

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ И ИХ РОЛЬ В ПОДВИЖНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЪЕМОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Г.А. Шануров (МИИГАиК)

В 1971 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономогеодезия». После окончания института работал в отделе инженерных изысканий в/ч 33859. С 1975 г. работает в МИИГАиК, в настоящее время — профессор кафедры высшей геодезии. Доктор технических наук. Член Международной ассоциации геодезии (IAG).

А.Д. Манилова (МИИГАиК)

В 2002 г. окончила геодезический факультет Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) по специальности «астрономогеодезия». После окончания университета работала в ЗАО «ПРИН», с 2004 г. — в ЗАО ПО «ГЕОКОМ» филиал № 1. С 2012 г. по настоящее время — аспирант кафедры высшей геодезии МИИГАиК.

Теория инерциальных навигационных систем (ИНС) (Inertial Navigational System (INS) или Inertial Measurement Unit (IMU). — *Прим. ред.*) появилась в начале XX века. Естественной системой координат для ИНС является инерциальная система координат. В инерциальной системе координат справедливы законы Ньютона. Существенным признаком инерциальной системы координат является то, что она не испытывает ускорений, т. е. не вращается, а вектор скорости ее перемещения с течением времени не изменяется. Хотя это и не имеет прямого отношения к кругу рассматриваемых вопросов, отметим следующее. В настоящее время наиболее удачной практической реализацией инерциальной системы координат является такая система, координатные оси которой фиксированы направлениями на квазары [1, 2].

Результаты любых геодезических работ, как правило, представляют в геоцентрической системе координат с началом отсчета в центре масс Земли

и вращающейся вместе с Землей. Результаты, полученные с использованием ИНС, переводят в эту систему координат.

Основу ИНС составляют акселерометры, гироскопы и датчики угловой скорости [2]. Датчик угловой скорости предназначен для измерения угловой скорости вращения ИНС вокруг одной из его осей. При неравномерном движении относительно инерциальной системы координат появляются силы инерции. Существуют датчики, которые «чувствуют» ускорения, их принято называть акселерометрами. У каждого акселерометра есть ось чувствительности. Если в конструкцию ИНС входят три акселерометра, их оси чувствительности ортогональны. Акселерометры определяют составляющие ускорения, каждый вдоль своей оси чувствительности. На акселерометр также действует гравитационное поле Земли. Поэтому для получения абсолютных значений ускорений, которые и надо интегрировать для определения перемещений, необходимо знать проекции ускорения вектора

тяжести на оси чувствительности акселерометров и вычитать их из показаний акселерометров. На практике применяют ту или иную математическую модель гравитационного поля, по которой вычисляют эти проекции [3].

В [4] отмечается, что акселерометр измеряет «кажущееся» ускорение (\mathbf{a}), которое определяется по формуле:

$$\mathbf{a} = \mathbf{w}^{\text{абс}} - \mathbf{g},$$

где $\mathbf{w}^{\text{абс}}$ — абсолютное ускорение; \mathbf{g} — гравитационное ускорение. Оба ускорения имеют размерность м/с² [4]. Вектор «кажущегося» ускорения измеряется акселерометрами в приборной системе координат, т. е. в той системе, оси которой направлены вдоль осей чувствительности акселерометров. Для получения проекции вектора «кажущегося» ускорения на оси геоцентрической системы координат необходимо знать матрицу направляющих косинусов перехода от приборной системы координат к этой системе координат.

Ускорение представляет собой вектор, который имеет вели-

чину и направление. Акселерометр измеряет величину ускорения, а информацию о направлении получают с помощью гироскопа.

В ИНС могут использоваться акселерометры следующих типов:

- маятниковые с электромагнитной обратной связью;
- с пробной массой на стержне, струне или камертоне;
- с пробной массой на электростатическом подвесе;
- с пробной массой, связанной с гироскопом;
- со свободной движущейся пробной массой;
- поплавковые;
- стержневые вибрационные.

В настоящее время широкое распространение получили акселерометры, основанные на микроэлектромеханических системах (Micro Electro Mechanical System — MEMS). Технологии MEMS используются для создания объектов, размеры которых составляют одну миллионную долю метра (микрометр). Погрешность современного акселерометра имеет порядок $10^{-6}g-10^{-7}g$.

