

На правах рукописи

НАГИН Илья Алексеевич

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ
ПОТРЕБИТЕЛЯ СРНС
С НЕРАДИОТЕХНИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре Радиотехнических систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ПЕРОВ Александр Иванович

Официальные оппоненты: **ЕФИМЕНКО Валерий Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
начальник отдела НИР
ОАО «ВНИИР-Прогресс»

ПУДЛОВСКИЙ Владимир Борисович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
3 ЦНИИ МО РФ

Ведущая организация: ЗАО «Конструкторское бюро навигационных систем» (ЗАО «КБ НАВИС») г. Москва

Защита состоится 03 октября 2013 года в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.157.05 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 17, **аудитория А-402.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: **111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Ученый совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».**

Автореферат разослан «23» июля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.157.05
кандидат технических наук, доцент

Т.И.Курочкина

Введение

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) используются во многих областях человеческой деятельности. Эти системы позволяют с большой точностью оценивать вектор состояния (ВС) потребителя СРНС, включающий в себя координаты, скорость потребителя и время относительно системной шкалы. Вместе с тем, ряд потребителей нуждается в расширенном векторе состояния, включающем в себя, кроме прочих, параметры ориентации потребителя. Также при большой динамике движения потребителя снижается точность навигационных определений и помехоустойчивость (способность выполнять целевую задачу под действием внешних помех) приемника СРНС.

Часто для компенсации этих недостатков используют комплексирование навигационной аппаратуры потребителя (НАП) СРНС с инерциальными навигационными системами (ИНС). Комплексирование объединяет достоинства обеих систем, позволяя повысить точность и помехоустойчивость системы. Комплексированные СРНС/ИНС системы часто называют инерциально-спутниковыми навигационными системами (ИСНС).

Максимального выигрыша при комплексировании СРНС и ИНС можно достичь, поставив и решив соответствующую задачу оптимальной комплексной фильтрации. Результатом синтеза является оптимальный приемник с одноэтапной обработкой сигналов СРНС и ИНС. Этот тип схем комплексирования характеризуется большой вычислительной сложностью и близкими к потенциальным точностными характеристиками и помехоустойчивостью. Существенным недостатком использования одноэтапных алгоритмов является необходимость отказа от привычной двухэтапной схемы построения НАП.

В классической НАП можно выделить этап первичной обработки - оценки параметров сигналов (задержек и доплеровских смещений частот сигналов спутников) и этап вторичной обработки – оценки вектора состояния потребителя. Можно поставить и решить задачу комплексной фильтрации при условии использования фиксированной двухэтапной схемы приемника. Одним из известных подходов для решения этой задачи является комплексированная на вторичном уровне НАП. Недостатком такой схемы комплексирования является отсутствие выигрыша в помехоустойчивости по сравнению с некомплексированной НАП.

Существует способ повышения помехоустойчивости при комплексировании с ИНС в рамках двухэтапной схемы построения НАП. Для этого часть оценок ИСНС

вводится в блок первичной обработки в качестве компенсирующего воздействия, что позволяет скомпенсировать динамику потребителя и сузить полосы пропускания следящих систем (ССЗ, ССФ или ССЧ). Эта схема комплексирования называется схемой комплексирования на первичном уровне. Достоинством такой схемы комплексирования, наряду с повышением точности определения навигационных параметров и определением ориентации, является также повышение помехоустойчивости по сравнению с некомплексированной НАП.

В работе рассматривается синтез алгоритма комплексирования НАП СРНС и ИНС на первичном уровне. Важным отличием диссертационной работы от опубликованных подходов и алгоритмов является более полное описание погрешностей инерциальных датчиков, и как следствие — увеличение числа оцениваемых параметров, а именно: смещений нулей, масштабных коэффициентов, а также перекосов осей чувствительности как гироскопов, так и акселерометров. Другим отличием работы является то, что в качестве компенсирующего воздействия в следящих системах за фазами навигационных сигналов (ССФ) используется оценка рывка (первая производная от ускорения) вдоль линии визирования НАП-навигационный спутник, (НС) которая формируется с использованием оценок, формирующихся в комплексном фильтре ИСНС. Это позволяет сохранить традиционную структуру ССФ (третьего порядка). Эффективная компенсация динамического возмущения, действующего на следящую систему, позволяет получить существенный выигрыш в помехоустойчивости ИСНС.

Отметим также еще одну особенность рассматриваемых в диссертации алгоритмов комплексирования, а именно — использование кватернионов для представления ориентации потребителя. Кватернионы обладают рядом преимуществ над другими способами представления ориентации – углами Эйлера, матрицами направляющих косинусов.

Актуальность увеличения точности и помехоустойчивости ИСНС обусловлена сферой их использования. В первую очередь эти системы применяются на высокодинамичных объектах военной техники: самолетах и вертолетах, беспилотных летательных аппаратах и др. Также ИСНС разных классов востребованы в гражданской авиации и транспорте.

Существует **другой класс задач**, применительно к которым комплексная фильтрация позволяет улучшать потребительские характеристики НАП. Гражданские потребители, использующие НАП СРНС для автомобильной навигации в условиях со-

временных мегаполисов сталкиваются с определенными трудностями. Плотная застройка ведет к уменьшению количества видимых спутников и ухудшению геометрического фактора точности навигационных определений. Кроме того, возникающие переотражения сигналов вызывают эффект многолучевости, что также негативно сказывается на точности определения навигационных параметров.

Одним из способов повышения потребительских характеристик НАП является комплексирование с одометрическими датчиками, представляющими собой счетчики пройденного пути. Использование одометрического датчика позволяет получать информацию о перемещении потребителя даже в том случае, когда недоступны сигналы СРНС.

