УДК 629.05 DOI: 10.18698/2308-6033-2019-1-1843

Синтез мультиплатформенных алгоритмов обработки информации в инерциальных навигационных системах низкой точности

© А.Ю. Егорушкин[1], О.С. Салычев[2]

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия;
[2]ООО «ТеКнол», Москва, 117246, Россия

Инерциальные навигационные системы низкой точности — это системы, гироскопы в которых характеризуются значениями дрейфа 5…10 град/ч. В настоящее время такие системы широко распространены вследствие низкой стоимости. Применение низкоточных бесплатформенных инерциальных навигационных систем для определения углов ориентации в автономном режиме (без коррекции от внешнего источника информации) принципиально ограничено по причине растущих во времени ошибок. Для повышения точности определения углов ориентации низкоточной бесплатформенной инерциальной навигационной системы в режиме курсовертикали разработан метод обработки навигационной информации, использующий мультиплатформенный подход к построению навигационного алгоритма и формированию выходных сигналов системы. Синтез такого алгоритма и его применение позволяет существенно снизить значения ошибок ориентации курсовертикали. Реализация предлагаемого метода рассматривается на конкретном примере для курсовертикали, установленной на вертолете.

Ключевые слова: *инерциальная навигационная система* (*ИНС*)*, курсовертикаль, спутниковая навигационная система* (*СНС*)*, фильтр Калмана, мультиплатформенный навигационный алгоритм, мастер-фильтр*

Введение. Существуют два варианта использования низкоточных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС):

1) построение на ее основе курсовертикали;

2) интеграция с приемником спутниковой навигационной системы (СНС).

В первом случае навигационное решение представляет собой традиционный (шулеровский) навигационный алгоритм [1–4] с использованием радиальной коррекции для горизонтальных каналов и внешнего магнитометра для коррекции азимута [2, 4, 5]. Во втором — получение автономного (при отсутствии информации СНС) навигационного решения возможно в течение непродолжительного времени (5–10 мин), по прошествии которого ошибка определения параметров ориентации становится слишком большой. Этот случай подробно рассмотрен в работах [4, 6–9].

Остановимся подробнее на первом варианте. Традиционным методом построения курсовертикали является применение навигационного алгоритма, основанного на коррекции углового положения расчетной платформы относительно плоскости горизонта по сигналам,

пропорциональным интегралу от измеряемых горизонтальных ускорений. Для участков траектории, на которых отсутствуют составляющие горизонтального ускорения, предусмотрена радиальная коррекция, величина которой пропорциональна сигналам горизонтальных ускорений, измеренных акселерометрами. Для азимутального канала применяется коррекция от внешнего магнитометра. В случае использования БИНС с низкоточными инерциальными датчиками ошибка определения углов ориентации в режиме интегральной коррекции стремительно увеличивается, и система становится неработоспособной.

Цель данной работы — создание алгоритма курсовертикали, построенной на основе низкоточной БИНС. Ошибки определения углов ориентации при работе этого алгоритма должны быть значительно меньше, чем при использовании традиционного алгоритма.

Мультиплатформенный навигационный алгоритм. Рассмотрим построение курсовертикали на базе низкоточной БИНС. Для получения навигационного решения проведем синтез мультиплатформенного (многоплатформенного) алгоритма [1].

Под мультиплатформенностью подразумеваем параллельный расчет нескольких навигационных решений («расчетных платформ») с различными алгоритмами и их суперпозицию для генерации выходного навигационного решения. Разработана функциональная схема создания мультиплатформенного алгоритма курсовертикали на базе двух расчетных платформ (рис. 1).