Термин «гироскоп», который можно перевести как «наблюдатель вращений» (от греч. *gyros* — круг, *scopos* — смотрю, наблюдаю), был предложен в 1852 г. французским ученым Леоном Фуко для изобретенного им прибора, предназначенного для демонстрации вращения Земли вокруг своей оси. Развитие этого направления привело к тому, что гироскопами стали называть широкий класс приборов. В настоящее время термин «гироскоп» используется для названия устройств, содержащих материальный объект, который совершает быстрые периодические колебания. При таком понимании термина «гироскоп» не обязательно наличие в конструкции прибора симметричного массивного быстро вращающегося ротора, подвешенного практически без трения таким

образом, чтобы его центр масс совпадал с центром подвеса [5].

Текущая привязка приборной системы координат к исходной, например, геоцентрической системе координат, осуществляется с помощью гироскопов и датчиков угловой скорости. Датчики угловой скорости определяют величину угловой скорости вращения относительно инерциальной системы координат, а гироскопы сохраняют заданное направление своих осей в инерциальном пространстве. Как отмечалось выше, инерциальная система координат — понятие идеальное, и реализовать ее, т. е. зафиксировать, практически невозможно. Поэтому для целей геодезии допустимо считать инерциальными системы координат, связанные с центром масс Земли и не вращающиеся относительно звезд. Практически это означает, что учитывать необходимо только суточное вращение Земли [3]. В ИНС применяют гироскопы следующих типов:

- поплавковые;
- механические с вращающимся ротором;
- механические с колеблющейся массой;
- лазерно-кольцевые;
- волоконно-оптические.

Погрешность кольцевого лазерного гироскопа составляет от 2×10^{-3} до 5×10^{-1} градус/час, а волоконно-оптического гироскопа — от 10^{-2} градус/час и менее.

Разработано и создано два вида ИНС — платформенные (карданные) и бесплатформенные [6]. Платформенные ИНС (рис. 1) бывают геометрического, аналитического и полуаналитического типов. В платформенных ИНС акселерометры и гироскопы устанавливают на стабилизированной платформе в карданном подвесе. Подвес изолирует платформу от различных поворотов, что позволяет удерживать акселерометры в неизменной ориентации в инерциальном пространстве во время движения транспорта. В бесплатформенных ИНС (рис. 2) ги-

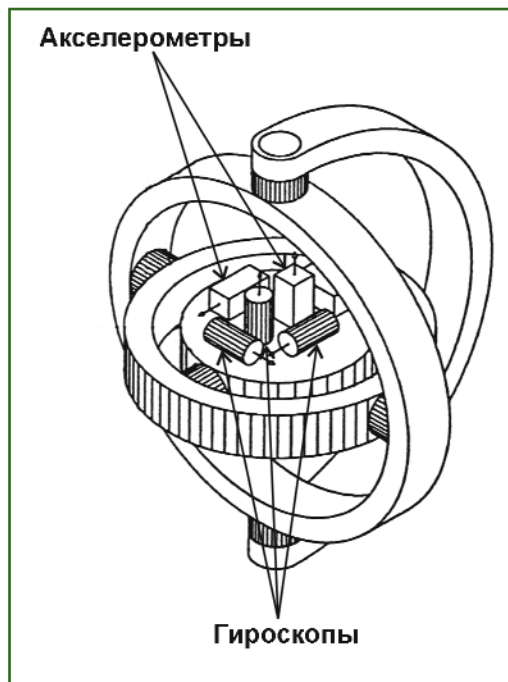


Рис. 1 Платформенная (карданная) ИНС [6]

роскопы и акселерометры жестко связаны с корпусом прибора. Обычно применяют волоконно-оптические и лазерно-кольцевые гироскопы. В бесплатформенных ИНС данные, полученные от гироскопов, поступают в компьютер, где по заданному алгоритму вычисляется матрица текущей ориентации осей чувствительности акселерометров.

В ИНС обоих типов обеспечивается измерение проекции вектора ускорений в одной и той же первоначально заданной системе координат. Кроме координат



Рис. 2 Бесплатформенная ИНС [6]

точек и уклонения силы тяжести, в результате последующей обработки определяют ускорение отвесной линии. Такая возможность появляется только при отсутствии движения, когда на акселерометры не действуют другие ускорения, кроме ускорения силы тяжести [3].

