

УДК 528.27:621.37/39

## Чувствительность гравиинерциальных датчиков

Е. И. Крючков

Институт космических исследований НАН Украины, НКА Украины, Київ

Надійшла до редакції 09.04.98

Стаття присвячена розробці інерціальних датчиків для розв'язання задач гравіметрії, сейсмографії та інерціальної навігації. Розглянуті деякі датчики різного принципу дії. Головну увагу приділено криогенним датчикам, які зараз мають найвищу чутливість. Проведено аналіз чутливості широко відомого криогенного датчика Пейка та криогенного датчика нового типу, розробленого в ІКД. Цей датчик знаходиться в стані лабораторних досліджень.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной гравиметрии является создание градиентометра на движущихся объектах и использование новых физических принципов при создании гравиметрических приборов [2]. Космическая гравиметрия предоставляет заманчивую возможность изучения неоднородностей гравитационного поля Земли из космоса с помощью гравитационного градиентометра. Требуемая чувствительность градиентометра должна составлять  $10^{-12} \div 10^{-13}$  м/с<sup>2</sup> при базе градиентометра 1 м. Градиентометров с такой высокой чувствительностью на сегодняшний день нет.

Достигнутая точность измерения ускорения свободного падения  $g$  на поверхности Земли с относительной погрешностью  $10^{-8}$  при времени усреднения выходного сигнала датчика до нескольких минут не удовлетворяет требованиям сегодняшнего дня. Например, экспериментальная проверка стабильности положения центра масс Земли, измерения смещений полюсов Земли, измерение гравитационной постоянной требуют обеспечения чувствительности гравиметрических датчиков на уровне  $(10^{-10} \div 10^{-12})g$  и выше.

Для повышения чувствительности гравиметрических приборов необходимо использовать новые физические принципы.

Напомним основные принципы построения гравиинерциальной аппаратуры.

Название «гравиинерциальный» означает, что датчик измеряет ускорения гравитационного поля и инерционные (кажущиеся) ускорения. Пространственные градиенты гравитационных ускорений, являющиеся вторыми производными гравитационного потенциала, измеряются гравитационными градиентометрами. Градиентометр содержит две чувствительные массы, разнесенные на определенное расстояние друг от друга, называемые базой. По принципу работы гравиинерционные датчики разделяются на статические и динамические.

Основной частью статического гравиинерциального датчика является чувствительная масса (ЧМ), связанная с корпусом датчика элементами жесткости и трения.

Информация о воздействии гравитационных либо инерционных ускорений, неразделимых вследствие принципа эквивалентности, содержится в изменении координаты или скорости ЧМ относительно корпуса прибора.

В других датчиках, работа которых основана на динамическом методе, ускорения регистрируются путем измерения частоты, периода колебаний либо по измерениям пройденного пути и времени.

Гравиинерциальные датчики разделяют на гравиметры и гравитационные градиентометры, измеря-

ющие гравитационное поле, и на акселерометры и сейсмографы, измеряющие инерционные ускорения.

Отличия между гравиметрами, акселерометрами и сейсмодатчиками заключаются в классе точности, в частотном диапазоне измеряемых ускорений и месте предполагаемого использования (стационарный наземный или мобильный вариант), что определяет их различные массо-габаритные показатели (см. подробнее в [1]).

Основной показатель качества гравиинерциальных датчиков — это их способность определять минимально обнаружимые перемещения ЧМ или время с требуемой точностью на фоне собственных шумов прибора.

Для оценки такой способности обычно рассчитывают чувствительность, которая определяется внутренними неустранимыми шумами прибора — так называемую потенциальную чувствительность.

#### ДАТЧИКИ, РАБОТАЮЩИЕ ПРИ ОБЫЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Исторически первыми создавались датчики, работающие при обычных температурах. За более чем 30-летний период времени были созданы и успешно работают достаточно большое количество гравиинерциальных датчиков различных типов и конструкций.