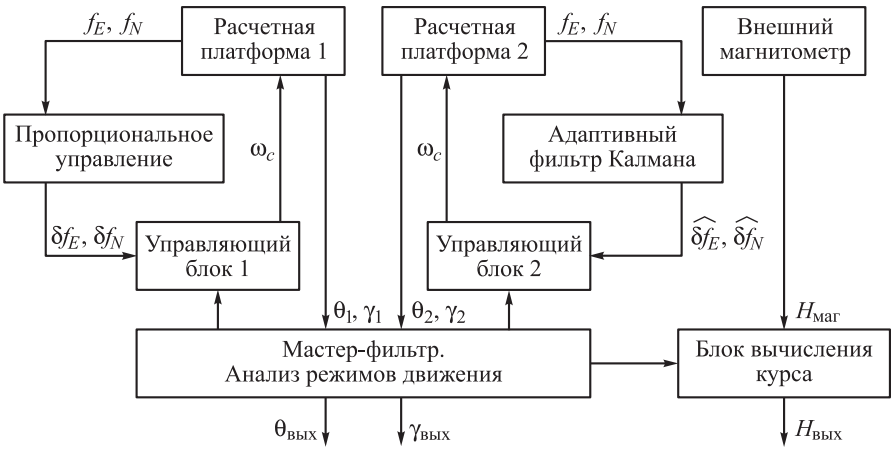


Рис. 1. Функциональная схема курсовертикали с использованием мультиплатформенного алгоритма

Для первой расчетной платформы воспользуемся законом пропорционального управления с относительно большими коэффициентами демпфирования, т. е. с фактически «жесткой» радиальной коррекцией, которая в обратной связи вводится в навигационный

алгоритм. Использование относительно больших коэффициентов демпфирования гарантирует малое значение низкочастотной составляющей ошибки углов ориентации. Важно иметь в виду, что радиальная коррекция для курсовертикали должна функционировать с учетом параметров движения транспортного средства, а именно, обязательно выключаться при его маневрах, что означает уменьшение значений коэффициентов демпфирования (эта задача решается блоком мастер-фильтра). Навигационное решение этой расчетной платформы используется для формирования низкочастотной составляющей выходных сигналов углов ориентации.

Во второй расчетной платформе используется алгоритм адаптивного фильтра Калмана. Полученные оценки ускорений применяются для вычисления параметров демпфирования расчетной платформы, они поступают в цепи обратной связи в навигационный алгоритм. Коэффициенты демпфирования в этом случае сравнительно невелики, что позволяет корректно определить составляющие выходного сигнала углов ориентации в области высоких частот.

На основе траекторных данных и получаемых значений параметров ориентации и навигации мастер-фильтр проводит анализ параметров движения, согласно которому формирует значения коэффициентов демпфирования для каждой из расчетных платформ, объединяет их индивидуальные навигационные решения и выдает окончательные расчетные значения углов крена и тангажа.

Принципиальное отличие предлагаемого подхода к построению алгоритма курсовертикали от традиционных алгоритмов заключается в гибком подборе параметров управления индивидуальными расчетными платформами и комбинации получаемых навигационных решений с учетом параметров движения объекта.

Азимутальный канал предлагаемого мультиплатформенного алгоритма курсовертикали работает аналогично рассмотренным горизонтальным каналам. Определение угла курса проводится с использованием показаний внешнего магнитометра и результатов вычисления расчетных платформ по показаниям инерциальных датчиков. При этом высокочастотная часть навигационного решения формируется на основе показаний инерциальных датчиков, а низкочастотная — по показаниям магнитометра. В случае когда объект совершает быстрый маневр, для расчета параметров ориентации применяются только данные инерциальных датчиков, а значения коэффициентов демпфирования, полученные по показаниям магнитометра, существенно уменьшаются.

Проиллюстрируем работу такого мультиплатформенного алгоритма нахождения углов ориентации на примере обработки показаний курсовертикали «КомпаНав-4» производства компании «ТеКнол» (рис. 2) [10].



Рис. 2. Курсовертикаль «КompaНав-4»

Спецификация системы «КompaНав-4» приведена ниже:

Масса, кг	1,8
Габариты, мм	110 × 110 × 100
Напряжение питания, В	10–30
Дрейф датчика угловой скорости (1σ), град/ч	5–7
Смещение нуля акселерометров (1σ), м/с^2	0,01–0,03
Время готовности, с	60
Интерфейс	RS232, RS422
Крен, тангаж (динамическая точность), град	0,3
Курс (динамическая точность), град	1,5

