ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова”
Механико-математический факультет

На правах рукописи

Никитин Илья Вячеславович

ЗАДАЧА НАВИГАЦИИ НАЗЕМНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ БИНС И ОДОМЕТРА

Специальность 01.02.01 – теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва, 2016

Работа выполнена на кафедре прикладной механики и управления механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель: Голован Андрей Андреевич,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Егоров Юрий Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Деревянкин Алексей Викторович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ФГУП «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения имени академика Н. А. Пилюгина»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП ГосНИИАС)

Защита диссертации состоится 25 марта 2016г. в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.22 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, механико-математический факультет, ауд. 16-10.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: Ломоносовский проспект, д. 27 и на сайте
`http://mech.math.msu.su/~snark/files/diss/0099diss.pdf`

Автореферат разослан февраля 2016г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Прошкин Владимир Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Диссертационная работа посвящена исследованию задачи навигации подвижного объекта, навигационный комплекс которого состоит из

- инерциально-измерительного блока (ИИБ), состоящего из триады ньютонометров (акселерометров), триады датчиков угловой скорости (ДУС) или гироскопов;
- датчика пройденного пути — одометра.

Возможным дополнительным источником навигационной информации в рассматриваемой задаче могут быть известные координаты реперных (или маркерных) точек, мимо которых перемещается объект, позиционные, скоростные показания спутниковых систем навигации GPS, ГЛОНАСС, а также неявная скоростная информация о нулевой скорости во время остановок объекта.

Совокупный приборный состав комплекса и навигационной информации избыточен, что позволяет анализировать различные функциональные схемы решения задачи и обосновывать алгоритмы интеграции.

Значительное внимание в работе уделено анализу возможных функциональных схем решения задачи и их интерпретации с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Это важно для приложений, поскольку становится доступной картина возможных алгоритмических решений и их особенностей

Актуальность обусловлена востребованными практическими приложениями, для решения которых используется интеграция данных БИНС и одометра. Из них можно выделить следующие:

- задача навигации внутритрубных диагностических снарядов (ВДС), целью которых является привязка выявленных дефектов магистрального нефте- или газопровода к карте местности;
- задача навигации наземного транспортного средства с привлечением информации GPS в городских условиях или на специальных полигонах;
- задача навигации на железнодорожном транспорте, цель которой, помимо навигационной составляющей, может содержать привязку обнаруженных дефектов пути к карте;

- специфические приложения, для которых важно не зависеть от информации, предоставляемой приемником сигналов GPS и/или ГЛОНАСС.

Применение разработанных алгоритмов демонстрируется на конкретных приложениях, представляющих самостоятельный интерес.

Цель работы.
Основными целями диссертационной работы являются:

- анализ, обоснование возможных функциональных схем решения задач навигации и топопривязки объектов, использующих ИИБ (или БИНС) и одометр(ы);
- разработка, обоснование математических моделей, алгоритмов решения исследуемой задачи коррекции БИНС, которая ставится как линейная стохастическая задача оценивания и сглаживания (в режиме постобработки);
- тестирование разработанных решений при помощи экспериментальных данных (навигационный эксперимент с ВДС в магистральном газопроводе, городские автомобильные испытания, а также при помощи разработанного компьютерного имитатора задачи).

Методы исследований.
Используются методы и модели теоретической механики, теории инерциальной и спутниковой навигации, численные методы, элементы линейной алгебры, оптимального оценивания, теории случайных процессов.

Достоверность результатов.
Все представленные в работе алгоритмы проверены либо с помощью экспериментальных данных, либо с помощью данных, полученных при моделировании движения разработанным имитатором.

Научная новизна. Все основные результаты, полученные в диссертационной работе, являются новыми. В диссертационной работе:

1. разработаны, обоснованы, проанализированы функциональные схемы интеграции данных БИНС и одометра, новые для этой задачи;
2. выведены и применены на практике новые коррекционные модели для задачи интеграции БИНС-одометр. Основная идея построения новых

алгоритмов коррекции состоит в применении результатов кинематического одометрического счисления для непрерывной коррекции БИНС в движении. Вывод коррекционных моделей основан на базовых понятиях механики корректируемых инерциальных навигационных систем;

3. разработан алгоритм введения обратных связей в модельные уравнения для рассматриваемых схем интеграции по всем компонентам сводного вектора состояния уравнений ошибок интеграционных моделей БИНС+одометр, учитывающий значимые параметры инструментальных погрешностей инерциальных датчиков, погрешность масштабного коэффициента одометра, геометрические погрешности взаимной установки приборов;

4. разработан алгоритм сглаживания, который учитывает специфику применения обратных корректирующих связей в алгоритмах реального и обратного времени;

5. разработан компьютерный имитатор как инструмент численного исследования задачи и отладки алгоритмов.

Теоретическая и практическая ценность.

Основную теоретическую ценность составляют разработанная классификация функциональных схем интеграции данных БИНС и одометра, полученные в работе коррекционные модели задачи БИНС+одометр в нотации механики корректируемых навигационных систем, а также разработанный алгоритм введения обратных связей, учитывающий как модели погрешностей инерциальных датчиков, так и модели погрешностей, связанных с одометром. С практической стороны, алгоритмы могут быть полезны специалистам в области интегрированных навигационных систем, занимающимися, в частности, задачами топографической привязки, в которых используются инерциальная навигационная система и одометр.

Апробация работы.

Содержащиеся в диссертации результаты докладывались на международных конференциях:

1. XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Концерн "ЦНИИ "Электроприбор 2015 (пленарный доклад).

2. XXII Международный научно-практический семинар "Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации Алушта, 2013.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в четырех работах автора, из них две статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Список работ приведен в конце автореферата.

Личный вклад.

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично автором. Научному руководителю принадлежат постановка задачи и общее научное руководство.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 31 наименований и приложений. В диссертации приведено 19 рисунков. Общий объем диссертации – 89 страниц.

Содержание диссертации

Во введении формулируются цели диссертационной работы, перечисляются основные сферы практического применения исследуемой задачи, а также приводится историческая справка по развитию данного направления в работах лаборатории управления и навигации МГУ имени М.В. Ломоносова. Описывается структура работы и приводится обзор основных профильных публикаций, присутствующих в открытой печати.

В первой главе проводится анализ возможных функциональных схем решения задачи интеграции БИНС-одометр с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Этот анализ позволяет построить важную для навигационных приложений, использующих БИНС и одометр, картину возможных алгоритмических решений.

Инерциальные навигационные системы моделируют движение двух механических объектов:

- материальной точки M, движущейся в поле сил земного тяготения g^0 под действием внешней силы f, доступной измерению;
- приборного трехгранника, тем или иным способом связанного с движущимся объектом и в осях которого измеряется упомянутая внешняя сила f.

Пусть поведение динамического объекта описывается векторным уравнением:

$$\dot{X} = F(X, U), \qquad X(t_0) = X_0, \tag{1}$$

где X – вектор состояния, U – внешнее воздействие на систему, доступное измерению, F – известная вектор-функция.

В инерциальной навигации компонентами вектора состояния X служат координаты (например, географические) характерной точки объекта M – местоположения приведенного центра БИНС, а именно, центра блока ньютонометров БИНС, компоненты вектора линейной скорости этой точки (относительной или абсолютной), параметры ориентации приборного трехгранника Mz, жестко связанного с осями чувствительности ньютонометров БИНС.

Компонентами вектора измеряемого внешнего воздействия U служат показания инерциальных датчиков – ньютонометров, датчиков угловой скорости или гироскопов.

Предполагается известной информация о начальном состоянии объекта $X'(t_0) = X'_0$. В каждый момент времени измеряется $U(t)$, результат измерения обозначим $U'(t)$. Тогда с указанным начальным состоянием могут интегрироваться уравнения, структурно повторяющие уравнения движения объекта (принцип инвариантности):

$$\dot{X}' = F(X', U'). \tag{2}$$

Информация $X'(t_0), U'(t)$ называется основной.

Здесь вектор X' является модельным, числовым образом исходного динамического объекта, причем поведение этого модельного объекта подчиняется тем же законам, что и реальный объект. Поэтому в инерциальной навигации уравнения (2) называются модельными уравнениями.

Выходной вектор X' определяет координаты второй модельной точки M' и ориентацию нескольких модельных трехгранников, в частности, числового образа приборного трехгранника Mz - трехгранника $M'y$.

Представим вектор X в коагулированном виде:

$$X = \left(X^{(c)^T}, X^{(v)^T}, X^{(a)^T}\right)^T, \tag{3}$$

где подвектор $X^{(c)}$ характеризует координаты точки M, $X^{(v)}$ характеризует компоненты вектора линейной скорости точки M, $X^{(a)}$ – параметры ориентации корпуса объекта.

Обозначим через V^d идеальные измерения одометра. Это измерение является скалярной величиной, интерпретируемой либо как локальная продольная скорость объекта, либо как локальное перемещение объекта вдоль его продольной оси.

