

В. Г. ПЕШЕХОНОВ

ПРОБЛЕМА УКЛОНЕНИЯ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ В ВЫСОКОТОЧНОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Рассматривается методическая погрешность инерциальной навигационной системы, обусловленная несовпадением отвесной линии и нормали к поверхности референц-эллипсоида. Анализируются методы оценки указанного расхождения, их использование для коррекции выходных данных инерциальных навигационных систем.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, отклонение отвесной линии, инерциальная навигационная система, гравиметр.

Введение

Известно, что в инерциальной навигационной системе (ИНС) скорость и координаты определяются путем интегрирования измеренного акселерометрами ускорения, из которого исключается ускорение силы тяжести. При этом предполагается, что Земля имеет однородную структуру, геоид (эквипотенциальная поверхность силы тяжести) и референц-эллипсоид (земной эллипсоид, аппроксимирующий фигуру Земли) совпадают.

Однако в силу неоднородности структуры Земли (аномалий гравитационного поля) эти поверхности отличаются и, как следствие, не совпадают нормаль к геоиду (отвесная линия) и нормаль к референц-эллипсоиду (нормальная сила тяжести). Мерой несовпадения является угол ε между ними (рис. 1), который принято называть отклонением отвесной линии (УОЛ). УОЛ порождает отличие инерциальных координат от геодезических – методическую погрешность ИНС. Чем выше инструментальная точность ИНС, тем больше вклад методической погрешности в результирующую погрешность. В сильноаномальных районах методическая погрешность может превосходить инструментальную.

Пешехонов Владимир Григорьевич. Академик РАН, генеральный директор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Директор, Институт информационно-навигационных систем Университета ИТМО (С.-Петербург). Президент международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

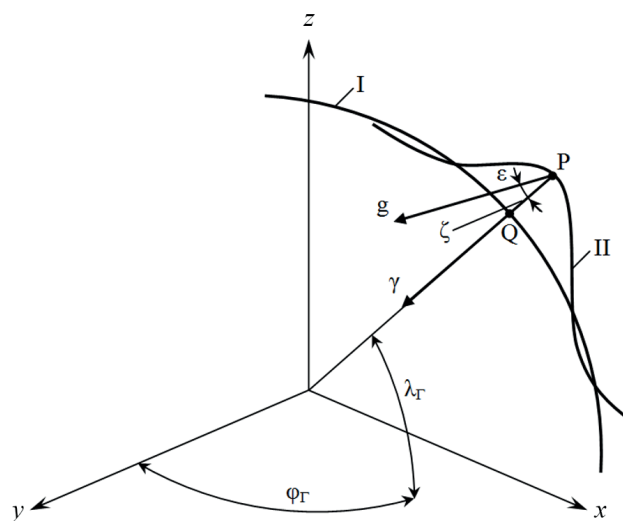


Рис. 1. Параметры аномалий гравитационного поля Земли:

I – референц-эллипсоид, II – геоид, $\varphi_{Г}$, $\lambda_{Г}$ – геодезические широта и долгота, g – отвесная линия (нормаль к геоиду), γ – нормальная сила тяжести (нормаль к референц-эллипсоиду), ε – уклонение отвесной линии, ζ – превышение геоида над референц-эллипсоидом (ундуляция) – расстояние между точками P и Q соответствующих уровневых поверхностей

Изучение аномалий гравитационного поля Земли началось в конце XIX века в интересах высшей геодезии. Венгерский геофизик Л. Этвеш построил прибор для измерения горизонтального градиента силы тяжести на базе крутильных весов Кулона – гантель¹ с двумя идентичными пробными массами на концах, подвешенная на торсионе. Изменение силы тяжести на длине гантели нарушает ее равновесие, и угол поворота гантели служит мерой градиента силы тяжести. Располагая гантель на различных азимутах, можно определить горизонтальные составляющие градиента силы тяжести. Для определения УОЛ необходимо также измерить вертикальную составляющую градиента силы тяжести, но построить крутильные весы с горизонтальной осью чувствительности не удалось.

Гантели вследствие маятниковости измерительной системы могут использоваться только на неподвижном основании и глобальную съемку аномалий гравитационного поля не обеспечивают. Во второй половине прошлого века возникла потребность в знании параметров аномалий гравитационного поля на всей поверхности Земли в интересах определения точных значений эфемерид космических аппаратов, поиска месторождений полезных ископаемых и устранения методической погрешности высокоточной инерциальной навигации. Были развернуты и продолжают до настоящего времени работы по созданию мобильных средств измерения параметров аномального гравитационного поля.