Существует возможность использования в качестве одометра датчиков антиблокировочной (АБС) системы автомобиля. В данной работе рассмотрен синтез алгоритма, использующего измерения НАП СРНС и измерения пройденного пути двумя датчиками АБС. Отличительной особенностью данного алгоритма от существующих является оценка и компенсация масштабных погрешностей одометрических датчиков, а также оценивание величины колеи автомобиля, что повышает точность работы системы. Таким образом, синтез и исследование алгоритмов комплексирования датчиков АБС и НАП СРНС является перспективной и актуальной задачей.

Объектами диссертационного исследования являются:

1. Инерциально-спутниковая навигационная система, комплексированная на уровне первичной обработки в приемнике СРНС.
2. Приемник СРНС, комплексированный с одометрическими датчиками.

Предметом исследования являются алгоритмы комплексирования СРНС и ИНС, а также алгоритмы комплексирования СРНС и одометрических датчиков.

Целями диссертационной работы являются:

1. Повышение потребительских характеристик приемника СРНС (помехоустойчивости, точности, оценка углов ориентации и обеспечение автономности) путем комплексирования на первичном уровне с инерциальными датчиками.
2. Повышение потребительских характеристик приемника СРНС (точности и возможности оценивания координат потребителя при пропадании сигналов НС) путем комплексирования с одометрическими датчиками.

Для достижения поставленной в диссертации цели решаются задачи:

1. Разработка алгоритмов комплексирования ИНС и СРНС.

2. Разработка алгоритма комплексирования НАП СРНС и одомерических датчиков.
3. Анализ разработанных комплексных алгоритмов.
4. Разработка имитационных моделей и моделирование комплексных алгоритмов.
5. Экспериментальные исследования алгоритма комплексирования НАП СРНС и одомерических датчиков.

Методы исследования: при решении поставленных задач использованы методы теории оптимальной фильтрации случайных процессов, статистической теории радиотехнических систем, имитационного компьютерного моделирования, а также исследования характеристик экспериментальных макетов.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложена и обоснована структура комплексной инерциально-спутниковой системы (ИСНС), включающая: НАП СРНС, на выходе которой формируются оценки координат и скорости потребителя в связанной с Землей геоцентрической системе координат, и в следящие системы за фазами спутниковых сигналов (ССФ) которой вводятся компенсирующие воздействия в виде оценок рывков на линии визирования НС-НАП; ИНС, включающую трехосевые гироскоп и акселерометр; комплексный фильтр ИСНС, обрабатывающий данные, поступающие с выходов НАП и ИНС, и формирующий оценки вектора состояния \mathbf{x}_k ; блок расчета компенсирующих воздействий (в виде оценок рывков вдоль линии визирования НС-потребитель) для ССФ НАП на основе сформированных оценок вектора состояния \mathbf{x}_k .

2. Методами теории оптимальной фильтрации в гауссовом приближении для комплексного фильтра ИСНС синтезирован квазиоптимальный алгоритм обработки измерений инерциальных датчиков и оценок составляющих вектора скорости потребителя, формирующихся в НАП СРНС, с 27-компонентным вектором состояния.

3. Методами теории оптимальной фильтрации в гауссовом приближении для комплексного фильтра ИСНС синтезирован упрощенный квазиоптимальный алгоритм обработки измерений инерциальных датчиков и оценок составляющих вектора скорости потребителя, формирующихся в НАП СРНС. Вектор состояния данного фильтра включает 13 компонент.

4. Разработан алгоритм комплексной фильтрации данных, поступающих из навигационной аппаратуры потребителей СРНС и инерциальной навигационной системы, основанный на технологии Unscented фильтра Калмана, при использовании 13-компонентного вектора состояния.

5. Методами теории оптимальной фильтрации в гауссовом приближении проведен синтез алгоритма комплексирования НАП СРНС и одометрических датчиков – датчиков пройденного пути автомобиля.

6. Результаты моделирования и экспериментальных исследований разработанных алгоритмов.

Практическая ценность работы

1. Разработанный алгоритм комплексной обработки в ИСНС с расширенным вектором состояния обеспечивает повышение помехоустойчивости до 17 дБ по сравнению с некомплексированной НАП.

2. Разработанный алгоритм комплексной обработки позволяет оценивать углы ориентации потребителя со среднеквадратичной ошибкой (СКО) ~ 0.17 угловых минут, скорости потребителя с СКО ~ 5 мм/с, ускорение потребителя с СКО ~ 1 мм/с² для высокой динамики потребителя и ИНС навигационного класса точности.

3. Алгоритм комплексной обработки позволяет существенно уменьшить ошибки счисления навигационных параметров при работе ИСНС при пропадании спутниковых сигналов – до 17 раз по СКО оценки координат и до 20 раз по СКО оценки скорости по сравнению с ИНС, которая работала бы в автономном режиме, т.е. без поддержки НАП СРНС.

4. Алгоритм комплексирования НАП СРНС с одометрическими датчиками позволяет снизить СКО определения координат (до 9 раз) и курса (до 2 раз) автомобиля.

5. Также алгоритм комплексирования НАП СРНС с одометрическими датчиками позволяет оценивать координаты в режиме, когда недоступны измерения НАП СРНС (в режиме экстраполяции по измерениям одометрических датчиков), с точность в несколько процентов пройденного пути.

Реализация и внедрение результатов исследования Результаты исследований использованы при выполнении ОКР: «Создание навигационных модулей для использования в аппаратуре высокочастотных объектов Вооруженных Сил Российской Федерации», «Разработка алгоритмического и программного обеспечения высокоточной коррекции БИНС межвидовой АИНС данными приемника СНС» и НИР: «Разработка комплексных алгоритмов и программно-математического обеспечения для обработки сигналов спутниковых радионавигационных и инерциальной навигационной систем в приемо-вычислительном модуле бортовой навигационной аппаратуры», «Теоретические и экспериментальные исследования высокоточной коррекции БИНС сигналами аппаратуры потребителей спутниковых навигационных си-

стем», «Исследование вопросов помехозащиты аппаратуры спутниковой навигации военного и специального назначения, средств НКУ и бортовых информационно-навигационных комплексов системы ГЛОНАСС», «Исследование принципов построения и разработка алгоритмов функционирования инерциально-спутниковых комплексов для эффективного решения задач по безопасности посадки летательных аппаратов»; НИР по созданию малогабаритного навигационного модуля, интегрированного с микромеханическими датчиками для расширения возможностей навигационной аппаратуры потребителей СНС («Проект ИНМ»).