Тогда состояние объекта можно описать отличным от (1) уравнением

$$\dot{X}^{(c)} = F^d\left(X^{(c)}, X^{(a)}, V^d\right), \tag{4}$$

представляющего модель кинематического одометрического счисления (F^d соответствующая ему известная вектор-функция), в которой помимо собственно измерения V^d используется информация об ориентации корпуса объекта, содержащаяся в компонентах подвектора $X^{(a)}$.

Соответственно, второй вариант модельных уравнений, определяющих состояние вектора координат $X^{(c)}$ примет вид:

$$\dot{X}'' = F^d(X'', X^{(a)'}, V''), \qquad X'' = X^{(c)''}, \tag{5}$$

где V'' – реальное измерение одометра, вектор $X'' = X^{(c)''}$ – второй модельный набор координат.

Этот вариант не является автономным, поскольку он предполагает использование дополнительной сторонней информации о параметрах ориентации $X^{(a)'}$, предоставляемых первым модельным объектом (2).

Поэтому для замыкания модели (5) следует использовать избыточное представление

$$\begin{aligned} \dot{X}' &= F(X', U'), \qquad X' = \left(X^{(c)'^T}, X^{(v)'^T}, X^{(a)'^T}\right)^T, \\ \dot{X}'' &= F^d(X'', X^{(a)'}, V''). \end{aligned} \tag{6}$$

Избыточность здесь понимается в том смысле, что первая и вторая подсистемы модельных уравнений определяют модельные значения координат $X^{(c)}$ и скорости $X^{(v)}$ одного и того же объекта.

Вектор X'' является вторым модельным, числовым образом "части" исходного динамического объекта, поведение которого подчиняется тем же законам, что и реальный объект. Выходной вектор X'' определяет координаты и скорость второй модельной точки M'', и, в частности, ориентацию модельного географического трехгранника.

В случае использования измерений одометра здесь возникает два варианта.

- Измерение одометра V'' интерпретируется как измерение продольной скорости и оно является корректирующим измерением. Именно этот вариант встречается на практике;

- Вектор X'', являющийся результатом кинематического одометрического счисления (6), служит вектором позиционной коррекции модельного объекта (2). В диссертации рассматривается именно этот вариант, означающий применение непрерывной позиционной коррекции БИНС при помощи результатов одометрического счисления.

Для второго варианта вводятся следующие вектора ошибок:

$$x^d(t) = X''(t) - X^{(c)}(t), \qquad x(t) = X'(t) - X(t).$$

Тогда уравнения ошибок навигационного счисления для избыточной модельной системы (6) примут вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x^d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q \\ q^d \end{pmatrix}, \tag{7}$$

где

$$A_{21} = \frac{\partial F^d}{\partial X}, \quad A_{22} = \frac{\partial F^d}{\partial X^{(c)}}, \quad q^d = \frac{\partial F^d}{\partial V}.$$

Структурные свойства коагулированной системы уравнений ошибок таковы, что ошибка x^d одометрического счисления будет зависеть от ошибок инерциального счисления, а ошибка x инерциального счисления от одометрического - нет.

Появление, например, внешней позиционной $Z = \Theta(X) + r$ информации приводит к формированию пар векторов коррекции как для инерциального модельного объекта (2), так и для одометрического модельного объекта (5) ($_{ins} \to$ БИНС, $_{odo} \to$ одометр)

$$\begin{aligned} z_{ins} &= Z - \Theta(X') = H_{ins}x + r, \qquad & H_{ins} &= \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \\ z_{odo} &= Z - \Theta(X'') = H_{odo}x^{(c)} + r, \qquad & H_{odo} &= \frac{\partial \Theta}{\partial X^{(c)}}. \end{aligned} \tag{8}$$

Также одометрическое решение X'' естественно использовать к качестве коррекционной позиционной информации для модельного объекта (2):

$$z_{ins/odo} = X' - X'' \simeq x - x^d. \tag{9}$$

Существующая классификация и терминология задач комплексирования инерциальных и спутниковых навигационных систем порождает следующие функциональные схемы для данной задачи. Условно назовем их «**одометр + БИНС**» и «**БИНС + одометр**».

1. Схема «**одометр+БИНС**». Схема достаточно распространена на практике: показания одометра заменяют часть основной инерциальной информации и становятся главными для определения координат объекта. Углы ориентации БИНС служат источником информации об ориентации объекта в пространстве. Возможности комплексной обработки информации БИНС и одометра не реализуются полностью.

   Подварианты интеграции в рамках принятой схемы «одометр+БИНС».

   (a) **Слабосвязанные системы.** Автономная БИНС доставляет углы ориентации объекта, используемые для перепроектировки векторных измерений одометра на оси модельного географического (квазимодельного) трехгранника с целью последующего интегрирования кинематических уравнений для географических координат.

   (b) **Модифицированные слабосвязанные системы.** Отличие этого варианта от предыдущего заключается в добавлении процедуры коррекции углов ориентации автономной БИНС – углов курса, крена и тангажа, обусловленной несовпадением модельных точек M' и M''. Угловые ошибки первого из них могут быть значительными в сравнении со вторым при длительном функционировании БИНС.

2. Схема «**БИНС+одометр**». В этой схеме показания одометра служат корректирующими измерениями для БИНС. В частности, коррекция может производится по позиционному решению, полученному в схеме «одометр+БИНС». Соответствующая задача оптимизации может быть решена в линейной постановке.

   Подварианты интеграции в рамках принятой схемы «БИНС+одометр»:

   (a) **Тесно связанные системы.** В линейной постановке в варианте **оценивания** ставится и решается задача коррекции БИНС при помощи измерений одометра. Вариант применим для достаточно точных БИНС с ограниченным временем функционирования.

   (b) **Глубоко связанные системы.** Эта же задача коррекции БИНС решается в линейной постановке в варианте **введения обратных связей** в алгоритмы навигационного счисления БИНС и одометра.

Идеализированная модель одометра.

Пусть одометр представляет собой устройство, измеряющее число оборотов колеса. Первичной измерительной информацией служат целые числа N_i, представляющие собой значение целочисленного счетчика

парциальных углов поворота колеса на интервале времени $[t_0, t_i]$ (в начальный момент времени t_0, для определенности, $N_0 = 0$). Пусть n – число равномерно установленных по окружности колеса меток, тогда величина парциального угла Δa в радианах:

$$\Delta a = \frac{2\pi}{n}.$$

Пусть R – значение радиуса колеса. Тогда пройденный путь s точкой контакта колеса с поверхностью дороги на интервале времени $[t_0, t_i]$ будет равен:

$$s(t_i) = \frac{2\pi R N_i}{n} = K N_i, \qquad K = \Delta a R, \tag{10}$$

где параметр K имеет смысл масштабного коэффициента одометра, переводящего первичные целочисленные измерения в пройденный путь, изменение значение счетчика N_i произошло именно в момент времени t_i.

Разность $\Delta N_i = N_i - N_{i-1}$ характеризует пройденный путь Δs_i на интервале времени $[t_{i-1}, t_i]$:

$$\Delta s_i = K \Delta N_i.$$

Это есть истинное значение приращения пути, если именно в моменты времени t_{i-1}, t_i происходило увеличение счетчика N до величин N_{i-1}, N_i.

Идеализированная модель одометра представляет из себя модель датчика, связанного с продольной осью объекта и измеряющего дискретным образом пройденный путь $s(t_i)$ (скалярную величину) приведенного центра БИНС M, находящегося на этой оси. То есть считается, что пройденный путь s, зафиксированный одометром, совпадает с пройденным путем приведенного центра БИНС. Предполагается, что:

- движение объекта происходит без проскальзывания;
- объект постоянно сцеплен с дорогой, то есть не подлетает и не проваливается, и отсутствует снос объекта в поперечном направлении.

Это позволяет перейти от скалярной интерпретации измерения приращения пути одометром к векторной: вектор скорости объекта в осях связанной с корпусом системы координат Ms представляет вектор с двумя нулевыми компонентами (проекции на боковую Ms_1, и вертикальную Ms_3 оси), и одной ненулевой компоненты Δs_i (при движении объекта) по продольной оси Ms_2:

$$\Delta s_s = (0, \Delta s_i, 0)^\top. \tag{11}$$

Аналогичная интерпретация справедлива для локальной продольной средней скорости V_i на интервале времени $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$:

$$V_s = (0, V_i, 0)^\top, \qquad V_i = \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i}, \tag{12}$$

где V_s – вектор истинной относительной скорости точки M в связанной системе координат Ms.

Используя описанные модели приращения пройденного пути (11) и продольной скорости (12), модель дискретного одометрического счисления географических координат записывается в следующем виде:

$$\Delta s^d_{x^0} = \begin{pmatrix} \Delta s_{x^0_1} \\ \Delta s_{x^0_2} \\ \Delta s_{x^0_3} \end{pmatrix} = D^\top_{sx^0} \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta s_i \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \frac{\Delta s_{x^0_1}}{R_E \cos\varphi_{i-1}}, \quad \varphi_i = \varphi_{i-1} + \frac{\Delta s_{x^0_2}}{R_N}, \quad h_i = h_{i-1} + \Delta s_{x^0_3}, \tag{13}$$

где $\varphi_0 = \varphi(t_0), \lambda_0 = \lambda(t_0), h_0 = h(t_0)$ – координаты стартовой точки.