Практическое применение ИНС для геодезических целей началось в начале 1960-х гг. в США. В 1969 г. фирмой Litton был создан вариант геодезической ИНС, который получил наименование PADS (Position and Azimuth Determining System). Эта система позволяла плановые координаты определять с погрешностью 20 м, высоту — с погрешностью 10 м, азимут — с погрешностью несколько десятков секунд. Затем была разработана программа послерейсового уравнивания результатов измерений, названная IPS (Inertial Positioning System). Она давала возможность определять плано-

вые координаты и высоту с погрешностью 1–2 м. В дальнейшем в систему IPS был встроены более чувствительный вертикальный акселерометр и модернизировано ее математическое обеспечение. Этот вариант системы, названный RGSS (Rapid Geodetic Survey System), помимо плановых координат и высоты позволял определять аномалии ускорения силы тяжести с погрешностью до 2 мГал и уклонения отвесной линии с погрешностью 1" [3]. В 1976 г. фирма Honeywell разработала геодезическую ИНС, которая позволяла плановые координаты и высоту определять с погрешностью в несколько десятков сантиметров, ускорения силы тяжести — с погрешностями менее 1 мГал, а уклонения отвесной линии — менее 1" [3].

ИНС как средство измерения имеет источники ошибок, например такие, как неортогональность осей акселерометров и гироскопов, погрешности калибровки акселерометров и гироскопов, а также погрешность модели гравитационного поля, закладываемой при обработке. Существуют ошибки, зависящие от времени измерения, которые проявляются в виде линейных дрейфов выходных сигналов акселерометров и гироскопов.

В настоящее время работы по созданию и совершенствованию ИНС активно ведутся во многих странах мира, включая Россию [7].

Все датчики измерений, входящие в состав ИНС, обычно монтируются в едином блоке. Результаты измерений ИНС требуют периодических коррекций. Коррекцию выполняют на основе дополнительной информации, которая может быть получена от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Характер и причины, вызывающие погрешности в данных, полученных ИНС и приемниками ГНСС, различны. Поэтому интеграция ИНС и приемников ГНСС позволяет преодолеть ограниче-

ния обеих систем и повысить точность измерений. Приемники ГНСС предоставляют информацию для калибровки и инициализации ИНС, а результаты измерений ИНС оказываются востребованными в те интервалы времени, когда на антенну приемников ГНСС приходят сигналы менее чем от четырех навигационных спутников или отсутствуют полностью.

При совместной обработке инерциальных и спутниковых данных образуются «несвязанное» (loosely coupled) и «связанное» (tightly coupled) решения. «Несвязанное» решение имеет место, когда данные ИНС и ГНСС обрабатываются отдельно друг от друга с использованием фильтра Калмана [8]. При «связанном» решении данные ИНС и ГНСС обрабатывают совместно, применяя метод фильтрации Калмана. На выходе в обоих случаях получается интегрированное решение ИНС и ГНСС. Фильтр Калмана является линейной системой и играет роль «оценителя» сигнала.

На практике существует несколько программ, которые позволяют совместно обрабатывать данные ГНСС и ИНС, например такие, как Inertial Explorer, Applanix POSPac MMS, Geoclean Workstation и Spatial Collect. На рис. 3 показаны траектории движения транспортного средства, полученные с помощью данных ГНСС и ИНС, в программе Inertial Explorer. Первоначально обрабатываются данные ГНСС (рис. 3а), а затем — ИНС. Завершается обработка интеграцией данных, полученных ИНС и ГНСС. На рис. 3б линией синего цвета показана траектория, полученная в результате интегрированного решения, которая для сравнения наложена на траекторию, полученную по данным ГНСС. При совместной обработке данных ИНС и ГНСС учитываются, а затем устраняются (уменьшаются) ошибки, которые возникают во время работы как ИНС, так и ГНСС.

