

## Применение атомных интерферометров в гравиметрии

В. Н. БАРЫШЕВ, И. Ю. БЛИНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: baryshev@vniiftri.ru

Показано, что с появлением и развитием в Российской Федерации лазерных фонтанных технологий охлаждения и управления движением атомов стало возможным создание атомных интерференционных гравиметров с точностными характеристиками, сравнимыми с характеристиками гравиметров на свободно падающем угольном отражателе. По кратковременной стабильности атомные гравиметры превосходят существующие.

**Ключевые слова:** гравиметрия, атомная интерферометрия, атомный гравиметр, квантовый проекционный шум.

*It has been shown that with the development in Russian Federation of laser fountain cooling and motion of atoms control technologies the solution of problem of development of atomic interferometry gravimeters comparable in accuracy with the best classical gravimeters and superior in short-term stability became possible.*

**Key words:** gravimetry, atomic interferometry, atomic gravimeter, quantum projection noise.

За последние 20 лет развитие атомной интерферометрии материальных волн привело к усовершенствованию техники измерений инерциальных сил [1], нашедшей применение как в фундаментальной физике, так и в прикладных исследованиях. Атомную интерферометрию используют при создании новых инерциальных сенсоров, которые сегодня могут конкурировать с наиболее точными из подобного рода классических приборов. Число приложений атомных интерференционных инерциальных сенсоров быстро растет — от измерений физических фундаментальных констант, например гравитационной постоянной  $G$  [2] и параметров вращения, до разработки возимых компактных приборов, гравиметров и градиометров. Такие приборы применяют в навигации, картографии гравитационных полей, которые можно проводить, в том числе, в условиях низкой гравитации [3].

Измерения ускорения свободного падения  $g$  на поверхности Земли представляют важную геофизическую информацию о ее внутренней структуре, локализованных профильных подземных изменениях плотности, а также изменениях гравитационного поля во времени вследствие различных деформационных процессов. Чувствительность гравиметров, необходимая для разрешения пространственных гравитационных вариаций, составляет порядка 20 мкГал (1 Гал =  $10^{-2}$  м/с<sup>2</sup> =  $10^{-3}$  g). Скорость локального изменения  $g$  для многих деформационных процессов 1 мкГал · год<sup>-1</sup>. Абсолютные измерения  $g$  имеют большое значение, например, при создании нового эталона массы [4].

Принципы атомной интерферометрии, проводимой с помощью двухфотонного рамановского процесса, детально описаны в [5]. В этом процессе долго живущие уровни  $|a\rangle$ ,  $|b\rangle$  основного состояния атома связаны двумя световыми полями через общий промежуточный уровень  $|e\rangle$ , который находится далеко (несколько гигагерц) от ближайшего воз-

бужденного уровня, связанного с уровнями  $|a\rangle$ ,  $|b\rangle$  процессом однофотонного поглощения. Атом может находиться или в состоянии  $|a\rangle$  (черные линии), или в состоянии  $|b\rangle$  (серые линии) (рис. 1). Принцип действия атомного интерферометра можно пояснить с помощью трех рамановских импульсов, разделенных во времени и (или) пространстве. Первый  $\pi/2$ -импульс переводит атомы, предварительно перемещенные на какой-либо один из уровней основного состояния, в когерентную суперпозицию состояний  $|a\rangle$ ,  $|b\rangle$ . В стоячей световой волне, созданной распространяющимся навстречу друг другу излучением, этот импульс, подобно расщепителю луча в оптике, создает две пространственно разнесенные материальные волны. Следующий  $\pi$ -импульс перекидывает оба внутренних состояния и моменты обеих материальных волн подобно зеркалу. С помощью третьего  $\pi/2$ -импульса проводится пространственная рекомбинация и смешивание материальных волн аналогично тому, как это происходило при первом  $\pi/2$ -импульсе.

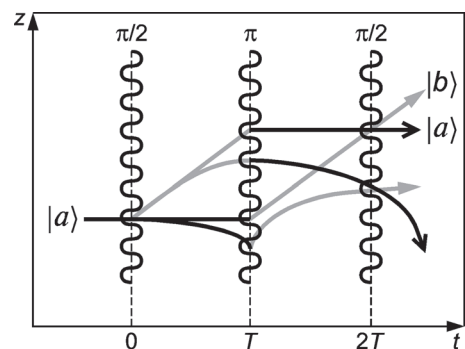


Рис. 1. Иллюстрация (по Стивену Чу) принципа атомного интерферометра в гравитационном поле (кривые линии) и при его отсутствии (пунктирные линии)

Изменение разности фаз между материальными волнами приводит к изменению разности заселенностей между атомными состояниями  $|a\rangle, |b\rangle$ . Эту разность измеряют с помощью селективного по состояниям процесса детектирования флюоресценции, точно такого же, который применяют в атомных стандартах частоты фонтанного типа для измерения вероятности часового микроволнового перехода:

$$P = N_{|a\rangle} / (N_{|a\rangle} + N_{|b\rangle}),$$

где  $N_{|a\rangle}, N_{|b\rangle}$  — число атомов в состояниях  $|a\rangle, |b\rangle$ , соответственно.

