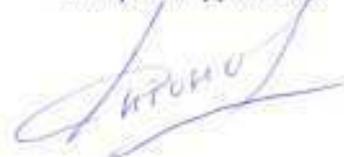


*На правах рукописи*



**Антонов Дмитрий Александрович**

**БОРТОВОЙ НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ПОВЫШЕННОЙ  
ПОМЕХОЗАЩИЩЁННОСТИ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ  
БПЛА**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные комплексы систем ориентации и навигации» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент

**Веремесенко Константин Константинович**

**Официальные оппоненты:** **Соловьев Юрий Арсеньевич**

доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение "Центральный научно-  
исследовательский институт Военно-воздушных  
сил" Министерства обороны Российской  
Федерации, ведущий научный сотрудник

**Фещенко Сергей Владимирович**

кандидат технических наук, Акционерное  
общество "Российская самолётостроительная  
корпорация "МиГ", ведущий конструктор

**Ведущая организация:** **Открытое акционерное общество  
«Московский институт электромеханики  
и автоматики»**

Защита диссертации состоится «20» апреля 2015 г. в \_\_\_\_\_ часов \_\_\_\_\_ минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.11 в Московском авиационном институте по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

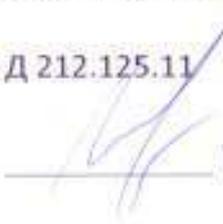
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московском авиационном институте по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4 и на сайте МАИ (НИУ): [http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=55962](http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=55962)

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Отзывы просим отправлять в 2-х экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Учёный совет МАИ

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.125.11

кандидат технических наук, доцент

 Горбачев Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Роботизированные технологии находят всё большее применение в различных видах воздушного, наземного и морского транспорта, в сельском хозяйстве, при добыче полезных ископаемых и освоении природных ресурсов. При этом весьма динамично развивается рынок роботизированных летательных аппаратов. По мере роста общего количества беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится актуальной задача их интеграции в общее пространство с пилотируемыми воздушными судами (ВС), решение которой возможно только при достижении заданного качества определения параметров движения БПЛА, в том числе точности и помехозащищённости. Эксплуатационные стандарты находятся в стадии разработки уполномоченными органами гражданской авиации и, вероятно, будут повторять аналогичные требования к бортовому оборудованию (БО) гражданских ВС.

В настоящее время на международном и отечественных рынках не предлагаются специализированные серийные навигационных систем для беспилотной авиации, прежде всего малого и среднего классов, удовлетворяющие требованиям безопасности полетов в общем воздушном пространстве. К бортовому оборудованию БПЛА предъявляются жесткие требования по минимизации стоимости, массогабаритных характеристик и энергопотребления, которые зачастую являются взаимно противоречивыми, а их выполнение в общем случае приводит к ухудшению точности и помехозащищённости. Перед разработчиками навигационного оборудования БПЛА стоит проблема обеспечения точности и помехозащищённости при использовании элементной базы общего назначения. Специфика применения малых и средних БПЛА при отсутствии наземных навигационных средств поддержки, в условиях низковысотного маневренного полёта, при снижении видимости и переотражении сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) усложняет

проблему обеспечения точности и помехозащищённости навигационного определения.

Решение проблемы возможно двумя основными путями: первый из них - применение аппаратуры, используемой в пилотируемой авиации. Преимуществом такого подхода является применение отработанных изделий и технологий, а недостатком - игнорирование специфики БПЛА, что делает практически невозможным его применение в составе БПЛА малого и среднего классов. Модификация существующего БО ВС под нужды беспилотной авиации требует значительных ресурсов и не снимает ряд принципиальных ограничений на применение, прежде всего из-за массогабаритных характеристик БО ВС и его высокой стоимости.

Второй путь - создание специализированных навигационных комплексов БПЛА малого и среднего классов, в которых следует применять недорогие датчики общего назначения. Повышение точности навигационного определения, надежности и унификация методик проектирования и испытаний аппаратной части и программно-алгоритмического обеспечения БО БПЛА могут быть достигнуты за счет глубокой интеграции систем различной физической природы при сохранении алгоритмического, программного и аппаратного ядра навигационного комплекса БПЛА, основанного на инерциальной навигационной системе. Определяющий вклад в развитие алгоритмического обеспечения навигационных комплексов внесли своими работами Ишлинский А.Ю., Андреев В.Д., Красовский А.А., Помыкаев И.И., Пешехонов В.Г., Селезнев В.П., Дмитроченко Л.А.. Вопросы комплексной обработки информации для решения задач повышения точности и надёжности навигационных систем раскрыты в работах Парусникова Н.А., Голована А.А., Красильщикова М.Н., Распопова В.Я., Репникова А.В., Степанова О.А. Программно-аппаратный состав навигационного комплекса и методики полунатурных и натурных испытаний навигационных систем различного класса

и областей применения приводятся в работах Бабича О.А., Джанджгавы Г.И., Харина Е.Г. и д.р.

Актуальная проблема обеспечения помехозащищённости навигационного оборудования может быть решена на основе построения алгоритмов комплексной обработки информации с переменной структурой, что позволяет оценить погрешности каждой из подсистем и реализовать алгоритмы обнаружения и исключения отказов различного вида.

**Цель работы** заключается в обосновании концепции построения, разработке программно-алгоритмических и аппаратных решений, обеспечивающих повышение точности, а также в исследовании свойств бортового навигационного комплекса (БНК) повышенной помехозащищённости с переменной структурой для БПЛА малого и среднего классов.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **научно-технические задачи**:

- разработка концепции построения БНК БПЛА и обоснование структуры алгоритмического обеспечения БНК повышенной помехозащищённости с переменной структурой;
- разработка математической модели погрешностей навигационного комплекса, учитывающей стохастическую и волновую структуру возмущений и особенности траектории движения БПЛА;
- разработка алгоритма оценителя вектора состояния БНК, учитывающего стохастическое и волновое представление возмущений, и алгоритма контроля ГНСС измерений;
- разработка методики имитационного моделирования алгоритмов БНК, в том числе алгоритмов комплексной обработки информации БНК переменной структуры, с учётом влияния возмущающих факторов различного вида;
- создание экспериментального образца БНК;

- разработка методики проведения полунатурных испытаний для анализа характеристик алгоритмов комплексной обработки информации.