Во второй главе приводится необходимое для изложения описание одного из вариантов уравнений БИНС с описанием модели уравнений ошибок БИНС, приводятся вывод и описание моделей одометрического кинематического счисления в рамках схемы «**одометр**+**БИНС**». В частности, это:

- реалистичная модель измерения одометра и ее векторные интерпретации;
- модели одометрического счисления в рамках вариантов **слабосвязанные системы** и **модифицированные слабосвязанные системы**;

Приводится вывод уравнения ошибок одометрического счисления для вариантов **слабосвязанные системы** и **модифицированные слабосвязанные системы**. В рамках схемы «**БИНС**+**одометр**» описываются сводные модели задачи коррекции БИНС по одометрическому счислению.

Уравнения ошибок БИНС. В теории инерциальной навигации при выводе уравнений ошибок БИНС и их интерпретации используются представление о двух точках: идеальной (реальной) M и модельной M' – числовом образе точки M (решения БИНС) и пяти трехгранниках:

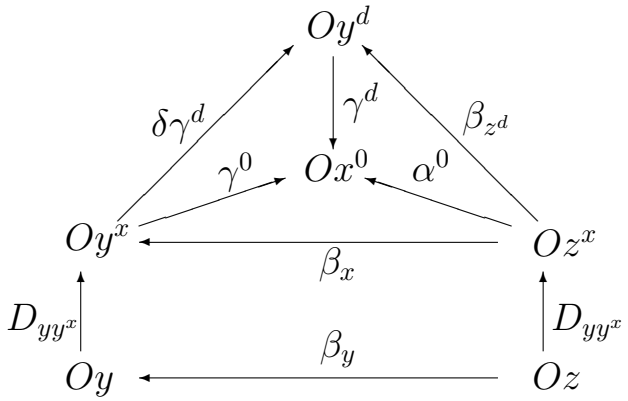
- географическом (опорном) $Mx^0(Ox^0)$;
- приборном $Mz(Oz)$;
- модельном $M'y(Oy)$ – числовом образе Mz приборного трехгранника;
- квазимодельном $M'y^x(Oy^x)$ – числовом образе Mx^0;
- квазиприборном $Mz^x(Oz^x)$ – так называемой виртуальной платформе, числовом образе приборного трехгранника в географических осях.

В рассматриваемой задаче интеграции БИНС и одометра позиционное решение по схеме интеграции **«одометр+БИНС»** пополняют выше приведенные представления, появляются:

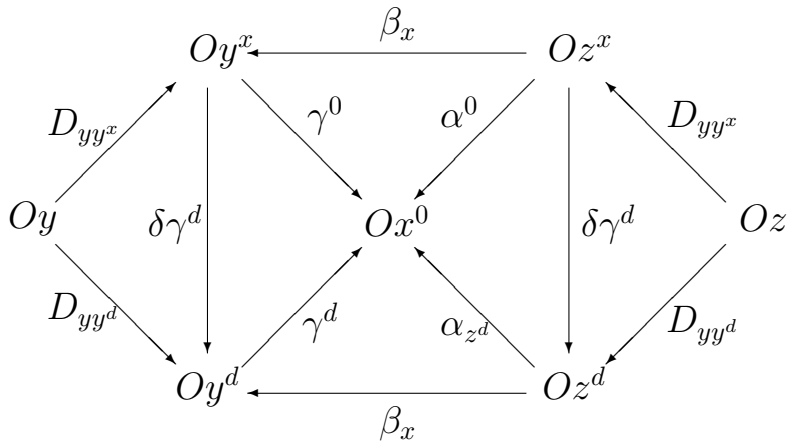
- вторая модельная точка M'' (одометрическая),
- второй модельный географический одометрический трехгранник $M''y^d\,(Oy^d)$.
- в схеме интеграции **«одометр+БИНС» + модифицированный слабосвязанный вариант** появляется второй квазиприборный одометрический трехгранник $Mz^d\,(Oz^d)$, матрица ориентации которого относительного модельного трехгранника $M'y$ определяет вторая модельная матрица D_{yy^d}.

Диаграммы соотношений координатных трехгранников, векторы малых поворотов.

Связи между описанными системами координат в схеме «БИНС+одометр» в слабосвязанном варианте интеграции с одометром могут быть представлены в виде следующей диаграммы:



В схеме «БИНС+одометр» в модифицированном слабосвязанном варианте интеграции диаграмма связей будет представляться в следующем виде:



Здесь вектора $\alpha^0, \alpha_{z^d}, \beta_y, \beta_x, \gamma^0, \gamma^d, \delta\gamma^d$ – вектора малых поворотов, определяющих матрицы ориентации между соответствующими трехгранниками. α_1, α_2 – являются ошибками построения приборной вертикали; γ^0 – угловые ошибки, характеризуют позиционные ошибки, вызванные несовпадением географических трехгранников в реальной M и модельной M' точках; $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$ – ошибки вычисления географических координат; $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ – азимутальные ошибки ориентации.

Вектор $\delta\gamma^d$ характеризует позиционную ошибку модельной точки БИНС M' относительно модельной одометрической точки M''. В линейном приближении:

$$\delta\gamma^d = \begin{pmatrix} -\delta\varphi^d \\ \delta\lambda^d \cos\varphi' \\ \delta\lambda^d \sin\varphi' \end{pmatrix}, \quad \delta\varphi^d = \varphi' - \varphi'', \ \delta\lambda^d = \lambda' - \lambda''. \tag{14}$$

Вектор γ^d характеризует полную позиционную ошибку координат модельной одометрической точки M'':

$$\gamma^d = \begin{pmatrix} -\Delta\varphi^d \\ \Delta\lambda^d \cos\varphi'' \\ \Delta\lambda^d \sin\varphi'' \end{pmatrix}, \quad \Delta\varphi^d = \varphi'' - \varphi, \ \Delta\lambda^d = \lambda'' - \lambda. \tag{15}$$

Реалистичная модель измерений одометра s'', рассматриваемая в диссертационной работе, предполагает учет следующих факторов:

1. относительная погрешность масштабного коэффициента κ, переводящего первичное измерение в пройденное расстояние:

$$\frac{K''}{K} = 1 + \kappa,$$

где K – номинальное значение масштабного коэффициента, K'' – используемое значение для вычислений.

Предполагаем, что в указанной модели ошибка κ не изменяется со временем;

2. наличие зоны нечувствительности измерения, обусловленная упомянутой целочисленностью первичной измерительной информации.

Рассмотрим интервал времени $[t_{i-1}, t_i]$ со значениями счетчика N_{i-1}, N_i. В этом случае можно сказать, что измеряемое приращение пути $\Delta s_i''$ есть сумма истинного приращение пути Δs_i, ошибки, вызванной погрешностью масштаба κ, и случайной погрешности Δs_i^s:

$$\Delta s_i'' = K''(N_i - N_{i-1}) + \Delta s_i^s = \Delta s_i + \kappa \Delta s_i'' + \Delta s_i^s.$$

Наличие случайной составляющей вызвано тем, что неподвижная точка колеса, контактирующая с дорогой, случайным образом может лежать на дуге парциального угла поворота колеса. Иными словами это ошибка синхронизации снимаемых данных с инерциальных датчиков и с одометра. Для параметра Δs_i^s можно использовать, например, модель случайной величины, равномерно распределенной на отрезке $[0, K]$;

3. "измерительная" ось одометра и продольная приборная ось БИНС Mz_2 могут быть несоосны.

Данная ошибка может быть описана при помощи введения вектора малого поворота $\varkappa_z = (\varkappa_{z_1}, \varkappa_{z_2}, \varkappa_{z_3})^\top$, характеризующего взаимную ориентацию приборного трехгранника БИНС Mz и связанного с корпусом объекта системы координат Ms:

$$l_z = (E + \widehat{\varkappa}_z) l_s, \tag{16}$$

где l_z, l_s – один и тот же вектор l.

Считаем, что ошибка $\varkappa_z$ также не изменяется со временем.

Модели измерения одометра.