Оценка влияния УОЛ на погрешность ИНС

Общее представление о величине УОЛ дает оценка для Мирового океана [1]: на 80% площади среднее значение УОЛ составляет 5 угл. с (слабоаномальные районы),

¹ В геофизике принят термин «коромысло».

на 15% площади – 15 угл. с (существенно аномальные районы), на 5% площади величина УОЛ может достигать 1 угл. мин (сильноаномальные районы, например разломы земной коры)¹.

Оценка влияния величины УОЛ (ϵ) на точностные характеристики ИНС приведена на рис. 2, где построены графики зависимости времени (t) достижения заданной величины погрешности ИНС (Δ) от величины УОЛ (ϵ). В силу того что методическая погрешность ИНС, обусловленная УОЛ, аддитивна к инструментальной погрешности ИНС и пропорциональна величине ϵ , зависимости $t(\epsilon)$ при фиксированных значениях Δ имеют линейный характер. При $\epsilon = 0$ величина t максимальна, при величине Δ , равной погрешности, обусловленной УОЛ, $t = 0$.

Если допустить, что вклад УОЛ в погрешность ИНС не должен приводить к снижению времени t более чем на 25%, то из рис. 2 следует, что для среднеточной ИНС с максимальной погрешностью 1 морская миля необходимо учитывать УОЛ только в районах с сильноаномальным гравитационным полем. В случае высокоточной ИНС (0,5 морской мили) область учитываемого УОЛ включает районы с существенной и сильной аномальностью гравитационного поля. При использовании прецизионной ИНС (предельная погрешность порядка 0,1 мили) необходимо учитывать УОЛ с погрешностью порядка 1 угл. с.

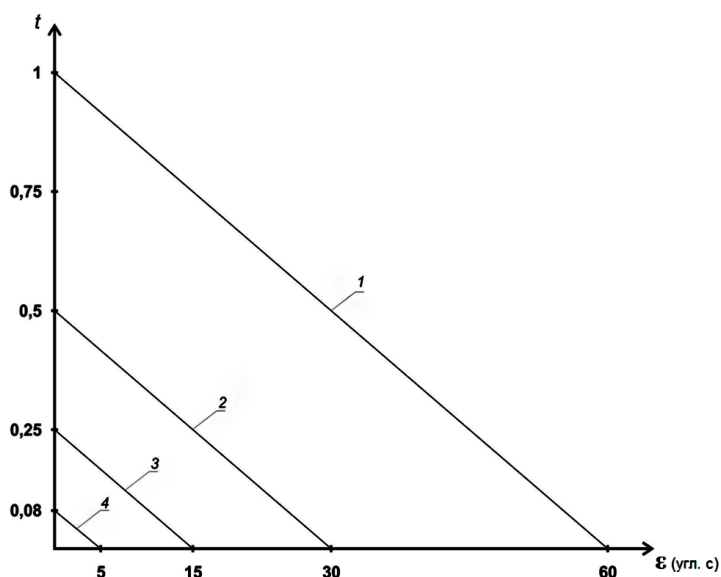


Рис. 2. Влияние УОЛ на погрешность инерциальной навигационной системы:
 t – нормированное время достижения заданной погрешности ИНС; ϵ – величина УОЛ.
 Заданная погрешность ИНС: 1 – 1 морская миля, 2 – 0,5 морской мили, 3 – 0,25 морской мили, 4 – 0,08 морской мили

Последнее, в частности, означает, что для решения обсуждаемой в настоящее время проблемы построения ИНС с точностью выработки координат, соответствующей точности глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), необходимо знание УОЛ с погрешностью не более 0,1 угл. с.

¹ Отклонение вертикали на 1 угл. с приводит к погрешности определения координат 30 м, при отклонении на 1 угл. мин погрешность равна 1 морской миле.

Методы определения УОЛ на подвижном основании

Непосредственное измерение УОЛ невозможно. Разработаны и реализуются методы косвенного оценивания УОЛ на основе измерения двух других параметров, характеризующих аномалии гравитационного поля, и их производных:

- аномалия силы тяжести – разность силы тяжести на геоиде и референц-эллипсоиде;
- высота геоида (ундуляция) – расстояние между поверхностями геоида и референц-эллипсоида.

Ниже рассматриваются методы, основанные на измерениях аномалий силы тяжести, так как альтиметрический метод измерения ундуляции с борта космического аппарата или самолета обеспечивает получение только сильно сглаженной картины гравитационного поля, не обеспечивающей решение задач навигации.

В настоящее время развиваются четыре метода измерения УОЛ на подвижном основании [2]. Их реализация с точки зрения оценивания УОЛ с погрешностью порядка 1 угл. с рассматривается в данном разделе.