**Объектом исследования** является БНК моторного БПЛА малого и среднего классов самолетного типа, предназначенного для решения широкого круга практических задач, при этом в качестве **предмета исследований** выступает алгоритмическое обеспечение БНК, включающее процедуры комплексной обработки информации переменной структуры, которые обеспечивают повышение помехозащищённости комплекса за счёт обнаружения, оценки и исключения искажённых сигналов навигационных спутников.

**Методы исследования.** Диссертационная работа выполнена с использованием методов построения моделей динамических систем, методов статистической обработки данных, теории оптимального оценивания и комплексной обработки навигационной информации, методов имитационного и полунатурного моделирования, а также методов натурных испытаний. Экспериментальные исследования проводились с использованием пакетов MATLAB и MathCAD, языков программирования C, Java, Borland Delphi, операционных систем реального времени (RTKernel, TNKernel), специально разработанного стенда полунатурных испытаний БНК на автотранспорте, предложенных авторских методик и оборудования.

**Положения, выносимые на защиту:**

- структуры алгоритмической и аппаратной частей БНК, обеспечивающие повышение помехозащищённости за счёт контроля измерений ГНСС и переменной структуры алгоритмов КОИ;

- математическая модель погрешностей навигационного комплекса, учитывающая стохастическую и волновую структуру возмущений и особенности траектории движения БПЛА;

- алгоритмы оптимального оценивателя и контроля измерений ГНСС на базе стохастического и волнового подходов представления погрешностей

определения псевдодальностей и псевдоскоростей НКА ГЛОНАСС/GPS, обеспечивающие повышенную помехозащищённость комплекса;

- методики имитационного и полунатурного моделирования алгоритмов БНК предложенных схем комплексирования при различных возмущающих факторах, а также методики натуральных испытаний экспериментальных образцов БНК;

- результаты имитационного моделирования и натуральных испытаний, полученные с использованием созданных образцов БНК.

**Научная новизна работы:**

- концепция построения БНК БПЛА и структура алгоритмического обеспечения БНК повышенной помехозащищённости с переменной структурой;

- математическая модель погрешностей навигационного комплекса, учитывающая стохастическую и волновую структуру возмущений, а также особенности траектории движения БПЛА;

- алгоритм линейного стохастического оценителя с использованием волнового представления возмущений;

- алгоритм контроля измерений ГНСС на базе предложенного линейного стохастического оценителя;

- методика имитационного моделирования алгоритмов БНК, в том числе алгоритмов комплексной обработки информации, для нескольких вариантов схем комплексирования с учётом влияния возмущающих факторов различного вида;

- методика проведения полунатурных испытаний и камеральной обработки результатов для анализа характеристик алгоритмов комплексной обработки информации;

- результаты имитационного моделирования и натуральных испытаний, подтверждающие работоспособность разработанного стохастического оценителя и его потенциальную точность.

**Практическая ценность результатов исследований** определяется разработанными схемами, математическими моделями, алгоритмами и аппаратными решениями, которые могут быть использованы разработчиками и производителями бортовых навигационных комплексов БПЛА малого и среднего классов.

**Реализация и внедрение.** Результаты научных исследований, полученные при работе над диссертацией, были использованы в ОКР ЗАО "Транзас Авиация" при создании образцов БИСНС-1Т, БИСНС-1ТМ, БИСНС-2Т, а также на кафедре «Автоматизированные комплексы систем ориентации и навигации» МАИ (НИУ) в учебном процессе по дисциплинам «Навигационные системы» и «Программное и алгоритмическое обеспечение ПНК».

**Апробация результатов работы.** Основные результаты исследований доложены и обсуждены на 8 конференциях и семинарах международного и всероссийского уровней.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 14 работах, из которых 3 входят в издания, рекомендованные ВАК, в виде статей, докладов и тезисов докладов, приведенных в списке публикаций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из оглавления, списка сокращений, введения, четырёх глав, заключения и библиографического списка, включающего 77 ссылки по теме проводимых исследований. Основное содержание диссертации изложено на 146 страницах, содержит 97 рисунков и 2 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов

работы. Представлена структура диссертации и представлено краткое содержание её глав.

**В первой главе** на базе требований к конкретному БПЛА и режимам работы формируются требования к набору определяемых бортовым навигационным комплексом параметров ориентации и навигации, а также точности их определения. Концепция построения БНК формируется на основании предъявляемых к нему требований, и в её рамках во главу угла ставятся алгоритмы КОИ, в том числе с переменной структурой, а исходные данные для них формируются алгоритмами ориентации и навигации. Структура алгоритмического обеспечения БНК приводится на Рисунке 1.

Обобщённая аппаратная структура БНК включает приёмник ГНСС с антенной, трёхосный инерциальный модуль и магнитный компас, выполненный в виде отдельного устройства на базе магниторезистивного датчика. В качестве вычислителя используется контроллер общего назначения. БНК сопрягается с внешними датчиками - системой воздушных сигналов (СВС) и приёмником дифференциальных поправок ГНСС - посредством двух последовательных интерфейсов. Дискретные входы и выходы используются для приема разовых команд и отображения признаков состояния системы. Взаимодействие с бортовым оборудованием производится через два последовательных интерфейса и интерфейс Ethernet.