Формируется векторная интерпретация показаний одометра для реалистичной модели, аналогично (11):

$$\Delta s_s'' = (0, \Delta s_i'', 0)^\top . \tag{17}$$

Аналогичная (12) интерпретация для измеренной локальной продольной скорости:

$$V_s'' = (0, V_i'', 0)^\top , \qquad V_i'' = \frac{\Delta s_i''}{\Delta t_i}, \tag{18}$$

Можно показать, что в линейном приближении справедливо:

$$\Delta s_s'' = \Delta s_z + \Delta s_i'' \, (-\varkappa_{z_3}, \kappa, \varkappa_{z_1})^\top + \Delta s_s^{d^s}, \tag{19}$$

где Δs_s, Δs_z – векторы истинного приращения локальных координат в проекции на связанные Ms и приборные Mz оси соответственно, $\Delta s_s^{d^s}$ – вектор, составленный из случайной составляющей модели погрешности одометра $\Delta s_i^{d^s}$:

$$\Delta s_s^{d^s} = \left(0, \Delta s_i^{d^s}, 0\right)^\top . \tag{20}$$

Аналогично для модели векторного скоростного измерения имеем:

$$V_s'' = V_z + V_i'' \, (-\varkappa_{z_3}, \kappa, \varkappa_{z_1})^\top + \Delta V_s^{d^s}, \tag{21}$$

где V_s, V_z – векторы истинной относительной линейной скорости объекта в проекции на связанную Ms и приборную Mz системы координат, соответственно, $V_s^{d^s}$ – вектор, соответствующий случайной составляющей показаний одометра:

$$\Delta V_s^{d^s} = \left(0, \Delta V_i^{d^s}, 0\right)^\top , \quad \Delta V_i^{d^s} = \frac{\Delta s_i^{d^s}}{\Delta t}. \tag{22}$$

Уравнения ошибок одометрического счисления.
Введем:

- y^d – радиус-вектор истинной точки M в осях Oy^d;
- V_{y^d} – вектор относительной линейной скорости точки M в осях Oy^d;
- Ω'' – вектор относительной угловой скорости Oy^d.
- y'' – радиус-вектор точки M'' в осях одометрического квазимодельного трехгранника Oy^d;

- V''_{y^x} – вектор относительной линейной скорости точки M'', полученный проектированием "скоростного" измерения одометра (21) на оси Oy^x с помощью матрицы D_{yy^x};
- V''_{y^d} – вектор относительной линейной скорости точки M'', полученный проекцией "скоростного" измерения одометра (21) на оси Oy^d с помощью матрицы D_{yy^d};

Можно показать, что справедливы следующие уравнения ошибок для полной позиционной ошибки одометрического счисления – $\Delta\dot{y}^d$:

- для слабосвязанного варианта:

$$\Delta\dot{y}^d = \widehat{\Omega}''\Delta y^d + \left(\widehat{\beta}_x + \widehat{\delta\gamma^d}\right) V''_{y^x} - D_{y^x y}\widehat{\varkappa}_z V''_s + \kappa V''_{y^x} + \Delta V^{ds}_{y^x}. \tag{23}$$

- для модифицированного слабосвязанного варианта:

$$\Delta\dot{y}^d = \widehat{\Omega}''\Delta y^d + \widehat{\beta}_x V''_{y^d} - D_{y^d y}\widehat{\varkappa}_z V''_s + \kappa V''_{y^d} + \Delta V^{ds}_{y^d}. \tag{24}$$

Полный набор переменных вектора состояния уравнений ошибок совокупной системы уравнений ошибок БИНС и одометрического счисления формируется следующим образом:

$$\xi = (\xi^{(i)\top}, \xi^{(d)\top})^\top,$$

где

1. $\xi^{(i)}$ — вектор ошибок БИНС:

$$\xi^{(i)} = \left(\Delta y^\top, \delta V_{y^x}^\top, \alpha_1, \alpha_2, \beta_3, \nu_z^{0\top}, \Delta f_z^{0\top}\right)^\top;$$

где Δy – вектор полных ошибок определения местоположения в осях трехгранника $M'y^x$; δV_{y^x} – вектор динамических ошибок определения составляющих относительной линейной скорости; α_1, α_2 – угловые ошибки построения приборной вертикали; β_3 – азимутальная кинематическая ошибка; $\nu_z^0, \Delta f_z^0$ – векторы нулевых составляющих погрешностей ДУС и ньютонометров соответственно.

2. $\xi^{(d)}$ — вектор ошибок в одометрическом счислении, аналогичный (**??**):

$$\xi^{(d)} = \left(\Delta y^{d\top}, \kappa, \varkappa_{z_1}, \varkappa_{z_3}\right)^\top,$$

где Δy^d – вектор полных позиционных ошибок одометрического счисления; κ – ошибка масштабного коэффициента;

$\varkappa_{z_1}, \varkappa_{z_3}$ – угловые ошибки установки БИНС на корпусе объекта.

Модели корректирующих измерений.

В качестве корректирующих измерений для схемы «БИНС+одометр» используется позиционная информация, предоставляемая одометрическим счислением географических координат. Измерения формируются по разностям географических координат БИНС (φ', λ', h') и одометрических координат $(\varphi'', \lambda'', h'')$ и в линейном приближении имеют вид:

$$\begin{aligned}
z_1 &= (\lambda' - \lambda'')R_E \cos\varphi' = (\lambda' - \lambda)R_E \cos\varphi' - (\lambda'' - \lambda)R_E \cos\varphi' = \Delta y_1 - \Delta y_1^d + r_1^p, \\
z_2 &= (\varphi' - \varphi'')R_N \quad\;\; = (\varphi' - \varphi)R_N \quad\;\; - (\varphi'' - \varphi)R_N \quad\;\; = \Delta y_2 - \Delta y_2^d + r_2^p, \\
z_3 &= (h' - h'') \quad\;\; = (h' - h) \quad\;\; - (h'' - h) \quad\;\; = \Delta y_3 - \Delta y_3^d + r_3^p,
\end{aligned} \tag{25}$$

где $r^p = (r_1^p, r_2^p, r_3^p)^\top$ – вектор шума измерений, обусловленный возможным отсутствием синхронизации информационных потоков БИНС и одометрического счисления.

В качестве характерных значений среднеквадратичных отклонений шумов r_j^p, $j = 1, 2, 3$, может использоваться минимальное возможное приращение пройденного пути по одометру.

Коррекция по внешней позиционной информации.

В качестве внешней позиционной информации (в зависимости от приложения) могут использоваться, например, спутниковые данные $(\varphi^{\text{GPS}}, \lambda^{\text{GPS}}, h^{\text{GPS}})$ или координаты контрольных точек $(\varphi^{\text{cp}}, \lambda^{\text{cp}}, h^{\text{cp}})$. Обозначим такую внешнюю дополнительную информацию как $\varphi^{\text{ext}}, \lambda^{\text{ext}}, h^{\text{ext}}$. Тогда

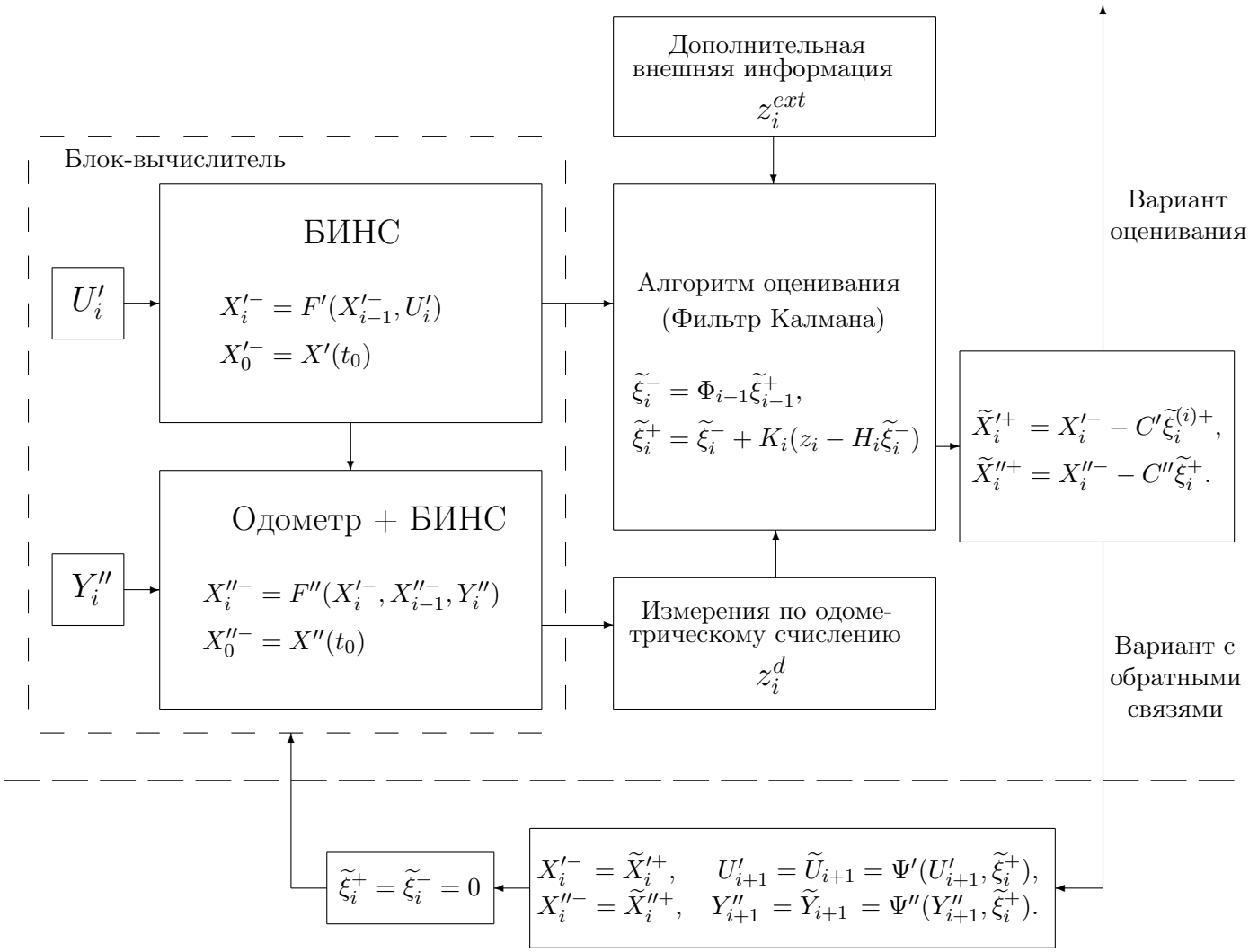
$$\begin{aligned}
z_1^{(i)} &= (\lambda' - \lambda^{\text{ext}})R_E \cos\varphi' = \Delta y_1 + r_1^{(i)} \\
z_2^{(i)} &= (\varphi' - \varphi^{\text{ext}})R_N \quad\;\; = \Delta y_2 + r_2^{(i)} \\
z_3^{(i)} &= (h' - h^{\text{ext}}) \quad\;\; = \Delta y_3 + r_3^{(i)}, \\
z_4^{(d)} &= (\lambda'' - \lambda^{\text{ext}})R_E \cos\varphi'' = \Delta y_1^d + r_4^{(d)} \\
z_5^{(d)} &= (\varphi'' - \varphi^{\text{ext}})R_N \quad\;\; = \Delta y_2^d + r_5^{(d)} \\
z_6^{(d)} &= (h'' - h^{\text{ext}}) \quad\;\; = \Delta y_3^d + r_6^{(d)},
\end{aligned} \tag{26}$$

