

УДК 551.46.077:629.584

## АВТОНОМНЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ – ИДЕАЛЬНАЯ ПРЕЦИЗИОННАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

М.Д.Агеев

Обсуждается проблема производства высокоточных гравиметрических измерений с помощью автономного подводного аппарата. Рассматривается методологическая связь задач повышения точности гравиметрических измерений и навигации с ориентированием в инерциальном пространстве. Отмечаются преимущества автономного подводного аппарата при решении данного класса задач.

Настоящей работой мы продолжаем публиковать фундаментальные материалы из научного наследия академика М.Д. Агеева. Первоисточниками для данной статьи послужили рукописные работы и заготовки для публичных выступлений на российских и международных конференциях. Исследованием возможности создания «сверхточных» информационно-измерительных систем М.Д. Агеев занимался в течение многих лет. В частности, это относится к средствам инерциальной навигации, измерению флуктуаций скорости морских течений, системам электромагнитного поиска, методам совмещения гравитационных и навигационных измерений. Проблемы морской гравиметрии с давних пор были в центре внимания специалистов в области геофизики и навигации [1,2]. Создание АНПА открыло новые возможности для повышения эффективности измерений силы тяжести в море по сравнению с традиционными методами [3-5]. Обычно гравиметрические измерения осуществляются с надводных судов, подводных лодок, донных станций с помощью

маятниковых приборов и сильно демпфированных гравиметров. Одним из основных требований, предъявляемых к процессу измерения силы тяжести на море, является обеспечение минимума возмущающих и инерционных ускорений, которым подвержено подвижное основание гравиметрического прибора. Гравиметрические съемки с надводных судов при использовании стабилизированных гравиметров проводятся обычно по следующей схеме. С помощью донных гравиметров, дающих наибольшую точность измерений, намечаются сеть опорных гравиметрических пунктов и опорный морской профиль, которые привязываются системой радионавигации или радиогеодезии к географическим координатам или береговым пунктам. Затем выполняются непрерывные измерения на параллельных или пересекающихся галсах с коррекцией съемки по опорным пунктам и профилям. По данным съемки строятся карты изоаномал, масштаб которых соответствует полученной результирующей точности измерений и привязки. При использовании для гравиметрических измерений подводных лодок удается ослабить или полно-

стью исключить воздействие волнения моря, но остаются знакопеременные возмущения, обусловленные, в частности, турбулентными процессами в океане. Идея использования для морской гравиметрии и геодезии автономных подводных аппаратов возникла на самых ранних этапах их создания. Первый в стране АНПА «Скат-гео» (1976) предназначался для решения именно таких задач. В дальнейшем в ИПМТ ДВО РАН был создан АНПА «Тифлонус» (1988), при проектировании которого ставилась основная задача обеспечения гравиметрических измерений в Арктическом бассейне. В процессе испытаний аппарата проводились экспериментальные гравиметрические измерения с помощью серийного прибора, разработанного в ЦНИИ «Дельфин». Результаты этих измерений использованы в настоящей статье. Следует отметить тот факт, что в работе, рассчитанной на широкую аудиторию, автор использует свой богатый опыт для решения практических задач в области подводных исследований и робототехники.

Л. Киселев.

## ■ ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Земные гравитационные аномалии отражают геологическое строение нижних слоев Земли. Гравиметрические измерения позволяют судить о тектонических процессах в земной коре и имеют очень большое научное значение. Кроме того, они важны и для практики, так как дают дополнительную информацию для разведки минералов. Особенности морских гравиметрических измерений обусловлены их связью с подвижной платформой. В такой же степени это справедливо, например, и для авиационных измерений. Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы показать перспективность применения АНПА для гравиметрических измерений и привлечь внимание специалистов в области геофизики и разработчиков АНПА. В принципе задачи гравиметрических измерений и измерений положения с помощью инерциальных навигационных систем (ИНС) отражают две стороны одного общего явления. В его основе лежит обработка сигнала трехмерного акселерометра со значением, определенным (с помощью гироскопов) в инерциальном пространстве.