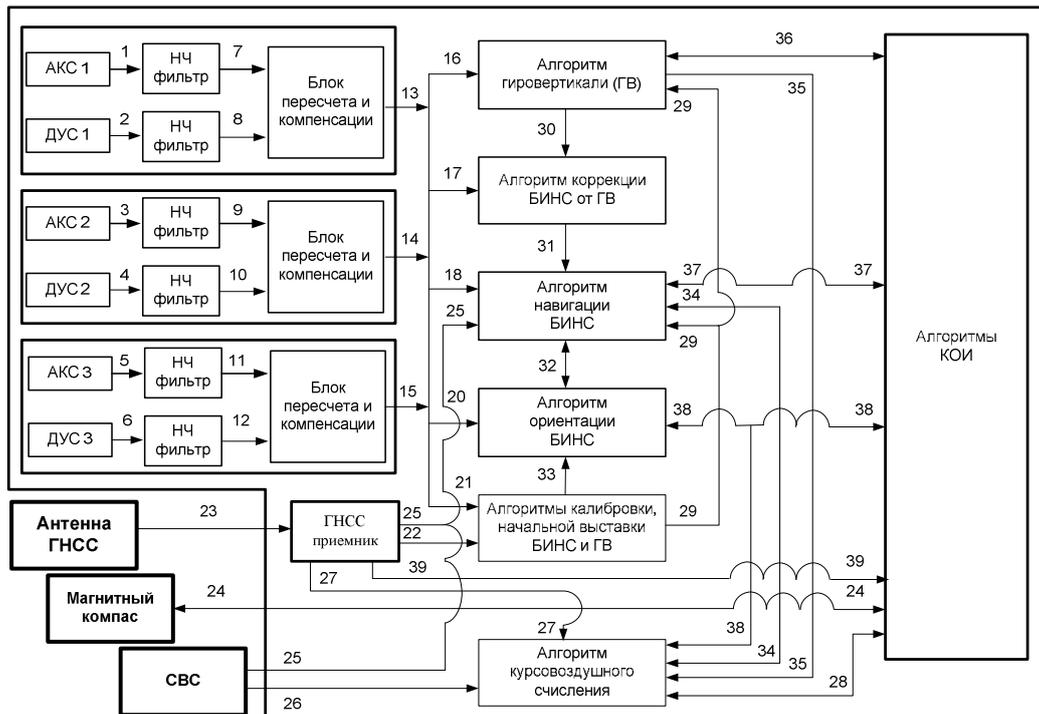


Рисунок 1 – Структура алгоритмов ориентации и навигации БНК.

Во второй главе основное внимание уделяется обоснованию и модификации математических моделей погрешностей датчиков и систем, входящих в состав БНК. Приводится модифицированная модель погрешностей определения углов ориентации БПЛА без ограничений на траекторию полёта. Сделан вывод о необходимости введения волнового представления погрешностей определения псевдодальностей и псевдоскоростей НКА ГЛОНАСС/GPS. Использование волнового и статистического подходов при представлении этого типа погрешностей позволяет значительно повысить точность и помехозащищённость работы алгоритмов комплексной обработки информации БНК и навигационного обеспечения БНК в целом. Существенное внимание в главе уделено вопросам согласования ориентации осей чувствительности (магнитный компас) МК и БНК и особенностям девиационных работ на базе рекуррентного метода наименьших квадратов. Математическая модель погрешностей БИНС представлена в виде модели линейной динамической системы в пространстве состояний

$$\dot{\bar{X}} = [F] \cdot \bar{X} + [B] \cdot \bar{U} + [G] \cdot \bar{W}, \quad (1)$$

где  $[F]$  - матрица динамики системы;  $\bar{X}$  - вектор состояния системы;  $[B]$  - матрица управления;  $\bar{U}$  - вектор управляющих сигналов;  $[G]$  - матрица шумов системы;  $\bar{W}$  - вектор шумов системы. Вектор состояния БИНС имеет вид:

$$\bar{X}^T = \left\{ \begin{array}{l} x_1, x_2, x_3, x_4, \alpha, \beta, \gamma, \Delta\Omega_X, \Delta\Omega_Y, \Delta\Omega_Z, \Delta K_{\Omega_X}, \Delta K_{\Omega_Y}, \Delta K_{\Omega_Z}, \\ \Delta n_X, \Delta n_Y, \Delta n_Z, \Delta K_{n_X}, \Delta K_{n_Y}, \Delta K_{n_Z} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где  $\Delta\Omega_X, \Delta\Omega_Y, \Delta\Omega_Z$  - проекции постоянных составляющих погрешностей ДУС на оси связанной системы координат;  $\Delta K_{\Omega_X}, \Delta K_{\Omega_Y}, \Delta K_{\Omega_Z}$  - ошибки масштабных коэффициентов ДУС;  $\Delta n_X, \Delta n_Y, \Delta n_Z$  - постоянные составляющие ошибок акселерометров в проекциях на оси связанной системы координат;  $\Delta K_{n_X}, \Delta K_{n_Y}, \Delta K_{n_Z}$  - ошибки масштабных коэффициентов акселерометров;  $x_1, x_2$  - ошибки определения координат БИНС,  $x_3, x_4$  - ошибки определения скорости изменения координат БИНС. Особенностью предложенной в работе математической модели БИНС является введение связи между ошибками определения углов ориентации по истинному курсу, тангажу и крену  $\delta\psi, \delta u, \delta\gamma$  и малыми углами поворота вычисленного трехгранника относительно вычисленного горизонта  $\alpha, \beta, \gamma$  без ограничений на вид траектории:

$$\delta\gamma = \left( \frac{-\sin(\psi)}{\cos(u)} \right) \cdot \alpha_2 + \left( \frac{\cos(\psi)}{\cos(u)} \right) \cdot \beta_2;$$

$$\delta\psi = (\sin(\gamma) \cdot \cos(\psi) + \cos(\gamma) \cdot \sin(\psi) \cdot \operatorname{tg}(u)) \cdot \alpha_2 + \\ + (\sin(\gamma) \cdot \sin(\psi) - \cos(\gamma) \cdot \cos(\psi) \cdot \operatorname{tg}(u)) \cdot \beta_2 + \cos(\gamma) \cdot \gamma_2;$$

$$\delta u = (\cos(\gamma) \cdot \cos(\psi) - \sin(\gamma) \cdot \sin(\psi) \cdot \operatorname{tg}(u)) \cdot \alpha_2 + \\ + (\cos(\gamma) \cdot \sin(\psi) + \sin(\gamma) \cdot \cos(\psi) \cdot \operatorname{tg}(u)) \cdot \beta_2 - \sin(\gamma) \cdot \gamma_2;$$

$$\alpha_2 = \alpha + \alpha_1; \beta_2 = \beta + \beta_1; \gamma_2 = \gamma + \gamma_1;$$

$$\alpha_1 = -\frac{x_2}{\rho_1}; \beta_1 = \frac{x_1}{\rho_2}; \gamma_1 = \frac{x_1}{\rho_2} \cdot \operatorname{tg}(\varphi),$$

где  $\psi, u, \gamma$  - идеальные значения текущих углов истинного курса, тангажа и крена;  $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$  - компоненты полной ошибки ориентации БИНС относительно идеального горизонтного трехгранника;  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  - погрешности ориентации вычисленного горизонтного трехгранника относительно идеального.