Алгоритм комплексирования НАП СРНС и одометрических датчиков внедрен в серийный малогабаритный встраиваемый навигационный модуль NV08C-CSM.

Апробация результатов: результаты работы докладывались и обсуждались на шестнадцатой, семнадцатой и восемнадцатой международной НТК студентов и аспирантов «Радиотехника, электроника и энергетика» (Москва, 2010-2012 г.); на десятой НК «Радионавигационные Технологии в Приборостроении» (Туапсе, 2011 г.); на НК «Радиооптические технологии в приборостроении» (Туапсе, 2012 г.); на семнадцатой международной НТК «Радиолокация Навигация Связь» (RLNC-2011, Воронеж, 2011 г.), на ION GNSS 25th International Meeting of the Satellite Division (Nashville, USA, 2012).

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Структура комплексной инерциально-спутниковой системы (ИСНС).
2. Квазиоптимальный алгоритм комплексного фильтра вторичной обработки измерений НАП СРНС и ИНС, оценивающий скорость и ориентацию потребителя, а также погрешности инерциальных датчиков (27 компонент вектора состояния).
3. Упрощенный квазиоптимальный алгоритм комплексного фильтра вторичной обработки измерений НАП СРНС и ИНС, оценивающий скорость и ориентацию потребителя, а также погрешности инерциальных датчиков (13 компонент ВС).
4. Квазиоптимальный алгоритм комплексирования НАП СРНС и одометрических датчиков.
5. Результаты имитационного моделирования разработанных алгоритмов и экспериментальных исследований.

Структура и объем работы. Структура диссертации состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 161 странице машинописного текста (включая 3 страницы приложения), содержит 90 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 64 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых задач, формулируется цель работы, определяется научная новизна и практическая ценность результатов, вводятся основные используемые понятия, обосновываются способы достижения целей работы и формулируется перечень решаемых задач.

В первой главе приводится описание постановки задачи и синтеза алгоритма комплексирования НАП СРНС и ИНС на первичном уровне.

При синтезе алгоритма комплексирования учитывается то, что темп поступления инерциальных измерений $y_{\text{ИНС}}$ и измерений НАП СРНС $y_{\text{СРНС}}$ существенно различается. Пусть измерения НАП и ИНС поступают в соответствии с временной диаграммой, приведенной на Рис. 1.

Будем полагать, что измерения синхронизированы, т.е. момент времени навигационных определений приемника совпадает с моментом измерений инерциальных датчиков. При этом период навигационных определений НАП $T_{\text{СРНС}}$, а темп инерциальных измерений - $T_{\text{ИНС}}$, $T_{\text{ИНС}} \gg T_{\text{СРНС}}$. На Рис. 1 и далее индекс k соответствует более частым измерениям ИНС, а индекс i — более редким измерениям НАП.

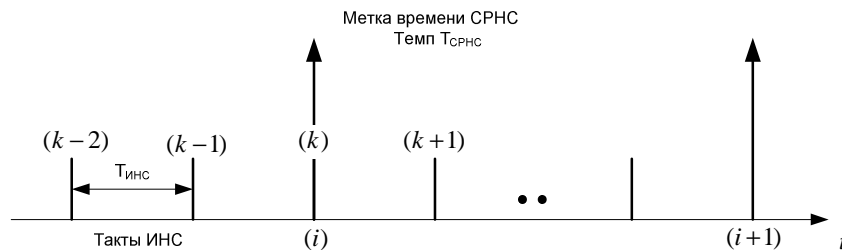


Рис. 1. Временная диаграмма измерений НАП СРНС и ИНС

Приняты следующие модели измерений инерциальных датчиков:

$$y_{a,k} = (\mathbf{I} + \mathbf{m}_{a,k}) \mathbf{A}_{RPY,k} + \mathbf{b}_{a,k} + \mathbf{n}_{a,k},$$

где $\mathbf{A}_{RPY,k}$ - вектор истинных ускорений, $\mathbf{m}_{a,k}$ - матрица перекоса осей и погрешностей масштабных коэффициентов, $\mathbf{b}_{a,k}$ - вектор смещений нулей акселерометров, $\mathbf{n}_{a,k}$ - вектор независимых белых гауссовских шумов (БГШ) с СКО σ_a .

$$y_{\omega,k} = (\mathbf{I} + \mathbf{m}_{g,k}) \mathbf{\Omega}_{RPY,k} + \mathbf{b}_{g,k} + \mathbf{n}_{g,k},$$

где $\mathbf{\Omega}_{RPY,k}$ - вектор истинных угловых скоростей, $\mathbf{m}_{g,k}$ - матрица перекоса осей и масштабных коэффициентов, $\mathbf{b}_{g,k}$ - вектор смещения нулей гироскопов, $\mathbf{n}_{g,k}$ - вектор независимых БГШ с СКО σ_g .

Модель измерений скорости НАП СРНС:

$$\mathbf{y}_{\text{СРНС},i} = \hat{\mathbf{V}}_{\text{ECEF(СРНС)},i} = \mathbf{V}'_{\text{ECEF},i} + \mathbf{n}_{V,i},$$

$\mathbf{V}'_{\text{ECEF},i}$ - истинный вектор скорости, $\mathbf{n}_{V,i}$ - вектор БГШ с матрицей дисперсий $\mathbf{R}_{V,i}$.

Обосновывается использование модернизированного варианта комплексирования, суть которого в данной задаче заключается в том, что измерения $\mathbf{y}_{\omega,k}$ и $\mathbf{y}_{a,k}$ представляются известными функциями времени и через них может быть выражена динамика компонент вектора состояния.

