

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

Панев Алексей Анатольевич

**ЗАДАЧА НАВИГАЦИИ  
МОБИЛЬНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ  
В РЕЖИМЕ ПОСТОБРАБОТКИ**

01.02.01 - Теоретическая механика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Москва - 2011

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

### **Научные**

**руководители:** доктор физико-математических наук,  
профессор Парусников Николай Алексеевич  
кандидат физико-математических наук,  
Вавилова Нина Борисовна

### **Официальные**

**оппоненты:** доктор технических наук,  
Копылов Игорь Анатольевич  
кандидат физико-математических наук,  
Фомичев Александр Владимирович

### **Ведущая**

**организация:** Закрытое акционерное общество  
"Инерциальные технологии "Технокомплекса"

Защита диссертации состоится 22 апреля 2011 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.22 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, механико-математический факультет, аудитория 16-10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке механико-математического факультета МГУ по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, механико-математический факультет, 14 этаж.

Автореферат разослан 22 марта 2011 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Прошкин В.А.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Диссертационная работа посвящена исследованию задачи навигации подвижных объектов при условии, что её решение допускает постобработку совокупной измерительной информации. При этом навигационная задача ставится как задача коррекции бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) при помощи внешней информации. Предполагается, что используемые инерциальные датчики – ньютонометры и датчики угловых скоростей – достаточно грубы и не относятся к классу прецизионных приборов, а в качестве корректирующей информации могут использоваться: данные одометров, спутниковой навигационной системы, координаты реперных точек, неявная скоростная и угловая информация на остановках.

Актуальность темы связана с необходимостью разработки методов и алгоритмов постобработки информации для прикладных задач навигации, аппаратное обеспечение которых основано на достаточно грубых инерциальных датчиках.

### **Цели работы**

Целями диссертационной работы служат:

- разработка, обоснование, анализ унифицированных алгоритмов комплексной обработки данных инерциальных датчиков и информации средств коррекции в режиме постобработки;
- применение разработанных алгоритмических решений в конкретных актуальных приложениях — в задаче навигации внутритрубных диагностических снарядов, в задаче навигации дорожной лаборатории;

### **Научная новизна**

В диссертационной работе:

1. Построен новый алгоритм комплексной обработки информации для решения важной прикладной задачи навигации внутритрубного диагностического снаряда (ВДС). Впервые, судя по отечественной и зарубежной литературе, для данной задачи разработанный алгоритм основан на корректных математических моделях БИНС и средств дополнительной информации.
2. Разработан новый алгоритм решения задачи "Определение параметров движения дорожной лаборатории". В качестве корректирующей информации привлекаются: координаты, измерения одометра, информация об остановках. Также как и для предыдущей задачи, алгоритм основан на

математических моделях корректируемой БИНС. Проведён анализ точности навигационного решения в зависимости от класса точности БИНС.

3. При решении указанных задач получена новая схема коррекции БИНС в варианте введения обратных связей в модельные уравнения. Схема учитывает зависимость переменных вектора состояния модельных уравнений БИНС и может быть применена в различных задачах коррекции БИНС, в том числе и в задачах реального времени.
4. Алгоритм сглаживания данных в режиме постобработки, основанный на вычислении оценок при помощи фильтра Калмана в прямом и обратном времени, распространён на случай, когда задача решается в варианте введения обратных связей.

### **Практические применения данной работы**

Разработанные и описанные в настоящей работе алгоритмы обработки данных корректируемой БИНС могут быть использованы для решения типовых навигационных задач, предполагающих использование грубых БИНС и режима постобработки.

В рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) лаборатории управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова было разработано алгоритмическое обеспечение для навигации внутритрубных диагностических снарядов, которое было успешно протестировано, внедрено и используется в работе ЗАО «Везерфорд трубопроводный сервис».

Также в рамках НИОКР лаборатории управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова было разработано, апробировано и внедрено в эксплуатацию программное обеспечение для определения траекторных параметров движения автомобиля лаборатории для НПО «Регион».

Кроме того, построенные алгоритмы комплексной обработки информации могут быть применены в задачах реального времени: в бортовых алгоритмах резервных курсовых вертикалей на MEMS-датчиках (совместная с ОАО «МИЭА» разработка находится в стадии тестирования), в алгоритмах навигации мобильных роботов.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

1. Навигация внутритрубных инспекционных снарядов. Конференция молодых ученых, МАИ, 2009.
2. Задача коррекции БИНС в постобработке. Конференция «Современные проблемы математики и механики», МГУ, 2009.

3. Задача коррекции бескарданной инерциальной навигационной системы при помощи разнородной информации в постобработке. Конференция молодых ученых и специалистов (проводилась Московским отделением Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением»), ФГУП ЦНИИ автоматики и гидравлики, 2009.
4. Разработка и тестирование алгоритмов навигации внутритрубных диагностических приборов. Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2010.

## Публикации

По теме диссертации опубликовано пять работ, из них одна — в журнале, включённом ВАК в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций. Перечень опубликованных работ приведен в конце автореферата.

## Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 116 страниц. Список литературы содержит 69 наименований.

## Краткое содержание работы

**Во введении** к работе рассмотрены основные тенденции в задачах комплексной постобработки навигационной информации. Обсуждаются возможности современных навигационных систем. Перечисляются новые гражданские приложения, возникшие благодаря появлению недорогих и миниатюрных инерциальных датчиков и возможностям регистрации больших объёмов информации.

Далее для каждой из рассмотренных в диссертации прикладных задач - задачи навигации внутритрубного диагностического прибора (ВДС) и задачи определения параметров движения дорожной лаборатории (ДЛ) даётся обзор литературы и анализ существующих подходов к решению.

**В первой главе** приводится описание двух прикладных навигационных задач. Приводится общая постановка задачи коррекции БИНС.

Задача навигации ВДС. Внутритрубная диагностика трубопроводов основана на использовании автономных приборов-дефектоскопов (внутритрубных диагностических приборов, rigs), движущихся внутри контролируемой трубы под напором перекачиваемого продукта (нефть, нефтепродукты, газ и т.п.). В приборе установлена следующая аппаратура:

- БИНС;
- датчик скорости - одометр;
- другие измерительные устройства (осуществляющие дефектоскопию ультразвуковые или магнитные датчики);
- системы записи и хранения в памяти данных контроля и вспомогательной служебной информации, источники питания аппаратуры.