Следует, вероятно, отметить, что представленные в работе обоснования имеют эскизный характер.

Приведем основные соотношения, отражающие суть проблемы. Они могут быть представлены в виде уравнений, связывающих две задачи: задачу гравиметрии и задачу инерциальной навигации:

$$a = g(R, t) + \ddot{R}; \quad (1)$$

$$g(R, t) = a - \ddot{R}, \quad (2)$$

$$R = \iint dt^2 [a - g(R, t)],$$

где  $a$  – ускорение, действующее на рабочую массу акселерометра,  $R$  – вектор ускорения в инерциальном пространстве, направленный от центра Земли,  $g(R, t)$  – ускорение силы притяжения Земли.

Первое уравнение в (2) относится к гравиметрии, второе – к инерциальной навигации.

Из общей постановки вытекают достаточно простые следствия:

- в обоих случаях здесь (и в гравиметрии, и в навигации) рассматривается идеальная механическая система;
- для гравиметрических измерений параметры движения платформы должны быть известны из независимых источников;
- для навигационных измерений требуется априорное знание значений гравитационного поля  $g^*(R, t)$ ;
- возможно совместное решение обеих проблем.

Поскольку совмещение функций гравиметра и ИНС проблематично, представляется наиболее целесообразным использовать отдельно гравиметр и ИНС, производя совместную обработку их сигналов.

## ■ ВЛИЯНИЕ УСКОРЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Понятно, что для производства гравиметрических измерений с заданной точностью необходимо как минимум знать координаты и скорости платформы. В этом отношении измерения с борта АНПА не представляют особенностей. Положение АНПА может быть определено с помощью GPS и гидроакустической навигационной системы (ГАНС). Коррекция измеренных данных проводится далее обычным пу-

тем. Очевидные преимущества АНПА состоят в значительном снижении ускорений по сравнению с судовыми условиями. Рассмотрим этот вопрос более детально.

Уравнения гравиметрии могут быть выражены с помощью географических координат: широты  $\varphi$ , долготы  $\lambda$ , отклонения  $z$  от нормального уровня моря. Справедливо следующее выражение:

$$g(\varphi, \lambda, z) = a - F(\varphi, \lambda, z; \dot{\varphi}, \dot{\lambda}, \dot{z}; \ddot{\varphi}, \ddot{\lambda}, \ddot{z}), \quad (3)$$

где  $F(\varphi, \dots, \ddot{z})$  – кинематическая функция преобразования координат. Если выполнить стандартные преобразования, измеряемая величина  $a_z$  будет равна:

$$a_z = \left[ (g + \ddot{z})^2 + \ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Функция  $F$  определяет коррекции показаний гравиметра, установленного на подвижной платформе, и ошибки измерения при неточном знании параметров движения. Для платформы, неподвижной относительно Земли,  $F = 0$ . Если платформа движется с постоянной скоростью на постоянном пространственном уровне, функция  $F$  характеризует величину необходимой коррекции. Ясно, что ошибки измерения скорости с помощью внешних устройств будут создавать помеху измерениям силы тяжести. На практике, как правило, ускорения платформы в расчет не принимаются и в процессе коррекции рассматриваются как шум, устраняемый при фильтрации сигнала.

Предположим, что координаты и скорости платформы определяются с необходимой точностью и нужным образом вычисляется функция коррекции. Иными словами, во внимание может быть принята

только та часть функции  $F$ , которая соответствует ускорениям. В этом случае мы можем принять декартовы координаты, связанные с платформой и ориентированные так, что ось  $Z$  направлена по силе тяжести, а ось  $X$  – по направлению движения платформы. Это позволяет учесть горизонтальные и вертикальные ускорения.

Влияние горизонтальных и вертикальных ускорений существенно различается. Так, вертикальные ускорения просто суммируются с измеренной величиной  $g$ . Влияние горизонтальных ускорений проявляется прежде всего в отклонении оси чувствительности гравиметра от направления силы тяжести, если гравиметр установлен в кардановом подвесе. Если гравиметр установлен на гиросtabilизируемой платформе, можно использовать формулу (4), проведя соответствующую замену переменных.

