

# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ GPS/IMU\*

Е.М. Медведев («ГеоЛИДАР»)

В 1986 г. окончил МЭИ. С 1986 по 1997 г. работал инженером, старшим инженером, ведущим инженером, начальником сектора ГосНИИ Авиационных систем. С 1997 по 2002 г. — руководитель группы дистанционного зондирования, руководитель группы научно-исследовательских работ ЗАО «Оптэн Лимитед». С 2002 г. работает в Компании «Геокосмос» директором по научной работе. С июля 2005 г. — генеральный директор компании «ГеоЛИДАР». Кандидат технических наук.

В настоящей серии публикаций уже неоднократно подчеркивалось, что навигационные решения надлежащего качества могут быть получены именно в результате взаимодействия или последующей совместной обработки данных от основных источников — системы спутникового геопозиционирования (GPS, ГЛОНАСС) и инерциальной системы. Можно сказать, что эти системы решают одну и ту же навигационную задачу — определяют в некоторой системе координат траекторию движения носителя. Принципиально новое качество данных, прежде всего точность, рождается в результате совместного анализа обеих траекторий, в результате чего интегральное навигационное решение заимствует основные преимущества и подавляет основные недостатки базовых систем. Интегральное навигационное решение оказывается свободным как от дрейфа (благодаря наличию GPS и/или ГЛОНАСС), так и от высокочастотных помех (благодаря наличию инерциальной системы).

Было бы весьма полезно обсудить основные принципы современной инерциальной навигации, которые, как уже неоднократно подчеркивалось, в основном реализованы в интегральных навигационных комплексах типа GPS/IMU. Предполагается, что с вопросами использования систем спутниковой навигации

читатели хорошо знакомы.

В общей форме инерциальную систему можно определить как ортогональную *триаду гироскопов и акселерометров*, выполняющих непосредственные геопространственные измерения, и вычислительный блок, осуществляющий алгоритмические преобразования данных непосредственных измерений.

Как было отмечено в первой части данной серии публикаций (см. *Геопрофи*. — 2005. — № 3. — С. 39–40), в современных комплексах GPS/IMU используются в основном не механические, а кольцевые лазерные или волоконно-оптические гироскопы, имеющие существенно отличный принцип действия. Однако для целей данной публикации будет достаточно считать, что гироскоп любого типа позволяет определять ориентацию в геодезическом пространстве в любой момент времени независимо от местоположения, скорости и других параметров носителя. Точность поставляемых гироскопом данных во всех случаях подвержена деградации («ухода») с течением времени. Величина «ухода» значительна и может составлять до нескольких градусов в час.

Акселерометры предназначены для измерения линейных ускорений. В равной степени они пригодны для измерения сил, так как, согласно ньютоновской механике, сила и ускорение яв-

ляются разными проявлениями одного и того же физического явления.

С учетом сделанных замечаний рассмотрим основные процедуры, выполняемые в навигационном комплексе на базисном информационном уровне.

## ▼ Вычисление крена и тангажа посредством акселерометров

Обладая чувствительностью к земной гравитации, акселерометры обеспечивают измерение долговременных значений крена и тангажа по схеме, изображенной на рис. 1. Рассмотрим акселерометр, рабочая ось которого совпадает со строительной осью носителя  $Ox$ .

Полагая ускорение носителя равным нулю, можно вычислить угол тангажа:

$$P = \arcsin(-a_s/g).$$

Аналогично вычисляется и угол крена. Таким образом, два из трех углов, определяющих угловую ориентацию, могут быть

