

## АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ИНТЕГРИРОВАННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Суворов М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Уральский Федеральный университет имени первого президента России, Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия (6200002, Екатеринбург, ул. Мира, 19), e-mail:mihailsuворov39@mail.ru

---

Один из способов решения задачи навигации – построение интегрированных навигационных систем. Было пояснено, почему выбрано именно такое решение. В статье представлены их основные варианты в современных навигационных системах. Каждый вариант был детально изучен: для него был пояснен принцип его работы; дана характеристика эффективности определения координат навигационных систем, реализующих данную схему; рассмотрены основные достоинства и недостатки. В статье представлен сравнительный анализ с остальными вариантами по таким параметрам, как точность определения координат, структура измерительных приборов, избыточность информации, надежность системы, количество ошибок, энергообеспечение, сложность вычислений. Были приведены примеры их реализации в современных навигационных системах. Также было сказано о некоторых проблемах такой реализации. Сделан вывод о возможном улучшении характеристик БИНС при использовании интегрированных навигационных систем.

---

Ключевые слова: комплексирование, навигационные системы, БПЛА

## ANALYSIS OF THE VARIANTS FOR INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS

Suворov M.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University n.a. the first President of Russia, B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (6200002, Yekaterinburg, street Mira, 19), e-mail:mihailsuворov39@mail.ru

---

One way of solving the problem of navigation is construction of integrated navigation systems. It has been explained, why such a solution has been chosen. The article presents the main variants of modern navigation systems. Each option has been studied in detail: for it was explained principle of its work; the characteristic of the efficiency of determining the coordinates of navigation systems that implement the scheme; the main advantages and disadvantages. The article presents a comparative analysis one with another variant for parameters such as positioning accuracy, measuring instruments structure, data redundancy, system reliability, errors, power supply, and computational complexity. Examples have been given of their implementation in modern navigation systems. It has also has been said about some problem of such implementation. It is concluded that the possible improvement of performance UAV using integrated navigation systems.

---

Keywords: complexation, navigation system, UAV

Развитие информационных технологий, а также в целом технический прогресс позволили вывести тактико-технические возможности подвижных объектов на существенно новый уровень. Большая заслуга в этом принадлежит развитию в области решения задач ориентации и навигации. Системы на борту летательного аппарата (ЛА), решающие эти задачи, объединяются в информационно-управляющие комплексы ориентации и навигации (КОН). В последнее время одной из главных целей является повышение точности и надежности определения параметров ориентации и навигации.

К числу основных систем навигации принадлежат инерциальные системы навигации (ИНС) и спутниковые системы навигации (СНС). Каждая из этих систем имеет свои достоинства и недостатки. Современным ЛА, использующим КОН, не хватает точности, которую могут предоставить ИНС и СНС по отдельности. Выходом из этой ситуации является интегрированная система, в которой ИНС и СНС дополняют друг друга.

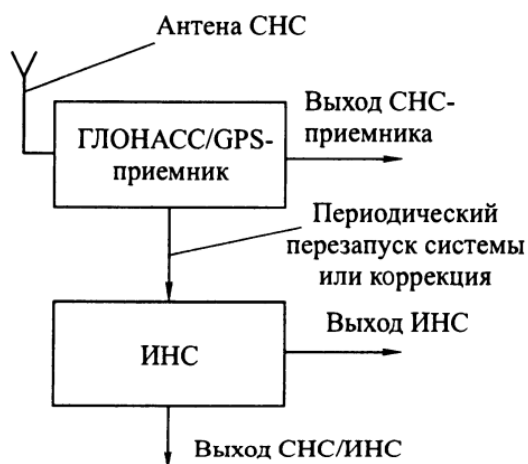
Достоинства их совместного использования хорошо известны [4; 5; 7; 8]. В таких интегрированных системах часто используются бесплатформенные инерциально-навигационные системы ввиду их повышенной надежности, меньшего веса, меньших показателей энергопотребления и т.д. [1].

Работы по интегрированию ИНС и СНС ведутся уже достаточно давно, и в настоящее время сложилось представление о возможности комплексирования в следующих вариантах [6]:

- раздельная схема;
- слабо связанная схема;
- жестко связанная схема;
- глубоко интегрированная схема.

#### **Раздельная схема**

Самый простой вариант совместного использования ИНС и СНС (рис. 1). Принцип работы заключается в периодическом перезапуске алгоритма ИНС с новыми начальными условиями координат и скорости, которые поступают от СНС. Это необходимо, потому что ошибки ИНС увеличиваются со временем. Получается система, обладающая более высокой точностью в вычислении координат, скорости и углов ориентации по сравнению с ИНС и СНС. Изменения в уже существующих КОН для построения такой системы требуются минимальные.



*Рис. 1. Раздельная схема комплексирования СНС и ИНС*

#### **Слабо связанная схема**

ИНС и СНС в слабо связанной схеме работают независимо, но появляется независимый блок, отвечающий за коррекцию данных, полученных от СНС с помощью интегрального фильтра Калмана (рис. 2).