где вектор $r = (r_1^{(i)}, r_2^{(i)}, r_3^{(i)}, r_4^{(d)}, r_5^{(d)}, r_6^{(d)})^\top$ представляет случайную составляющую ошибки внешней корректирующей информации.

Таким образом, если имеется внешняя дополнительная позиционная информация, возможна (и необходима) коррекция обоих позиционных решений: решения БИНС и одометрического счисления.

В третьей главе применительно к задаче интеграции «**БИНС+одометр**» детально описываются алгоритмы информационно эквивалентных схем решения задачи коррекции – варианты оценивания (схема **«БИНС+одометр» + тесно связанные системы**) и введения обратных связей (схема **«БИНС+одометр» + глубоко связанные системы**) в модельные уравнения БИНС и одометрического счисления. Приводится единая блок-схема соответствующих алгоритмов решения задачи интеграции БИНС и одометра для задач в реальном времени и в постобработке. Приводится описание алгоритмов решения задачи сглаживания, возникающей в том случае, когда допускается постобработка совокупной измерительной информации.

Блок-схема алгоритмов решения задачи коррекции БИНС по одометрической информации.



Здесь:

- U_i' – основная информация инерциальной природы;
- Y_i'' – информация о пройденном объектом пути, поставляемая одометром и используемая для построения одометрического решения;
- F', F'' – известные вектор-функции интегрирования параметров векторов состояния систем X', X'' по поступающей информации с инерциальных датчиков U_i' и одометра Y_i'';
- z_i^d – корректирующие измерения, формируемые по внутренней, относительно совокупной системы БИНС и одометра, информации — кинематическом одометрическом счислении географических координат;
- z^{ext} – возможная внешняя дополнительная корректирующая информация, например, решения GPS или координаты контрольных (маркерных) точек;
- C', C'' – матрицы пересчета оценки вектора состояния уравнений ошибок $\widetilde{\xi}$ к вектору ошибок состояния системы $\widetilde{x}$, включающего в себя как ошибки автономного БИНС, так и ошибки одометрического счисления;
- Ψ', Ψ'' – функции вычисления поправок к входной инерциальной и одометрической информации, списывающих оцененные составляющие модели ошибок датчиков в варианте с введением обратных связей.

Схематичное описание алгоритма

1. Обозначим данные, поступающие с датчиков БИНС U_i' и одометра Y_i'', в следующем общем виде:

$$U_i' = U_i'(\omega_z', f_z'),$$
$$Y_i'' = Y_i''(s'');$$

2. Блок-вычислитель производит интегрирование уравнений движений как для автономной БИНС, так и для интегрированной системы БИНС+одометр с соответствующими начальными условиями. Численное интегрирование выходных векторов состояния систем $X_i'^-, X_i''^-$ производится по формулам:

$$X_i'^- = F'(X_{i-1}'^-, U_i'),$$
$$X_i''^- = F''(X_i'^-, X_{i-1}''^-, Y_i''),$$

где F', F'' отражают используемый метод интегрирования.

3. По данным одометра формируются позиционные корректирующие измерения z_i^d согласно (25);

4. В качестве внешней корректирующей информации z_i^{ext} могут выступать показания GPS-приемников, либо информация о координатах реперных точек (26);

5. Блок оценивания совокупного вектора состояния уравнений ошибок ξ;

6. Блок вычисления оценок ошибок векторов состояния системы $X_i'^-, X_i''^-$ посредством специальных матриц пересчета C', C'' между вектором ошибок уравнений ошибок и ошибок параметров состояния системы, а именно географических координат, скорости и углов ориентации;

7. Далее, полученные оценки векторов состояния системы $\widetilde{X}_i'^+, \widetilde{X}_i''^+$ представляют собой итоговое решение коррекционной задачи в варианте оценивания (БИНС+одометр, тесно-связанные системы).

---

8. Далее приводится описания второго схемного решения задачи коррекции – варианта с введением обратных связей в алгоритмы навигационного счисления БИНС.

   В этом случае в алгоритм включается блок учета поправок к компонентам вектора состояния X^*. На следующем шаге алгоритма используются оценки векторов состояния совокупной системы $\widetilde{X}_i'^+, \widetilde{X}_i''^+$:

$$X_i'^- = \widetilde{X}_i'^+,$$
$$X_i''^- = \widetilde{X}_i''^+,$$

   При обновлении показаний инерциальных датчиков БИНС и одометра учитываются оценки ошибок нулей акселерометров Δf_z^0, дрейфов ДУС ν_z^0, а также ошибок, связанных с одометром, – ошибки масштаба κ и ошибок углов установки БИНС на корпусе объекта $\varkappa_{z1}, \varkappa_{z3}$:

$$U'_{i+1} = \widetilde{U}_{i+1} = \Psi'(U'_{i+1}, \widetilde{\xi}_i^+),$$
$$Y''_{i+1} = \widetilde{Y}_{i+1} = \Psi''(Y''_{i+1}, \widetilde{\xi}_i^+),$$

   Вводятся интегральные счетчики $\Delta f_z^{\text{sum}}, \nu_z^{\text{sum}}$ оценок нулей инструментальных ошибок $\widetilde{\Delta f_z^0}^+, \widetilde{\nu_z^0}^+$ датчиков БИНС. Величины этих поправок вычисляются суммированием оценок соответствующих компонент

вектора ошибок $\widetilde{\xi}_i^+$ после каждого шага коррекции и задаются следующими рекуррентными соотношениями:

$$\begin{aligned}\widetilde{\Delta f_z}^{\text{sum}} &= \widetilde{\Delta f_z}^{\text{sum}} + \widetilde{\Delta f^0_{z\,i}}^{+},\\ \widetilde{\nu_z}^{\text{sum}} &= \widetilde{\nu_z}^{\text{sum}} + \widetilde{\nu^0_{z\,i}}^{+}.\end{aligned}$$

Поправки к показаниям датчиков:

$$\begin{aligned}f'_{zi+1} &= f'_{zi+1} - \widetilde{\Delta f_z}^{\text{sum}},\\ \omega'_{zi+1} &= \omega'_{zi+1} + \widetilde{\nu_z}^{\text{sum}}.\end{aligned}$$

Для одометра вводятся аналогичные суммируемые величины $\widetilde{\kappa}^{\text{sum}}, \widetilde{\varkappa_{z1}}^{\text{sum}}, \widetilde{\varkappa_{z3}}^{\text{sum}}$:

$$\begin{aligned}\widetilde{\kappa}^{\text{sum}} &= \widetilde{\kappa}^{\text{sum}} + \widetilde{\kappa}_i,\\ \widetilde{\varkappa_{z1}}^{\text{sum}} &= \widetilde{\varkappa_{z1}}^{\text{sum}} + \widetilde{\varkappa_{z1i}},\\ \widetilde{\varkappa_{z3}}^{\text{sum}} &= \widetilde{\varkappa_{z3}}^{\text{sum}} + \widetilde{\varkappa_{z3i}}.\end{aligned}$$

Поправка к приращению пройденного пути по одометру вычисляется по формуле:

$$\Delta s''_{i+1} = \frac{1}{(1+\widetilde{\kappa}^{\text{sum}})}(E + \widehat{\widetilde{\varkappa}^{\text{sum}}})\Delta s''_{i+1},$$

где $\widetilde{\varkappa}^{\text{sum}} = (\widetilde{\varkappa_{z1}}^{\text{sum}}, 0, \widetilde{\varkappa_{z3}}^{\text{sum}})$ вектор, составленный из введенных интегральных счетчиков $\widetilde{\varkappa_{z1}}^{\text{sum}}, \widetilde{\varkappa_{z3}}^{\text{sum}}$;

9. Последним шагом производится реинициализация вектора состояния уравнений ошибок:
$$\widetilde{\xi}_i^+ = \widetilde{\xi}_i^- = 0.$$

Шаги 1-6 представленного алгоритма определяют получение навигационного решение в варианте оценивания. Следующие шаги 8-9 замыкают алгоритм введением обратных связей в модельные уравнения.