Снаряд вводится в контролируемый трубопровод через специальную камеру пуска-приёмки, проходит по трубе сотни километров со скоростью 1-5 м/с, накапливая информацию о показаниях датчиков в бортовой памяти, а затем извлекается через аналогичную камеру. Важно отметить, что для снаряда обеспечивается винтовое движение.

Далее в режиме постобработки решается навигационная задача определения координат ВДС, для пространственной привязки обнаруженных дефектов трубы и построения её профиля. Внутри трубопровода ВДС функционирует автономно, что накладывает ограничения на возможность применения точных инерциальных датчиков. В качестве дополнительной корректирующей информации привлекается позиционная информация о координатах реперных точек (маркеров) - расположенных вдоль трубы меток, с заранее известными координатами.

Задача определения параметров движения дорожной лаборатории. Дорожная (передвижная, мобильная) лаборатория (ДЛ) предназначена для сбора данных о состоянии автомобильных или железных дорог и прилегающих к ним объектов. Дорожная лаборатория может регистрировать следующие параметры:

- геометрические характеристики дороги (длину осевой линии, профиль, радиусы кривых и углы поворота, продольные уклоны и радиусы выпуклых и вогнутых кривых, поперечные уклоны, расстояния прямой видимости);
- координаты любых объектов дороги и придорожной полосы.

Аппаратный комплекс дорожной лаборатории состоит из:

- БИНС, приёмника спутниковой навигационной системы (СНС), одометра;
- видеокамер, датчиков положения платформы автомобиля относительно поверхности дороги и другого измерительно-регистрирующего навесного оборудования (ультразвуковой профилометр, лазерный сканер, георадар).

Данные всех измерителей сохраняются в памяти устройства, находящегося на борту дорожной лаборатории. Вычисление навигационным алгоритмом

траекторных параметров движения дорожной лаборатории происходит в режиме постобработки на основании показаний инерциальных датчиков (нютонометров, ДУС) и дополнительной информации (координаты по данным СНС, одомерическая скорость, информация об остановках). Затем, на основании вычисленных величин определяются параметры дорожного полотна.

Общая постановка задачи коррекции БИНС. Рассмотренные выше навигационные задачи ставятся как задача коррекции БИНС при помощи внешней информации. В каждой из этих задач имеется свой состав доступных средств внешней информации:

- в задаче навигации ВДС: одомер и координаты реперных точек;
- в задаче определения параметров движения ДЛ: одомер, информация об остановках, позиционные измерения приёмника СНС.

Приведём постановку задачи коррекции БИНС в общем виде.

БИНС включает в себя три нютонометра и три ДУС с ортогональными осями чувствительности и является моделью двух объектов: материальной точки, движущейся в поле сил земного тяготения под действием внешней силы, и приборного трёхгранника, связанного с движущимся объектом.

Будем рассматривать систему - материальную точку  $M$  и трёхгранник  $Mx$ , поведение которой описывается уравнением:

$$\frac{dX}{dt} = F(X, U), \quad X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где  $X (n \times 1)$  — вектор состояния объекта;  $U (m \times 1)$  — внешнее воздействие, доступное измерению;  $F (n \times 1)$  — известная, дифференцируемая по своим аргументам функция.

Уравнение (1) таково, что величины  $X_0, U[t_0, t]$  необходимы и достаточны для однозначного определения состояния  $X(t)$ .

Ставится задача непрерывного определения во времени вектора  $X$  (или некоторого вектора  $S (l \times 1) : S = \Psi^s(X)$ ).

Для решения этой задачи используется система  $J$ , содержащая вычислительное устройство и измерители, доставляющие информацию о векторе  $U$ . В вычислительное устройство вводится информация о начальном состоянии объекта.

Уравнения, которыми описывается работа системы  $J$  будем называть модельными уравнениями, а переменные в этих уравнениях — модельными переменными, обозначаемые теми же буквам, но с акцентом штрих: ' :  $X', U', S'$ .

Для определения текущего значения вектора состояния  $X$  привлекаются два вида информации, условно разделяемые на основную и дополнительную.

### Основная информация.

$$X'_0 = X_0 + x_0, \quad U'(t) = U(t) + u(t),$$

где  $x_0$  — ошибка начального значения вектора состояния,  $u(t)$  — инструментальная погрешность измерения  $U(t)$ .

**Дополнительная информация.** Предполагается, что дополнительная информация описывается уравнением:

$$Z = \Theta(X, w).$$

Здесь  $Z$  — вектор дополнительной информации,  $w$  — вектор малой погрешности дополнительной информации,  $\Theta$  — известная вектор-функция.

Далее будем считать  $x_0, r, u$  малыми величинами, чтобы решать задачу в линейной постановке.

Естественным способом определения вектора  $X'$  ( $S'$ ) с помощью системы  $J$  служит такой, при котором модельные уравнения системы  $J$  имеют вид:

$$\frac{dX'}{dt} = F(X', U'), \quad X'(t_0) = X'_0, \quad S' = \Psi^s(X').$$

Введем ошибки определения соответствующих переменных:

$$x = X' - X, \quad u = U' - U, \quad s = S' - S.$$

Будем считать величины  $x, u, s$  малыми настолько, что возмущенную работу системы  $J$  можно было описать с помощью линейных уравнений ошибок:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + q, \quad q = Bu, \quad s = Cx, \\ A &= \frac{\partial F}{\partial X}, \quad B = \frac{\partial F}{\partial U}, \quad C = \frac{\partial \Psi^s}{\partial X}. \end{aligned} \quad (2)$$

Вследствие малости  $x, u$ , аргументами производных в (2) можно считать величины  $X', U'$ .

Введём величину  $z = Z - \Theta(X')$ , тогда с точностью до второго порядка малости:

$$\begin{aligned} z &= Hx + r, \\ H &= \frac{\partial \Theta(X)}{\partial X}. \end{aligned}$$

*Замечание.* Относительно инструментальных погрешностей  $u$  и погрешностей измерений  $r$  предполагается:

$$\begin{aligned} u &= u^0 + u^s, \\ r &= r^0 + r^s, \end{aligned}$$



где для  $u^0, r^0$  - принимается параметризованная линейная модель, а  $u^s, r^s$  - случайные составляющие типа белого шума.