Из этой гравиметрической аппаратуры можно выделить:

1. Баллистические гравиметры, измеряющие абсолютную величину  $g$  с относительной погрешностью  $10^{-8} \div 10^{-9}$  [1]. В этих гравиметрах применяется динамический метод свободного падения тел. Высокая точность измерения  $g$  достигается за счет использования рубидиевого стандарта частоты, стабильность которого составляет  $10^{-10}$  за 10 сут и оптического интерференционного метода измерения длины пути падения с погрешностью  $10^{-9}$  измеряемой длины. Перспективы повышения эффективности использования баллистических гравиметров связаны не только с дальнейшим увеличением точности, но и с созданием портативного абсолютного гравиметра, применение которого существенно расширит области его использования.

2. Кварцевые статические гравиметры Всесоюзного научно-исследовательского института геофизики АН СССР. Эти гравиметры обеспечивают среднюю квадратичную погрешность  $10^{-8} g$  [1].

3. Широко известны за рубежом гравиметры Лакоста и Ромберга. Они также обеспечивают в среднем точность измерения  $10^{-8} g$  [1].

Приведенные выше точности достигаются при усреднении выходного сигнала датчика до нескольких минут.

В датчиках, работающих при обычных температурах, практически достигнут предел чувствительности и стабильности работы, связанный с собственными шумами.

Достигнутая точность измерения  $g$  с погрешностью  $\pm 10^{-8} g$  при заметном времени усреднения перестает удовлетворять требованиям сегодняшнего дня.

#### КРИОГЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Одним из путей повышения чувствительности гравиинерциальных датчиков является использование низких и сверхнизких температур. Применение этих температур позволяет не только снизить уровень тепловых шумов и увеличить стабильность работы датчиков, но и использовать необычные физические эффекты и явления. Наиболее интересными из них являются сверхпроводимость, эффект Браунбека, эффекты «магнитной потенциальной ямы» (МПЯ) и Джозефсона.

Эффект Браунбека состоит в том, что при использовании диамагнитных тел возможен устойчивый подвес свободной массы. Поскольку диамагнетизм присущ односвязным сверхпроводящим образцам (сплошное тело, «без дырок»), конструктивно один элемент диамагнитного неконтактного подвеса выполняется, как правило, в виде неподвижной сверхпроводящей катушки, а чувствительная масса (ЧМ) делается в форме осесимметричного сверхпроводящего тела, геометрические формы которого повторяют поверхность сверхпроводящей катушки подвеса. ЧМ располагается над неподвижной катушкой, чтобы сила тяжести компенсировалась силой диамагнитного отталкивания.

Еще более широкие возможности для создания устойчивого подвеса ЧМ открывает эффект МПЯ [3]. Исследования магнитного взаимодействия между сверхпроводящими токонесущими катушками привели к обнаружению нового характера поведения силы магнитного взаимодействия (рис. 1).

Известно, что притяжение и отталкивание двух постоянных магнитов или электромагнитов с увеличением расстояния между ними монотонно ослабевает, а при уменьшении расстояния — монотонно увеличивается. При эффекте МПЯ магниты взаимодействуют существенно иным образом: при уменьшении расстояния между ними притяжение вначале усиливается, но, дойдя до некоторого значения, ослабевает и, пройдя через нулевое значе-

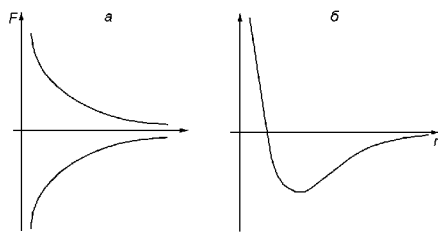


Рис. 1. Характер силы взаимодействия между осесимметричными магнитами в зависимости от расстояния между ними: *a* — взаимодействие между обычными магнитами; *b* — МПЯ-взаимодействие. Положительным значениям силы  $F$  соответствует отталкивание, отрицательным — притяжение

ние, переходит в отталкивание. Это свойство эквивалентно тому, что потенциальная энергия магнитного взаимодействия как функция расстояния имеет минимум (существует потенциальная яма), причем точке минимума энергии отвечают нуль магнитной силы. Фактически реализуется магнитный эквивалент обычной механической пружины. На основе этого магнитного эквивалента пружины возможно создание разнообразных вариантов неконтактного подвеса свободного тела для экспериментов по обнаружению малых сил.