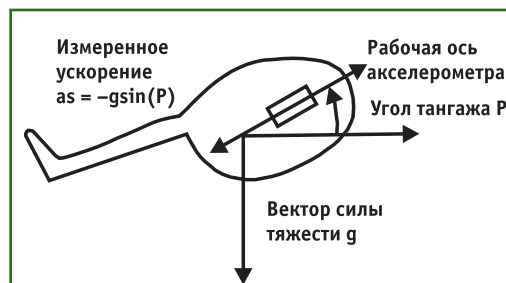
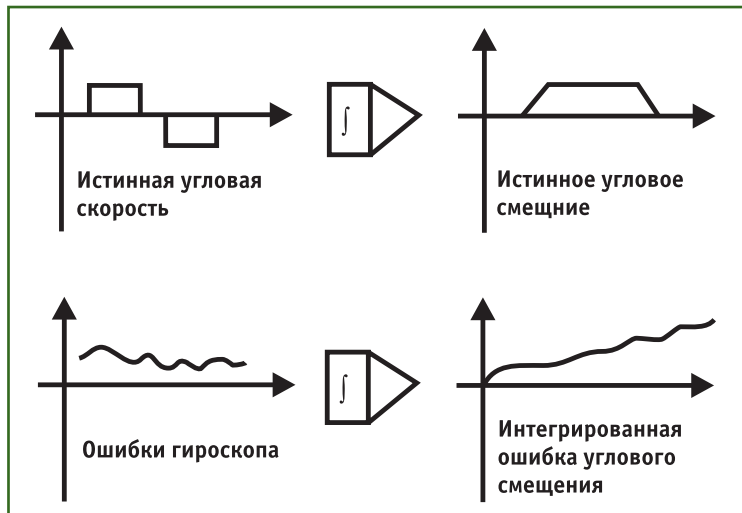


Рис. 1  
Схема измерения величин крена и тангажа посредством акселерометров

\* Окончание. Начало в № 3–5-2005.



**Рис. 2**  
Схема определения углового смещения

определены только за счет использования акселерометров. Это очевидный результат, принимая во внимание то обстоятельство, что углы крена и тангажа изначально определены по отношению к вертикали, которая в данном случае соответствует вектору тяжести. Однако следует признать, что описанный метод не может быть использован на практике самостоятельно.

В описанной схеме существенно состояние покоя, в котором должна находиться система. Если это условие не соблюдается, то совершенно очевидно, что *отсутствует принципиальная возможность* выделить вектор ускорения свободного падения из суммы всех ускорений, которую испытывает система.

▼ **Вычисление изменений ориентации с использованием гироскопов**

Как отмечено выше, в конструкции навигационного комплекса используются оптические гироскопы, обладающие чувствительностью к изменениям ориентации, т. е. к величине угловой скорости. Интегрирование (численное суммирование) значений, измеренных гироскопами, обеспечивает определение кратковременных угловых перемещений в физическом пространстве.

Необходимо отметить, что угловые перемещения в геодезическом (например, WGS-84) и физическом пространствах не тождественны. Для корректного перехода к геодезическому пространству должны быть учтены следующие факторы:

- вращение Земли с угловой скоростью 15°/ч.
- транспортная норма, определяемая как изменение ориентации в физическом пространстве при движении. Скорость такого изменения равна  $V_n/R$ , где  $V_n$  — горизонтальная составляющая вектора скорости, а  $R$  — радиус Земли.
- внутренние ошибки гироскопа (дрейф, ошибка масштабного коэффициента, случайный шум).

Что касается двух первых упомянутых факторов, то они могут быть учтены аналитическими методами при вычислении интегрального навигационного решения. Однако внутренние ошибки гироскопа полностью смешаны с истинными значениями и не могут быть отделены от них на базисном информационном уровне. В процессе дальнейшей обработки эта смесь подвергается интегрированию, в результате чего возникает ошибочное угловое смещение, которое, таким образом, приобретает долговременный характер

(рис. 2). Точная оценка величины ошибочного углового смещения и его устранение осуществляется при генерации навигационного решения на последующем навигационном уровне.

▼ **Вычисление курсового угла**

Метод измерения величины курсового угла, используемый в комплексах GPS/IMU, также можно считать классическим.

Курсовой угол в процессе инициализации определяется путем наблюдения компонентов вектора вращения Земли по «горизонтальным» гироскопам. Данные «вертикального» гироскопа в процессе съемки интегрируются по времени для определения изменений курсового угла.

▼ **Определение координат пространственного положения с помощью акселерометров**

Наличие акселерометров позволяет определять величины линейных ускорений, которые испытывает система. Положим, что ориентация системы в физическом пространстве точно определена с помощью методов, описанных выше. Тогда имеется возможность выделить вектор силы гравитации среди суммы векторов сил, приложенных к системе и, следовательно, оценить величину ускорения. Численное интегрирование ускорения позволяет перейти к скорости, а повторное — интегрирование к перемещению. Таким образом, с учетом представленных выше замечаний и правил перехода из физического пространства в географическое, появляется принципиальная возможность оценить геодезические координаты системы в любой момент времени.