Для принятой в БНК двухканальной схемы БИНС в уравнении (1) учитываются погрешности, связанные с вертикальными параметрами через вектор управления  $\bar{U}^T = \{\delta H, \delta V_H\}$ , где  $\delta H, \delta V_H$  – погрешности определения высоты и вертикальной скорости внешними измерителями. Элементы матрицы управляющих сигналов  $[B]$ , отличные от нуля, имеют вид:

$$[B]_{3,1} = -\dot{\Omega}_N - \Omega_E \cdot \Omega_H; [B]_{3,2} = -2 \cdot \Omega_N;$$

$$[B]_{4,1} = \dot{\Omega}_E - \Omega_N \cdot \Omega_H; [B]_{4,2} = 2 \cdot \Omega_E,$$

где  $\Omega_E, \Omega_N, \Omega_H$  и  $\dot{\Omega}_E, \dot{\Omega}_N$  - проекции абсолютной угловой скорости вращения и скорости их изменения в горизонтной системе координат, ориентированной по сторонам света.

На примерах реальных записей погрешностей определения местоположения по сигналам ГНСС показано наличие волновой составляющей погрешностей местоположения, в том числе их скачкообразного изменения при смене рабочего созвездия НКА. Использование волнового подхода при формировании математической модели в совокупности со стохастическим даёт более достоверное описание погрешностей приёмника ГНСС. У возмущений, обладающих волновой структурой (Рисунок 2), имеют место различные волновые формы, хотя бы на коротких интервалах времени. Возмущения волновой структуры  $\omega(t)$  могут быть математически представлены с помощью полудетерминированных аналитических выражений вида:

$$\omega(t) = c_1 \cdot f_1(t) + c_2 \cdot f_2(t) + \dots + c_n \cdot f_n(t),$$

где  $f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)$  - известные базовые функции;  $c_1, c_2, \dots, c_n$  - кусочно-постоянные неизвестные весовые коэффициенты, которые могут скачкообразно менять свои значения.

Для волновых процессов, представленных на Рисунке 2, математическое описание можно представить в виде:

$$T_1: \omega_1(t) = c_1; T_2: \omega_2(t) = c_2; T_3: \omega_3(t) = c_3 + c_4 \cdot t; T_4: \omega_4(t) = c_5 + c_6 e^{\beta t},$$

где  $T_1, T_2, T_3, T_4$  - интервалы действия возмущения соответствующего вида.

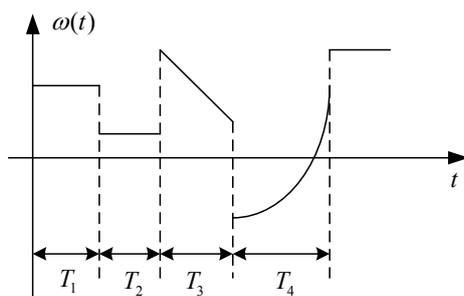


Рисунок 2 - Волновое представление случайных процессов  $\omega(t)$ .

**Третья глава** посвящена разработке алгоритмического обеспечения комплексной обработки информации в БНК. При этом было использовано последовательное усложнение математической модели погрешностей измерений. Предложен алгоритм КОИ переменной структуры, базирующийся на анализе характера погрешностей с целью выявления волновой структуры с амплитудой выше заданного порога в кодовых и доплеровских измерениях. Такой подход позволяет учитывать особенности сигналов ГНСС при формировании алгоритмов КОИ, а также сравнивать различные схемы комплексирования для анализа их характеристик. Предложенная структура алгоритмов КОИ БНК и разработанных математических моделей позволяет проанализировать три варианта схем комплексирования информации от БИНС, приёмника ГНСС и МК: слабосвязанная и жёсткосвязанная схемы комплексирования со стохастическим представлением шумов системы и шумов измерений, а также переменная схема комплексирования на базе стохастического и волнового представления погрешностей измерения псевдодальностей и псевдоскорости ГНСС приёмником. Последний вариант построения оптимального фильтра позволяет не только улучшить характеристики КОИ, но и построить на его основе алгоритм контроля целостности навигационного обеспечения БНК и, тем самым, повысить помехозащищённость БНК. В главе приведена основа такого алгоритма целостности. Алгоритмы КОИ БНК построены на базе использования оптимального дискретного фильтра Калмана.

$$\hat{X}_k = [\Phi]_{k/k-1} \cdot \hat{X}_{k-1} + [B]_{k/k-1} \cdot \bar{U}_{k-1} + [K]_k \cdot (\bar{Z}_k - [H]_k \cdot [\Phi]_{k/k-1} \cdot \hat{X}_{k-1})$$

$$[K]_k = [S]_k \cdot [H]_k^T \cdot ([H]_k \cdot [S]_k \cdot [H]_k^T + [R]_k)^{-1}$$

$$[S]_k = [\Phi]_{k/k-1} \cdot [P]_{k-1} \cdot [\Phi]_{k/k-1}^T + [\Gamma]_{k/k-1} \cdot [Q]_{k-1} \cdot [\Gamma]_{k/k-1}^T$$

$$[P]_k = ([E] - [K]_k \cdot [H]_k) \cdot [S]_k,$$

где  $k$  - такт работы оценщика,  $\hat{X}_k$  - вектор оценок;  $[\Phi]_{k/k-1}$  - переходная матрица системы;  $[B]_{k/k-1}$  - матрица управления;  $\bar{U}_{k-1}$  - вектор управляющих сигналов;  $[K]_k$  - матрица оптимальных коэффициентов;  $\bar{Z}_k$  - вектор измерений;  $[H]_k$  - матрица связи измерений и вектора состояния;  $[S]_k$ ,  $[P]_k$  - априорная и апостериорная матрицы ковариации, соответственно;  $[R]_{k-1}$ ,  $[Q]_{k-1}$  - матрицы интенсивностей шумов измерений и шумов системы, соответственно;  $[\Gamma]_{k/k-1}$  - матрица шумов системы;  $[E]$  - единичная матрица.