Эффект МПЯ был теоретически открыт и экспериментально подтвержден в Институте кибернетики НАНУ. В настоящее время эти работы продолжают в Институте космических исследований НАНУ и НККАУ.

В основу работы сверхпроводящего квантового интерферометрического датчика (СКВИД) положен эффект Джозефсона. Использование СКВИДа в регистраторе смещений ЧМ позволило сразу получить потенциальную чувствительность, минимум на порядок превышающую лучшие достижения обычного приборостроения. Это реализовано в конструкции криогенного статического гравиметрического датчика, получившая название по многочисленным публикациям как датчик Пейка.

#### ДАТЧИК ПЕЙКА

На базе конструкции Пейка разработаны акселерометры и гравитационные градиентометры с предположительным их использованием как в земных условиях, так и в космосе [4].

Рассмотрим базовую модель датчика Пейка, измеряющую гравинерциальные ускорения. Роль ЧМ в данной конструкции выполняет сверхпроводящая пластина, взвешенная на специальных пружинах (рис. 2). По обеим сторонам на расстоянии  $x_0$  от ЧМ расположены две плоские спиральные

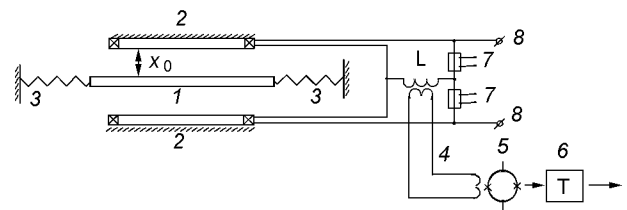


Рис. 2. Датчик Пейка: 1 — ЧМ; 2 — спиральные катушки (вид сбоку); 3 — пружины; 4 — трансформатор потока; 5 — СКВИД; 6 — усредняющее звено; 7 — тепловые ключи; 8 — токовводы

катушки, параллельно соединенные между собой. Между точками их соединения включена катушка с индуктивностью  $L$ , связанная через трансформатор потока со СКВИДОм. В сверхпроводящих плоских катушках циркулирует незатухающий ток  $I_0$ . Смещения ЧМ под воздействием внешних ускорений модулируют вследствие эффекта Мейсснера индуктивности спиральных катушек, что приводит к изменениям магнитного потока в индуктивности  $L$ . Этот сигнал регистрируется СКВИДОм. На рис. 2 также показаны токовводы и тепловые ключи для ввода в спиральные катушки тока  $I_0$ . Датчик имеет вертикальную ось чувствительности. На выходе датчика находится усредняющее звено.

Принципиально неустранимыми шумами здесь, как и во многих других криогенных датчиках, являются тепловой броуновский шум ЧМ и широкополосный шум СКВИДа.

Автором проведен расчет коэффициента передачи энергии от ЧМ ко входу СКВИДа и получена следующая относительно простая формула для оценки потенциальной чувствительности с учетом конечного времени  $T$  усреднения выходного сигнала СКВИДа и с учетом соотношения на выходе сигнал/шум = 1:

$$\Delta g_{\min} \approx \frac{2\omega_0^2 x_0 \sqrt{E_f}}{k I_0 \sqrt{L}} \frac{1}{\sqrt{T}}. \quad (1)$$

Здесь  $E_f$  — энергетическая спектральная плотность шумов СКВИДа, приведенная к его входной катушке; для лучших коммерческих СКВИДов эта величина лежит в пределах  $4 \cdot 10^{-28} \div 5 \cdot 10^{-29}$  Дж/Гц;  $k$  — коэффициент связи между индуктивностью  $L$  и трансформатором потока;  $\omega_0$  — круговая частота собственных колебаний ЧМ.

Шум СКВИДа в датчике Пейка превышает броуновский шум ЧМ, поэтому при расчете чувствительности брался во внимание только шум СКВИДа.

Выражение (1) получено для низкочастотных ускорений  $\Delta g$ , частота которых гораздо меньше частоты  $\omega_0$ .