▼ **Принципы образования интегрального навигационного решения**

Из представленного выше краткого описания основных принципов инерциальной навигации видно, что использование

только триад гироскопов и акселерометров в принципе позволяет решить все основные навигационные задачи. В реальных комплексах GPS/IMU используется детальная модель динамики системы, которая включает набор алгоритмов решения уравнений движения Ньютона в геоцентрической системе координат, а также параметрическую модель ошибки IMU, которая описывает:

- ошибки инерциального измерения позиции, скорости и ориентации;
- дрейф гироскопа и ошибки масштабного коэффициента;
- дрейф акселерометра и ошибки масштабного коэффициента и др.

Создание модели динамики системы весьма нетривиальная задача. Исследованиям по этому направлению компании уделяют большое внимание.

Принципиально важно, что ошибки IMU описываются системой алгебраических и дифференциальных уравнений с конечным числом параметров. Т. е. считается, что поведение системы было бы полностью определено используемыми уравнениями движения, если бы были известны точные значения этих численных параметров. Проблема состоит как раз в том, что численные значения этих параметров неизвестны априорно и, кроме того, они могут меняться с течением времени. Общее количество таких параметров может достигать нескольких десятков.

Главная идея методики работы комплексов GPS/IMU состоит в том, что значения неизвестных параметров могут быть определены путем решения системы уравнений, составляющих модель динамики системы, исключительно благодаря наличию GPS, выступающего в качестве независимого источника данных. Иными словами наличие некомпенсированных ошибок IMU приведет к появлению расхождений траекторий движения системы, исчисленных

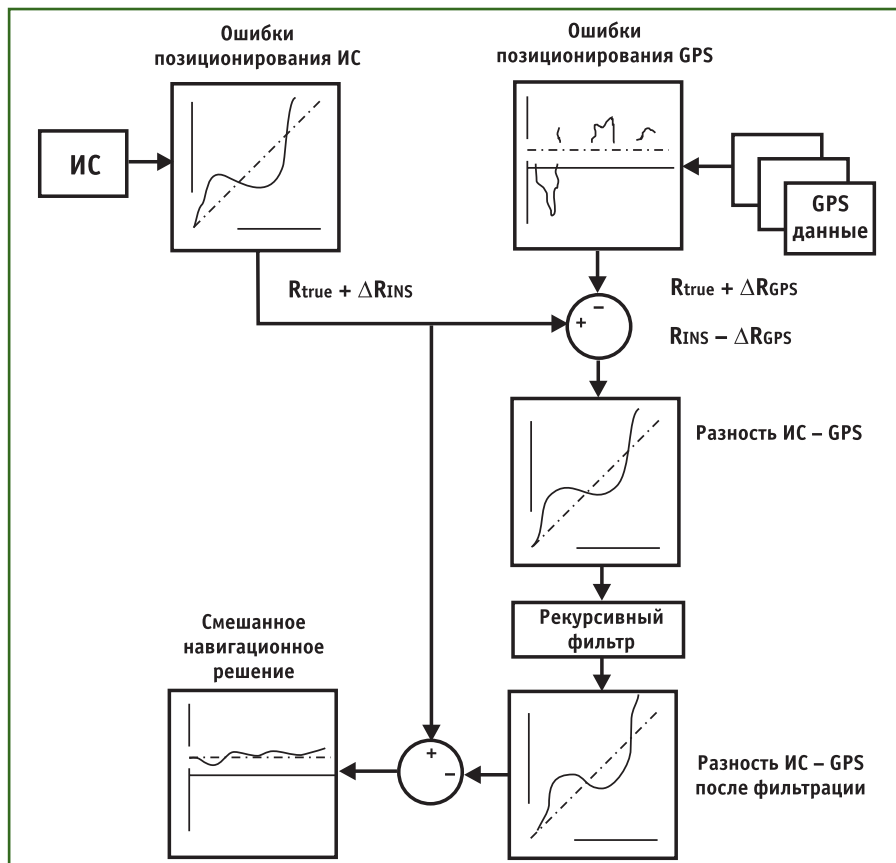


Рис. 3

Схема образования интегрального навигационного решения в режиме реального времени за счет совместной обработки данных GPS и IMU

раздельно по данным GPS и IMU. Для получения корректного интегрального навигационного решения подбираются такие значения параметров модели динамики системы, при которых обе траектории будут тождественны. Это достигается описанным ниже способом.