Задачу определения вектора  $X$  ( $S = \Psi^s(X)$ ) можно поставить теперь неформализовано следующим образом. Известно, что поведение вектора  $X$  подчиняется уравнению (1). Известна функция  $\Theta$ , имеется информация  $X'_0$ . Информация о векторах  $U', Z$  доступна на интервале времени  $[t_0, t]$  и существует идеальный вычислитель с неограниченными возможностями. Требуется построить систему  $J^*$  такую, чтобы выходом системы был вектор  $X^*$  ( $S^*$ ), мало отличающийся от  $X$  ( $S$ ).

Таким образом, для постановки задачи коррекции и построения алгоритма навигации необходимо описать следующие математические модели:

- модельные уравнения БИНС;
- уравнения ошибок БИНС;
- модели инструментальных погрешностей;
- уравнения корректирующих измерений;
- модели корректирующих поправок к выходной информации.

**Во второй главе** рассматриваются математические модели задачи коррекции БИНС, составляющие основу алгоритма постобработки информации. Приводятся схемы коррекции — вариант оценивания и вариант с введением обратных связей в модельные уравнения БИНС. Эти два варианта решения задачи оценивания информационно эквивалентны друг другу в том смысле, что ошибка оценки вектора состояния полученная с помощью обоих вариантов одинакова в случае линейных систем.

На базе такого подхода строится схема коррекции БИНС в варианте с введением обратных связей с учётом особенностей реализации модельных уравнений БИНС. Схема проиллюстрирована двумя примерами её использования.

Рассматривается алгоритм сглаживания в постобработке в варианте с введением обратных связей в модельные уравнения БИНС.

Используются следующие основные системы координат:

- Инерциальная система координат  $O\xi_1\xi_2\xi_3$  ( $O\xi$ ).  $O$  - геометрический центр Земли.  $O\xi_3$  - ось вращения Земли.  $O\xi_1$  направлена на точку весеннего равноденствия.  $O\xi_1\xi_2$  - плоскость экватора.
- Гринвичская система координат  $O\eta_1\eta_2\eta_3$  ( $O\eta$ ).  $O\eta_3$  совпадает  $O\xi_3$ .  $O\eta_1\eta_2$  — экваториальная плоскость, вращающаяся вместе с Землей.
- Географическая система координат  $Mx_1x_2x_3$  ( $Mx$ ).  $Mx_3$  совпадает с направлением географической вертикали. Ось  $Mx_1$  направлена на восток,  $Mx_2$  — на север.

- Приборный трёхгранник  $Mz_1z_2z_3$  ( $Mz$ ), жёстко связанный с корпусом объекта. Его оси совпадают с точностью до ошибок установки с осями чувствительности ньютометров и ДУС. Первую ось  $z_1$  можно считать направленной вдоль продольной оси объекта,  $z_3$  направлена вертикально вверх,  $z_2$  дополняет трёхгранник до правого.

При описании модельных уравнений БИНС подчеркивается следующее обстоятельство. Существует множество форм модельных уравнений в связи с тем, что они могут быть эквивалентным образом записаны в разных переменных — абсолютных или относительных линейных скоростях движения точки, в различных опорных трёхгранниках - географическом, гринвичском, инерциальном, с использованием разных численных методов и параметров ориентации - матриц направляющих косинусов, кватернионов и т.п. Вводится вектор  $X$  - *вектор независимых параметров*, описывающий состояние системы материальная точка — приборный трёхгранник:

$$X = (\varphi, \lambda, h, V_1, V_2, V_3, \gamma, \vartheta, \psi)^T.$$

Здесь  $\varphi, \lambda, h$  — географические широта, долгота и высота;  $V_1, V_2, V_3$  — составляющие относительной скорости в проекциях на оси географического трёхгранника  $Mx$ ;  $\psi, \gamma, \vartheta$  — угол истинного курса, углы крена и тангажа.

Введём *вектор состояния модельных уравнений*  $Y$  — вектор переменных, относительно которых решается замкнутая система дифференциальных уравнений в форме Коши. Рассматривается конкретная форма модельных уравнений относительно переменных:

$$Y = (h, V_1, V_2, V_3, b_1^T, b_2^T, d_1^T, d_2^T)^T.$$

Здесь  $b_1, b_2, d_1, d_2$  — столбцы матриц ориентации  $B_{x\eta}, D_{xz}$  (третьи столбцы доопределяют матрицы до ортогональных);  $D_{xz}$  — матрица ориентации трёхгранника  $Mx$  относительно  $Mz$ ;  $B_{x\eta}$  — матрица ориентации трёхгранника  $Mx$  относительно  $O\eta$ .

Для любой формы модельных уравнений существуют соотношения:

$$X = \Psi^x(Y), \quad Y = \phi^y(X).$$

После описания уравнений ошибок БИНС и математических моделей инструментальных погрешностей формируется полный набор переменных вектора состояния уравнения ошибок:

$$\xi = (\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \alpha_1, \alpha_2, \beta_3, \nu_1^0, \nu_2^0, \nu_3^0, \Delta f_1^0, \Delta f_2^0, \Delta f_3^0)^T. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3$  — полные ошибки определения местоположения в осях трёхгранника  $Mx$ ;  $\delta V_1, \delta V_2, \delta V_3$  — динамические ошибки определения составляющих относительной скорости;  $\alpha_1, \alpha_2$  — угловые ошибки построения приборной вертикали;  $\beta_3$  — азимутальная кинематическая ошибка;  $\nu_1^0, \nu_2^0, \nu_3^0$  — систематические составляющие дрейфов ДУС;  $\Delta f_1^0, \Delta f_2^0, \Delta f_3^0$  — систематические составляющие погрешностей ньютометров.

Схема решения задачи коррекции. Вариант с введением обратных связей в модельные уравнения.

Рассматривается дискретная реализация алгоритма коррекции с введением обратных связей в модельные уравнения в случае, когда вектор состояния модельных уравнений  $Y$  содержит алгебраически зависимые переменные и известны функции пересчёта  $X = \Psi^x(Y)$ ,  $Y = \phi^y(X)$ .

Наглядно работа данного алгоритма иллюстрируется схемой, изображённой на рис. 1. Схема основана на идее информационной эквивалентности в рамках линейной теории варианта оценивания и варианта с введением обратных связей в модельные уравнения БИНС.