Численная реализация задачи сглаживания.

Если возможна постобработка первичной измерительной информации, то задача коррекции БИНС может быть поставлена как задача сглаживания.

Опишем используемую численную реализация алгоритма сглаживания, оперирующая с данными прямого фильтра Калмана – фильтра в реальном времени, и обратного фильтра – фильтра Калмана в обратном времени.

Сводной вектор состояния коррекционной модели задачи интеграции БИНС+одометр состоит из двух подвекторов:

- фазового вектора x_I, компоненты которого характеризуют позиционные, скоростные, угловые ошибки БИНС, параметры инструментальных погрешностей инерциальных датчиков;

- фазового вектора x_{II}, компоненты которого характеризуют позиционные ошибки одометрического счисления, параметры инструментальных, геометрических погрешностей одометра.

При построении сглаженных оценок будем использовать оценки (и соответствующие ковариационные характеристики) только фазового вектора x_I, полученные фильтрами реального $\tilde{x}_I^{f^+}(t_j)$ (индекс вверху ^{f}, $f \to$ forward) и обратного времени $\tilde{x}_I^{b^-}(t_j)$ (индекс вверху ^{b}, $b \to$ backward). Сглаженные величины будут обозначаться индексом сверху ^{sm}, $sm \to$ smoothed.

Соответствующие наборы оценок параметров движения системы:

$$X^f = (\widetilde{\varphi}^{f^+}, \widetilde{\lambda}^{f^+}, \widetilde{h}^{f^+}, \widetilde{V}_E^{f^+}, \widetilde{V}_N^{f^+}, \widetilde{V}_{UP}^{f^+}, \widetilde{\psi}^{f^+}, \widetilde{\gamma}^{f^+}, \widetilde{\vartheta}^{f^+})$$

$$X^b = (\widetilde{\varphi}^{b^-}, \widetilde{\lambda}^{b^-}, \widetilde{h}^{b^-}, \widetilde{V}_E^{b^-}, \widetilde{V}_N^{b^-}, \widetilde{V}_{UP}^{b^-}, \widetilde{\psi}^{b^-}, \widetilde{\gamma}^{b^-}, \widetilde{\vartheta}^{b^-})$$

Реализация сглаживания.

Алгоритм сглаживания применяется не для всего вектора оценок, а по его фракциям:

- сглаживание оценок горизонтальных координат $y_{\lambda\varphi}^{sm} = (\widetilde{\varphi}^{sm}, \widetilde{\lambda}^{sm})$;

- сглаживание оценки высоты $y_h^{sm} = (\widetilde{h}^{sm})$;

- сглаживание оценок северной и восточной составляющих линейной относительной скорости $y_{EN}^{sm} = (\widetilde{V}_E^{sm}, \widetilde{V}_N^{sm})$;

- сглаживание вертикальной составляющей линейной относительной скорости $y_{UP}^{sm} = (\widetilde{V}_{UP}^{sm})$;

- сглаживание оценок углов ориентации $y_{\psi\gamma\vartheta}^{sm} = (\widetilde{\psi}^{sm}, \widetilde{\gamma}^{sm}, \widetilde{\vartheta}^{sm})$

Обозначим фракции как y^{f+}, y^{b-}.

На прямом проходе в момент t_j (далее индекс j будет опускаться для более наглядной записи):

1. фиксируются оценки соответствующих параметров движения y^{f+};

2. матрица ковариации P_y^{f+} для y^{f+} получается сверткой матрицы ковариации P^{f+} исходного фильтра Калмана:

$$P_y^{f+} = C_y P^{f+} C_y^\top,$$

где C_y – известная прямоугольная матрица размерности $\dim(y) \times \dim(x)$, соответствующая фракции y^{f+}.

Для фильтра в обратном времени в момент времени t_j, аналогично:

1. фиксируется прогноз вектора y^{b-} соответствующих параметров движения;

2. матрица ковариации P_y^{b-}:

$$P^{b-} = C_y P^{b-} C_y^\top,$$

где матрица C_y такая же, как для прямого фильтра;

3. наконец, сглаженная оценка y^{sm} определяется путем склейки векторов y^{f+}, y^{b-} и матриц ковариаций P_y^{f+}, P_y^{b-} по следующим известным формулам:

$$y^{sm} = P^{sm}\big[(P^{f+})^{-1} y^{f+} + (P^{b-})^{-1} y^{b-}\big],$$

где

$$P^{sm} = \big[(P_y^{f+})^{-1} + (P_y^{b-})^{-1}\big]^{-1}.$$

В четвертой главе приводятся результаты тестирования разработанных алгоритмов интеграции БИНС и одометра для решения задачи навигации подвижного объекта к трем типам наборов данных.

Результаты обработки данных специально разработанного имитатора движения.

Имитированная траектория, на которой отрабатывались алгоритмы интеграции БИНС и одометра, представляет из себя движение по прямой с несколькими поворотами с переменной скоростью ($V(t) \in [10\text{км/час}, 40\text{км/час}]$) на протяжении 2 часов. Углы крена γ и тангажа ϑ моделировались как тригонометрические функции от времени с заданными частотами колебаний и амплитудами.

Полные характеристики имитации:

- длительность имитации – 2 часа;

- пройденный путь – 46 км;
- частота регистрации данных с инерциальных датчиков – 50Гц;
- частота регистрации показаний одометра – 10Гц.
- наборы нулевых составляющих погрешностей инерциальных датчиков рассматривались в разных вариантах. Для краткости, изложения будут приведены результаты для класса системы средней точности: $\nu^0 = 0.2\,^\circ/\text{час}$, $\Delta f^0 = 1\text{E}^{-4}\text{G}$;
- минимальное приращение одометра – $K = 0.2$м;
- ошибка масштаба одометра – $\kappa = 0.01$, или 1% от пройденного пути;
- угловые ошибки установки БИНС – $\varkappa_1 = -0.5^\circ$, $\varkappa_3 = -1^\circ$;
- ошибка дополнительных позиционных измерений – случайная величина в метрах на отрезке $[-1, 1]$.

В качестве шумовых составляющих для имитации использовались реализации шумов инерциальных датчиков, записанных в состоянии покоя БИНС.

В качестве результатов обработки далее будут приведены комбинации графиков позиционных ошибок (как плановых координат, так и высоты), оценок ошибок масштаба одометра κ и углов установки БИНС на корпусе объекта $\varkappa_{z1}, \varkappa_{z3}$ в вариантах с периодической коррекцией по дополнительной позиционной информации (для определенности – маркерные точки) и без.