Заметим, что здесь и далее инструментальными ошибками гравиметра мы пренебрегаем.

Предположим, что ускорения имеют случайный характер с нулевым средним значением.

Основания для такого предположения очевидны: если средняя величина скорости не нулевая, то скорость будет увеличиваться во времени, что невозможно в нормальных условиях. Рассмотрим порядки переменных величин, чтобы лучше понять идею задачи.

В гравиметрической практике принято использовать в качестве единицы измерения величину Гал =  $1 \text{ см/с}^2 \approx 10^{-3} \text{ g}$ . Измерения величины  $g$  изменяются в диапазоне 978 – 983 Гал. Точность измерений в условиях поля Земли составляет  $0,01 \text{ мГал} \approx (10^{-6} - 10^{-7}) \text{ g}$ , и в морских условиях ошибка около  $1 \text{ мГал} \approx 10^{-6} \text{ g}$  может считаться удовлетворительной, в то время как для более детальных исследований требуется точность  $0,1 \text{ мГал}$ . Следовательно, разница в точности измерений на Земле (на неподвижном основании) и в море составляет 2 десятичных порядка. Для практических целей необходимо увеличить точность морских измерений как минимум в 5-10 раз. Очевидно, что ошибки судовых гравиметрических измерений обусловлены главным образом качкой судов (рис. 1).

Предположим, что амплитуда качки судна составляет  $1 \text{ м}$ , а период  $6 \text{ с}$ . В этом случае амплитуда вертикальных ускорений равна  $1 \text{ м/с}^2 \approx 100 \text{ Гал}$ , что в  $10^5$  раз превышает ошибку наилучших измерений. Какой бы ни была система регистрации отсчетов гравиметра, сам гравиметр принципиально представляет собой устройство измерения силы, и увеличение его точности в широком диапазоне измеряемых величин более или менее трудное и дорогостоящее дело. Приведенные соображения приводят к выводу, что при

всех равных условиях (качество гравиметра, эффективность обработки сигналов) уменьшение ошибок гравиметрических измерений может быть достигнуто только при уменьшении возмущающих ускорений.

Автономный подводный аппарат в этом смысле представляется наиболее подходящей платформой. Точность стабилизации зависит в основном от внешних возмущений. Известно, что амплитуды волновых движений уменьшаются с глубиной  $z$  в зависимости  $\exp(-2\pi z/l)$ , где  $l$  – длина волны. Например, для состояния моря 5 баллов длина волны составляет  $80 \text{ м}$ . В этом случае амплитуда в  $100$  раз уменьшается на глубине  $60 \text{ м}$  и в  $1000$  раз на глубине  $90 \text{ м}$ .

За исключением верхних слоев и быстрых течений просторы океана являются достаточно тихими, чтобы достичь очень высокой степени стабилизации движения. Сам аппарат, уравновешенный по плавучести, эквивалентен поплавковому гироскопу. Например, на сравнительно небольшой глубине  $100 \text{ м}$  измерения вертикальных ускорений с АНПА составляют не более  $50 \text{ мГал}$ . Это в  $1000$  с лишним раз меньше, чем приведенная выше величина для бортовой качки судна. Приведем в качестве примера результаты измерений спектра ускорений, полученных в 1988 г. с помощью гравиметра ЦНИИ «Дельфин», установленного на борту АНПА «Тифлонус» при глубине погружения  $70 \text{ м}$  (рис.2).

Измерения показывают, что ускорения платформы имеют характер шума. Рассмотрим далее свойства полезного сигнала.