Гравиметрический метод исторически является первым реализованным методом оценки УОЛ по данным измерения ускорения силы тяжести на подвижном основании. В 1923 году голландский ученый Феликс Андрис Венинг-Мейнес провел гравиметрические измерения на борту подводной лодки и затем вычислил составляющие УОЛ по формулам [1, 3]:

$$\xi = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \Delta g Q(\psi) \cos A d\psi dA,$$

$$\eta = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \Delta g Q(\psi) \sin A d\psi dA,$$

где ξ , η – составляющие УОЛ соответственно в плоскости меридиана и плоскости первого вертикала, Δg – аномалии силы тяжести, $Q(\psi)$ – функция Венинг-Мейнеса, ψ – расстояние между точкой определения УОЛ и текущей точкой, A – геодезический азимут направления на текущую точку.

Для оценки ξ и η с погрешностью на уровне 1 угл. с необходимо знание Δg с погрешностью не более 1 мГал и координат с погрешностью не более 10 м. Современные морские гравиметры и ГНСС обладают соответствующей точностью [1].

Проблема заключается в том, что интегрирование по формулам Венинг-Мейнеса выполняется по всей поверхности Земли, и величина Δg должна быть определена в этих пределах. Однако функция $Q(\psi)$ убывает с увеличением ψ , и чем больше расстояние текущей точки от точки определения УОЛ, тем с меньшей точностью необходимо знать Δg . В геодезии принято [1–3] разбивать область интегрирования на зоны (рис. 3).

В центральной зоне необходима максимально возможная точность измерения Δg , и съемка ведется гравиметром. Вся зона покрывается галсами, расстояние между которыми составляет не более 1 км. С учетом ортогональных галсов судно проходит тысячи миль в течение сотен часов.

В ближней и средней зонах может производиться аэросъемка, производительность которой на порядок выше судовой, а снижение точности в 2–3 раза мало влияет на точность определения составляющих УОЛ.

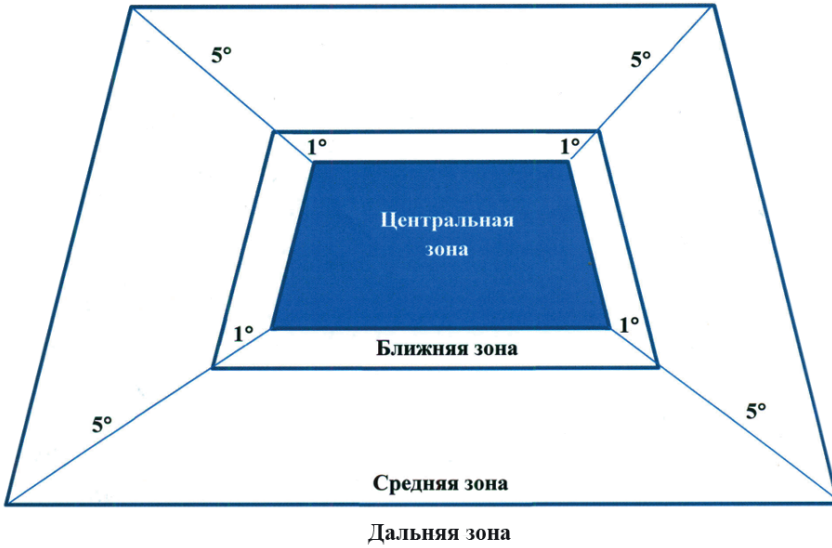


Рис. 3. Зоны измерения аномалии силы тяжести

В дальней зоне съемка не производится, используется глобальная модель геопотенциала. В целом гравиметрический метод обеспечивает необходимую точность оценивания УОЛ, но трудоемкость его велика, и он используется только для локальной площадной съемки. По результатам съемки формируются карты УОЛ для исследованных локальных районов.

Градиентометрический метод заключается в измерении составляющих тензора градиента силы тяжести и последующего вычисления УОЛ по формулам [3]:

$$\xi = \xi_0 - 1 / \gamma (T_{xx} \Delta x + T_{xy} \Delta y + T_{xz} \Delta z),$$

$$\eta = \eta_0 - 1 / \gamma (T_{xy} \Delta x + T_{yy} \Delta y + T_{yz} \Delta z),$$

где ξ_0, η_0 – составляющие УОЛ в точке x_0, y_0, z_0 , γ – нормальное ускорение силы тяжести в расчетной точке, T_{ij} – составляющие тензора градиента силы тяжести ($ij = x, y, z$), $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – приращения координат объекта относительно x_0, y_0, z_0 .

Для измерения всех величин T_{ij} необходима система по крайней мере из четырех пробных тел, не лежащих в одной плоскости [1]. Простейшая схема расположения датчиков – в вершинах тетраэдра (см. рис. 4). Прибор, обеспечивающий измерение всех составляющих тензора, принято называть тензорным гравитационным градиентометром.