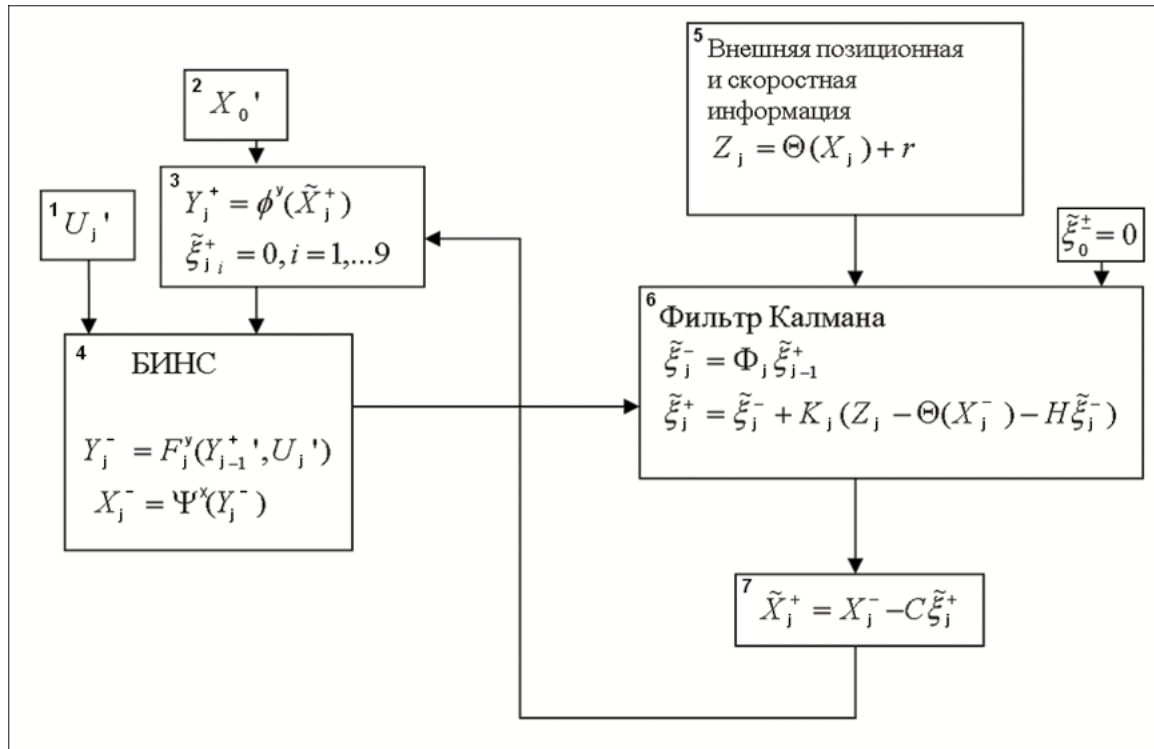


Рис. 1: Схема решения задачи коррекции. Вариант с введением обратных связей в модельные уравнения.

Опишем каждый блок схемы (1):

1. Информация с датчиков БИНС поступает в виде:

$$U_j' = (\omega_z', f_z').$$

Здесь  $\omega_z'$  - информация от датчиков угловых скоростей (ДУС);  $f_z'$  - информация от ньютометров. Индекс  $j$  обозначает момент времени  $t_j$ .

2.  $X_0'$  - начальная информация о векторе независимых параметров:

$$X_{j=0}' = X_0'.$$

3. Блок пересчёта. Связывает вектора  $\tilde{X}_j^+$  и  $Y_j^+$ :

$$Y_j^+ = \phi^y(\tilde{X}_j^+).$$

Значение  $\tilde{X}_j^+$  доставляется обратной связью из алгоритма фильтра Калмана.

Кроме того, происходит обнуление накопленной информации об оценке вектора состояния уравнения ошибок  $\tilde{\xi}_j^+$ , так называемое "списание" накопленных ошибок:

$$\tilde{\xi}_{ji}^+ = 0, \quad i = 1, \dots, 9.$$

4. Вычислитель БИНС, оперирующий в расчётах вектором  $Y_{j-1}^+$ , а на выход подающий вычисленный вектор  $X_j^-$ .

Модельные уравнения системы для определения вектора  $Y_j$  совпадают с модельными уравнениями в варианте оценивания и выглядят следующим образом:

$$Y_j^- = F_j^y(Y_{j-1}^+, U_j'), \quad Y_{j=0}' = \phi^y(X_0').$$

5. Блок внешней корректирующей позиционной и скоростной информации. Формируется вектор измерений:

$$Z_j = \Theta(X_j^-) + r.$$

Где  $r$  - погрешность дополнительной информации.

6. Фильтр Калмана. Входной информацией служит вычисленный БИНС вектор  $X_j^-$  и корректирующая внешняя информация. На выход подаются вычисленное значение  $\tilde{\xi}_j^+$  вектора состояния уравнения ошибок.

Общая структура алгоритма, доставляющего оценку  $\tilde{\xi}$  вектора  $\xi$ , совпадает со структурой, описанной для варианта оценивания:

(a) Этап обработки корректирующего измерения:

$$\tilde{\xi}_j^+ = \tilde{\xi}_j^- + K_j(Z_j - \Theta(X_j^-) - H_j\tilde{\xi}_j^-).$$

(b) Этап прогноза оценок между измерениями:

$$\tilde{\xi}_{j+1}^- = \Phi_j\tilde{\xi}_j^+.$$

Коэффициенты  $K_j$  для калмановской постановки задачи оценивания вычисляются стандартным образом.

7. Блок компенсации вычисленной ошибки. Входной информацией является вычисленный вектор  $\tilde{\xi}_j^+$ . На выход подаётся рассчитанный вектор  $\tilde{X}_j^+$ :

$$\tilde{X}_j^+ = X_j^- - C\tilde{\xi}_j^+.$$

Где  $C$  связывает ошибку определения вектора состояния модельных уравнений и вектор состояния уравнения ошибок.

В дальнейшем вектор  $\tilde{X}_j^+$  используется в обратной связи между блоками (7) и (3).

Таким образом:

1. В блоке БИНС (4) на каждом  $j$ -том шаге работы алгоритма, на основании данных измерителей БИНС  $U_j'$  и вычисленных на предыдущем шаге значений вектора  $Y_j^+$  происходит вычисление текущего значения вектора состояния модельных уравнений  $Y_{j+1}^-$  и, далее,  $X_{j+1}^-$ .
2. Вычисленное значение  $X_j^-$  и данные дополнительных измерений  $Z_j$  обрабатываются в блоке фильтра Калмана (6).
3. Затем в блоке (7) происходит компенсация вычисленных ошибок.
4. Вычисления  $Y_j^+$  в блоке пересчёта (3) замыкают обратную связь между блоками (7) и (3) в модельных уравнениях.

