

## ЛЕТНАЯ ОТРАБОТКА ГРАВИИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ\*

А. В. Чернодаров<sup>1</sup>, А. П. Патрикеев<sup>2</sup>, О. О. Казьмин<sup>3</sup>

ООО «Экспериментальная мастерская «НаукаСофт», 125167, Москва, Россия,  
4-я улица 8 Марта, 6А, Тел.: +7 (495) 2553635, Факс: +7 (499) 558049, e-mail: chernod@mail.ru

А. В. Хрушев<sup>4</sup>

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Россия,  
ул. 2-я Бауманская, 5, Тел. +7 (916) 6607524, e-mail: alex.gensek@gmail.com

И. В. Овчинников<sup>5</sup>

Филиал АО «Концерн радиостроения «Вега», 197376, Санкт-Петербург, Россия,  
ул. Академика Павлова, 14А, Тел./Факс: +7 (812) 4387654, e-mail: mail@spb.vega.spb.ru

### Аннотация

**Ключевые слова:** инерциальная навигация, спутниковая навигация, гравиметрия, фильтр Калмана

*Рассматриваются особенности построения гравиинерциально-спутниковой навигационной системы (ГИСНС). Реализация ГИСНС опирается на комплексное использование цифровых баз данных об аномалиях гравитационного поля Земли, инерциальных и спутниковых измерений. В качестве ядра в состав ГИСНС включена инерциальная навигационная система БИНС-500НС на базе волоконно-оптических гироскопов. Описывается технология летной отработки ГИСНС. Проведенные исследования подтвердили целесообразность использования цифровых баз данных об аномалиях ускорения силы тяжести в алгоритмах ГИСНС.*

### Анализ гравиинерциально-спутниковой навигационной системы как объекта летной отработки

В настоящее время актуальной остается задача улучшения точностных характеристик автономных систем навигации. Одно из решений данной задачи связано с интеграцией инерциальных (ИНС) и геоинформационных систем, обеспечивающих навигацию по физическим полям Земли [1-4]. В работе [5], рассмотрены современные подходы к комплексированию беспилотных ИНС (БИНС) и геоинформационных систем, функционирующих по полю рельефа.

Однако при небольших градиентах рельефа по маршруту движения такое комплексирование может оказаться неэффективным. В этом случае представляется целесообразным дополнительно использовать информацию о параметрах других физических полей Земли, в частности, информацию об аномалиях ускорения силы тяжести (УСТ) относительно расчетного. Расчетные значения УСТ  $g$  [6, 7] определяются в БИНС как функции текущих географических координат: широты  $\varphi$  и долготы  $\lambda$ , а также высота полета над земным эллипсоидом  $H$ .

$$g = 9.780318 (1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.59 \cdot 10^{-5} \sin^2 2\varphi). \quad (1)$$

На рис. 1 и 2 представлены план и профиль исследуемой траектории полета самолета NG - 4 (см. рис. 5) фирмы ROKO AERO (Чехия), где

$$\Delta\phi_R = [\phi(t) - \phi(t_0)]R; \Delta\lambda_R = [\lambda(t) - \lambda(t_0)]R \cos \phi; R = a (1 - 0.5e^2 \sin^2 \phi); a = 6378245\text{м}; e^2 = 0.0066934.$$

Динамика изменения вертикальной составляющей аномалии УСТ  $\Delta g$  по представленной траектории, полученной из базы данных [6], показана на рис. 3. Интерполяция значений УСТ между узлами выполнена с помощью кубических сплайнов. Из рис. 3 видно, что изменения аномалий УСТ вдоль траектории движения также могут быть незначительными, что затрудняет применение корреляционно-экстремальных методов навигации.

В то же время для повышения точностных характеристик БИНС текущие значения аномалий УСТ  $\Delta\bar{g}$  [6] могут быть использованы при решении основного уравнения инерциальной навигации [7]

$$\dot{\bar{V}} = C^T \bar{a} - 2\bar{\Omega} \times \dot{\bar{V}} - \bar{\omega} \times \bar{V} + \bar{g} + \Delta\bar{g}, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник.