Для средних значений параметров датчика

$$E_f = 10^{-29} \text{ Дж/Гц}; \quad \omega_0 = 2\pi \cdot 20 \text{ Гц}; \quad x_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$I_0 = 1 \text{ А}; \quad k = 0.8; \quad L = 1 \text{ мкГн}$$

из (1) получаем следующее значение потенциальной чувствительности

$$\Delta g_{\min} \approx 5 \cdot 10^{-10} \frac{1}{\sqrt{T}} \text{ м/с}^2, \quad (2)$$

которое удовлетворительно согласуется с данными других публикаций.

Подвес ЧМ на механических пружинах может быть причиной нестабильности показаний прибора из-за усталости материала пружин, влияния упругого последействия, зависимости свойств материала от температуры. При реализации столь высокой чувствительности исключение любых мешающих факторов имеет особенно важное значение.

Уменьшение  $\omega_0$  с целью увеличения чувствительности приводит к сужению динамического диапазона измерений. Уменьшение  $x_0$  и увеличение  $I_0$  и  $L$  для той же цели увеличивает обратное влияние системы СКВИД-регистрации на подвес ЧМ, что приводит к появлению дополнительной «динамической» жесткости, т. е. к увеличению  $\omega_0$ .

Из изложенного выше вытекает, что разработчики датчика Пейка при достижении требуемой чувствительности должны заботиться о других, не менее важных параметрах прибора.

#### ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МПЯ

Простейшая модель МПЯ датчика содержит две сверхпроводящие катушки с элементами ввода подвеса в рабочий режим и СКВИД с трансформатором потока (рис. 3). Верхняя катушка, закрепленная неподвижно, имеет удаленный виток, индуктивно связанный через трансформатор потока со

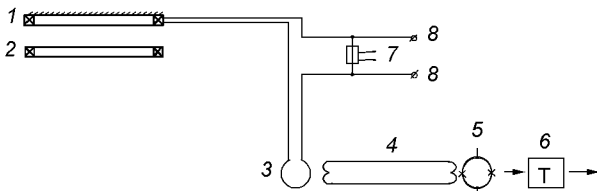


Рис. 3. Датчик на эффекте МПЯ: 1 — неподвижная катушка (вид сбоку); 2 — свободно левитирующая катушка (ЧМ); 3 — удаленный виток; 4 — трансформатор потока; 5 — СКВИД; 6 — усредняющее звено; 7 — тепловой ключ; 8 — токовводы

входом СКВИДа. Другая катушка, являющаяся ЧМ, свободно левитирует под закрепленной катушкой. На рис. 3 также показаны токовводы и тепловой ключ для ввода МПЯ подвеса в рабочий режим. Датчик имеет вертикальную ось чувствительности. На выходе включено усредняющее звено.

С точки зрения регистрации смещений ЧМ МПЯ подвес обладает весьма полезным свойством: поскольку ток в неподвижной катушке является однозначной функцией положения ЧМ, то подвес сам непосредственно регистрирует смещения взвешенной катушки. Вследствие этого в МПЯ-датчике отсутствует отдельный блок преобразователя смещений ЧМ в сигнал, способный измеряться СКВИДом [6]. Это значительно упрощает конструкцию.

Коэффициент передачи энергии от ЧМ ко входу СКВИДа в этом датчике в среднем на 2 порядка больше, чем в датчике Пейка. Вследствие этого броуновский тепловой шум ЧМ на входе СКВИДа превышает собственный шум СКВИДа, приведенный к его входной катушке.

Потенциальную чувствительность МПЯ-датчика можно оценить учитывая только броуновский шум ЧМ.

Автором получена формула (3) для оценки потенциальной чувствительности МПЯ-датчика при соотношении на выходе сигнал/шум = 1, с учетом конечного времени  $T$  усреднения выходного сигнала, и при условии высокочастотного МПЯ-подвеса ( $Q \gg \omega_0 T$ , где  $Q$  — добротность подвеса):

$$\Delta g_{\min} \approx \sqrt{\frac{2K_B T}{m}} \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Здесь  $K_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град — постоянная Больцмана;  $T \approx 4$  К — температура жидкого гелия;  $m$  — масса ЧМ,  $m \approx 0.3$  кг.