### **Инвариантность способа введения обратных связей**

Важной принципиальной особенностью данной схемы является разделение блоков 3 и 4, что обеспечивает независимость алгоритма коррекции от способа задания модельных переменных и модельных уравнений в блоке БИНС (блок 4), а значит и вектор состояния уравнений ошибок  $\xi$  в фильтре Калмана (блок 6) остаётся неизменным.

*В схеме (1) нет необходимости вычислять коэффициенты обратной связи для модельных переменных  $Y$ , которые зависят от конкретного способа их выбора (кватернионы поворота, любые два столбца матрицы ориентации и т.п.). Для определения  $Y$  достаточно применить оператор  $\phi^y$ , реализующий зависимость модельных переменных от независимых. Этот оператор обеспечивает на каждом шаге алгоритма учёт алгебраической зависимости модельных переменных и осуществляет, например, ортогонализацию матрицы ориентации или нормализацию кватернионов поворота.*

Алгоритм сглаживания данных в режиме постобработки. Приведём соотношение, которое позволяет вычислять значение вектора  $\tilde{X}_j^{sm}$  - сглаженного

вектора независимых параметров в случае введения обратных связей в модельные уравнения:

$$\begin{aligned} P_{xj}^{sm} &= \left( (P_{xj}^f)^{-1} + (P_{xj}^b)^{-1} \right)^{-1}, \\ \tilde{X}_j^{sm} &= P_{xj}^{sm} \left( (P_{xj}^f)^{-1} \tilde{X}_j^{f+} + (P_{xj}^b)^{-1} \tilde{X}_j^{b-} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\tilde{X}_j^f, \tilde{X}_j^b$  — соответствующие оценки вектора  $X$  полученные с помощью алгоритма фильтра Калмана в прямом и обратном времени;  $P_{xj}^f, P_{xj}^b$  — соответствующие  $X$  матрицы ковариаций алгоритма фильтра Калмана в прямом и обратном времени. Очевидно, что:

$$P_x^f = CP_\xi^f C^T, \quad P_x^b = CP_\xi^b C^T.$$

Здесь  $P_\xi^f, P_\xi^b$  — матрицы ковариаций алгоритма фильтра Калмана в прямом и обратном времени. Особенностью алгоритма сглаживания (4) является то, что он применяется не к вектору ошибок  $x_j$ , а к вектору независимых параметров  $X_j$ .

Выводы ко второй главе:

- Приведено подробное описание математических моделей корректируемой БИНС, лежащих в основе алгоритма навигации диагностических комплексов.
- Построен алгоритм коррекции БИНС, применимый к системам различного класса точности. Особенностью алгоритма является схема введения обратных связей, которая учитывает зависимость переменных вектора состояния модельных уравнений.
- Алгоритм сглаживания, основанный на вычислении оценок фильтром Калмана в прямом и обратном времени, распространен на случай, когда задача решается в варианте введения обратных связей.

**В третьей главе** построены алгоритмы решения прикладных задач, описанных в первой главе. Основой алгоритмов являются математические модели и схемы решения задачи коррекции БИНС, полученные во второй главе.

Задача навигации ВДС. Алгоритм решения строится на основе схемы, описанной во второй главе. Задача коррекции БИНС решается как задача оценки ошибки вектора независимых параметров, при помощи корректирующих измерений. Режим постобработки данных даёт возможность использования алгоритма сглаживания, описанного во второй главе.

Особое внимание уделено корректирующим измерениям, которые обеспечиваются дополнительной скоростной (одометр) и позиционной информацией о координатах реперных точек (полученной при помощи ГЛОНАСС/GPS приёмника).

Модель позиционной информации представляется в виде:

$$z_i^{pos} = \Delta r_i + \zeta_i, i = 1, 2, 3,$$

где  $z_i^{pos}$  — позиционные измерения, сформированные при помощи спутниковых данных ГЛОНАСС/GPS;  $\zeta_i$  — погрешности измерений типа белого шума.

Обычно модель скоростных измерений одометра выводится в предположении, что продольная ось снаряда коллинеарна вектору скорости. Тогда измерения представляются в виде:

$$z_i^{odo} = \delta V_i + \zeta'_i, i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где  $z_i^{odo}$  — скоростные измерения, сформированные по данным одометра;  $\zeta'_i$  — погрешности измерений типа белого шума.

В работе было предложено модифицировать данную модель, поскольку при её использовании точность навигационных определений не соответствует поставленным требованиям (1 м ошибки в определении координат на 1 км пути).

Опишем модель измерений при более общих предположениях. При анализе экспериментальных данных было замечено, что вектор скорости неколлинеарен продольной оси. Кроме того, известно, что для ВДС, движущегося внутри трубы, обеспечивается винтовое движение. Были введены два угла малых поворотов  $\kappa_2, \kappa_3$ , характеризующие неколлинеарность вектора скорости и продольной оси снаряда. Углы изображены на рис. 2.

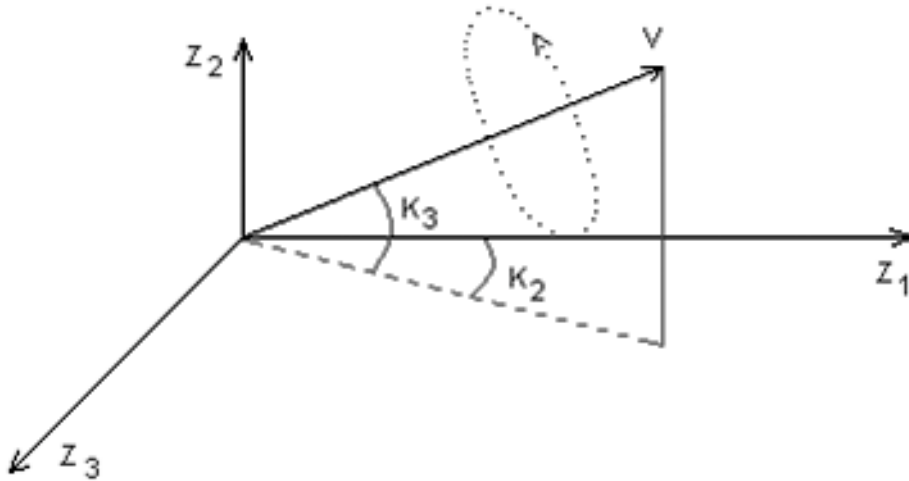


Рис. 2: Формирование измерения в случае винтового движения.