Рис. 2. Слабо связанная схема комплексирования ИНС и СНС

Здесь функциональное разделение систем может сопровождаться физическим разделением: СНС, ИНС и блок вычислителя-корректора оформляются в виде законченных блоков, между которыми организованы соответствующие информационные связи, не требующие высоких скоростей при передаче данных.

В этой схеме СНС использует информацию от ИНС только для целей более надежного восстановления захвата после его потери (связь выходного блока ИНС и ВЧ-приемника). Структура ИНС позволяет скорректировать данные измерительных приборов по априорным данным, полученным, например, в предыдущей итерации. Блок, который соединяет блоки СНС и ИНС, является интегральным блоком Калмана. В его задачи входят получение данных от обеих систем, вычисление разности показаний и на этой основе определение величины ошибки оценки ИНС. После этого данные об ошибке отправляются в ИНС посредством блока компенсации инструментальных ошибок.

В слабо связанной схеме, как и в отдельной, данные вырабатываются независимо у ИНС и СНС. Слабо связанная схема является «каскадной» в силу двух последовательно включенных фильтров Калмана. Плюсом такой схемы является высокая надежность комплексной системы, а минусом – взаимная корреляция ошибок оценок на выходе фильтра

спутникового приемника и их отличие от белых шумов [1]. Существует 3 вида слабо связанных схем: стандартная, «агрессивная», MAGR-схема (Military Airborne GPS Receiver).

### Жестко связанная схема

В такой системе роль ИНС сводится только лишь к определению первичных параметров поступательного и вращательного движений (рис. 3). Поэтому блоки ИНС представляют собой лишь блоки инерциальных измерителей (акселерометры и гироскопы). В СНС фильтр Калмана отсутствует. Измерения с СНС и ИНС идут в общий вычислительный блок, в котором реализован интегральный фильтр Калмана.



Рис. 3. Жестко связанная схема комплексирования ИНС и СНС

По сравнению с разделительными и слабо связанными системами жестко связанные системы более точны, а интегральный фильтр позволяет использовать все доступные спутники. Например, при одной и той же точности ИНС на 20-й минуте автономного полета жестко связанная схема дает в 1,5–2 раза меньшие ошибки определения координат, чем слабо связанная схема. Также они различаются временами потери работоспособности аппаратуры потребителей [там же]. Но из-за того, что становится доступным лишь одно совместное решение, это приводит к потере избыточности системы.

Достоинства таких систем [там же]:

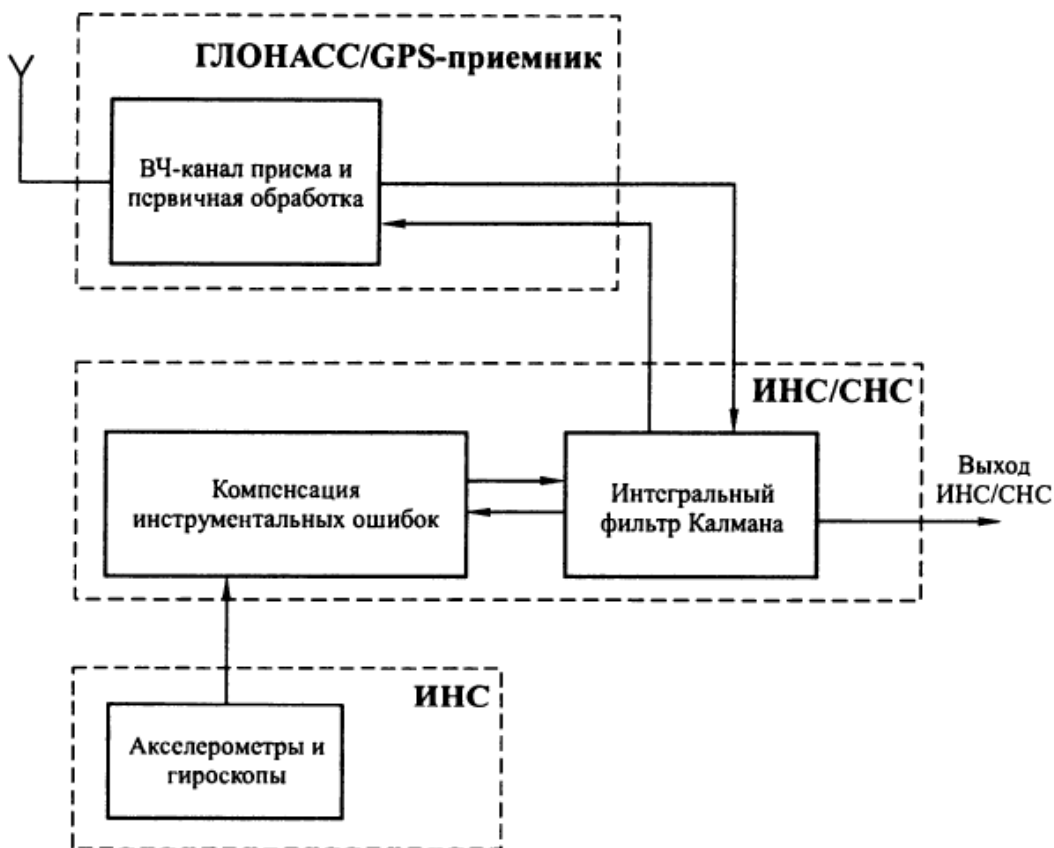
- отсутствие проблемы взаимной корреляции шумов измерений и их отличие от белых шумов;
- отсутствие проблемы синхронизации измерений БИНС и СНС, так как используется один формирователь тактовых частот;
- обнаружение и отбраковка «плохих» измерений псевдодальностей, так как появляется возможность их контроля по предсказанным значениям, формируемым с использованием данных от БИНС.