Оцениваемый вектор состояния фильтра записывается как:

$$\mathbf{x} = \left[\left(\mathbf{V}_{\text{ECEF}} \right)^T \quad \left(\mathbf{q}_{\text{RPY}}^{\text{ECEF}} \right)^T \quad \left(\mathbf{b}_g \right)^T \quad \left(\vec{\mathbf{m}}_g \right)^T \quad \left(\mathbf{b}_a \right)^T \quad \left(\vec{\mathbf{m}}_a \right)^T \right]^T,$$

где \mathbf{V}_{ECEF} - вектор скорости потребителя в ECEF системе координат; $\mathbf{q}_{\text{RPY}}^{\text{ECEF}}$ - кватернион, представляющий собой вращение от ССК к ECEF системе координат; \mathbf{b}_g - вектор смещений нулей гироскопов; $\vec{\mathbf{m}}_g$ - элементы матрицы \mathbf{m}_g записанные в виде вектора; \mathbf{b}_a - вектор смещений нулей акселерометров; $\vec{\mathbf{m}}_a$ - элементы матрицы \mathbf{m}_a записанные в виде вектора.

Всего вектор состояния комплексного фильтра включает 27 компонент.

Динамика изменения вектора состояния описывается матричным уравнением:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{G} \cdot \mathbf{n}_k,$$

где \mathbf{x}_k , \mathbf{x}_{k-1} - оценка вектора состояния на k и $k-1$ шаге, \mathbf{G} - матрица дисперсий формирующих шумов, \mathbf{n}_k - вектор независимых БГШ с нулевыми мат.ожиданиями и единичными дисперсиями, $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1})$ - нелинейная векторная функция, связывающая значения вектора состояния на k и $k-1$ шаге:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}) = \left[\begin{array}{c} (\mathbf{I} - 2T\boldsymbol{\Omega}_{EX}) \mathbf{V}_{\text{ECEF},k-1} + T\mathbf{g}(\hat{\mathbf{X}}_{\text{ECEF},k}) + TC(\mathbf{q}_{\text{RPY},k-1}^{\text{ECEF}})(\mathbf{I} - \mathbf{m}_{a,k-1})(\mathbf{y}_{a,k} - \mathbf{b}_{a,k-1}) \\ \Delta_E^* \otimes \mathbf{q}_{\text{RPY},k-1}^{\text{ECEF}} \otimes \Delta_{\text{RPY},k} \\ \mathbf{b}_{g,k-1} \\ \mathbf{m}_{g,k-1} \\ \mathbf{b}_{a,k-1} \\ \mathbf{m}_{a,k-1} \end{array} \right].$$

Алгоритм комплексного фильтра задается двумя этапа - экстраполяции и коррекции. *Этап экстраполяции* описывается соотношениями:

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}), \quad \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},k} = \frac{\partial \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial \mathbf{x}_{k-1}} \hat{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},k-1} \left(\frac{\partial \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial \mathbf{x}_{k-1}} \right)^T + \mathbf{G},$$

а этап коррекции описывается соотношениями:

$$\mathbf{K}_i = \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},i} \cdot \mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{H} \cdot \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},i} \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_{V,i})^{-1}, \quad \hat{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},i} = (\mathbf{I}_{27} - \mathbf{K}_i \cdot \mathbf{H}) \cdot \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},i},$$

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \tilde{\mathbf{x}}_i + \mathbf{K}_i \cdot (\mathbf{y}_{\text{СРНС},i} - \tilde{\mathbf{V}}_{\text{ЕСЕС},i}),$$

где $\mathbf{H} = [\mathbf{I}_3 \quad \mathbf{0}_{3 \times 24}]$, $\tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},i}$ - матрица дисперсий ошибок экстраполяции, $\hat{\mathbf{D}}_{\mathbf{x},i}$ - матрица дисперсий ошибок фильтрации, \mathbf{K}_i - матрица весовых коэффициентов.

В результате работы РФК происходит оценивание ориентации потребителя и его скорости, а также оценивание погрешностей инерциальных датчиков. При помощи полученных в комплексном фильтре оценок рассчитываются компенсирующие воздействия – рывки в проекции НС – потребитель, которые затем используются в канале первичной обработки НАП (структурная схема приведена на Рис.2).

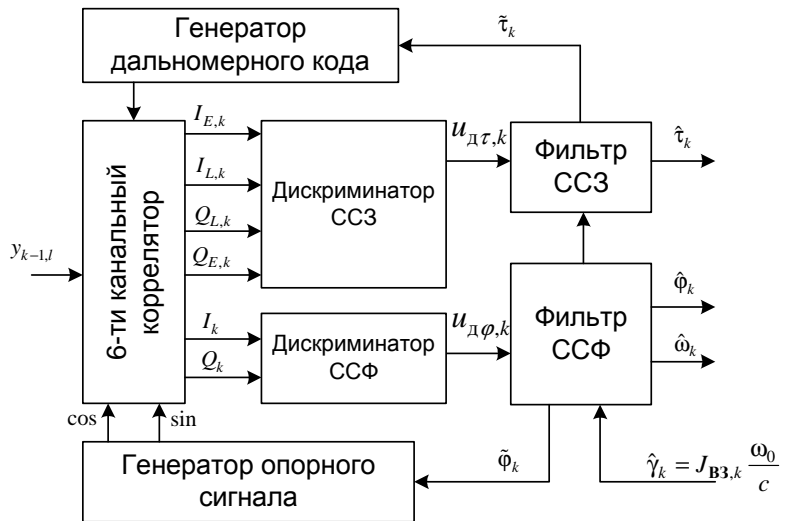


Рис. 2. Канал первичной обработки НАП

В работе проведен синтез комплексного фильтра системы слежения за фазой (ССФ), на вход которого подается сигнал с выхода дискриминатора $u_{д\phi,k}$ и компенсирующее воздействие $\hat{\gamma}_k$. В результате поддержки петли слежения данными о взаимной динамики НАП и НС удастся снизить полосу ССФ и тем самым повысить помехоустойчивость НАП.