Выражение (3) справедливо при измерении низкочастотных ускорений, частота изменения которых гораздо меньше частоты  $\omega_0$ .

При указанных выше величинах получаем:

$$\Delta g_{\min} \approx 1.6 \cdot 10^{-11} \frac{1}{T} \text{ м/с}^2. \quad (4)$$

За счет большей связи ЧМ со входом СКВИДа расчетная потенциальная чувствительность МПЯ-датчика превосходит чувствительность датчика Пейка.

Видно, что  $\Delta g$  в выражении (3) более сильно зависит от времени усреднения  $T$ , чем в выражении (1).

Для увеличения чувствительности нужно увеличивать  $m$ . Экспериментальные возможности уста-

новки по проверке нагрузочной способности МПЯ-подвеса позволяли подвешивать массы до 80 кг. Основное ограничение на увеличение  $m$  накладывают масса-габаритные показатели создаваемого прибора.

К настоящему времени проведены успешные лабораторные испытания основных узлов МПЯ-датчика: МПЯ-подвес, система СКВИД-регистрации токового сигнала, блок АЦП, что позволяет надеяться на работоспособность всего макета датчика в целом.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что применение высокочувствительных датчиков позволяет решить ряд существующих проблем современной гравиметрии.

В наземных условиях демонстрация высокой чувствительности (2), (4) требует тщательного устранения или компенсации мешающих факторов. Самой значительной помехой являются естественные и промышленные колебания земной поверхности.

Поэтому наиболее предпочтительным является создание высокочувствительных датчиков, пригодных для работы на подвижном основании. Использование таких датчиков на спутниках, самолетах, кораблях и других подвижных объектах позволит осуществлять не только глобальное изучение гравитационного поля Земли с требуемыми высокими точностями, но и существенно повысить точность и автономность инерциальной навигации за счет непрерывного учета влияния уклонений отвесной линии.

Можно осуществлять навигацию по гравитационному полю и построить на гравитационных градиентометрах и акселерометрах (без использования гироскопов, создание которых с необходимой высокой точностью задача весьма сложная) гравиинер-

циальную и инерциальную навигационные системы [5]. При этом акселерометр определяет вектора линейных и угловых ускорений, действующих на платформу градиентометра. Такой акселерометр в комбинации с градиентометром является обзорной гравиинерциальной системой.

Автор благодарит О. К. Черемных за сделанные замечания и С. Д. Живило за помощь в оформлении статьи.

1. Грушинский Н. П. Основы гравиметрии. — М.: Наука, 1983.—361 с.
2. Исследования гравитационного поля и природных ресурсов Земли космическими средствами: Тез. докл. Всесоюз. конф. — Львов, 1984.—137 с.
3. Михалевиц В. С., Козорез В. В., Рашкован В. М. и др. «Магнитная потенциальная яма» — эффект стабилизации сверхпроводящих динамических систем. — Киев: Наук. думка, 1991.—336 с.
4. Chan H. A., Paik H. J., Moody M. V. Superconducting gravity gradiometer for space and terrestrial applications // J. Appl. Phys.—1991.—60, N 12.—P. 4308-4315.
5. Chan H. A., Paik H. J., et al. Superconducting techniques for gravity survey and inertial navigation // IEEE Trans. Magn.—1985.—21, N 2.—P. 411—414.
6. Kruchkov E. I. One approach to magnetic levitation and precision acceleration measurement under superconductivity conditions // IEEE Trans. Appl. Supercond.—1996.—6, N 4.—P. 157—159.

#### SENSITIVITY OF INERTIAL-GRAVITATIONAL INSTRUMENTS

E. I. Kryuchkov

The paper describes some devices based on various operating principles to be used in gravimetry, seismography, and in inertial navigation systems. Major improvements in sensitivity and drift can be made in inertial-gravitational instruments by utilizing favorable properties of materials available at low temperatures. Therefore most attention is concentrated on superconducting instruments. We propose a new superconductive gravity instrument based on the «magnetic potential well» effect.