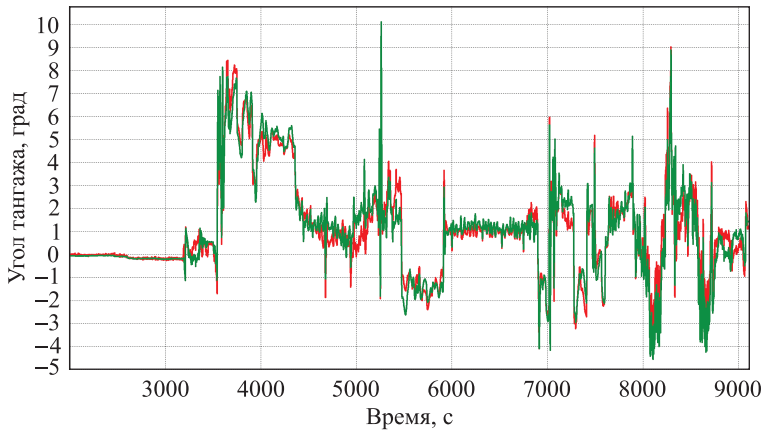


Рис. 3. Значения угла тангажа в автономном режиме:
— эталонная ИНС; — курсовертикаль «КompaНав-4»

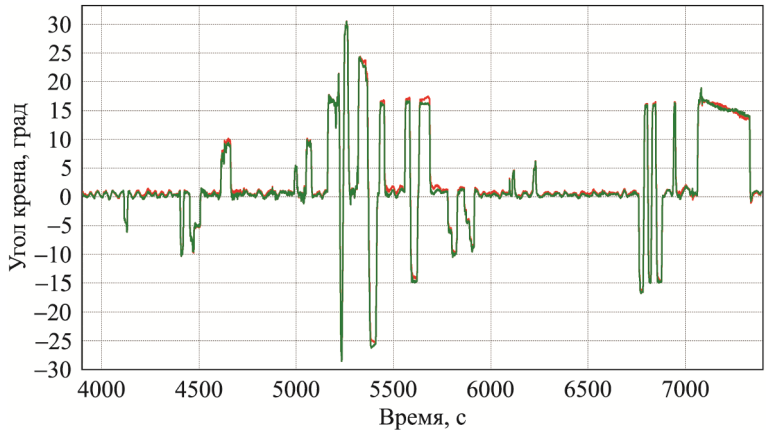


Рис. 4. Значения угла крена в автономном режиме:
— эталонная ИНС; — курсовертикаль «КомпаНав-4»

По результатам работы мультиплатформенного алгоритма для системы, установленной на вертолете, совершающем высокоманевренное движение, получены реальные данные (рис. 3, 4). На представленных диаграммах наряду со значениями углов ориентации, вычисляемых курсовертикалью «КомпаНав-4» в автономном режиме, приведены показания эталонной системы ориентации.

В качестве эталонной системы использовали ИНС среднего класса точности на волоконно-оптических гироскопах БИНС-ТЭК-С2. Точность определения углов крена и тангажа эталонной БИНС была на порядок выше, чем у рассматриваемой, и составляла 0,03 град/ч.

Заключение. Предлагаемый метод построения алгоритмов обработки навигационной информации позволяет существенно повысить точность определения углов ориентации БИНС низкого класса точности при использовании ее в качестве курсовертикали. Метод основан на использовании нескольких вычислительных инерциальных платформ и комбинации получаемых навигационных решений с учетом параметров движения объекта. Это дает возможность повысить точность вычисления углов ориентации в процессе автономной работы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Salychev O.S. *MEMS-based Inertial Navigation: Expectations and Reality*. Moscow, BMSTU Press, 2012, 208 p.

[2] Salychev O.S. *Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions*. Moscow, BMSTU Press, 2004, 304 p.

[3] Питтман Д., ред. *Инерциальные системы управления*. Москва, Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1964, 453 с.

[4] Titterton D.H., Weston J.L. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd ed. UK Stevenage, The Institution of Electrical Engineers, 2004, 581 p.

[5] Матвеев В.В. *Инерциальные навигационные системы*. Тула, Изд-во ТулГУ, 2012, 199 с.

[6] Власов И.Б. *Глобальные спутниковые системы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 182 с.

[7] Groves P.D. *Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Norwood, Artech House, 2013, 800 p.