Первым из рассматриваемых алгоритмов комплексирования БНК является алгоритм на основе слабосвязанной схемы комплексирования. Вектор состояния в этом случае совпадает с (2) и равен  $\bar{X}_{\text{БИНС/СНС/МК}} = \bar{X}$ . Вектор измерений имеет вид:

$$\bar{Z}_{\text{БИНС/СНС/МК}}^T = \{ \lambda_{\text{БИНС}} - \lambda_{\text{СНС}}, \varphi_{\text{БИНС}} - \varphi_{\text{СНС}}, v_{e\text{БИНС}} - v_{e\text{СНС}}, v_{n\text{БИНС}} - v_{n\text{СНС}}, \psi_{\text{БИНС}} - \psi_{\text{МК}} \},$$

где  $\lambda_{\text{БИНС}}$ ,  $\varphi_{\text{БИНС}}$  и  $\lambda_{\text{СНС}}$ ,  $\varphi_{\text{СНС}}$  - долгота и широта точки места по показаниям БИНС и приёмника ГНСС, соответственно;  $v_{e\text{БИНС}}$ ,  $v_{n\text{БИНС}}$  и  $v_{e\text{СНС}}$ ,  $v_{n\text{СНС}}$  - восточная и северная проекции путевой скорости по показаниям БИНС и ГНСС;  $\psi_{\text{БИНС}}$  и  $\psi_{\text{МК}}$  - углы истинного курса по показаниям БИНС и МК.

Второй вариант алгоритмов КОИ БНК разработан на базе жёсткосвязанной схемы комплексирования. Для формирования вектора измерений  $\bar{Z}_{\text{БИНС/СНС/МК}}^{\text{ЖС}}$  на основе выходных параметров БИНС вычисляются прогнозируемые псевдодальности  $\rho_i^{\text{БИНС}}$  и псевдоскорости  $\dot{\rho}_i^{\text{БИНС}}$  для всех НКА рабочего созвездия ГНСС. Вектор состояния системы

$\bar{X}^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}$  расширяется по сравнению с вектором  $\bar{X}_{\text{БИНС/СНС/МК}}$  за счет включения в его состав погрешностей измерения псевдодальностей и псевдоскоростей. В модели погрешностей кодовых и доплеровских измерений приёмника ГНСС при этом учитываются ошибки, вызванные уходами начальной фазы и частоты опорного генератора ГНСС приёмника  $\delta\rho_{\Delta\tau}^{\text{СНС}}$  и  $\dot{\delta\rho}_{\Delta\tau}^{\text{СНС}}$ . Включенная в систему двухканальная БИНС не даёт информацию о высоте и вертикальной скорости. Эти данные должны поступать от внешнего датчика, в качестве которого в БНК выступает приёмник ГНСС, и такое решение допустимо при слабосвязанной схеме комплексирования. При жёсткосвязанной схеме навигационное решение ГНСС в векторе исходных данных отсутствует, а следовательно нет информации о текущей высоте и вертикальной скорости от ГНСС. Единственной доступной информацией являются измеренные псевдодальности и псевдоскорости НКА. Предложено решение, при котором в вектор состояния вводятся фиктивные компоненты - ошибка определения высоты  $\delta h^{\text{БИНС}}$  и ошибка вертикальной скорости  $\delta v_{\text{Н}}^{\text{БИНС}}$ . Эти компоненты образуются из ошибок измерения псевдодальностей и псевдоскоростей, проецируемых на вертикальное направление. В этом случае вектор состояния жесткосвязанной схемы комплексирования принимает вид:

$$\bar{X}^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}^{\text{T}} = \{\bar{X}_{\text{БИНС/СНС/МК}}^{\text{T}}, \delta\rho_{\Delta\tau}^{\text{СНС}}, \dot{\delta\rho}_{\Delta\tau}^{\text{СНС}}, \delta h^{\text{БИНС}}, \delta v_{\text{Н}}^{\text{БИНС}}\}$$

Матрица связи  $[H]^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}$  между вектором измерений  $\bar{Z}^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}$  и вектором состояния системы  $\bar{X}^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}$  формируется на базе принятой модели кодовых и доплеровских измерений приёмника ГНСС путем формального варьирования уравнений измерений с использованием уравнений связи систем координат по параметрам БИНС- $\lambda^{\text{БИНС}}$ ,  $\varphi^{\text{БИНС}}$  и  $V_{\text{Е}}^{\text{БИНС}}$ ,  $V_{\text{Н}}^{\text{БИНС}}$ , соответственно.

