О способе параметризации инструментальных погрешностей гравитационного градиентометра

А.А. Голован, Е.В. Горушкина, И.А. Папуша

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Москва, Россия

aagolovan@yandex.ru

*Аннотация.* В статье приводится описание математической модели погрешностей одной из приборных реализаций гравитационного градиентометра, измеряющего тензор градиента гравитационного поля Земли на подвижном основании. Модель разработана для единственной в мире конструкции прибора, доведенной до стадии практического внедрения и серийного производства.

Ключевые слова — гравитационный градиентометр, инструментальные погрешности.

#  Введение

Гравитационный градиентометр – прибор, измеряющий компоненты тензора градиента гравитационного потенциала на поверхности и близ поверхности Земли. Практический интерес представляют приборные реализации на подвижном основании, используемые, например, в аэрогравиметрии. В этом случае гравиградиентометр размещается на горизонтируемой платформе, что обеспечивает требуемую ориентацию в инерциальном пространстве. В настоящее время все доведенные до стадии внедрения градиентометры служат для гравиметрических съемок с целью разведки полезных ископаемых [1-3]. Аэрогравиметрические измерения при этом обрабатываются в режиме постобработки. Идея использования информации о градиенте гравитационного поля Земли (о резко расчлененных структурах гравитационного поля) для решения навигационных задач находится в разработке.

Необходимость измерять компоненты тензора гравитационного градиента на подвижном основании предъявляет ряд требований к приборной реализации градиентометра и его точностным характеристикам. Чувствительные элементы прибора испытывают на себе суммарное воздействие сопоставимых по величине сил тяготения и сил инерции. С учетом этого гравиинерциальные измерительные приборы должны обладать высокой пороговой чувствительностью, широким динамическим диапазоном, долговременной стабильностью характеристик чувствительных элементов. Также для достижения высокой точности прибора необходимо адекватное описание модели инструментальных погрешностей с целью их последующей алгоритмической оценки и компенсации.

# Модель погрешностей

Способ параметризации инструментальных погрешностей канонической модели гравиградиентометра предложен в [5]. Каноническая модель, обеспечивает измерение всех девяти компонент тензора, и состоит в следующем. Шесть пространственных трехосных акселерометров, ориентированных в географической системе координат, разнесены по трем ортогональным осям на одинаковое расстояние от приведенного центра градиентометра. Компоненты измеряемого тензора  определяются как разность показаний парных акселерометров, ориентированных по оси *i* и разнесенных вдоль оси *j*, поделенная на величину плеча.

Гравиградиенометр на подвижном основании измеряет физический тензор , где *w* – удельная сила, действующая на приведенный центр приборного блока (центр диска). Однако полезным сигналом является тензор гравитационного градиента , где *g* – вектор силы тяготения. Разложим тензор *W* $W$на симметрическую  $W^{(С)}$и кососимметрическую составляющие [6]:





где ω – абсолютная угловая скорость приборного трёхгранника гравиградиенометра в географической системе координат. Здесь и далее используются понятия опорного географического, приборного и модельного трехгранников, принятые в [7].

Кососимметрическая часть  содержит только навигационную информацию, а симметрическая часть  – гравитационный градиент  и центростреми-тельное ускорение . Отсюда



Прибор, сконструированный на основе канонической модели, не может обеспечить требуемую точность измерений градиента в 1 Этвеш (м/с2). Для этого потребуются акселерометры с погрешностью не более м/с2 при расстоянии между чувствительными массами акселерометров в 1м. В то же время существует приборная реализация гравиградиентометра, способная справиться с этой проблемой [6]. Ее основным конструктивным элементом является медленно вращающийся диск с частотой вращения порядка 0.25 Гц и диаметром диска – 0.2м (для разных моделей эти параметры могут отличаться). Четыре маятниковых акселерометра с силовой компенсацией смонтированы параллельными парами на диаметрально противоположных сторонах диска на равном расстоянии (0.1м) друг от друга. Оси акселерометров ориентированы по касательной.



Рис.1. Модель гравиградиентометра

Выходной сигнал градиентометра формируется из линейной комбинации показаний акселерометров. Вращение диска порождает вынужденные гармонические колебания, при этом выходной сигнал модулируется с частотой, равной удвоенной частоте вращения.



или выражение через компоненты тензора :



Эта модель градиентометра на протяжении двух десятилетий разрабатывалась лабораторией Bell Aerospace (США), и в настоящее время доведена до стадии практического внедрения [4]. Серийное производство прибора осуществляется компанией Lockheed Martin (США), общепринятое название GGI (Gravity Gradiometer Instruments). Три зарубежные компании, ведущие аэрогравитационные съемки с использованием градиентометра, используют различные модификации единой схемы прибора, создавая на основе прибора собственные гравиизмерительные комплексы [1-3]. Отметим, что GGI в случае вертикальной ориентации оси вращения, измеряет компоненту  тензора гравитационного градиента и комбинацию .