Предположим, что носитель (платформа) движется прямолинейно вдоль оси  $OX$  со ско-

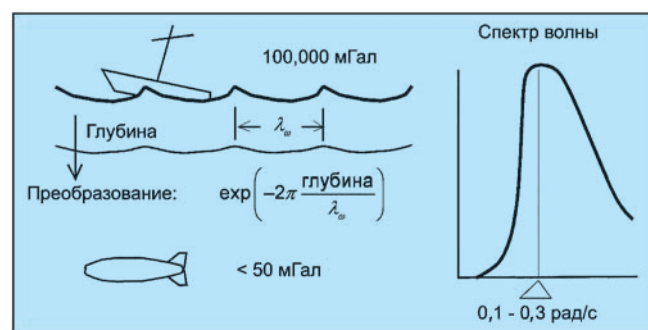


Рис. 1  
Волновые вынужденные ускорения

Рис. 2  
Пример спектра измеренных ускорений с борта АНПА

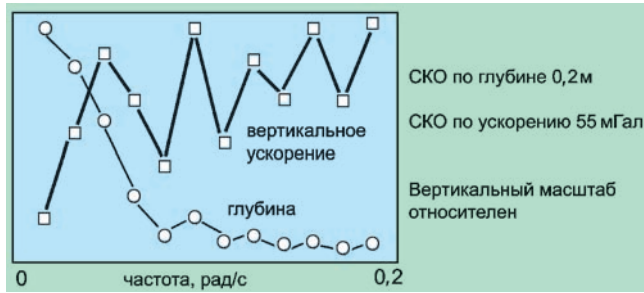
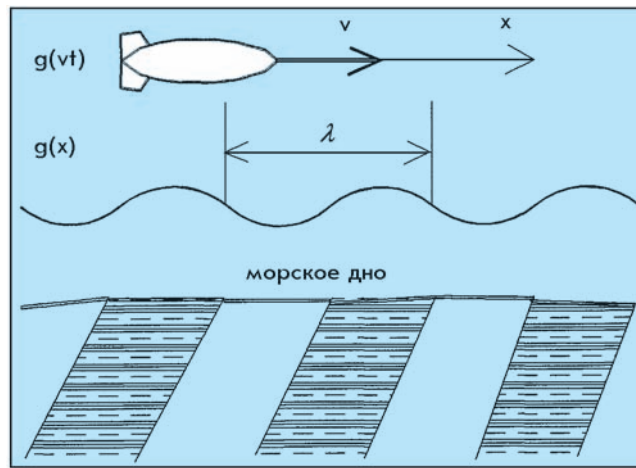


Рис. 3  
Функции аномальных сигналов:  
 $\omega$  – временная частота, рад/с;  
 $\sigma$  – пространственная частота, рад/м;  
спектральная функция  $S(\sigma) \rightarrow S(\omega)$ ,  $\omega = v \sigma$



ростью  $v$  (рис. 3). Сила тяжести вдоль траектории может быть представлена функцией  $g(x)$  величины  $x = vt$ , отображаемой на борту носителя в виде функции  $g(vt)$ . Функция  $g(x)$  может быть описана пространственным спектром  $S(\sigma)$ . Спектру временного сигнала на борту носителя соответствует функция  $S(\omega)$ . Таким образом, на борту носителя роль полезного сигнала играет функция  $g(t)$ , а вертикальные ускорения  $Z(t)$  представляют собой шум.

В настоящее время в процессе фильтрации может быть достигнута сверхвысокая точность вычислений. Однако вре-

менные ограничения на процесс измерения, переменность измеряемых величин по трассе в поле гравитационной аномалии не позволяют уменьшить ошибку ниже значения, обусловленного возмущениями. Известны различные методы фильтрации, но принципиально то, что сигнал и шум отличаются своими частотными свойствами. Ситуация схематически поясняется рис. 4.

В нашем случае спектр полезного сигнала находится в области более низких частот по сравнению со спектром возмущений. Аномалии поля силы тяжести, как правило, явля-

ются достаточно протяженными. Если допустить, что минимальная длина волны аномалии составляет 1 км и скорость носителя равна 3 м/с, то наибольшая частота спектра  $S(\omega)$  приблизительно равна  $0,02 \text{ с}^{-1}$ . Очевидно, это значение может быть уменьшено при снижении скорости аппарата. Спектр волн при качке судна находится в области частот более  $0,3 \text{ с}^{-1}$ , спектр вертикальных колебаний АНПА лежит в диапазоне  $0,2-0,5 \text{ с}^{-1}$ . Окно фильтра должно быть выбрано так, чтобы минимизировать общую ошибку. На АНПА оказывается возможным использование для коррекции ускорений сигналов датчика глубины. При этом нет необходимости вычислять вторую производную сигнала датчика, поскольку процесс коррекции может быть совмещен с фильтрацией.