[8] Фридлендер Г.О. *Инерциальные системы навигации*. Москва, Физматгиз, 1961, 153 с.

[9] Матвеев В.В., Распопов В.Я. *Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем*. Санкт-Петербург, ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009, 280 с.

[10] Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е. и др. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов. *Гироскопия и навигация*, 2014, № 1 (84), с. 14–25.

Статья поступила в редакцию 07.11.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Егорушкин А.Ю., Салычев О.С. Синтез мультиплатформенных алгоритмов обработки информации в инерциальных навигационных системах низкой точности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 1.

http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-1-1843

Егорушкин Алексей Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборы и системы ориентации стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научно-исследовательских работ в области систем инерциальной навигации. e-mail: mostinertial@gmail.com

Салычев Олег Степанович — д-р техн. наук, главный конструктор ООО «ТеКнол». Автор монографий и научных работ в области инерциальной навигации и обработки информации. e-mail: salychev@teknol.ru

Creation of multiplatform data processing algorithms in low cost inertial navigation systems

© A.Yu. Egorushkin[1], O.S. Salychev[2]

[1]Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russia
[2]"TeKnol", Ltd., Moscow, 117246, Russia

Low cost inertial navigation systems (INS) are systems in which gyroscopes are characterized by drift values of 5...10 degrees per hour. Currently, such systems are widely distributed due to their low cost and availability in the market. The use of low cost strapdown inertial navigation systems (SINS) for determining orientation angles in the autonomous mode (without correction from an external source of information) is fundamentally limited due to errors that grow with time. To improve the accuracy of determining the orientation angles of low-current SINS in the AHRS mode, a method for processing navigation information is proposed using a multiplatform approach to constructing a navigation algorithm and generating system output signals. The synthesis of such an algorithm and its application can significantly reduce the magnitude of errors in the orientation of the cursor. The implementation of the proposed method is considered on a specific example for a cursor mounted on a helicopter.

Keywords: *inertial navigation system (INS), gyroscope, accelerometer, global navigation satellite system (GNSS), attitude and heading reference system (AHRS), Kalman filter, masterfilter*

References

[1] Salychev O.S. *MEMS-based Inertial Navigation: Expectations and Reality*. Moscow, BMSTU Press, 2012, 208 p.
[2] Salychev O.S. *Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions*. Moscow, BMSTU Press, 2004, 304 p.
[3] Pittman D., ed. *Inersialnye systemy upravleniya* [Inertial control systems]. Moscow, Voenizdat Publ. of the Ministry of Defence of the USSR, 1964, 453 p. [in Russ.].
[4] Titterton D.H., Weston J.L. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd ed. UK Stevenage, The Institution of Electrical Engineers, 2004, 581 p
[5] Matveev V.V. *Inertsialnye navigatsiony systemy* [Inertial navigation systems]. Tula. TulGU, Publ., 2012, 199 p.
[6] Vlasov I.B. *Globalnie sputnikovye systemy* [Global sputnik systems]. Moscow, BMSTU Press, 2008, 182 p.
[7] Groves P.D. *Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Norwood, Artech House, 2013, 800 p.
[8] Fridlender G.O. *Inertsialnye systemy navigatsii* [Inertial Navigation Systems]. Moscow. Fizmatgiz, 1961, 153 p. [in Russ.].
[9] Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsialnykh navigatsionnykh system* [Fundamentals of Strapdown Inertial Navigation System Design]. St. Petersburg, GNTs RF JSC "Contsern TsNII "Elektropribor" Publ., 2009, 280 p.
[10] Korkishko Ju.N., Fedorov V.A., Prilutsky V.E. et al. *Journal "Giroskopiya i Navigatsiya"*, 2014, no. 1 (84), pp. 14–25.

Egorushkin A.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Instruments and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation, Bauman Moscow State Technical University. The author of a number of scientific and research works in the field of inertial navigation. e-mail: mostinertial@gmail.com

Salychev O.S., Dr. Sc. (Eng.), Professor, general designer of the "TeKnol" Company, Ltd. The author of a number of scientific and research works in the field of inertial navigation and optimal filtration. e-mail: salychev@teknol.ru