В качестве третьего варианта алгоритмов КОИ БНК рассмотрен алгоритм переменной структуры оптимального фильтра Калмана на базе жесткосвязанной схемы комплексирования БИНС, ГНСС и МК с учётом

возмущений волновой структуры в кодовых и доплеровских измерениях ГНСС. Волновая составляющая погрешности определения псевдодальности  $\delta\rho_i^W$  и псевдоскорости  $\delta\dot{\rho}_i^W$  для  $i$ -го НКА рабочего созвездия ГНСС представлена в виде:

$$\delta\rho_i^W = \Delta\rho_i + a_i \cdot t_i + b_i \cdot t_i^2; \delta\dot{\rho}_i^W = \Delta\dot{\rho}_i + c_i \cdot t_i,$$

где  $\Delta\rho_i$  - постоянная составляющая погрешности определения псевдодальности;  $\Delta\dot{\rho}_i$  - постоянная составляющая погрешности определения псевдоскорости;  $a_i$  - коэффициент линейной составляющей погрешности определения псевдодальности;  $b_i$ - коэффициент квадратичной составляющей погрешности определения псевдодальности;  $c_i$  - коэффициент линейной составляющей погрешности определения псевдоскорости;  $t_i$ —время с момента расширения вектора состояния за счет включения параметров волновых функций погрешностей  $i$ -го НКА.

Расширенный вектор состояния системы  $\bar{X}_P^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}$  в этом случае имеет вид:

$$\bar{X}_P^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}^T = \left\{ \bar{X}_{\text{БИНС/СНС/МК}}, \delta\rho_{\Delta\tau}^{\text{СНС}}, \delta\dot{\rho}_{\Delta\tau}^{\text{СНС}}, \delta h^{\text{БИНС}}, \delta V_H^{\text{БИНС}}, \Delta\rho_1, a_1, b_1, \Delta\dot{\rho}_1, c_1, \Delta\rho_2, a_2, b_2, \Delta\dot{\rho}_2, c_2, \dots \Delta\rho_l, a_l, b_l, \Delta\dot{\rho}_l, c_l \right\},$$

где  $l \in \overline{1, (m - 4)}$ —число НКА, в измерениях псевдодальностей до которых предположительно содержатся погрешности волновой структуры, превышающие заданный порог,  $m$  – количество НКА рабочего созвездия.

Вектор измерений фильтра с переменной структурой совпадает с вектором измерений  $\bar{Z}^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}$ . Матрица измерений  $[H]_P^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}$  формируется на основе матрицы  $[H]^{\text{ЖС}}_{\text{БИНС/СНС/МК}}$  с учетом волнового представления погрешностей псевдодальностей и псевдоскоростей для “проблемных” НКА. В связи с применением жесткосвязанной схемы построения комплексной системы необходимо отметить, что использование волнового представления в описании погрешностей определения псевдодальностей и псевдоскоростей позволяет одновременно оценивать

погрешности и исключать из решения до  $(m - 4)$  НКА. Как показано по результатам имитационного моделирования в диссертационной работе, это ограничение определяется двумя факторами:

Во-первых, минимальное количество НКА рабочего созвездия для функционирования фильтра с переменной структурой без дополнительных ограничений на траекторию и погрешности часов приёмника равно 4.

Во-вторых, одновременная оценка параметров волновых функций для количества НКА, больше чем  $(m - 4)$ , приводит к совместной наблюдаемости комбинации элементов вектора состояния. Таким образом,

если  $l > m - 4$ , то:

- $\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \delta \rho_i^w$  наблюдается совместно с  $\delta \rho_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}$ ;
- $\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \delta \dot{\rho}_i^w$  наблюдается совместно с  $\delta \dot{\rho}_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}$ ;

если  $l \geq m - 3$ , задача становится плохо обусловленной, при этом:

если  $l = m - 3$ , то:

–  $\delta \rho_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}$  оценивается совместно с  $\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \delta \rho_i^w$ , что приводит к ошибке оценки сдвига начальной фазы опорного генератора, проявляющейся в виде среднего вида  $e_{\delta \hat{\rho}_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}} = f\left(\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \delta \rho_i^w, [P]_k, [Q]_{k-1}, [R]_{k-1}, \text{GDOP}_k\right)$ ;

–  $\delta \dot{\rho}_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}$  – оценивается совместно с  $\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \delta \dot{\rho}_i^w$ , что приводит к ошибке оценки частоты опорного генератора, проявляющейся в виде среднего вида  $e_{\delta \hat{\dot{\rho}}_{\Delta \tau}^{\text{СНС}}} = f\left(\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \delta \dot{\rho}_i^w, [P]_k, [Q]_{k-1}, [R]_{k-1}, \text{GDOP}_k\right)$ ;

если  $l > m - 3$ , то оценка параметров вектора состояния  $\bar{X}_p^{\text{ЖС}}$  БИНС/СНС/МК отсутствует (происходит рост диагональных элементов матрицы ковариации  $[P]_k$ ) -  $x_1, x_2, x_3, x_4$ .

Обобщенная блок-схема алгоритма оценивания с переменной структурой приведена на Рисунке 3.



Рисунок 3 – Обобщенная блок-схема алгоритма оценивания с переменной структурой.

В четвертой главе предложена методика имитационного моделирования разработанных алгоритмов оптимальной обработки информации, позволяющая произвести сравнительный анализ характеристик разработанных схем комплексирования БНК. На базе предложенной методики разработан программно-математический комплекс имитационного моделирования. В главе приведены структура и описание основных блоков программно-математического обеспечения (ПМО), представлены результаты имитационного моделирования и дан сравнительный анализ работы следующих вариантов построения комплекса: 1) слабосвязанная схема 2) жестко связанная схема, 3) жестко связанная схема с переменной структурой.



Рисунок 4 - Траектории построенные по показаниям эталонной системы (синий цвет) и БИСНС-1ТМ (красный цвет).

В главе приведена методика натурных испытаний БНК на автотранспорте с целью проверки его функционирования и характеристик разработанных алгоритмов в условиях, близких к реальным. На основе этой методики были проведены испытания двух комплексных навигационных систем БИСНС-1ТМ и МБНПК “Трилистник”, в которых реализована предложенная слабосвязанная схема комплексирования. Результаты испытаний БНК БИСНС-1ТМ приведены на Рисунках 4,5. На Рисунке 4 приведена эталонная траектория движения автотранспортного средства (синий цвет) и траектория построенная по показаниям БНК БИСНС-1ТМ (красный цвет). Разница между показаниями систем по широте и долготе не превысила 5 метров.