<sup>2</sup> Кандидат технических наук, заместитель генерального директора.

<sup>3</sup> Научный сотрудник.

<sup>4</sup> Инженер.

<sup>5</sup> Начальник отдела.

где  $\vec{V}$  – вектор относительной скорости движения БИНС в проекциях на оси навигационного сопровождающего трехгранника (СТ);  $\vec{a}$  – вектор выходных сигналов акселерометров;  $\vec{g} = \vec{g}_{GP} - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{R})$  – вектор расчетного значения УСТ;  $\vec{g}_{GP}$  – вектор гравитационного ускорения;  $\vec{\Omega}$  – вектор угловой скорости вращения Земли;  $\vec{R}$  – радиус-вектор местоположения БИНС;  $C$  – матрица направляющих косинусов, характеризующая угловую ориентацию связанной с БИНС системы координат относительно географического сопровождающего трехгранника (СТ);  $(\times)$  – оператор векторного произведения.

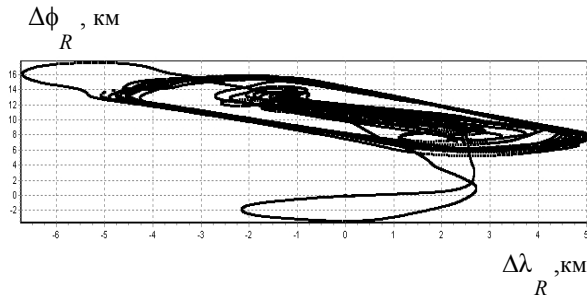


Рис. 1. Траектория полета в плане

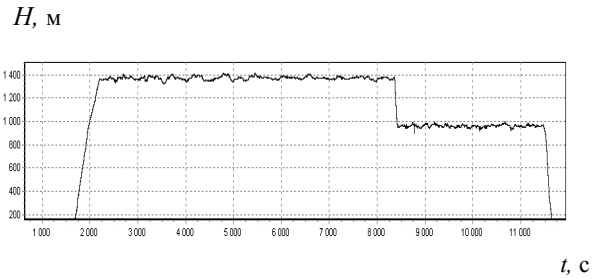


Рис. 2. Профиль полета

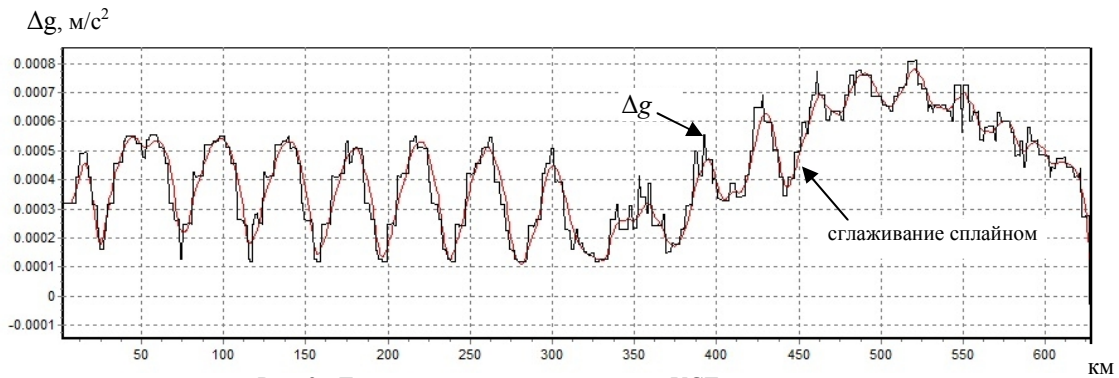


Рис. 3. Динамика изменения аномалий УСТ от расстояния

Реализация предлагаемого подхода к построению навигационной системы летательного аппарата (ЛА) основана на включении в структуру программно-математического обеспечения БИНС модуля памяти с данными о цифровой карте аномалий УСТ (ЦКАУСТ) на маршруте полета. В этом случае значения аномалий УСТ считываются из модуля памяти в функции от текущих координат. Причем текущие координаты могут определяться непрерывно с помощью БИНС и дискретно с помощью спутниковой навигационной системы (СНС). Таким образом, представляется возможным построить