Точность вычисления УОЛ 1 угл. с обеспечивается, если составляющие тензора T_{ij} определены с погрешностью не более 1 ЭТВ (изменение градиента ускорения силы тяжести на величину $10^{-11}g$ на расстоянии 0,1 м) [2]. Столь

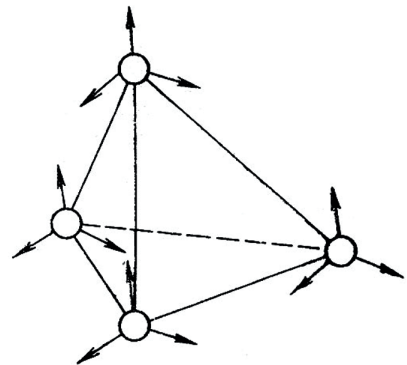


Рис. 4. Кинематическая схема тензорного гравитационного градиентометра

малую величину сложно измерить, особенно если измерения производятся на подвижном основании.

Ускорение движения подвижного основания обычно лежит в пределах $(10^{-2}-10^{-1})g$, т.е. помеха, вызванная переносным движением основания, на $9-10$ десятичных порядков превосходит измеряемую величину. Угловое движение основания также порождает интенсивную помеху. Даже если градиентометр стабилизируется в пространстве с погрешностью 2 угл. с, помеха составляет 400 Этв [4]. Наконец, если на расстоянии 1 м от градиентометра перемещается масса 100 кг, то возникает помеха в 13 Этв.

К настоящему времени разработано значительное число конструкций градиентометров, отличающихся видом пробных тел, подвеса и списывания информации [4]. Эффективным решением стала ротационная схема построения градиентометра, когда вводится принудительное вращение с постоянной скоростью относительно оси, ортогональной линии, соединяющей пробные тела. При этом полезный сигнал модулируется с двойной частотой вращения, а инерциальные ускорения платформы – с одинарной, и этим обеспечивается эффективная частотная фильтрация сигнала на фоне помех.

Еще одним важным решением стало использование в качестве пробных тел электростатических акселерометров. Чувствительность наиболее точных акселерометров, используемых в ИНС и других гироскопических системах, лежит в пределах $(10^{-5}-10^{-6})g$ и совершенно недостаточна для построения градиентометров класса 1 Этв. Однако в невесомости напряженность поля электростатического подвеса можно снизить более чем на порядок, и поскольку пондеромоторные силы электростатического подвеса пропорциональны квадрату напряженности поля подвеса, то шумы акселерометра в космосе будут снижены до приемлемого уровня.

В силу этих обстоятельств наилучшие условия для акселерометрического градиентометра обеспечиваются на космических аппаратах. В этом случае также нет движущихся масс вблизи градиентометра.

Акселерометрические градиентометры стали основой для космических геодезических миссий. В миссии GOCE Европейского космического агентства применен градиентометр на основе трех ортогонально расположенных пар трехосных электростатических акселерометров компании Alcatel Space Industries [5]. Измерительный диапазон градиентометра 0,005–0,1 Гц, уровень шума градиентометра 0,01–0,02 Этв/ $\sqrt{\text{Гц}}$ (уровень шума акселерометра $2 \cdot 10^{-13} \text{ g}/\sqrt{\text{Гц}}$) при стабильности температуры основания 10 мК в течение 200 с.

Одновременно в миссии GRACE (и ее продолжении GRACE Follow-On) реализован метод определения составляющих градиента силы тяжести «спутник–спутник», когда система из двух космических аппаратов реализует гигантский градиентометр, пробными телами в котором являются космические аппараты.

Космические геодезические миссии обеспечили решение проблемы построения современных глобальных моделей гравитационного поля Земли. Модель имеет вид ряда сферических гармоник, от их числа зависит длина волны, а следовательно, разрешающая способность модели. Наиболее совершенная современная модель имеет минимальную длину волны порядка 10 км. При подобной разрешающей способности в интересах высокоточной инерциальной навигации модель может использоваться в слабоаномальных районах с «плоским» гравитационным полем. В остальных случаях глобальная модель используется как дополнение к гравиметрическому методу (см. выше).

Астрономо-геодезический метод по существу моделирует УОЛ. Измеряются астрономические и геодезические координаты, их разность определяет составляющие УОЛ в точке наблюдения:

$$\begin{aligned}\xi &= \varphi_a - \varphi_r, \\ \eta &= (\lambda_a - \lambda_r) \cos \varphi_r,\end{aligned}$$

где φ_a, λ_a – астрономические координаты; φ_r, λ_r – геодезические координаты.