На Рисунке 5 представлены графики измерения углов крена эталонной системой (красный цвет) и БИСНС-1ТМ (зелёный цвет) для одного из проведенных испытаний на автотранспорте. Разница между показаниями систем не превышает 1 градуса. Таким образом, по результатам натурных испытаний БНК, построенного по слабосвязанной схеме, показано, что ошибки определения параметров ориентации и навигации не превышают значений, определенных в первой главе диссертационной работы (Таблица 1).

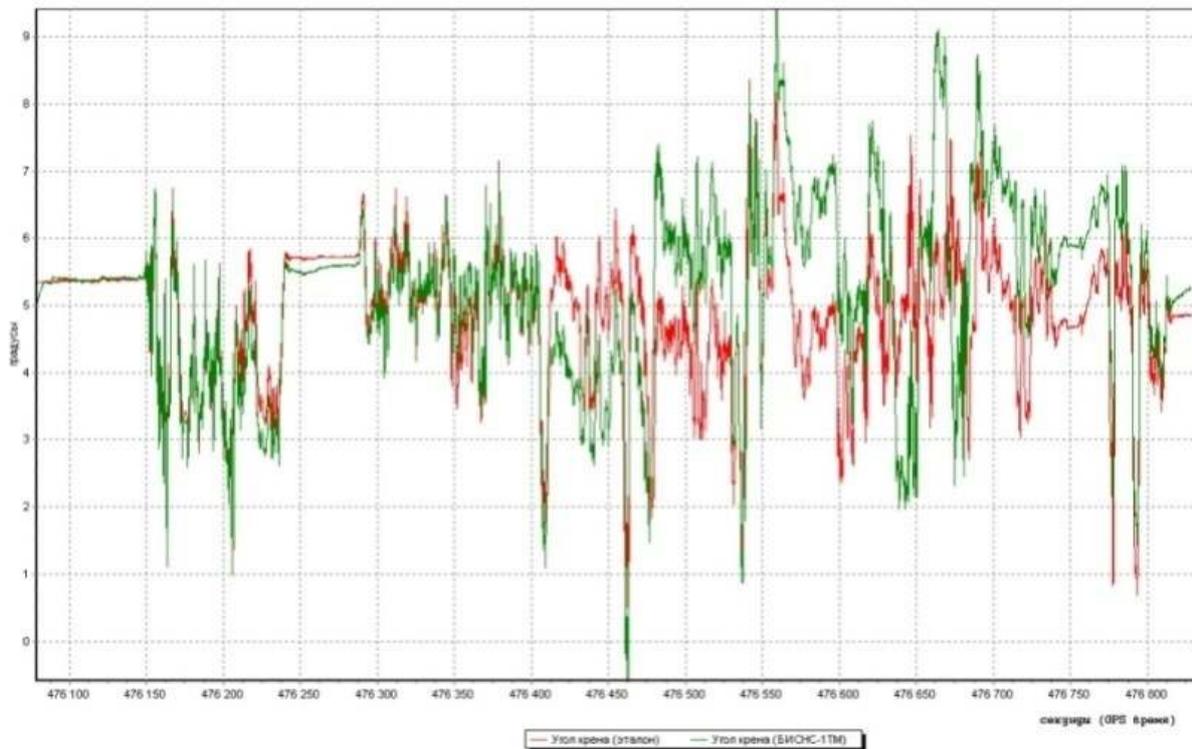


Рисунок 5 – Угол крена по измерениям эталонной системы (красный цвет) и БИСНС-1ТМ (зелёный цвет).

С целью экспериментального подтверждения характеристик БНК на базе слабосвязанной схемы комплексирования была разработана методика лётных испытаний и проведены испытания. Результаты лётных испытаний приводятся в диссертационной работе. Пример результатов лётных испытаний приведен на Рисунках 6,7. На Рисунке 6 приводятся графики траектории движения БПЛА, построенные по показаниям эталонной системы (красный цвет) и БИСНС-1ТМ (синий цвет). При этом БИСНС-1ТМ в процессе полёта через определённые интервалы времени командами переводилась в один из трёх режимов: режим работы БИНС с коррекцией от приемника ГНСС, автономной БИНС и автономной курсовертикали. На Рисунке 7 приводится пример измерения угла крена эталонной системой (синий цвет) и БИСНС-1ТМ (красный цвет). По результатам лётных испытаний разница по параметрам ориентации и навигации между показаниями эталонной системы и БИСНС-1ТМ не превышает допустимых значений, определённых требованиями к БНК.



комплексирования с переменной структурой, имеет более высокие характеристики. На этом основании сформулированы рекомендации по совершенствованию состава и структуры алгоритмов комплексной обработки информации в БНК. В соответствии с этим структуры разработанных бортовых навигационных комплексов нового поколения БИСНС-2Т (Рисунок 8) строятся на базе жёсткосвязанной схемы комплексирования, причем в его последующей модификации БИСНС-3А жёсткосвязанная схема комплексирования имеет переменную структуру.



Рисунок 8 – Блок инерциально-спутниковый БНК БИСНС-2Т.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Предложена концепция построения, структура и алгоритмическое обеспечение БНК, повышающее помехозащищённость комплекса за счёт алгоритмов КОИ переменной структуры путём контроля измерений ГНСС, обнаружения и исключения искажённых сигналов НКА.

2. Разработаны математические модели погрешностей навигационного комплекса, учитывающие стохастическую и волновую структуру ошибок определения псевдодалности и псевдоскорости НКА ГНСС. Получены аналитические соотношения, связывающие ошибки определения углов истинного курса, крена и тангажа с угловыми ошибками БИНС для общего случая движения БПЛА.

3. Разработан оценщик переменной структуры, позволяющий производить оценку вектора состояния системы с учётом стохастического и волнового представления погрешностей определения псевдодалностей и псевдоскоростей ГНСС.

4. Разработаны методики и ПМО:

- имитационного моделирования предложенных алгоритмов комплексной обработки информации с целью анализа их характеристик;
- полунатурных испытаний БНК на специализированном стенде, размещаемом на автотранспорте;
- лётных испытаний для подтверждения работоспособности алгоритмических, программных и аппаратных решений.

