железнодорожного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Боронахин А.М.** Инерциальные методы и средства измерений геометрических параметров рельсового пути: дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2002.
2. **Боронахин А.М., Гупалов В.И., Казанцев А.В.** Способ коррекции датчика пройденной дистанции. Патент РФ №2243505. 2004.
3. **Боронахин А.М.** Интегрированные инерциальные технологии динамического мониторинга рельсового пути: дис. ... докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 2013.
4. **Горбачев А.Ю.** Применение одометров для коррекции интегрированных навигационных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2009. №4. С. 37–53.
5. **Кузнецов И.М., Пронькин А.Н., Веремеенко К.К.** Навигационный комплекс аэропортового транспортного средства // Труды МАИ». 2011. Вып. 47.

6. Андропов А.В. Повышение точности определения местоположения внутритрубных инспекционных снарядов за счет использования спутниковых радионавигационных систем: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2006.
7. Андропов А.В. Повышение точности позиционирования внутритрубных инспекционных снарядов с использованием данных ГЛОНАСС/GPS // Вестник СибГАУ. 2006. Спец. вып. С. 28–35.
8. Голован А.А., Горицкий А.Ю., Парусников Н.А., Тихомиров В.В. Алгоритмы корректируемых инерциальных навигационных систем, решающих задачу топопривязки. Препринт N 2. М.: Изд-во МГУ, 1994.
9. Панев А.А. Задача навигации внутритрубного диагностического снаряда // Вестник московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2011. С. 53–56.
10. 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.
11. 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.
12. Никитин И.В. Задача навигации наземного объекта на основе данных БИНС и одометра: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2015.
13. Дмитриев С.П. Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 1997. 208 с.
14. Мальгин Н.В., Нестеров И.И., Кутман А.Б., Яудинов А.Ю., Маликов Н.Ш. Бесплатформенная инерциальная навигационная система M500. Современные системы ориентирования, навигации и топопривязки // Оборонная техника. 2014. №5–6. С. 87–92.
15. Georgy, J., Karamat, T., Iqbal, U., Noureldin, A., Enhanced MEMS-IMU/odometer/GPS integration using mixture particle filter, *GPS Solutions*, 2011, vol. 15, issue 3, pp. 239–252.
16. 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, Springer US, 2008, pp. 141–158.
17. Wankerl, M. and 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.
18. 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.
19. 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.
20. Hemerly, E.M., Schad, V.R., Implementation of a GPS/INS/Odometer navigation system, *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2008, vol. 3, pp. 519–524.
21. Jaewon Seo, Hyung Keun Lee, Jang Gyu Lee, Chan Gook Park, Lever Arm Compensation for GPS/INS/Odometer Integrated System, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2006, vol. 4, no. 2, pp. 247–254.
22. Wang Qingzhe, Fu Mengyin, Xiao Xuan, Deng Zhihong, Automatic calibration and in-motion alignment of an odometer-aided INS, *31st Chinese Control Conference (CCC)*, 2012, pp. 2024–2028.
23. Wei Jia, Xuan Xiao, Zhihong Deng, Self-calibration of INS/Odometer Integrated System via Kalman Filter, *IEEE fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*, 2012, pp. 224–228.
24. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Математические модели инерциальной навигации. М.: Издательство Московского университета, Москва, 2020. 162 с.
25. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Козлов А.В., Никитин И.В. и др. Результаты разработки и тестирования навигационных систем дефектоскопов магистральных нефте- и газопроводов // XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2015. С. 318–323.
26. Емельянцеv Г.И., Степанов А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. СПб: ГИЦ РФ «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 394 с.
27. Зорина О.А., Измайлов Е.А., Кухтевич С.Е., Портнов Б.И. и др. О расширении возможностей интеграции инерциальных и спутниковых навигационных систем для авиационных приложений // Гироскопия и навигация. 2017. №2. С. 18–34.

28. Phillips, R.E., Schmidt, G.T., GPS/INS Integration, *System Implications and Innovative Applications of Satellite Navigation*, AGARD Lecture Series 207, 9, 1–18, Canada Communication Group, Qu'ebec, 1996
29. Андреев В.Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Изд-во «Наука», 1966.
30. Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И. Задача коррекции в инерциальной навигации. М.: Изд-во МГУ, 1982.
31. **Современные методы и средства измерения** параметров гравитационного поля Земли / под общ. ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: ГИЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
32. 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 Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2019.
33. Vavilova, N., Golovan, A., Kozlov, A. et al., Impact of Antenna displacement and Time Delays of GNSS solutions on the INS-GNSS Complex Data Fusion Algorithm, *Proceedings of 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2020.

Golovan, A.A. (Lomonosov Moscow State University, Russia)

INS/Odometer Integration: Positional Approach, *Гироскопия и Навигация*, 2021, vol. 29, no. 2 (113), pp. 110–125.

Abstract. The problem of a strapdown inertial navigation system (SINS) integration with an odometer as part of an integrated navigation system is considered. The odometer raw measurement is considered as an increment of the distance traveled along the odometer ‘measuring’ axis. Models of the integration solution components for the case of three-dimensional navigation are presented, among which are the models of inertial autonomous and kinematic odometer dead reckoning (DR), models of relevant error equations, the model of SINS position aiding based on the odometer DR data and using GNSS position and velocity, wherever possible. The models comprise objective components, which do not depend on the type of the inertial sensors used and their accuracy grade, and variable components, which take into account the properties of the navigation sensors used. The integration does not require zero velocity updates, known as ZUPT correction, which are commonly used in navigation application.

Key words: strapdown inertial navigation system (SINS), odometer, odometer position measurement, SINS/odometer integration.

Материал поступил 08.01.2021