Резюмируя результаты анализа, можно отметить следующие факторы, подтверждающие преимущества АНПА в повышении точности гравиметрических измерений:

- ошибки гравиметрии, обусловленные ускорениями платформы, существенно уменьшаются на глубине 100 м и более;
- возможность использовать более точные измерительные устройства (маятниковый гравиметр или градиентометр);
- меньшее время обработки полученных данных о коротковолновых аномалиях;
- более высокая точность измерения глубины.

Задача гравиметрических исследований состоит в определении формы, размеров, положения и плотности объектов, порождающих аномалию силы тяжести. Это обратная задача геофизики, и ее решение является неточным и неустойчивым. Чтобы повысить эффективность вычислений, необходимо

Рис. 4  
Соотношение спектров полезного сигнала и шума: спектр сигнала – преобразованная функция аномалии  $S(\omega)$ , спектр шума – ускорения аппарата  $S_n(\omega)$



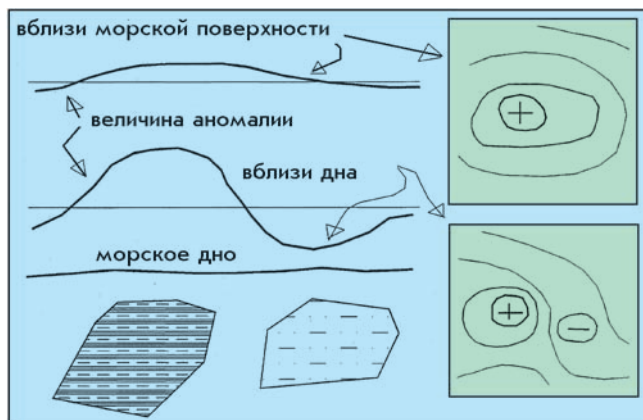


Рис. 5  
Пространственные гравитационные измерения

Сравнение данных, полученных при измерениях с различных горизонтов, позволяет более обоснованно оценивать геофизические явления. Представляется возможным осуществлять (рис.5):

- прецизионные измерения вертикальных градиентов гравитационного поля;
  - интерпретацию гравиметрических данных с высоким качеством;
  - измерения вблизи дна, особенно на большой глубине моря;
  - накопление новых данных о структуре донной поверхности.
- Возможность проведения трехмерных гравиметрических обследований доставляет и другие преимущества использования АНПА.

увеличить объем собираемых экспериментальных данных. Очевидно, это нельзя сделать, опираясь только на уменьшение шага сетки при работе на одном горизонте. Квадратичная зависимость силы тяжести от расстояния позволяет раз-

личать объекты, если измерения проводятся на различных пространственных уровнях. На больших дистанциях поля мало различимы и, наоборот, чем ближе аномальный объект, тем больше точность, с которой он может быть идентифицирован.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Определение силы тяжести на море / Под ред. Н.П.Грушинского. М.: Недра, 1970. С. 247.
2. Андреев В.Д., Десянин Е.А., Челпанов И.Б. и др. Развитие механики гироскопических и инерциальных систем. М.: Наука, 1973. С.307 – 333.
3. Автоматические подводные аппараты / Под. ред. М.Д.Агеева. Л.: Судостроение, 1981. С. 224.
4. Агеев М.Д. Точное измерение колебаний подводного аппарата с применением инерциальной навигационной системы // Подводные роботы и их системы. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 1990. С. 47-59.
5. Агеев М.Д. О точности стабилизации гравиметрической дрейфующей станции // Подводные роботы и их системы. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 1990. С.60-72.