5. Получены результаты имитационного моделирования предложенных алгоритмов КОИ, полунатурных и лётных испытаний созданных образцов БНК, подтверждающие соответствие БНК заявленным точностным характеристикам определения параметров ориентации и навигации, а также подтверждающие возможность использования предложенного в работе алгоритма КОИ переменной структуры для обнаружения и исключения отказов с целью повышения помехозащищённости комплекса. При этом показано, что предложенный алгоритм КОИ переменной структуры позволяет одновременно обнаруживать, сопровождать и исключать искаженные сигналы до  $(m - 4)$  НКА ГНСС без дополнительных ограничений на траекторию и погрешности опорного генератора ( $m$  - количество НКА рабочего созвездия ГНСС).

Разработанные методики, алгоритмическое и программное обеспечение внедрены в ОКР ЗАО "Транзас Авиация" «Разработка бесплатформенной инерциально-спутниковой навигационной системы», что позволило значительно уменьшить стоимость как самих ОКР, так и изделий в целом, ускорить выполнение ОКР, уменьшить массогабаритные характеристики изделия при сохранении требуемых точностных характеристик и повышении помехозащищённости БНК при создании новых образцов БИСНС-1Т, БИСНС-1ТМ, БИСНС-2Т. Предложенные методики и ПМО были внедрены также в учебном процессе кафедры «Автоматизированные комплексы систем ориентации и навигации» МАИ (НИУ) в рамках обучения по дисциплинам «Навигационные системы» и «Программное и алгоритмическое обеспечение ПНК».

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

В рецензируемых научных изданиях и журналах, рекомендованных ВАК:

1. Антонов Д.А., Савельев В.М. Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата на подвижном основании [Электронный ресурс] // «Труды МАИ» № 45.– Электрон, текстовые дан. – Москва, 2011. – общ. объем 19 страниц. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25497> – 21.10.2014.

2. Антонов Д.А., Алешин Б.С., Веремеенко К.К., Жарков М.В., Зимин Р.Ю., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Малогабаритный интегрированный навигационно-посадочный комплекс [Электронный ресурс] // «Труды МАИ» № 54.– Электрон, текстовые дан. – Москва, 2012. – общ. объем 20 страниц. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29692> – 21.10.2014.

3. Антонов Д.А., Алешин Б.С., Веремеенко К.К., Жарков М.В. Сильносвязанная многоантенная интегрированная инерциально-спутниковая

навигационная система[Электронный ресурс] // «Труды МАИ» № 54.– Электрон, текстовые дан. – Москва, 2012. – общ. объем 14 страниц. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29823> – 21.10.2014.

Статьи и материалы докладов, опубликованные в других научных изданиях и журналах:

4. Антонов Д.А., Веремеенко К.К., Зимин Р.Ю., Жарков М.В., Чернодубов А.Ю. Интегрированный малогабаритный навигационный модуль для беспилотного летательного аппарата // Тезисы в сборнике материалов 5-й Всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" и 2-й молодежной школы-семинара "Управление и обработка информации в технических системах". – Таганрог: ТТИ ЮФУ. – 2010 г. – С. 246.

5. Антонов Д.А., Веремеенко К.К., Зимин Р.Ю., Жарков М.В., Чернодубов А.Ю. Малогабаритная интегрированная навигационная система // Текст доклада в сборнике пленарных и стендовых докладов «XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам». – Санкт-Петербург, 2010. – С. 188-190.

6. Антонов Д.А., Белобородов О.П., Веремеенко К.К., Зимин Р.Ю., Жарков М.В., Чернодубов А.Ю. Малогабаритная интегрированная система БИНС-1ТМ: структура, алгоритмы, результаты испытаний // «Новости навигации №1». – М: ISSN 2223-0475, 2011. – С. 14-21.

7. Антонов Д.А., Веремеенко К.К., Зимин Р.Ю., Жарков М.В., Чернодубов А.Ю. Интегрированный малогабаритный навигационный модуль для беспилотного летательного аппарата // «Вопросы оборонной техники». – М.: ФГУП "НТЦ "Информтехника", 2011. – 152 стр.

8. Антонов Д.А., Жарков М.В., Зимин Р.Ю., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Малогабаритный интегрированный бортовой навигационно-посадочный комплекс беспилотного летательного аппарата // Тезисы в

сборнике трудов XX международного ежегодного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». – Пенза: ПГУ, 2011. – С. 89-90.

9. Антонов Д.А., Веремеенко К.К., Жарков М.В., Зимин Р.Ю., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Интегрированная система ориентации и навигации БПЛА // «Новости навигации №4». – М: ISSN 2223-0475, 2011. – С. 22-28.

10. Антонов Д.А., Лунев Е.М. Комплекс автоматической посадки беспилотного летательного аппарата // Тезисы в сборнике трудов XX международного ежегодного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». – Пенза: ПГУ, 2011. – С. 91-92.

11. Антонов Д.А., Жарков М.В. Сильносвязанная многоантенная интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система // Тезисы в сборнике трудов XX международного ежегодного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». – Пенза: ПГУ, 2011. – С. 103-104.

12. Антонов Д.А., Веремеенко К.К., Жарков М.В., Зимин Р.Ю., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Small-sized integrated navigation and landing complex of a variable structure // Текст доклада в сборнике трудов международной конференции «19th Saint Petersburg International conference on integrated navigation systems». – Санкт-Петербург, 2012. – С. 279-282.

13. Antonov D.A., Veremeenko K.K., Zharkov M.V., Zimin R.Yu. Experimental Automobile Integrated Navigation Module // «IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine» ISSN0885-8985. – V. 23, I. 12. – 2008. – С. 20-23.

14. Antonov D.A., Veremeenko K.K., Zharkov M.V., Zimin R. Yu., Tchernodoubov A. Yu. Small-Sized Integrated Navigation System // «IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine» ISSN0885-8985. – V. 26, I. 3. – март 2011. – С. 39-41.