Легко видеть, что в случае малых углов отклонения  $\kappa_2, \kappa_3$  вектор  $V$  в проекциях на оси трёхгранника  $Mz$  представляется в виде:

$$V_z = \begin{pmatrix} V \\ -\kappa_3 V \\ \kappa_2 V \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Сформируем измерения одометра  $z^{odo'}$  следующим образом:

$$z^{odo'} = V_x' - D_{xz}V_z.$$

Тогда, с учётом (6) они представляются в виде:

$$\begin{aligned} z_1^{odo'} &= \delta V_1 - V(\kappa_3 d_{12} + \kappa_2 d_{13}) + \zeta_1'', \\ z_2^{odo'} &= \delta V_2 + V(\kappa_3 d_{22} + \kappa_2 d_{23}) + \zeta_2'', \\ z_3^{odo'} &= \delta V_3 + V(\kappa_3 d_{32} + \kappa_2 d_{33}) + \zeta_3'', \end{aligned} \quad (7)$$

где  $z_1^{odo'}$ ,  $z_2^{odo'}$ ,  $z_3^{odo'}$  — скоростные измерения, сформированные по данным одометра;  $\zeta_i''$  — погрешности измерений типа белого шума;  $d_{ij}$  — элементы матрицы  $D_{xz}$  ориентации приборного трёхгранника относительно географического.

Очевидно, что расширенная модель (7) в предельном случае при  $\kappa_2 = 0$ ,  $\kappa_3 = 0$  совпадает с (5).

Новые переменные  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  включаются в вектор состояния уравнения ошибок. Таким образом, к уравнениям ошибок БИНС добавляются следующие формирующие уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{\kappa}_2 &= 0, \\ \dot{\kappa}_3 &= 0, \end{aligned}$$

а расширенный вектор состояния  $\xi^*$  состоит из 17 компонент:

$$\xi^* = (\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \alpha_1, \alpha_2, \beta_3, \nu_1^0, \nu_2^0, \nu_3^0, \Delta f_1^0, \Delta f_2^0, \Delta f_3^0, \kappa_2, \kappa_3)^T.$$

Для сравнения двух моделей одометрических измерений, на экспериментальных данных был проведен расчёт дисперсионных уравнений ошибок оценки в случае систем двух размерностей (размерности 15 - без  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  и 17 - с добавленными в вектор состояния  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ). Исследование СКО дисперсии ошибки оценки координат  $\Delta r_1$ ,  $\Delta r_2$  показало: СКО в случае введения в вектор состояния переменных  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  меньше на 20%, из чего можно сделать вывод что использование модели измерений (7) позволяет повысить точность определения координат; анализ меры оцениваемости показал, что переменные  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  наблюдаемы при винтовом движении, которое характерно для ВДС.

### Результаты тестирования

С целью проверки работоспособности разработанного алгоритма проведена обработка экспериментальных данных. Материалы для тестирования предоставлены ЗАО "Везерфорд трубопроводный сервис".

### Результаты обработки данных специальных испытаний

Макетный образец навигационного комплекса ВДС, на борту которого находилась БИНС, устанавливался на автомобиль. В качестве одометра использовался



счётчик оборотов колеса. Эксперимент состоял в поездке по стадиону. Данные датчиков БИНС и одометра регистрировались с частотой 128 Гц. Было совершено 8 кругов по разным дорожкам. В качестве реперных точек использовалась, в основном, одна и та же точка, с которой начиналось движение. Позиционное корректирующее измерение по этой информации вводилось в обработку лишь через каждые 4 круга. Расстояние, которое проходила система между реперными точками, составляло 2 км. Первая точка использовалась также как контрольная для оценки точности определения координат после первого и шестого круга. На рис. 3 представлены результаты определения координат системы.

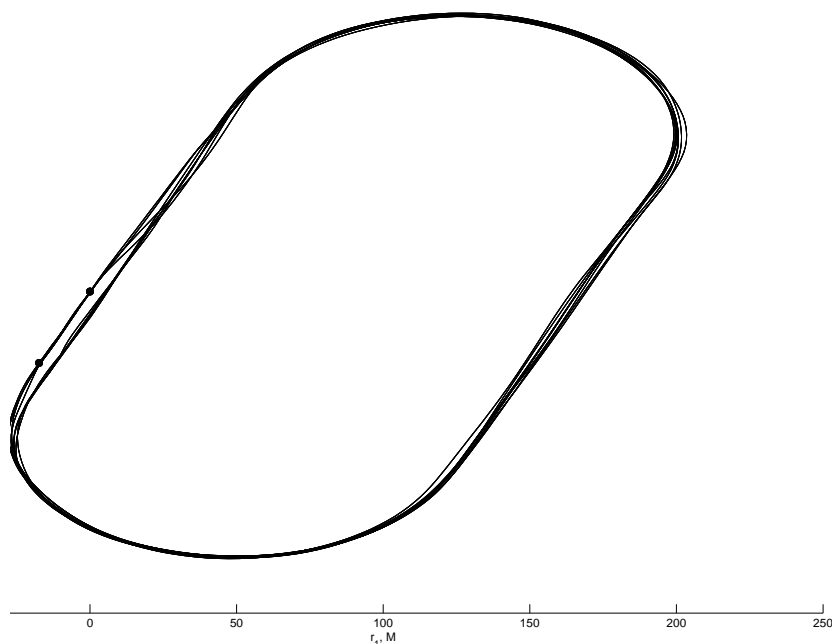


Рис. 3: Траектория на плоскости при круговом заезде.

Таблица 1 показывает разницу между координатами, полученными алгоритмом, и координатами контрольных точек.

№ точки	$\Delta\varphi$ , м	$\Delta\lambda$ , м	$\Delta h$ , м
1	0,022	0,313	0,07
2	-0,339	-0,12	0,15

Таблица 1: Отклонения координат в контрольных точках. Стадион.

### Результаты обработки данных прогона ВДС в нефтяном трубопроводе

Ниже приводятся результаты обработки фрагмента типового прогона ВДС в нефтяном трубопроводе. На рассматриваемом участке прогона имеются данные

о координатах 6 реперных точек, синхронизированные в шкале бортового времени инерциальных датчиков и одометра. Две из них были исключены из обработки для использования в качестве контрольных точек. Таким образом, в обработке использовались 4 реперные точки на расстоянии около 2 км друг от друга. Средняя скорость движения снаряда составляла 1.3 м/с. Характеристики инерциальных датчиков следующие: СКО случайных дрейфов ДУС волоконно-оптического типа составляли  $\sigma_{\nu^s} = 60^\circ/\text{ч}$ , ньютометров  $\sigma_{\Delta f^s} = 0.02 \text{ м/с}^2$ , систематические дрейфы ДУС порядка  $1^\circ/\text{ч}$ . Таблица 2 показывает разницу между координатами, полученными алгоритмом, и координатами контрольных точек.