Итогом синтеза алгоритма комплексирования становится структурная схема ИСНС, приведенная на Рис. 3.

Разработана имитационная модель ИСНС в среде MATLAB и проведено имитационное моделирование для высокой динамики потребителя (500 м/с^2 , 500 м/с^3) при работе НАП по С/А сигналу GPS. Показано, что погрешности инерциальных датчиков оцениваются в течение длительного переходного процесса, порядка 250 секунд. После переходного процесса, в ИСНС устанавливаются низкие среднеквадратичные ошибки оценивания навигационных параметров - углы ориентации

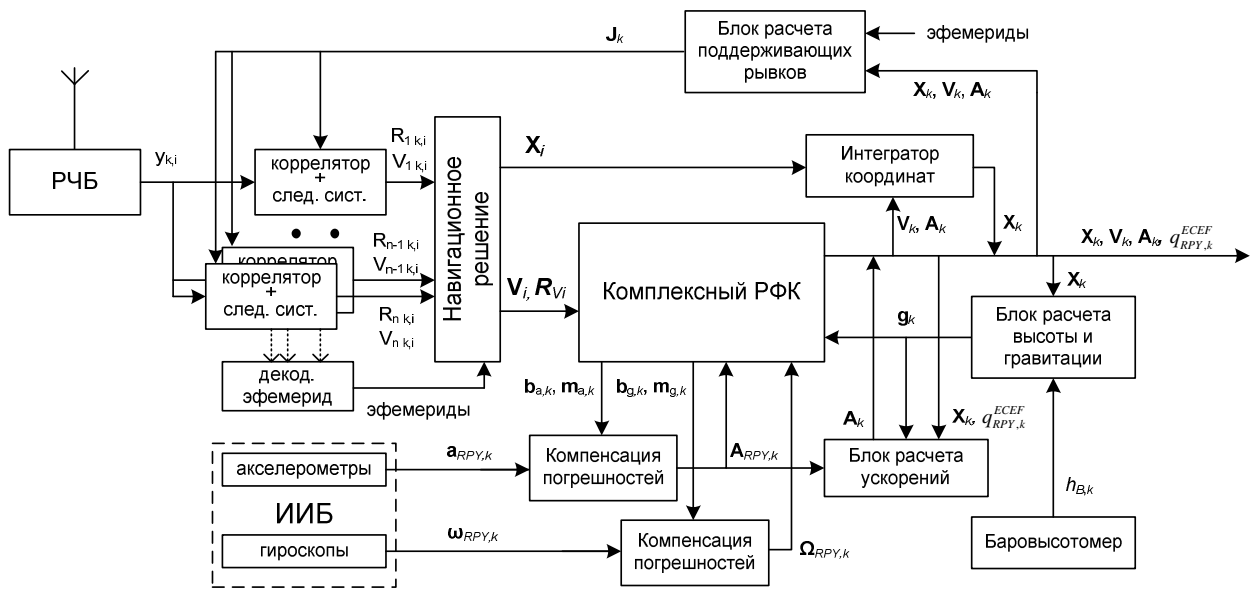


Рис. 3. Структурная схема ИНС.

потребителя - до 0.17 угловых минут, скорости потребителя - до 5 мм/с, ускорение потребителя - до 1 мм/с². Высокие точности оценок позволяют добиться повышения помехоустойчивости до 17 дБ по сравнению с НАП без поддержки от ИНС.

Установлено, что характеристики ИНС практически не зависят от динамики потребителя, но с уменьшением динамики уменьшается выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с НАП без поддержки от ИНС. Характеристики помехоустойчивости приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Выигрыш в помехоустойчивости при разной динамике потребителя.

Динамика потребителя	Низкая 5 м/с ³ , 5 м/с ²	Средняя 50 м/с ³ , 50 м/с ²	Высокая 500 м/с ³ , 500 м/с ²
Помехоустойчивость НАП без поддержки от ИНС, дБ	35	32	30
Помехоустойчивость ИНС, дБ	47	47	47
Выигрыш в помехоустойчивости, дБ	12	15	17

Величина помехоустойчивости зависит от качества используемого опорного генератора (ОГ), ухудшение характеристик которого приводит к снижению выигрыша в помехоустойчивости. Приведенные выше характеристики помехоустойчивости соответствуют ОГ с относительной нестабильностью частоты 10^{-11} , что позволяет сузить полосу пропускания ССФ до 0,4 Гц.

Исследованы характеристики точности ИНС при пропадании сигналов СРНС. Показано, что после пропадания сигналов СРНС ошибки оценивания координат в ИНС за 600 секунд работы возрастают до ± 43 метров, что в ~ 17 раз меньше аналогичных ошибок ИНС, работающей те же 600 секунд с момента начальной выставки в автономном режиме. При этом ошибки оценивания скоростей в ИНС за 600 се-

кунд возрастают до 0.2 м/с, что в 20 раз меньше аналогичных ошибок ИНС, работающей 600 секунд с момента начальной выставки в автономном режиме.

Во второй главе приводится описание постановки задачи и синтеза упрощенного алгоритма комплексирования ИНС и НАП СРНС. Основным отличием от алгоритма, описанного в первой главе, является упрощение модели измерения инерциальных датчиков, которая теперь задается в виде:

$$\mathbf{y}_{a,k} = \mathbf{A}_{RPY,k} + \mathbf{b}_{a,k} + \mathbf{n}_{a,k}, \quad \mathbf{y}_{\omega,k} = \mathbf{\Omega}_{RPY,k} + \mathbf{b}_{g,k} + \mathbf{n}_{g,k}.$$

Использование упрощенной модели инерциальных датчиков приводит к сокращению количества оцениваемых компонент вектора состояния до 13.

Сокращение количества оцениваемых и компенсируемых погрешностей инерциальных датчиков приводит к ухудшению характеристик ИСНС с упрощенным алгоритмом комплексирования. К тому же, характеристики ИСНС с упрощенным алгоритмом комплексирования зависят от динамики потребителя.