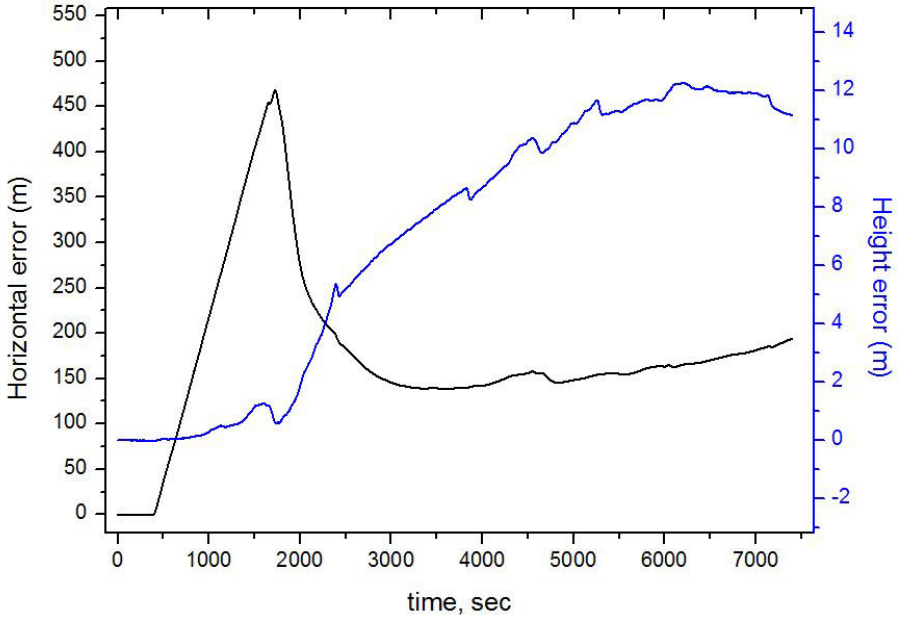


Рис. 1: Горизонтальная и вертикальная позиционные ошибки

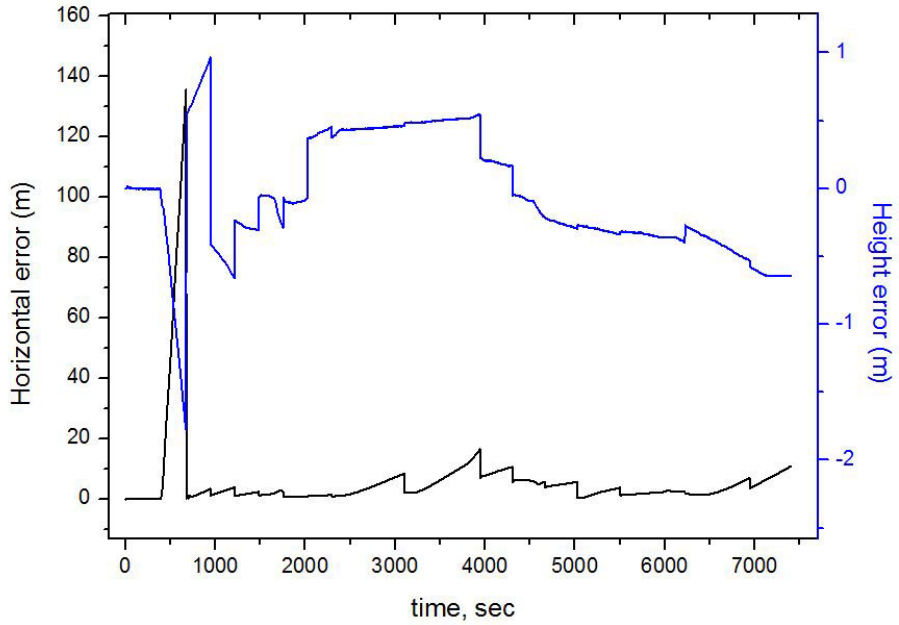


Рис. 2: Горизонтальная и вертикальная позиционные ошибки с доп. позиц. коррекцией

Результаты обработки экспериментальных данных навигации внутритрубного диагностического (инспекционного) снаряда.

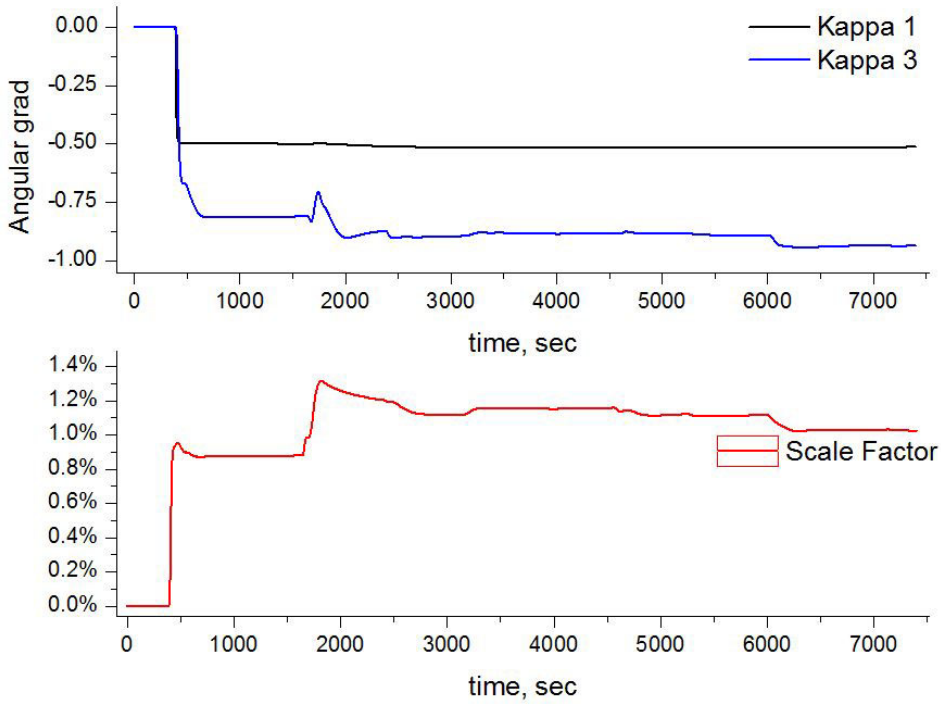


Рис. 3: Оценки ошибок масштаба κ и углов установки БИНС $\varkappa_1, \varkappa_3$

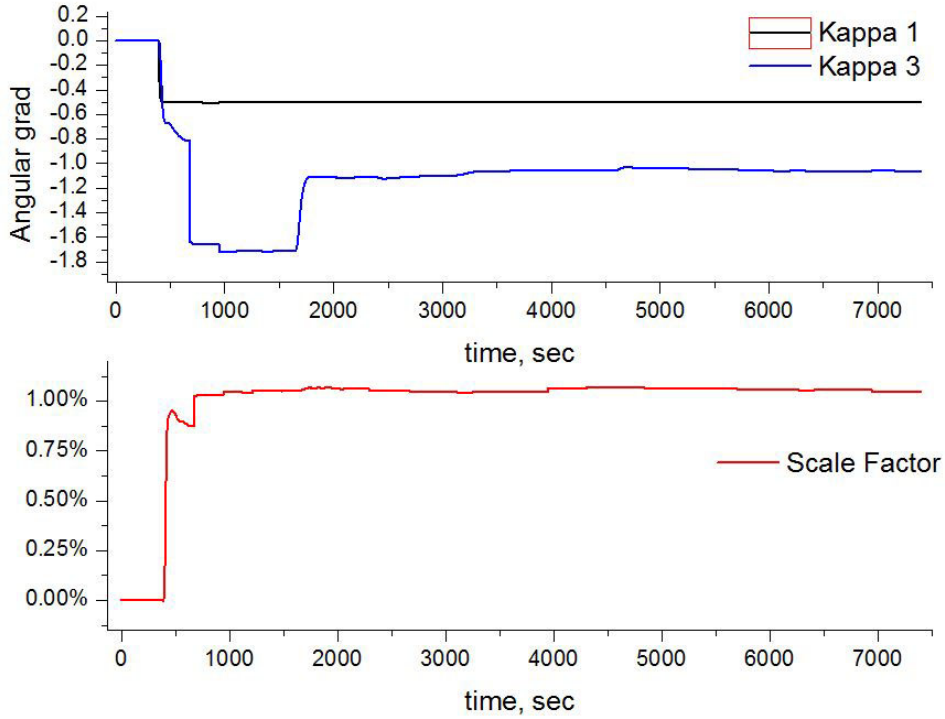


Рис. 4: Оценки ошибок масштаба κ и углов установки БИНС $\varkappa_1, \varkappa_3$ с дополнительной позиционной коррекцией

Использовался макетный образец дефектоскопа "Оргэнергогаз "Саратоворгдиагностика".

Навигационный эксперимент был проведен в июне 2014 г. на магистральном трубопроводе "СОЮЗ". Длина инспектируемого участка – примерно 114 км. Диаметр газовой трубы 1420 мм. Средняя скорость дефектоскопа составила около 2.5 м/с.

На газопроводе с помощью GPS приемников было снято 60 реперных точек + 1 для определения начального азимута (заданного курса). Расстояние между маркерами варьировалось от 2 км (наиболее распространенное расстояние) до 7 км. Перед пропуском дефектоскоп стоял включенным в камере запуска около 40 минут, что было использовано для решения задачи начальной выставки БИНС.

Задача решалась в постобработке с применением алгоритма сглаживания.

Оценка точности интегрированных навигационных решений определялась следующими способами:

- путем сравнения с координатами проверочных маркеров;
- путем исключения координат маркеров из обработки и последующей проверки точности определения этих же координат навигационным алгоритмом;
- сравнение с картой «Google Earth», на которой можно видеть рельефный профиль трубопровода и отображенный профиль трассы дефектоскопа.

На участках, где расстояние между маркерами составляет $\sim$ 2 км, точность топографического привязки траектории движения дефектоскопа составляет 1-2 м. На участках, где расстояние между маркерами составляет величину порядка 6 км, точность ухудшается до 15 м.