#### ▼ Совместный анализ данных GPS и инерциальной системы

Инерциальная система и GPS являются взаимно дополняющими источниками навигационных данных, потому что их динамические ошибки, имея различную природу и спектральный состав, могут быть разделены, в результате чего погрешности обеих систем могут быть взаимно компенсированы. Более того, инерциальная система обеспечивает поддержку навигационного решения даже в случае полной потери GPS-сигнала. Смешанное

решение является непрерывным и, следовательно, сохраняет целостность данных (рис. 3).

Интегральное навигационное решение может быть получено как в режиме реального времени, так и в процессе наземной постобработки. В любом случае, в ходе обработки программное обеспечение моделирует работу бортовой инерциальной системы в рамках замкнутого контура обмена данными с GPS, фильтром Калмана, а также с контроллером ошибки IMU.

По сравнению с режимом построения навигационного решения реального времени, обработка навигационных данных в камеральных условиях позволяет добиться существенно лучших результатов по точности. Программное обеспечение включает рекурсивный алгоритм сглаживания, который обеспечивает получение «траектории наибольшей достоверности». Эта

траектория является наилучшей для уровня точности данных, получаемых с помощью GPS и инерциальной системы.

В заключение данной серии публикаций хотелось бы еще раз повторить те факторы, которые, по мнению автора, определили успех применения интегральных навигационных комплексов во многих системах аэрофототопографии и авиационного дистанционного зондирования.

1) Возможность одновременного решения задач навигации и прямого геопозиционирования данных съемки.

2) Точность, достаточная для решения большинства задач по крупномасштабному топографическому картированию.

3) Получение навигационного решения как в процессе наземной постобработки, так и в режиме реального времени.

4) Сравнительная простота реализации.

5) И, наконец, экономическая целесообразность.

Справедливости ради необходимо отметить, что начало активного применения в аэросъемке

систем прямого геопозиционирования типа GPS/IMU по-прежнему вызывает активные дискуссии, главными вопросами которых являются:

1) Всегда ли достаточно заявляемая производителем паспортная точность для решения тех или иных задач?

2) Всегда ли реальная точность соответствует паспортной?

3) Как соотносятся методы прямого геопозиционирования и традиционные фотограмметрические методы?

Отметим также, что в настоящее время появились целые классы аэросъемочных средств, работа которых невозможна без использования систем прямого геопозиционирования типа GPS/IMU. К таким приборам относятся аэросъемочные лидары (Optech ALTM 3100, IGI LiteMapper, TopEye и др.), а также линейные фотографические сканеры (Leica ADS-40, Jena-Optronik JAS-150 и др.). А практически все остальные современные средства авиационного дистанционного зондирования

цифровые и аналоговые аэрофотоаппараты, радиолокаторы, спектрально-аналоговые и тепловизионные сканеры используют системы прямого геопозиционирования в качестве опции. Иными словами, главный вывод, который может быть сделан, состоит в том, что, во-первых, никакой дальнейший прогресс в аэрогеодезии, дистанционном зондировании и в смежных отраслях без активного применения комплексов GPS/IMU невозможен. И, во-вторых, наиболее перспективным направлением в этой области является комбинирование методов прямого геопозиционирования и традиционных фотограмметрических методов.

**RESUME**

This is a completing paper of the series devoted to the integral navigation systems operating based on both the global navigation satellite systems (GPS/GLONASS) and the inertial systems. Algorithms for the integral navigation based on the satellite and inertial data are described. The main applications of the integral navigation systems are given.

# ГЕОЛИДАР

ЯВЛЯЕТСЯ ПОСТАВЩИКОМ АЭРОСЪЕМОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ



Авторизованным дистрибьютором аэросъемочных систем лазерного картографирования Optech Inc.



Авторизованным дистрибьютором цифровых аэрофотокамер производства «Rollei Fototechnic GmbH»



Авторизованным дистрибьютором систем прямого геопозиционирования и ориентации POS производства «Applanix Corp.»

115035, Россия, Москва Софийская наб., д. 30, стр. 3  
Тел.: +7 (095) 953-01-00 Факс: +7 (095) 953-04-70  
E-mail: info@geolidar.ru http://www.geolidar.ru