Ниже приведена модель инструментальных погрешностей для прибора, подобного GGI. Инструментальные погрешности рассматриваются как аддитивные добавки к измеряемым величинам. Пусть *f* – измеряемая величина,  – результат измерения, тогда , где – инструментальная погрешность.

Учитываются следующие параметры:

* угловые ошибки установки градиентометра на горизонтируемой платформе. Угловая ошибка ориентации приборного трехгранника относительно географического задана углом малого поворота , которая включает в себя погрешность стабилизации инерциальной платформы относительно локального географического трехгранника и ошибку установки градиентометра на платформе;
* ошибки информации о расстояниях от центра чувствительных масс акселерометра до центра вращающегося диска. Пусть *i*-й акселерометр установлен на расстоянии  от центра вращающегося диска, тогда ошибка установки задается как ;
* угловые ошибки установки акселерометров, размещенных на диске, относительно касательной к диску обозначены ;
* погрешности нулей акселерометров ;
* ошибки масштабных коэффициентов акселерометров ;
* шумовые составляющие  в показаниях *i*‑го акселерометра.

Модель инструментальных погрешностей *i*-го акселерометра представляется как

,

где составляющая  отражает перекрестное влияние компоненты удельной силы, действующей на чувствительную массу акселерометра ортогонально его продольной оси из-за перекоса  в плоскости диска. В модель не включена погрешность, вызванная выходом осей парных акселерометров из плоскости диска, поскольку она будет заведомо меньше суммы угловой ошибки горизонтирования платформы, ошибки установки градиентометра на платформе, и ошибки, вызванной колебаниями диска, возникающими из-за вращения.

Рассмотрим полную модель инструментальных погрешностей GGI градиентометра:











Она обладает следующими особенностями:

* содержит три частотные компоненты:  и нулевую частоту (аддитивную составляющую);
* содержит линейные комбинации инструментальных погрешностей парных акселерометров, например *.* Важны именно эти комбинации, а не параметры каждого датчика в отдельности;
* при совместном движении и демодуляции выходных сигналов некоторые систематические ошибки компенсируются. Так, составляющие  являются аддитивной добавкой, и не влияют на полезный сигнал, который модулируется на частоте ;
* на двойной частоте содержатся как инструментальные погрешности, так и полезный сигнал ;
* оценки ошибок, содержащихся на частотах, не несущих полезный сигнал, могут использоваться для соответствующей компенсации.

Набор инструментальных погрешностей, включенный в приведенную модель гравиградиентометра, можно разделить на две группы. Первая группа содержит погрешности, которые предположительно остаются постоянными во все время работы прибора. К ним относятся ошибки, вызванные неидеальностью конструкции, а именно линейные  и угловые ошибки установки акселерометров на вращающемся диске. Эти параметры должны определяться до начала эксплуатации прибора в процессе производственной калибровки с использованием специализированых стендов.

Во вторую группу входят погрешности, которые могут изменяться от запуска к запуску, такие как ошибки нулей акселерометров , их масштабные коэффициенты *ki* и ошибка ориентации градиентометра  в географическом трехграннике. Погрешности этой группы могут быть оценены на предстартовой калибровке, а также могут уточняться в процессе эксплуатации прибора.

# Выводы

Разработана модель инструментальных погрешностей одной из приборных реализаций гравиградиентометра, измеряющего тензор гравитационного градиента на подвижном основании. Особенностью модели являются входящие в нее линейные комбинации ошибок датчиков – парных акселерометров. По этой причине калибровка должна производиться для прибора в сборе. Основой для последующей разработки плана калибровки градиентометра может служить приведенная модель инструментальных погрешностей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00731).

##### Литература

1. Barnes G.J., Lumley J.M., 2010, Noise analysis and reduction in full tensor gravity gradiometry data: In R.J.L. Lane (editor), Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2010 Workshop: Geoscience Australian Record 2010/23, 21-27.
2. Dransfield M., Le Roux T., Burrows D. Airborne gravimetry and gravity gradiometry at Fugro Airborne Surveys: In R.J.L. Lane (editor), Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2010 Workshop: Geoscience Australian Record 2010/23, 49-57.
3. Murphy C.A. Recent developments with Air-FTG: In R.J.L. Lane (editor), Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2010 Workshop: Geoscience Australian Record 2010/23, 142-151.
4. Hammond S., Murphy C.A., 2003, Air-FTG™: Bell Geospace’s gravity gradiometer – a description and case study: ASEG Preview, 105, 24-26.
5. Папуша И.А. «Анализ точности решения задачи авиационной гравиметрии с использованием градиентометров». Известия РАН, сер. МТТ, 1999 (4),. Издательство РАН, г. Москва. 11-20 c.
6. Торге В. Гравиметрия. М: Мир. 1999, 429с.
7. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Часть 1. – М.: Макс Пресс. 2011. –136 с.