замкнутую гравинерциально-спутниковую навигационную систему (ГИСНС). Инерциально-спутниковый режим в такой системе можно рассматривать как резервный, связанный с динамической калибровкой и периодической коррекцией БИНС. Структурная схема ГИСНС представлена на рис. 4, где обозначены:  $Y_{\text{БИНС}}$  – вектор навигационных параметров, считываемых БИНС;  $Y_{\text{СНС}}$  – вектор навигационных параметров, определяемых СНС;  $Z$  – вектор инерциально-спутниковых наблюдений [8] навигационных параметров;  $\hat{x}$  – оценка вектора ошибок БИНС  $x$ ; ОФК – обобщенный фильтр Калмана.

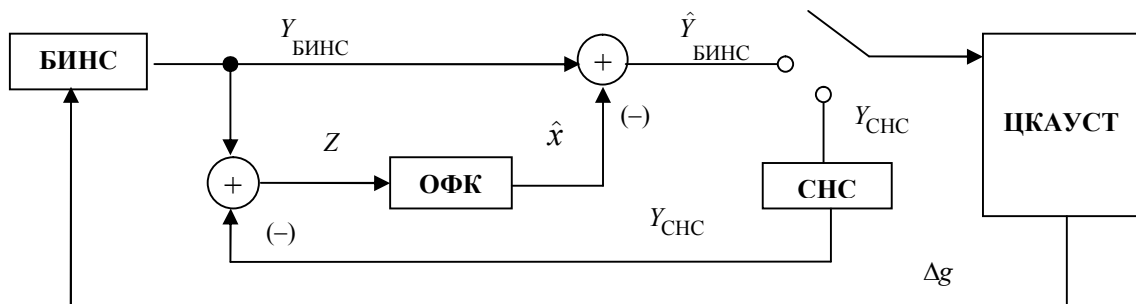


Рис. 4. Структурная схема гравинерциально-спутниковой навигационной системы

В соответствии с рис. 4 в ГИСНС выполняется инерциальное счисление параметров движения ЛА с учетом текущих значений аномалий УСТ  $\Delta g$  [6] и динамических калибровок чувствительных элементов БИНС, полученных путем обработки вектора наблюдений  $Z$ . С другой стороны, компенсируя оценки смещений акселерометров БИНС и используя вертикальный канал СНС, из решения обратной задачи инерциальной навигации представляется возможным определять аномалий УСТ.

Цель работы – исследование возможностей повышения точностных характеристик БИНС на основе использования данных об аномалиях УСТ и компенсации оценок дрейфов чувствительных элементов, определяемых по инерциально-спутниковым наблюдениям в процессе динамической калибровки.

### Анализ результатов исследований

Для проведения летного эксперимента под функции ГИСНС была модернизирована система БИНС-500НС [8] на волоконно-оптических гироскопах (см. рис. 6).