N точки	$l$ , м	$\Delta\varphi$ , м	$\Delta\lambda$ , м	$\Delta h$ , м
1	1001.2	0,54	0,61	0,8
2	3027.3	-0,24	-0,93	1,1

Таблица 2: Отклонения координат в контрольных точках. Нефтяная труба.

В ходе испытаний была получена следующая интегральная характеристика отклонения от контрольных точек: 80% точек имеют отклонение не более 2 м, что соответствует отраслевым стандартам точности.

Задача определения параметров движения дорожной лаборатории. Алгоритм решения аналогичен описанному для задачи навигации ВДС и отличается составом дополнительной информации (одометр, приёмник спутниковой позиционной информации, информация об остановках).

**Корректирующие измерения** обеспечиваются дополнительной скоростной и позиционной информацией.

Модель позиционных спутниковых измерений представляется в виде:

$$z_i^{pos} = \Delta r_i + \zeta_i, i = 1, 2, 3,$$

где  $z_i^{pos}$  — позиционные измерения, сформированные при помощи спутниковых данных ГЛОНАСС/GPS;  $\zeta_i$  — шумовые погрешности измерений типа белого шума.

Для скоростных одометрических измерений справедлива следующая модель:

$$z_i^{vel,odo} = \delta V_i + \zeta'_i, i = 1, 2, 3,$$

где  $z_i^{vel,odo}$  — скоростные измерения, сформированные по данным одометра;  $\zeta'_i$  — погрешности измерений типа белого шума.

Особенности обработки данных от одометра позволяют фиксировать интервалы времени остановки ДЛ. Для таких измерений справедливо:

$$z_i^{vel,stop} = \delta V_i + \zeta_i^{stop}, \zeta'_i \gg \zeta_i^{stop}.$$

Здесь  $\zeta_i^{stop}$  — погрешности (типа белого шума) измерения одометра в момент остановки.

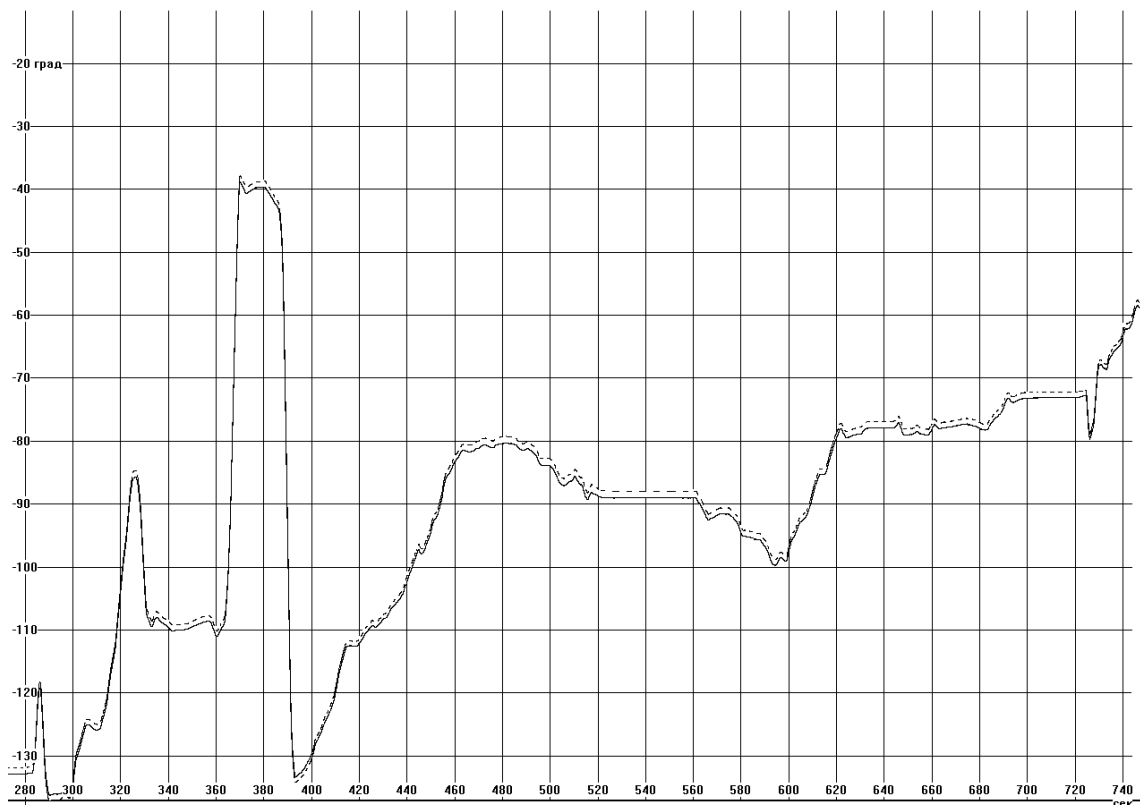


Рис. 4: Реализация угла курса в двух системах: вычисленный курс (пунктир), эталонный курс (сплошная)

### Результаты тестирования

Для проверки навигационного алгоритма использовались данные, полученные в результате заезда ДЛ по территории Московской области. В начале заезда производилась начальная выставка системы (5 минут), далее началось движение ДЛ со скоростью 40-80 км/ч. Общая длительность заезда - 25 минут. На борту ДЛ находилось следующее навигационное оборудование:

- БИНС ( $\sigma_{\nu^s} = 100^\circ/\text{ч}$ ,  $\sigma_{\Delta f^s} = 0.07 \text{ м/с}^2$ , систематические дрейфы ДУС порядка  $1^\circ/\text{ч}$ );
- приёмник спутниковой позиционной информации ( $\sigma_{gps} = 10 \text{ м}$ );
- одометр ( $\sigma_{V_{odo}} = 0.4 \text{ м/с}$ ).

Данные, полученные алгоритмом в ходе тестирования, сравнивались с эталонной навигационной системой, независимо функционирующей на ДЛ и имеющей высокие характеристики точности (паспортные характеристики определения углов курса, крена, тангажа -  $0.01^\circ$ ).