Метод обеспечивает необходимую точность определения составляющих УОЛ, но при использовании традиционных приемов наблюдательной астрономии и инженерной геодезии чрезвычайно трудоемок и применяется только на стационарных наземных пунктах. Координаты астроориентиров определяются визуально, что требует продолжительных наблюдений и высокой квалификации наблюдателя. Определение геодезических координат методом триангуляции также занимает значительное время и выполняется профессионалами-геодезистами.

Современные технологии открыли возможность автоматизированного определения составляющих УОЛ в течение одного часа. Высокоточное (с точностью до сотых долей пикселя) измерение изображения положения звезды на КМОП-матрице, компьютерная обработка информации, в том числе идентификация звезд с использованием данных звездного атласа, обеспечивают автоматическое определение астрономических координат без участия оператора. Геодезические координаты и привязку к точному времени получают по данным ГНСС.

Первые образцы автоматизированных астрономо-геодезических систем, созданные в академических организациях ряда стран, построены на базе зенитного телескопа, обеспечивающего высокоточное измерение зенитных расстояний околоразенитных звезд, и геодезической аппаратуры ГНСС. Сообщалось, что УОЛ определялась с точностью 0,2-0,3 угл. с за час наблюдений [6].

Одним из основных источников погрешности зенитного телескопа является отклонение основания от горизонта. Эту погрешность технически несложно свести к допустимому минимуму на неподвижном основании. Работа зенитного телескопа на подвижном основании до настоящего времени не обеспечена.

Еще одним серьезным ограничением применения астрономо-геодезического метода является условие видимости звезд. Для определения астрономических координат необходимо либо ясное небо, либо в крайнем случае – слабая (с разрывами) облачность.

Инерциально-геодезический метод является модификацией астрономо-геодезического, когда вместо зенитного телескопа используется ИНС и определяются не астрономические координаты, а инерциальные. Выработка геодезических координат по-прежнему обеспечивается ГНСС.

Очевидными достоинствами инерциально-геодезического метода являются: независимость от гидрометеорологических условий, устойчивость к линейным и угловым ускорениям подвижного основания, возможность использования для определения УОЛ не только разности инерциальных и геодезических координат, но также скоростей и ускорений, вырабатываемых ИНС и внешними измерителями.

Однако имеются и серьезные ограничения. Инструментальная погрешность ИНС должна быть существенно меньше методической погрешности, обусловлен-

ной УОЛ. Но инструментальная погрешность ИНС нарастает во времени, и это означает, что указанное выше условие выполняется только на ограниченном отрезке времени. Кроме того, в силу специфики ИНС инерциально-геодезическим методом определяется не абсолютная величина УОЛ, а относительная к УОЛ в исходной точке измерения.

Сообщений о реализации инерциально-геодезического метода немного. В числе последних – две публикации китайских авторов [7, 8], посвященные теоретическому и экспериментальному исследованию обусловленной УОЛ погрешности интегрированной инерциально-спутниковой системы, которые содержат результаты оценки составляющих УОЛ на морском маршруте.

Российские разработки

Инициатором и руководителем разработки в нашей стране градиентометра для работы на подвижном основании был академик А.А. Красовский. Работа выполнялась в Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского в сотрудничестве с Раменским ПКБ [9]. Были созданы экспериментальные ротационные градиентометры гантельного и акселерометрического типов, однако их точностные характеристики были достаточно далеки от требуемых [10, 11].

В конце семидесятых годов прошлого века ЦНИИ «Электроприбор» завершил разработку первой отечественной высокоточной ИНС на электростатических гироскопах, и проблема коррекции методической ошибки, обусловленной УОЛ, стала актуальной. Первая публикация по этой проблеме имела постановочный характер [12]. В дальнейших исследованиях [13, 14] были проанализированы методы измерения параметров аномального гравитационного поля и стохастическое описание гравитационных аномалий [15].

В связи с тем что на этапе начальных работ не был выявлен метод, гарантированно решающий проблему, в инициативном порядке были начаты исследования возможности всех методов определения УОЛ.

К этому времени в ЦНИИ «Электроприбор» совместно с Институтом физики Земли РАН уже был создан морской гравиметрический комплекс «Чета-АГГ», по точностным характеристикам приближающийся к требованиям гравиметрического метода определения УОЛ. Дальнейшее развитие этой тематики в интересах морской геологоразведки привело к созданию еще двух мобильных (аэроморских) гравиметров «Чекан-АМ» и «Шельф» [16], обеспечивающих измерение ускорения силы тяжести на море с погрешностью, не превышающей 1 мГал и 0,4 мГал соответственно.