Рис. 5. Самолет NG – 4

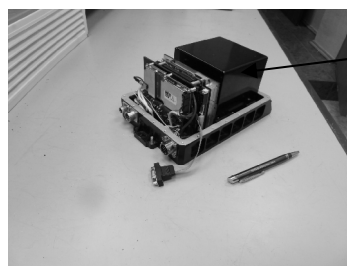


Рис. 6. Система БИНС-500НС

Была реализована следующая циклограмма работы ГИСНС: грубая начальная выставка ( $t = 0 \div 100$ с); точная начальная выставка ( $100 < t < 600$ с); инерциально-спутниковый режим навигации ( $600 < t < 2000$  с), обеспечивающий довыставку БИНС и оценку остаточных дрейфов чувствительных элементов (ЧЭ): гироскопов и акселерометров; режим автономной гравиинерциальной навигации ( $t > 2000$  с) с компенсацией оценок остаточных дрейфов ЧЭ. Частота обновления и регистрации данных для блока ЧЭ (БЧЭ) 1 кГц, для СНС  $\leq 1$ Гц. Некоторые результаты экспериментов представлены на следующих рисунках: рис. 1,2 – параметры траектории полета; рис. 7 - изменение проекции вектора траекторной скорости на ось  $oE$  сопровождающего трехгранника  $oENH$  геодезической системы координат; рис. 8 – угол истинного курса; рис. 9 - оценка остаточного дрейфа ВОГ  $ox$ ; рис. 10 - оценка смещения акселерометра  $ox$ ; рис. 11 - круговая позиционная ошибка оценки местоположения ЛА  $\Delta S$ , соответствующая счислению параметров движения БИНС-500НС без демпфирования оценок остаточных дрейфов ЧЭ и без введения поправок на аномалии УСТ в режиме автономной навигации, где

$$\Delta S = \sqrt{\delta_\phi^2 + \delta_\lambda^2}; \quad \delta_\phi = (\phi_{\text{БИНС}} - \phi_{\text{СНС}})R; \quad \delta_\lambda = (\lambda_{\text{БИНС}} - \lambda_{\text{СНС}})R \cos \phi_{\text{СНС}}.$$

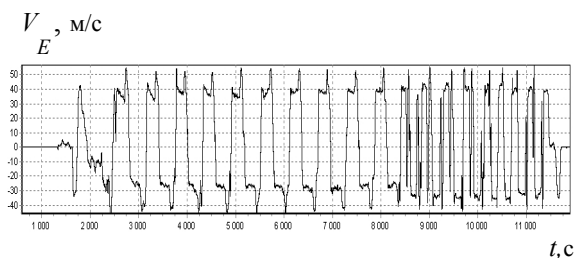


Рис. 7. Динамика изменения скорости  $V_E$

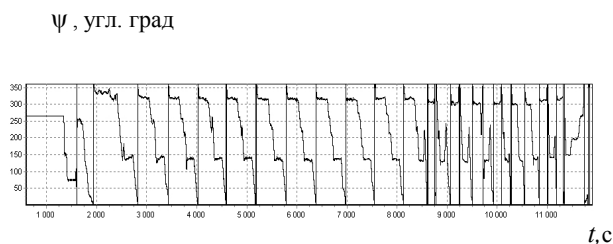


Рис. 8. Угол истинного курса

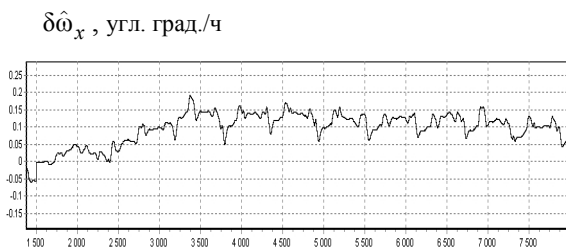


Рис. 9. Оценка остаточного дрейфа ВОГ  $ox$

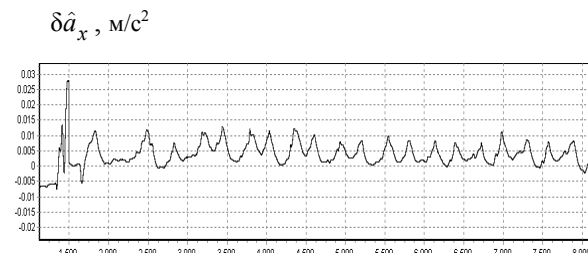


Рис. 10. Оценка смещения акселерометра  $ox$

На рис. 12 показана круговая ошибка  $\Delta S$ , соответствующая гравии-инерциальному счислению параметров полета ЛА с учетом введения поправок на УСТ и компенсации оценок дрейфов ЧЭ, полученных в процессе точной начальной выставки и инерциально-спутниковой довыставки системы БИНС-500НС в полете.