Рис. 5: Полная траектория движения снаряда

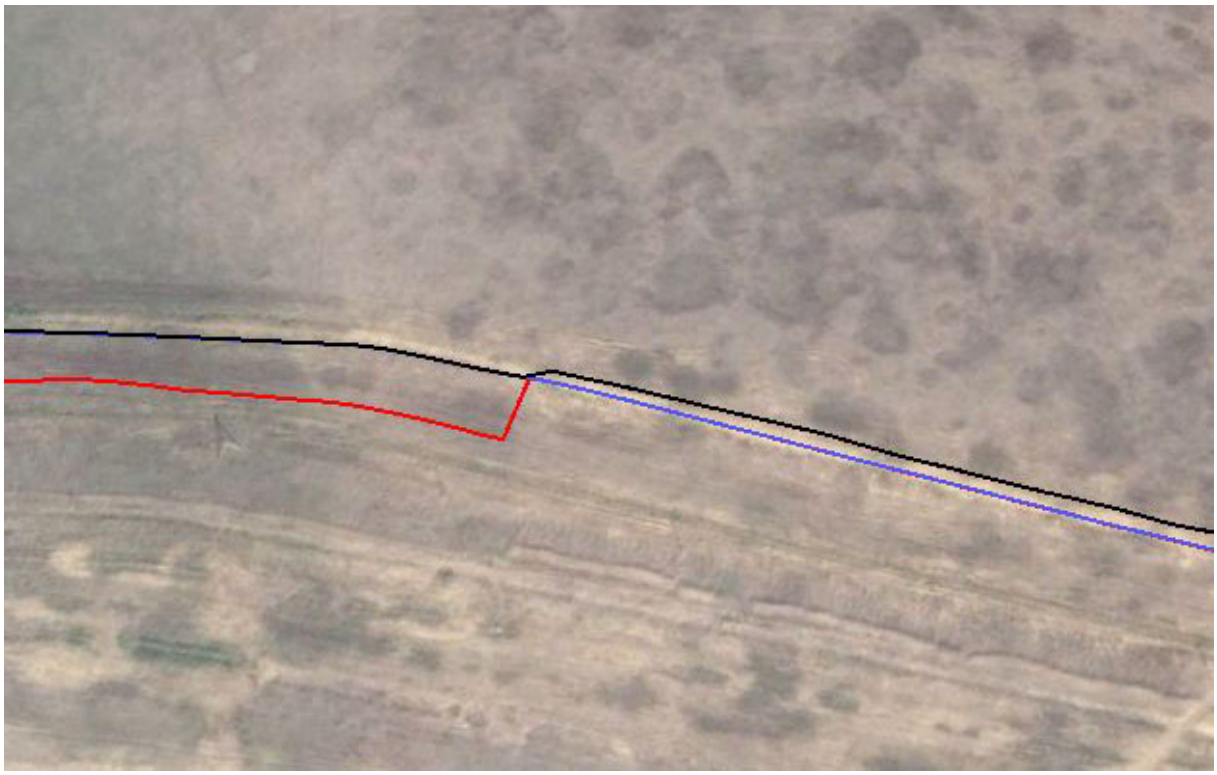


Рис. 6: Фрагмент траектории 1. Черным цветом обозначено решение в прямом времени, красным - в обратном, синим - сглаженное решение

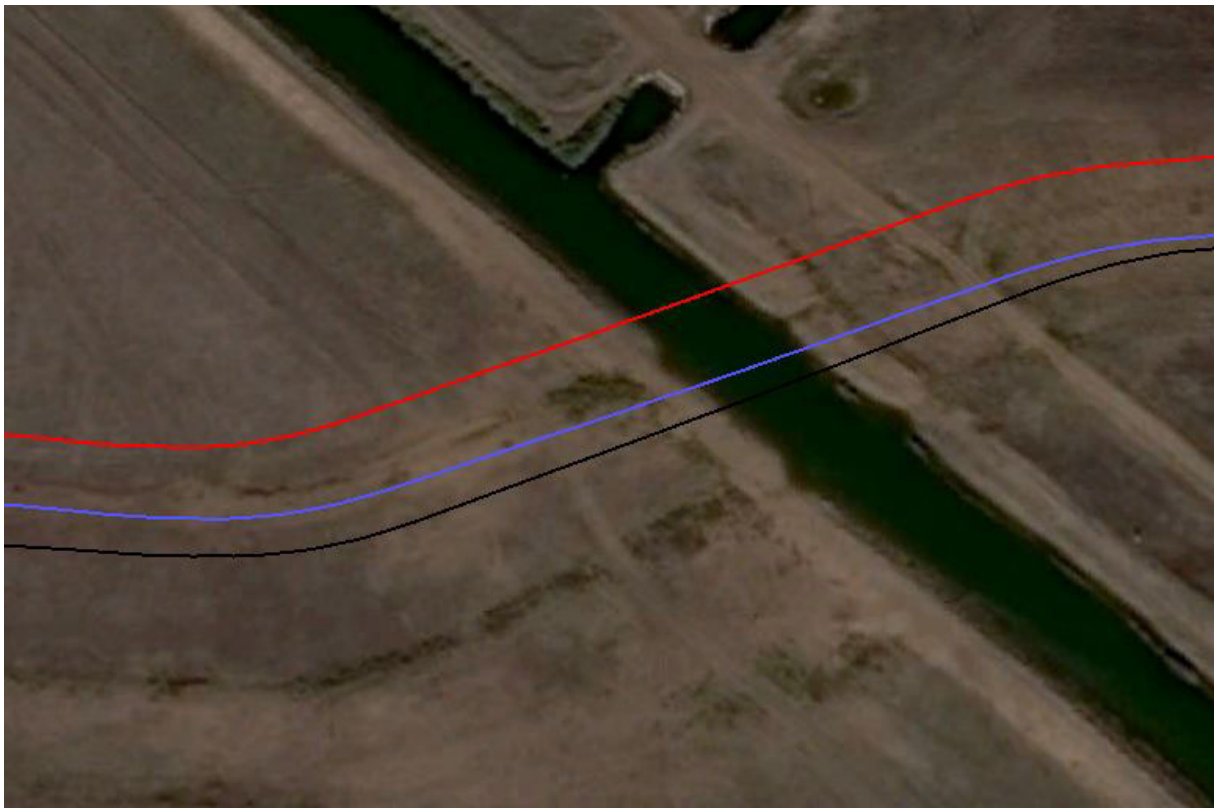


Рис. 7: Фрагмент траектории 2.

Результаты обработки экспериментальных данных городских заездов дорожно-транспортного средства.

Разработанные в диссертации алгоритмы решения задачи навигации по данным БИНС и одометра были применены к экспериментальным данным, полученным в заездах дорожно-транспортного средства в городских условиях. Пройденный путь по одометру составил 40км за 1 час. Приборный навигационный комплекс включал в свой состав БИНС и одометр. Внешная позиционная информация (GPS, ГЛОНАСС, реперные точки) отсутствовала.

Далее приводятся некоторые фрагменты траекторий (построенные с помощью ПО Google Earth), наглядно характеризующие точности привязки навигационного решения к местности (поворот, дорожная развязка):

Рис. 8: Фрагмент дорожной траектории. Развязка, 26км от стартовой точки

Рис. 9: Фрагмент дорожной траектории. Поворот, 33км от стартовой точки

Приведенные графики соответствуют 26км и 33км траектории. Соответствующие точности: 20м и 30м. Точность определения местоположения в конечной точке траектории составила 50м.

В заключении приводятся основные результаты, полученными в диссертационной работе:

1. обоснованы и проанализированы новые схемы решения задачи интеграции данных БИНС и одометра;
2. получены и обоснованы новые коррекционные модели для задачи интеграции **«БИНС+одометр»**;
3. разработаны и проверены на практике алгоритмы интеграции БИНС и одометра;
4. разработаны алгоритмы введения обратных связей в модельные уравнения навигационного счисления для рассмотренных функциональных схем интеграции;
5. разработан имитатор задачи как инструмент численного исследования и отладки алгоритмов интеграции, позволивший существенно сэкономить время разработки алгоритмов;
6. обработка экспериментальных данных подтвердила унификацию разработанных алгоритмов интеграции БИНС-одометр, а также показало их эффективность.

Работы автора по теме диссертации

1. *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.» №2, стр. 69-72, Москва, 2015. (Реферируемый журнал из перечня ВАК);

A.A. Golovan, I.V. Nikitin. Combined use of strapdown inertial navigation systems and odometers from the standpoint of mechanics of inertial navigation systems. Part 1. Moscow University Mechanics Bulletin. March 2015, Volume 70, Issue 2, pp 46-49; DOI: 10.3103/S0027133015020065.

2. *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.» №4, стр. 68-72, Москва, 2015. (Реферируемый журнал из перечня ВАК);

A.A. Golovan, I.V. Nikitin. Combined use of strapdown inertial navigation systems and odometers from the standpoint of mechanics of inertial navigation systems. Part 2. Moscow University Mechanics Bulletin. July 2015, Volume 70, Issue 4, pp 101-105; DOI: 10.3103/S0027133013050026.

3. *Вавилова Н.Б., Голован А.А., Козлов А.В., Никитин И.В., Панцв 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., Лаптиев А.А., Турусиков Д.В.* Результаты разработки и тестирования навигационных систем дефектоскопов магистральных нефте- и газопроводов. Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Концерн "ЦНИИ "Электроприбор 2015. Стр. 318-323;

Vavilova N.B., Golovan A.A., Kozlov A.V., Nikitin I.V., Panyov A.A., Parusnikov N.A., Solovyh I.A., Nikiforov S.V., Lavyrev A.M., Morozov S.V., Afanasyev A.V., Vesnovskiy I.V., Konon A.V., Laptiev A.A., Turusikov D.V. A navigation system of a pipeline inspection system for oil and gas pipelines: the results of the development and testing. 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Concern CSRI Elektropribor, JSC Saint-Petersburg. 2015, pp 357-362;

4. *Никитин И.В.*, Задача автономной навигации автомобиля на основе данных бескарданной инерциальной навигационной системы и и одометра. Сборник трудов XXII Международного научно-практического семинара "Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации 18-24 сентября 2013 г., Алушта - с. 228 - 229.