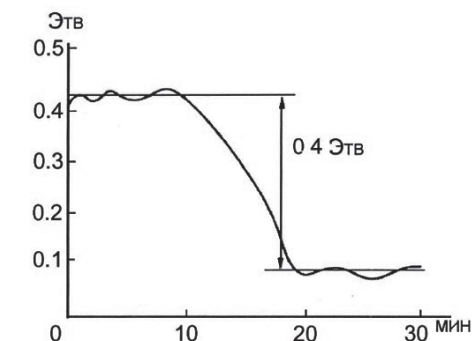
Одновременно компанией «НТП «Гравиинерциальные технологии» (г. Москва) был создан гравиметр GT-2, авиационный вариант которого имеет точность измерений 0,5-0,7 мГал при времени осреднения 100 с, обеспечивая пространственное разрешение на уровне 5 км [1].

Сегодня более 100 гравиметров «Чекан-АМ» («Шельф») и GT-2 (GT-2А и GT-2М) обеспечивают гравиметрическую съемку на морских акваториях и в труднодоступных районах суши (Антарктида, Гималаи и т.п.). Подтверждена возможность высокоточной морской гравиметрической съемки в высоких широтах [17]. При этом гравиметры типа «Чекан-АМ» в основном используются в морском исполнении, а GT-2 – в авиационном.

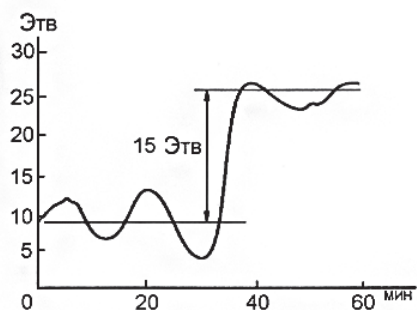
Таким образом, геодезисты обеспечены инструментами для определения УОЛ гравиметрическим методом, естественно с ограничениями, присущими этому методу (см. выше).

Чрезвычайно привлекательная идея определения УОЛ непосредственно на подвижной платформе, на которой используется ИНС, обусловила развитие работ по созданию градиентометра. В основу разработки ЦНИИ «Электроприбор» были положены новые технические решения: управляемый магнитный подвес системы пробных масс, вакуумная конструкция прибора, структурная симметрия его конструкции [18].

Испытания на неподвижном и слабокачающемся основании [19] дали приемлемые результаты (рис. 5), но сложность конструкции прибора (рис. 6) исключила возможность развития этого направления в инициативном порядке.



Отклик прибора на заданное гравитационное воздействие при определении пороговой чувствительности на неподвижном основании



Отклик на заданное гравитационное воздействие при качке стэнда с амплитудой 12 угл. мин и периодом 18 с

Рис. 5



Рис. 6. Экспериментальный образец чувствительного элемента гравитационного вариометра

Исследования астрономо-геодезического метода проводились в два этапа. На первом этапе (1988–1991 годы) были определены и обоснованы теоретически основные конструкторские решения, изготовлен и испытан макетный образец аппаратуры. Результаты этой работы содержатся в публикациях [20–22]. Кратко они сводятся

к следующему: разработана призмная астролябия, отличающаяся от известных конструкций использованием оптико-телевизионного канала для автоматической фиксации и измерения координат звезд, цифровой обработкой информации и построением плоскости горизонта не с помощью ртутного зеркала, исключаяющего работу на подвижном основании, а акселерометров.

Был построен макетный образец полностью автоматизированного прибора, обеспечивающий измерение координат 30-40 звезд в течение часа, возможность работы на слабоподвижном основании (например, на дрейфующем льду) и в высоких широтах. Прибор устойчиво фиксировал положение звезд вплоть до 6-й величины в период белых ночей (эксперименты проводились на берегу Ладожского озера). Среднеквадратичное отклонение, определенное по 120 измерениям координат звезд, составило 0,3-0,5 угл. с, наибольшее отклонение от среднего – 1 угл. с.

Второй этап исследований (текущее десятилетие) посвящен решению проблемы на базе зенитного телескопа, современной телевизионной и вычислительной техники [23]. Использование 20-мегапиксельной КМОП-матрицы и корреляционно-экстремального метода обработки изображений обеспечило локализацию положения изображения звезды с точностью до сотых долей пикселя. Измерение расстояния между двумя изображениями звезды вместо измерения положения их совмещенного изображения позволило за 10 с выполнять до 200 отсчетов по каждой звезде. Средненная за час измерений погрешность определения астрономических координат составила 0,3 угл. с. Эти измерения, а также идентификация звезд [24], сопоставление их измеренных координат с данными звездного атласа на фиксированный момент времени и фильтрация изображения звезд на неравномерном небесном фоне выполняются автоматически, без участия оператора.