Проведено моделирование упрощенного алгоритма комплексирования ИСНС для разных величин динамики потребителя (см. Таблицу 2).

Таблица 2. Ошибки оценивания навигационных параметров в ИСНС с упрощенным алгоритмом комплексирования.

Динамика потребителя	Низкая 5 м/с ³ , 5 м/с ²	Средняя 50 м/с ³ , 50 м/с ²	Высокая 500 м/с ³ , 500 м/с ²
среднеквадратичная ошибка определения координат, м	1,8	1,7	1,8
среднеквадратичная ошибка определения скоростей, м/с	0.01	0.1	0,5...1
среднеквадратичная ошибка определения ускорения, м/с ²	0.01	0,03	0,4...0,6
среднеквадратичная ошибка определения углов ориентации, угл. мин.	2...2,5	2...2,5	2...2,5

Установлено, что уменьшение ускорений и рывка потребителя на порядок ведет к уменьшению ошибок оценивания скоростей и ускорений в 7-9 раз. Ошибки оценивания координат и углов ориентации от динамики движения потребителя практически не зависят.

Характеристики помехоустойчивости ИСНС с упрощенным алгоритмом также зависят от динамики потребителя (приведены в Таблице 3).

Таблица 3. Выигрыш в помехоустойчивости при разной динамике потребителя.

Динамика потребителя	Низкая 5 м/с ³ , 5 м/с ²	Средняя 50 м/с ³ , 50 м/с ²	Высокая 500 м/с ³ , 500 м/с ²
Помехоустойчивость НАП без	35	32	30

поддержки от ИНС, дБ			
Помехоустойчивость ИСНС, упрощенный алгоритм, дБ	37	36	36
Помехоустойчивость ИСНС полный алгоритм, дБ	47	47	47

Установлено, что помехоустойчивость ИСНС с упрощенным алгоритмом ниже на 11 дБ ниже помехоустойчивости ИСНС с полным алгоритмом при высокой динамике потребителя, и выше на 6 дБ помехоустойчивости автономной НАП СРНС. При низкой динамике выигрыш в помехоустойчивости при комплексировании составляет лишь 2 дБ по сравнению с автономной НАП СРНС.

В этой же главе разработан алгоритм комплексной фильтрации данных, поступающих из НАП СРНС и ИНС, основанный на технологии Unscented фильтра Калмана. В алгоритме оцениваются погрешности инерциальных датчиков – смещения нулей гироскопов и акселерометров. Проведено моделирование комплексного алгоритма фильтрации и сравнение его характеристик с аналогичными характеристиками комплексного фильтра, построенного по методологии расширенного фильтра Калмана (с 13-компонентным вектором состояния). Показано, что среднеквадратические ошибки оценивания углов ориентации в обоих алгоритмах практически одинаковы, а среднеквадратические ошибки оценивания составляющих скорости в расширенном фильтре Калмана несколько меньше. При этом следует отметить, что реализация алгоритма с UKF значительно более ресурсоемка, чем реализация с РФК.

В третьей главе приводится описание постановки задачи и синтеза алгоритма комплексирования НАП СРНС и одометрических датчиков колес на вторичном уровне. С выхода НАП на вход алгоритма комплексирования подаются измерения широты и долготы B_k и L_k , высоты h_k и курса α_k с темпом T . С выходов одометрических датчиков колес (датчиков АБС) подаются измерения пройденного задними колесами пути за последний период T - $S_{1,k}$, $S_{2,k}$, для заднего левого и заднего правого колеса, соответственно.

При синтезе алгоритма используется модернизированный вариант комплексирования, аналогичный описанному в главах 1 и 2.

В комплексном фильтре производится оценивание вектора состояния:

$$\mathbf{x} = [B \quad L \quad \alpha \quad K_1 \quad K_2 \quad G]^T,$$

где B , L , α - широта, долгота и курс автомо-

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}) = \begin{bmatrix} B_{k-1} + \frac{dx_k \cdot \cos(\alpha_k)}{R_{\text{Земли}} + H_S} \\ L_{k-1} + \frac{dx_k \cdot \sin(\alpha_k)}{(R_{\text{Земли}} + H_S) \cdot \cos(B_S)} \\ \alpha_{k-1} + da_k \\ K_{1,k-1} \\ K_{2,k-1} \\ G_{k-1} \end{bmatrix}$$

бия, K_1 , K_2 - масштабные коэффициенты и G - величина колеи автомобиля. Динамика компонент вектора состояния описывается уравнением:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{G} \cdot \xi_{k-1},$$

где \mathbf{x}_k , \mathbf{x}_{k-1} - оценка вектора состояния на k и $k-1$ шаге, \mathbf{G} - матрица дисперсий формирующих шумов, ξ_{k-1} - вектор независимых БГШ с нулевыми мат. ожиданиями и единичными дисперсиями, $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1})$ - нелинейная векторная функция, связывающая значения вектора состояния на k и $k-1$ шаге.

Структурная схема комплексной системы приведена на Рис. 4.

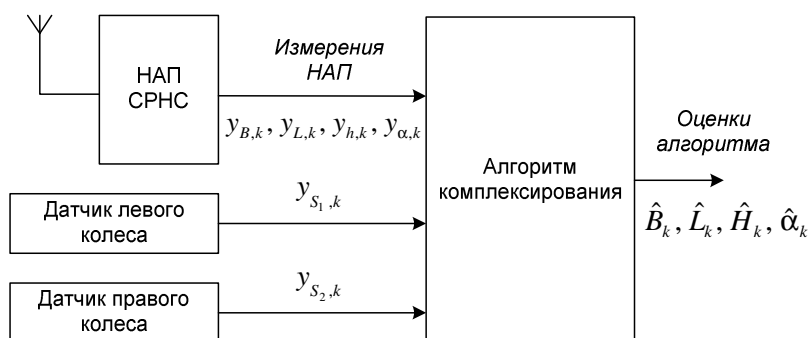


Рис. 4. Структурная схема алгоритма комплексирования НАП СРНС и одометрических датчиков колес.