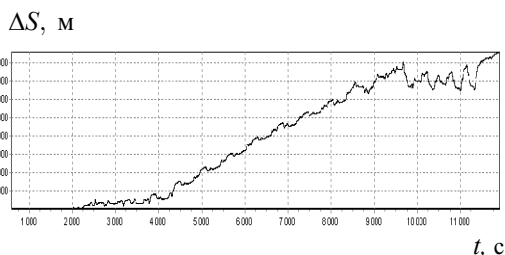


Рис. 11. Круговая позиционная ошибка без компенсации оценок остаточных дрейфов ЧЭ и без введения поправок на аномалии УСТ

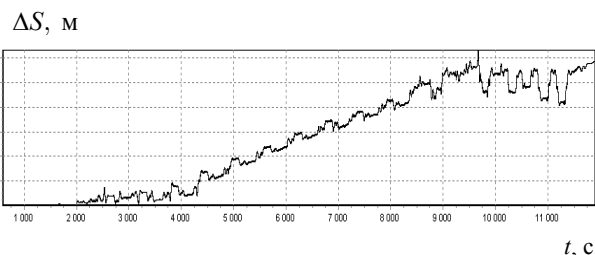


Рис. 12. Круговая позиционная ошибка с учетом компенсации оценок остаточных дрейфов ЧЭ и введения поправок на аномалии УСТ

Можно видеть, что компенсация оценок остаточных дрейфов ЧЭ и введение поправок на аномалии УСТ позволили уменьшить круговую позиционную ошибку ГИСНС в гравииинерциальном режиме между периодами спутниковой коррекции не менее чем в полтора раза.

## Заключение

Анализ результатов летной отработки ГИСНС показал, что периодическое использование спутниковой информации позволяет оценивать и демпфировать оставшиеся после заводской калибровки и начальной выставки погрешности чувствительных элементов БИНС. Точностные характеристики БИНС могут быть также повышены на основе использования в программно-математическом обеспечении (ПМО) следующих модулей: базы данных об аномалиях УСТ; модуля локализации и парирования нарушений на основе адаптивно-робастной обработки наблюдений [9]. Применение таких процедур и модулей позволило поддерживать точностные характеристики бесплатформенной гравии-инерциально-спутниковой навигационной системы на уровне одной мили за час полета.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 14-08-01173а.*

## Литература

1. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Часть 1. Обзор алгоритмов // Гирскопия и навигация. – 2015. - №3. – С. 102-125.
2. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Часть 2. Современные тенденции развития // Гирскопия и навигация. – 2015. - №4. – С. 147-159.
3. Vaman, D. TRN history, trends and the unused potential // 31st Digital Avionics Systems Conference, October 14-18, 2012, pp. 1A3-1 - 1A3-16.
4. Джанджгава, Г.И., Герасимов, Г.И., Августов, Л.И. Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. - № 3 (140). - С. 74-83
5. Сухомлинов, Д.В. Полунатурная отработка программно-математического обеспечения бесплатформенной геоинерциальной навигационной системы / Д.В. Сухомлинов, А.В. Чернодаров, А.П. Патрикеев // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011. - С. 93 - 96.
6. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>.
7. Бабич, О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. - 512с.
8. Чернодаров, А.В. Полунатурная отработка программно-математического обеспечения инерциально-спутниковой навигационной системы БИНС-500 на волоконно-оптических гироскопах / А.В. Чернодаров, А.П. Патрикеев, Ю.Н. Коркишко, В.А.Федоров, С.Е. Переляев // Гирскопия и навигация. – 2010. - № 4. - С. 19–31.
9. Джанджгава, Г.И. Инерциальная навигация и адаптивно-робастная фильтрация / Г.И. Джанджгава, А.В. Чернодаров // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. - № 8. - С. 19 – 29.