Многочисленные проверки подтвердили точность определения астрономических координат, близкую к требуемой на неподвижном основании. Пока остается открытым вопрос обеспечения необходимой точности при движении основания, но проблема имеет чисто технический характер и при определенных ограничениях на движение основания безусловно может быть решена.

Инерциально-геодезический метод подробно рассмотрен в работе [25], построена модель погрешности ИНС при решении геодезических задач, показано, что при измерениях на движущемся основании в случае близкого характера изменчивости УОЛ и неустойчивости нуля акселерометра ИНС отсутствует наблюдаемость составляющей УОЛ в плоскости первого вертикала. Получены оценки погрешности определения УОЛ при движении между двумя реперными пунктами. Предложено проводить измерения на прямом и обратном курсах в целях снижения влияния погрешностей гироскопов и акселерометров за счет автокомпенсации систематических составляющих их дрейфа.

Дальнейшее изучение [26] выявило возможность полного определения УОЛ, в том числе в высоких широтах, при использовании дополнительного измерителя – спутникового компаса с большой базой (СК). Моделирование показало, что при согласовании отсчетных баз ИНС и СК с погрешностью не более 5 угл. с перед началом измерений и контроле положений фазовых центров антенн СК в процессе измерений обеспечивается необходимая точность определения УОЛ.

Совместное использование инерциально-геодезического метода на маршруте движения и астрономо-геодезического метода для создания реперных точек маршрута

рута рассмотрено в работе [27]. Подобный комплекс при современных параметрах входящих в него средств мог бы обеспечить интервал времени движения между реперными точками порядка одного часа. Однако пока развития эта схема не получила.

Заключение

Коррекция методической ошибки, обусловленной УОЛ, является необходимым условием реализации точности ИНС с дрейфом 10^{-3} град/час и менее.

Развитые к настоящему времени методы определения УОЛ частично решают эту проблему.

Гравиметрический метод обеспечен аппаратно (современные морские и авиационные гравиметры и геодезическая аппаратура ГНСС) и алгоритмически (формулы Венинг-Мейнеса). Величина УОЛ оценивается с погрешностью порядка 1 угл. с. Возможности метода из-за большой трудоемкости и продолжительности гравиметрической съемки ограничены локальными небольшими районами.

Градиентометрический метод реализован на космических аппаратах и совместно с другими космическими геодезическими методами (альтиметрический и «спутник–спутник») обеспечил построение глобальных моделей гравитационного поля с максимальным разрешением 10 км. Космическая геодезия используется для оценивания УОЛ в районах со слабоаномальным гравитационным полем (80% поверхности Мирового океана) и для оценивания гравитационного поля в дальней зоне при гравиметрической съемке.

Астрономо-геодезический метод используется в настоящее время для определения реперных точек на суше. Измерения выполняются с использованием астрономо-геодезических систем, созданных научными организациями и университетами.

Инерциально-геодезический метод исследован, но пока не нашел применения.

Проблема УОЛ потребует новых решений при создании прецизионной ИНС с погрешностью выработки координат, приближающейся к погрешности ГНСС.

Благодарность

Автор благодарен О.А. Степанову, А.В. Соколову и М.И. Евстифееву за полезные замечания при обсуждении статьи.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-19-00627.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Современные методы и средства** измерения гравитационного поля Земли / под редакцией В.Г. Пешехонова и О.А. Степанова. СПб.: ГНЦ РФ «АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2017. 390 с.
2. **Конешов В.Н., Евстифеев М.И., Челпанов И.Б., Яшников О.М.** Методы определения уклонений отвесной линии на подвижном основании // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. №3 (94). С. 75–95. DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.3.075-095.
3. **Грушинский Н.П.** Теория фигуры Земли. М.: Наука, 1976. 511 с.
4. **Евстифеев М.И.** Состояние разработок бортовых гравитационных градиентометров // Гироскопия и навигация. 2016. Т.24. №3 (94). С. 96–114. DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.3.096-114.
5. **Rummel, R. et al.,** GOCE gravitational gradiometry, Journal of Geodesy, 2011, vol. 85, no.11.