В диссертации проведен синтез алгоритма комплексирования на основе расширенного фильтра Калмана. Разработана имитационная модель комплексной системы фильтрации и проведено имитационное моделирование.

Приводится описание модели и результатов моделирования синтезированного алгоритма. Показывается, что комплексирования НАП с одометрическими датчиками позволяет повысить точность оценивания координат (до 9 раз) и курса (до 2 раз) автомобиля. Установлено, что алгоритм комплексирования позволяет оценивать координаты в режиме, когда недоступны измерения НАП СРНС (в режиме экстраполяции по измерениям одометрических датчиков), с точностью в несколько процентов пройденного пути.

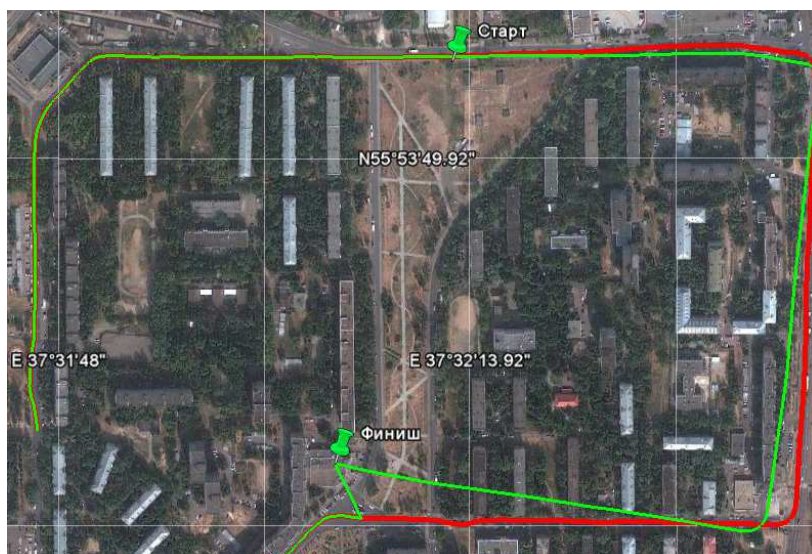


Рис. 5. Трек №1

Для оценки качества работы алгоритма в реальных условиях разработан макет специализированного приемника NV-08C DR («КБ НАВИС»). В макете присутствует интерфейс для подключения датчиков АБС автомобиля. Проведена серия испытаний в городских условиях. Результаты одного из испытаний в виде «трека» - траектории движения автомобиля, представлен на Рис. 5, где одна из линий (приходящая в точку «Финиш») – след траектории, оцененной комплексным алгоритмом, другая (не приходящая в точку «Финиш») – след траектории, оцененной приемником СРНС. Метки «Старт» и «Финиш» обозначают начало и конец участка симуляции автономного движения (по измерениям одометрических датчиков).

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

В Приложении 1 – приведены акты о внедрении результатов.

В рамках проведенного диссертационного исследования получены следующие **результаты**:

1. Предложена и обоснована структура комплексной инерциально-спутниковой системы (ИСНС), включающая: НАП СРНС, на выходе которой формируются оценки координат и скорости потребителя в подвижной геоцентрической системе координат, и в следящие системы за фазами спутниковых сигналов которой вводятся компенсирующие воздействия в виде оценок рывков на линии визирования НС-НАП; ИНС, включающую трехосевой гироскоп и трехосевой акселерометр; комплексный фильтр ИСНС, обрабатывающий данные, поступающие с выходов НАП и ИНС, и формирующий оценки вектора состояния; блок расчета компенсирующих воздействий (в виде оценок рывков вдоль линии визирования НС-потребитель) для ССФ НАП на основе сформированных оценок вектора состояния комплексным фильтром ИСНС.

2. Для комплексного фильтра ИСНС синтезирован квазиоптимальный алгоритм обработки с 27-компонентным вектором состояния, в которых ориентация объекта задается кватернионом вращения. Особенностью синтезированного алгоритма является то, что измерения от датчиков ИНС и НАП поступают и обрабатываются с различной частотой.

3. Предложена методика введения в следящую систему за фазой сигнала компенсирующего воздействия в виде оценки рывка вдоль линии визирования НС-потребитель, рассчитываемой по оценкам вектора состояния, формируемого комплексным фильтром ИСНС. Приведены соответствующие формулы для расчетов.

4. Разработана имитационная модель в среде MATLAB для исследования характеристик предложенной ИСНС и синтезированных алгоритмов обработки.

5. Исследованы характеристики ИСНС для датчиков ИНС навигационного класса точности при разной динамике потребителя. Установлено, что ИСНС позволяет оценивать навигационные параметры с низкими ошибками - углы ориентации потребителя - до 0.17 угловых минут, скорости потребителя - до 5 мм/с, ускорение потребителя - до 1 мм/с². Существенно уменьшаются ошибки счисления навигационных параметров при работе ИНС при пропадании спутниковых сигналов – до 17 раз по среднеквадратичной ошибке оценки координат и до 20 раз по среднеквадратичной ошибке оценки скорости по сравнению с ИНС, которая работала бы в автономном режиме, т.е. без поддержки НАП СРНС.

Предложенная комплексная ИСНС обеспечивает повышение помехоустойчивости при воздействии широкополосной помехи на 12-17 дБ по сравнению с помехоустойчивостью обычной НАП СРНС. Показано, что выигрыш по помехоустойчивости существенно зависит от характеристик ОГ, используемого в НАП. Указанные выше выигрыши достигаются при ОГ высокого класса с относительной нестабильностью частот $\sim 10^{-11}$ и низким уровнем фазовых шумов. При использовании ОГ более низкого класса выигрыш в помехоустойчивости ИСНС снижается.