На рис. 4 приведены сравнительные графики определения курса от времени на начальном интервале выставки. Дисперсия разности определения угла курса двумя системами составила  $\sigma_{\Delta yaw} = 0.15^\circ$ . Систематическая составляющая разности объясняется начальными углами установки двух систем. Дисперсия разности определения углов крена, тангажа двумя системами также была

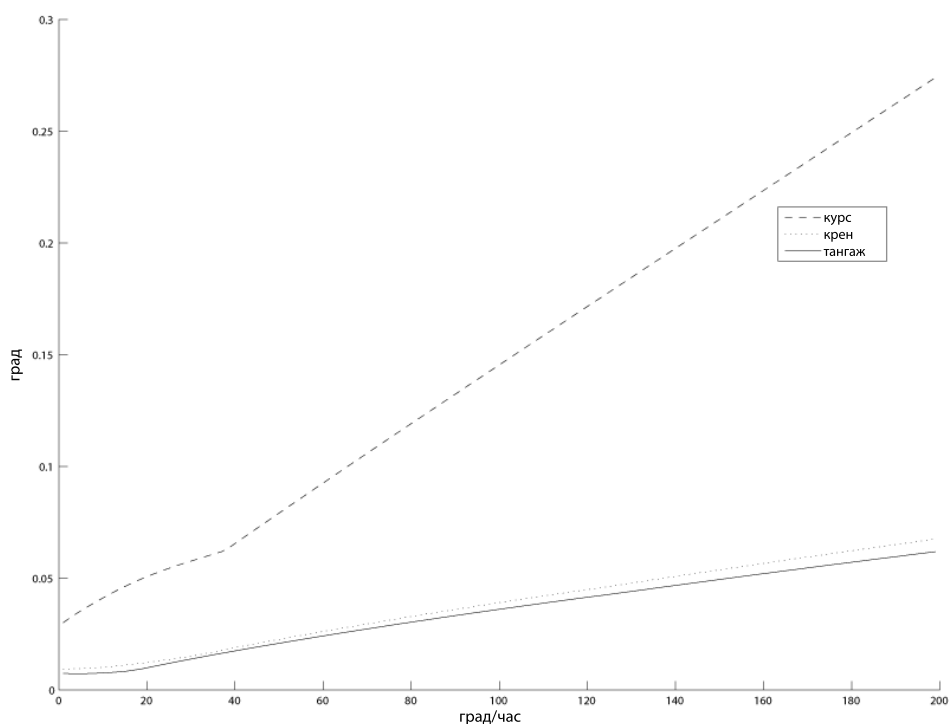


Рис. 5: Максимальная СКО для углов курса, крена и тангажа в зависимости от дрейфов ДУС.

исследована и составила  $\sigma_{\Delta pitch, roll} = 0.02^\circ$ , что удовлетворяет поставленным требованиям.

### Анализ точности навигационного решения в зависимости от класса точности БИНС

При решении практических задач часто приходится отвечать на два вопроса:

1. Какова предельная точность навигации при использовании БИНС данного класса?
2. Какую точность должны иметь датчики БИНС, чтобы получить требуемую точность решения?

Для ответа на эти вопросы было проведено следующее исследование. На конкретной реализации (заезде) моделировались ковариационные соотношения с разными параметрами шумов ДУС. Результаты исследования приведены на рис. 5.

Из рис. 5 можно заключить, что при шумах  $\sigma_{\nu^s} = 100^\circ/\text{ч}$  требуемая точность в  $\sigma_{\Delta yaw} = 0.15^\circ$  может быть получена.

*Замечание.* Точностные характеристики решения также зависят от качества и состава дополнительной информации.

Выводы к третьей главе:

- Построен алгоритм комплексной обработки информации для задачи навигации внутритрубного диагностического снаряда. Обосновано повышение точности за счёт использования расширенной модели одометрических измерений.
- Разработан алгоритм решения задачи определения траекторных параметров дорожной лаборатории. Проведён анализ точности навигационного решения в зависимости от класса точности датчиков БИНС.
- Приведённые результаты обработки экспериментальных данных подтверждают работоспособность алгоритмов и иллюстрируют возможности достижения высокой точности навигации.

**В заключении** диссертационной работы формулируются основные результаты.

1. Разработан алгоритм комплексной обработки информации для задачи навигации внутритрубного диагностического снаряда. Обосновано повышение точности за счёт использования расширенной модели одометрических измерений.
2. Построен алгоритм решения задачи определения траекторных параметров дорожной лаборатории. Проведён анализ точности навигационного решения в зависимости от класса точности датчиков БИНС.
3. Разработан алгоритм комплексной обработки информации для задачи коррекции БИНС в режиме постобработки, применимый к системам различного класса точности. Особенностью алгоритма коррекции является схема введения обратных связей, которая учитывает зависимости модельных переменных.
4. Алгоритм комплексной обработки информации реализован в программном обеспечении и используется для решения прикладных задач. Полученные результаты обработки экспериментальных данных подтверждают работоспособность алгоритма и демонстрируют возможность достижения требуемой точности навигации.
5. Алгоритм сглаживания данных в режиме постобработки, основанный на вычислении оценок при помощи фильтра Калмана в прямом и обратном времени, распространён на случай, когда задача решается в варианте введения обратных связей.

## Публикации по теме диссертации

1. А.А. Панев, Н.Б. Вавилова, А.А. Голован. Задача навигации внутритрубного диагностического прибора, «Вестник московского университета. Серия 1. Математика. Механика» N1, Москва, МГУ, 2011, с. 53-56.
2. Н.Б. Вавилова, А.А. Панев. Навигация внутритрубных инспекционных приборов, тезисы доклада. Материалы конференции молодых ученых, МАИ, 2009.
3. Н.Б. Вавилова, А.А. Панев. Задача коррекции БИНС в постобработке, тезисы доклада. Материалы конференции «Современные проблемы математики и механики», МГУ, 2009.
4. А.А. Панев. Задача коррекции бескарданной инерциальной навигационной системы при помощи разнородной информации в постобработке. Конференция молодых ученых и специалистов Московского отделения Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». Сборник «Вопросы оборонной техники. Серия 9», Москва, 2010.
5. Н.Б. Вавилова, А.А. Голован, А.А. Панев, А.В. Конон, А.А. Лаптев. Разработка и тестирование алгоритмов навигации внутритрубных диагностических приборов. Материалы XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2010, с. 141-143.