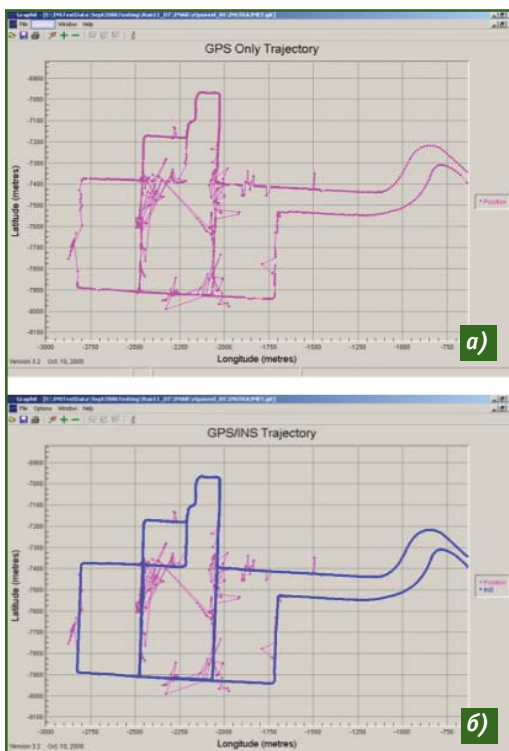


Рис. 3

Траектории движения транспортного средства в программе Inertial Explorer, полученные: а) по данным ГНСС; б) в результате интегрированного решения

В настоящее время рядом компаний разработаны комбинированные системы, включающие как ИНС, так и ГНСС. Одна из таких систем, основанная на технологии SPAN (Synchronized Position Attitude Navigation) компании NovAtel (Канада), приведена на рис. 4. Комбинированные системы могут использоваться для непрерывного определения пространственных координат траектории движения платформы с измерительным оборудованием, установленной на летательном аппарате, наземном транспортном средстве, морском или речном судне. Результаты исследования точности определения местоположения комбинированными системами с измерительным оборудованием, установленным на наземном транспорте, показывают, что средняя квадратическая погрешность составляет 3,3–3,8 см [9].

ИНС, совмещенные со спутниковыми приемниками, находят применение при создании подвижных геодезических съемочных комплексов для воздушного лазерного сканирования, аэросъемки и наземного мобильного картографирования. Это оборудование используется при топографической съемке незастроенной местности, территорий городов, протяженных линейных сооружений (автомобильных и железных дорог, воздушных линий электропередачи

и т. п.), а также береговых речных и морских линий.

В качестве одного из примеров можно привести систему мобильного картографирования IP-S2 Compact компании Topcon (Япония), включающую платформу с двумя лазерными сканерами, цифровую видеокамеру, ИНС и геодезический приемник ГНСС, установленную на автомобиле (рис. 5). Пространственные координаты платформы определяются ИНС, совмещенной со спутниковыми приемниками, что позволяет получать результаты трехмерного лазерного сканирования и видеоизображения с камер в единой системе координат. По результатам съемки системой IP-S2 Compact можно получить данные для создания топографического плана, удовлетворяющего требованиям масштаба 1:500 [10].

В заключение следует отметить, что дальнейшее повышение точности и надежности получения пространственных координат инерциальными навигационными системами как самостоятельными средствами измерений возможно за счет их модернизации и широкого внедрения MEMS-технологий и совершенствования методики обработки результатов измерений.

▼ Список литературы

1. Шануров Г.А., Мельников С.Р. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и



Рис. 4

Комбинированная система SPAN-CPT компании NovAtel (www.novatel.com)

методы выполнения геодезических работ. — М.: МИИГАиК, 2001. — 136 с.

2. Christopher Jekeli. Geometric Reference Systems in Geodesy. Division of Geodesy and Geospatial Science. School of Earth Sciences. OhioStateUniversity. July 2006, p. 202.

3. Черемисенов Г.В. Инерциальные геодезические системы // Геодезия и аэросъемка. — Том 25 (Итоги науки и техники, ВИНТИ АН СССР). — М., 1987. — С. 72–123.

4. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. — М.: Наука, 1987. — 320 с.

5. Мартыненко Ю.Г. Тенденции развития современной гироскопии // Соросовский образовательный журнал. — 1997. — № 11. — С. 120–127.

6. Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill and Angus P. Andrews. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley-Interscience. 2007, p. 554.

7. Салычев О.С., Воронов В.В. Навигационно-пилотажное обеспечение аэросъемочных работ // Геопрофи. — 2005. — № 5. — С. 38–40.

8. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. — 200 с.

9. Kennedy S., Hamilton J., Martell H. GPS/INS Integration with the iMAR-FSAS IMU // XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8–13, 2006.

10. Кукушкин Д.А. Преимущества применения систем мобильного сканирования TOPCON по сравнению с традиционными методами // Геопрофи. — 2014. — № 6. — С. 4–7.



Рис. 5

Система мобильного картографирования IP-S2 Compact компании Topcon (www.gsi.ru)