Показано, что выигрыш в помехоустойчивости ИСНС по сравнению с обычной НАП зависит от динамики движения потребителя. Так, например, если при высокой динамике потребителя (500 м/с², 500 м/с³) величина выигрыша составляет 17 дБ, то при средней динамике (50 м/с², 50 м/с³) величина выигрыша составляет ~ 15 дБ, а при низкой динамике потребителя (5 м/с², 5 м/с³) – 12 дБ.

6. Для комплексного фильтра ИСНС синтезирован упрощенный квазиоптимальный алгоритм обработки с 13-компонентным вектором состояния.

7. Проведено исследование характеристик ИСНС с упрощенным алгоритмом комплексирования методом имитационного моделирования. Показано, что в этом случае при большой динамике движения потребителя ошибки оценивания скоростей в комплексной ИСНС становятся сравнимыми с аналогичными характеристиками НАП СРНС без поддержки от ИНС. Вместе с тем, уже при средней динамике потребителя (50 м/с², 50 м/с³) упомянутая характеристика комплексной ИСНС с упрощенным алгоритмом комплексирования существенно лучше характеристик приемника СРНС примерно в 8 раз по СКО. Показано, что СКО оценивания углов ориентации в комплексной ИСНС с упрощенным алгоритмом обработки равны $\sim 2 \dots 2,5$ угловых

минут, что примерно в 12 раз хуже, чем при использовании комплексной ИСНС с более полным алгоритмом обработки.

Помехоустойчивость ИСНС с упрощенным алгоритмом ниже помехоустойчивости ИСНС с полным алгоритмом на 11 дБ и выше на 6 дБ помехоустойчивости автономной НАП СРНС.

8. Разработан алгоритм комплексной фильтрации данных, поступающих навигационной аппаратуры потребителей СРНС и инерциальной навигационной системы, основанный на технологии Unscented фильтра Калмана. В алгоритме рассматривался 13-компонентный вектор состояния. Проведено моделирование комплексного алгоритма фильтрации и сравнение его характеристик с аналогичными характеристиками комплексного фильтра, построенного по методологии расширенного фильтра Калмана. Показано, что СКО оценивания углов ориентации в обоих алгоритмах примерно одинаковы, а СКО оценивания составляющих скорости в расширенном фильтре Калмана несколько меньше. При этом отмечается, что реализация алгоритма с UKF значительно более ресурсоемка, чем реализация с РФК.

9. Сформулирована постановка задачи и проведен синтез алгоритма комплексирования НАП СРНС и одометрических датчиков.

10. Разработана имитационная модель и проведены исследования характеристик алгоритма комплексирования. Показано, что комплексирование позволяет получить существенный прирост в точности определения координат (до 9 раз по СКО) и курса (до 2 раз по СКО).

11. Разработан макет комплексированного с одометрическими датчиками приемника СРНС и проведены натурные испытания, результаты которых подтверждают характеристики комплексного алгоритма, полученные при моделировании.

Публикации Основное содержание диссертационной работы изложено в тринадцати печатных работах, среди которых четыре статьи (из которых три в научно-технических журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии), одно свидетельство о регистрации программы ЭВМ, а также восемь тезисов международных конференций.

1. Нагин И. А., Шатилов А. Ю. Алгоритм комплексирования НАП СРНС и автомобильных датчиков скоростей вращения колес // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2012. — № 6. — С. 126-130.

2. Шатилов А. Ю., Нагин И. А. Тесно связанный алгоритм комплексирования НАП СРНС и многоцелевой ИНС // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2012. — № 6. — С. 118-125.

3. Нагин И. А. Комплексный инерциально-спутниковый алгоритм вторичной обработки на основе метода «unscented» фильтрации // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2013. — № 5. — С. 17-22.

4. Нагин И. А., Шатилов, А. Ю. Синтез и анализ комплексной системы навигации по сигналам спутниковой навигационной системы и автомобильной системы счисления пути // Радиотехнические тетради. — 2011. — № 44. — С. 49-53.

5. A. Y. Shatilov, I. A. Nagin. A Tightly-Coupled GNSS/IMU Integration Algorithm for Multi-Purpose INS // ION GNSS 25th International Meeting of the Satellite Division, 2012, Nashville, TN, - Pp: 867-873.

6. Первачев С.В., Нагин И.А. Моделирование комплексной цифровой системы слежения за временным положением и частотой фазоманипулированного сигнала // Сборник тезисов докладов конференции РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — Т. 1. — С. 150-151.

7. Перов А. И., Нагин И. А. Моделирование комплексной системы спутниковой навигации и автомобильной системы счисления пути // Сборник тезисов докладов конференции РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — Т. 1. — С. 144-145.

8. Перов А. И., Нагин И. А. Экспериментальные исследования алгоритма Dead Reckoning на основе датчиков АБС автомобиля // Сборник тезисов докладов конференции РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. — Т. 1. — С. 140-141.

9. Нагин И.А. Реализация алгоритма Dead Reckoning на основе датчиков АБС автомобиля // Радионавигационные технологии в приборостроении: Сборник материалов Научно-технической конференции за 2011 г. (г. Туапсе). — М.: Лика, 2011.

10. Шатилов А.Ю., Нагин И.А. Тесно связанная схема комплексирования ИНС и НАП СРНС // Радиооптические технологии в приборостроении: Сборник материалов Научно-технической конференции за 2012 г. (г. Туапсе).

11. Бутыло С.В., Нагин И.А. Испытания интегрированного навигационного модуля // Радиооптические технологии в приборостроении: Сборник материалов Научно-технической конференции за 2012 г. (г. Туапсе).

12. Нагин И. А. Комплексный алгоритм обработки информации от приемника СРНС и автомобильной системы счисления пути // Радиолокация, навигация и связь: Сб. трудов междунар. конф. Воронеж, 2011.

13. Нагин И. А. Программа моделирования комплексного фильтра для интегрирования измерений приемника СРНС и автомобильной системы счисления пути. — РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2011616993 от 27.10.11 г.