Недостатки [там же]:

- необходимость разработки специальной аппаратуры потребителя (приемника);
- использование сложных уравнений измерения;
- ухудшение надежности, так как отказ в БИНС приводит к отказу системы в целом.

### Глубоко интегрированная схем

Такие системы более сложные с точки зрения организации их структуры (рис.



4).

Рис. 4. Глубоко интегрированная схема комплексования ИНС и СНС

Все оценки производятся в интегральном фильтре Калмана, а ГЛОНАСС/GPS – приемник еще более упрощается. В интегральном фильтре Калмана вычисляются не только ошибки ИНС, но и оценки псевдодальностей и псевдоскоростей. Такой фильтр должен

обладать двадцатым-сороковым порядком, и для его реализации нужны ЭВМ с большим быстродействием, что затрудняет продвижение таких систем на современный рынок БПЛА.

Достоинства [там же]:

- отсутствие проблемы «каскадного» включения фильтров;
- компактность;
- пониженные требования по энергообеспечению;
- обнаружение и отбраковка «плохих» измерений псевдодальностей, так как появляется возможность их контроля по предсказанным значениям, формируемым с использованием данных от БИНС.

Недостатки [там же]:

- вектор состояния содержит до 40 компонентов, и фильтр трудно реализуем;
- имеется необходимость разработки специальных датчиков.

### **Заключение**

В [2] приведены примеры реализации схем комплексирования в современных навигационных системах, а также даны их качественные и количественные характеристики. Степень интеграции оказывает качественное влияние на показатель целостности: он увеличивается на  $9,90165e^{-009}$  для жестко связанной схемы интегрирования и на  $1,63733e^{-008}$  — для глубоко интегрированной схемы по сравнению с показателем целостности для слабо связанной интеграции. Вероятность ложного отказа увеличивается на  $1,10576e^{-018}$  для жестко связанной схемы, для глубоко интегрированной схемы — на  $e^{-010}$  по сравнению с показателем для слабо связанной схемы интегрирования. Также вероятность необнаруженного отказа уменьшается для сильно связанной схемы на  $-1,07261e^{-008}$ , а для глубоко интегрированной схемы — на  $7,10448e^{-009}$  по сравнению с показателем для слабо связанной схемы интеграции [3].

Последние три схемы получают из фильтра Калмана оценки погрешностей ИНС, которые можно использовать для коррекции датчиков ИНС, следовательно, улучшая работу ИНС в автономном режиме. Таким образом, при комплексировании СНС и БИНС по жестко связанным и слабо связанным схемам или глубоко интегрированной схеме возможно улучшение характеристик автономных БИНС не только по координатам, но и по другим параметрам.

### **Список литературы**

1. Алешин Б.С., Веремеенко К.К., Черноморский А.И. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — С. 273–280.
2. Аникин А.А. Разработка и моделирование систем комплексирования разнородных наблюдений: автореф. дис. ... канд. технич. наук. — Ульяновск, 2006. — С. 40–53.
3. Демьянов А.А., Никитин В.Г. Анализ влияния степени интеграции инерциально-спутниковой системы посадки на целостность с учетом надежности // Аэрокосмические приборы и системы. — М.: 2011. — С. 3–5.
4. Красильщиков М.Н., Серебряков Г.Г. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — С. 263
5. Степанов О.А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Гироскопия и навигация. — 2002. — № 1. — С. 23–46.
6. Фокин Л.А., Щипицын А.Г. Методы пространства состояний в задаче синтеза // Вестник Южно-Уральского государственного университета. — 2006. — № 14. — С. 148–149.
7. Farrell J.A. GPS/INS-Streamlined // Navigation— 2002. — № 4. — P. 171–182.
8. Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. — New-York: John Wiley & Sons, Inc, 2001. — 392 p.

**Рецензенты:**

Поршнеv С.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой радиоэлектроники информационных систем Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;

Иванов В.Э., д.т.н., профессор, зав. кафедрой технологии и средств связи Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.