6. **Hirt, Ch., et al.**, Modern Determination of Vertical Deflections using Digital Zenith Cameras, *Journal Surveying Engineering*, 2010, vol. 136, issue 1.
7. **Hao Xiong, Dongkai Dai, Yingwei Zhao, Xingshu Wang, Jiaxing Zheng, and Dejun Zhan**, An Analysis of the Attitude Estimation Errors Caused by the Deflections of Vertical in the Integration of Rotational INS and GNSS, *Sensors*, 2019, 19, 1721. DOI:10.3390/s19071721.
8. **Dongkai Dai, Xingshu Wang, Dejun Zhan, Shiqiao Qin, Zongsheng Huang**, Dynamic Measurement of High-frequency Deflections of the Vertical Based on the Observation of INS/GNSS Integration Attitude Error, *Journal of Applied Geophysics*, 2015, vol. 119, pp.89–98. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.05.010.
9. **Красовский А.А.** Пути создания бортовых ротационных гравитационных градиентометров // Оборонная техника. 1983. №6.
10. **Августов Л.И., Сорока А.И.** Бортовой гравивариометр. Опыт разработки и результаты стендовых испытаний // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. №3. С. 51–56.
11. **Сорока А.И.** О разработках бортовых измерителей вторых производных гравитационного потенциала // Гравиметрия и геодезия. Москва: Научный мир, 2010.
12. **Анучин О.Н., Каракашев В.А., Емельянец Г.И.** Влияние геодезических неопределенностей на погрешность инерциальных систем // Судостроение за рубежом. 1982. №5.
13. **Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Старосельцев Л.П., Элинсон Л.С.** Судовые средства измерения гравитационного поля Земли. Л.: ЦНИИ «Румб», 1989. С. 89.
14. **Анучин О.Н.** Инерциальные методы определения параметров гравитационного поля Земли на море. Дисс. ... доктора технических наук, 05.11.03. 1992. С. 425.
15. **Дмитриев С.П., Шимилевич Л.И.** Стохастическое описание аномальных геофизических полей и ошибок их картографирования. Л.: ЦНИИ «Румб», 1985. С. 59.
16. **Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Железняк Л.К., Береза А.Д., Краснов А.А.** Вклад навигационных технологий в создание мобильных гравиметров // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №4. С. 162–180. DOI 10.17285/0869-7035.0018.
17. **Соколов А.В., Краснов А.А., Конешов В.Н., Глазко В.В.** Первая высокоточная морская гравиметрическая съемка в районе Северного полюса Земли // Физика Земли. 2016. №2. С. 109–114. DOI 10.7868/S000233716020125.
18. **Вольфсон Г.Б.** Пути решения проблемы создания бортового гравитационного вариометра. Дисс. ... доктора технических наук, 05.11.03. СПб., 1997.
19. **Пешехонов В.Г., Вольфсон Г.Б.** Решение проблемы создания гравитационного вариометра для работы на подвижном основании // Доклады Академии наук. 1996. Т. 351. №6. С. 118–121.
20. **Васильев В.А. и др.** Всеширотная автоматическая астролябия // Кинематика и физика небесных тел. 1991. Т.2. №3.
21. **Васильев В.А. и др.** Судовой астрогеодезический комплекс для уклонения отвесной линии // Судостроительная промышленность. Сер. «Навигация и гироскопия». 1991. Вып. 2. С. 51–56.
22. **Васильев В.А. и др.** Телевизионная астролябия // Судостроительная промышленность. Сер. «Навигация и гироскопия». 1991. Вып. 2. С. 57–61.
23. **Гайворонский С.В., Кузьмина Н.В., Цодокова В.В.** Высокоточное определение параметров гравитационного поля Земли автоматизированным зенитным телескопом // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2017. С. 474–479.
24. **Гайворонский С.В., Русин Е.В., Цодокова В.В.** Идентификация звезд при определении астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. №1. С. 22–29. DOI 10.17586/2226-1494-2015-15-1-22-29.
25. **Дмитриев С.П.** Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб.: ГНЦ РФ «ЦНИИ «Электроприбор», 1997. С. 208.
26. **Емельянец Г.И., Блажнов Б.А., Степанов А.П.** О возможности определения УОЛ в высоких широтах с использованием прецизионного инерциального модуля и двухантенной спутниковой аппаратуры // Гироскопия и навигация. 2015. №3(90). С. 72–81. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.072-081.
27. **Peshekhonov, V.G., Vasieljev, V.A., Zinenko, V.M.**, Measuring Vertical Deflection in Ocean Combining GPS, INS and Star Trackers, Proc. of the 3rd International Workshop «High Precision Navigation», Stuttgart, Germany, 1995, pp. 180–185.

Peshkhonov, V.G. (Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg, Russia; ITMO University, St. Petersburg, Russia)

Problem of the Vertical Deflection in High-Precision Inertial Navigation, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 4 (111), pp. 3–15.

Abstract. The paper addresses the systematic error of an inertial navigation system, caused by the discrepancy between the plumb line and the normal to the reference ellipsoid surface. The methods of this discrepancy estimation, and their use for correcting the output data of inertial navigation systems are studied.

Key words: Earth's gravitational field, vertical deflection, inertial navigation system, gravimeter.

Материал поступил 06.11.2020