В атомном интерферометре вероятность перехода

$$P_{|a\rangle} = N_{|a\rangle} / (N_{|a\rangle} + N_{|b\rangle})$$

зависит от относительных фаз  $\Delta\varphi_i, \Delta\varphi_n$  соответственно обеих материальных волн интерферометра и световых полей между первым и вторым, вторым и третьим рамановскими импульсами:

$$P_{|a\rangle} = [1 + C \cos(\Delta\varphi_i + \Delta\varphi_n)] / 2, \quad (1)$$

где  $C$  — контраст детектируемого сигнала интерферометра;  $\Delta\varphi_n = \varphi_1 - 2\varphi_2 + \varphi_3$  — обобщенная фаза, являющаяся результатом взаимодействия атомного диполя с  $i$ -м рамановским импульсом ( $i = 1, 2, 3$ ).

Фазовая разность интерферометра  $\Delta\varphi_i$  зависит только от относительного движения атома по отношению к световым полям, управляющим рамановскими процессами. Это движение обусловлено инерциальными силами в результате вращения и свободного падения так, что  $\Delta\varphi_i = \Delta\varphi_{вр} + \Delta\varphi_g$ .

Сдвиг фаз, вызванный вращением

$$\Delta\varphi_{вр} = \frac{2}{\hbar c^2} E (\omega \mathbf{S}),$$

зависит от площади  $\mathbf{S}$ , на которую падают материальные волны интерферометра, ориентации нормали к площади, вектора вращения  $\omega$ , релятивистской энергии  $E = mc^2$  атома массой  $m$ , скорости света  $c$  и константы Планка  $\hbar$ . В [6] показано, что, например, для атома рубидия и видимого света

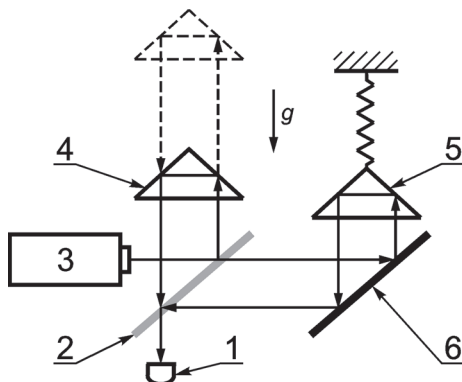


Рис. 2. Концептуальная схема гравиметра на свободно падающем уголкового отражателе:

1 — фотодетектор; 2 — делитель пучка; 3 — лазер; 4 — свободно падающий уголкового отражатель; 5 — виброизолированный отражатель; 6 — зеркало

частотой  $\nu$  в атомном интерферометре при одинаковых покрываемых площадях этот сдвиг фаз в  $mc^2/\hbar \sim 10^{10}$  раз больше, чем в оптических интерферометрах. Данный факт демонстрирует высокий потенциал атомного интерферометра как альтернативы гироскопам, базирующимся исключительно на световых волнах, несмотря на меньшие значения отношения сигнал — шум и покрываемой интерферометром площади.

Ускорение свободного падения  $g$  вызывает фазовый сдвиг интерферометра

$$\Delta\varphi_g = (\mathbf{k}_{эфф} \mathbf{g}) T^2,$$

где  $\mathbf{k}_{эфф}$  — эффективный волновой вектор рамановских лазерных лучей;  $T$  — время между импульсами. Таким образом, выбрав соответствующую геометрию интерферометра, можно выделить такой режим его работы, когда он функционирует только как гравиметр или гироскоп, что свидетельствует о широких функциональных возможностях атомной интерферометрии. В вертикальной стоячей волне, образуемой рамановским излучением, интерферометр будет представлять гравиметр. В атомных гравиметрах, как и в стандартах частоты фонтанного типа, вертикальное движение атомов происходит вследствие подброса облака атомов, охлажденных лазерным излучением до температур порядка 1 мК. Низкие скорости (порядка 1 см/с) атомов позволяют увеличить интервал  $T$ , а значит, и чувствительность гравиметра.

В [5] дано сравнение характеристик существующих на сегодняшний день гравиметров. Анализ их шумовых характеристик показывает, что независимыми от дрейфа сигналов и необходимости периодической перекалибровки являются классический гравиметр на свободно падающем уголкового отражателе и атомные гравиметры. Отсутствие необходимости перекалибровки объясняется тем, что в обоих случаях при вычислении ускорения свободного падения используется частота лазерного излучения, связанная с известной частотой оптических атомных переходов, не подверженных дрейфу с течением времени.

Таким образом, сегодня только два абсолютных гравиметра способны обеспечить требуемую точность измерений ускорения свободного падения на уровне  $10^{-9} g$  или 1 мкГал. Это атомный гравиметр, разработанный в лаборатории нобелевского лауреата Стивена Чу [5], и промышленный гравиметр на свободно падающем уголкового отражателе FG5 фирмы Micro-g Solutions [7, 8]. Последний представляет лазерный интерферометр, образованный двумя уголковыми отражателями, один из которых периодически находится в свободном падении, а другой зафиксирован (рис. 2). В течение времени  $T$  свободного падения определяется число интерференционных максимумов, которое соответствует длине свободного падения  $L$ , ускорение свободного падения  $g = 2L/T^2$ , частота циклов измерений — 0,1 Гц, продолжительность одного измерения — 200 мс. Кратковременное разрешение или чувствительность составляет 4—15 мкГал за 15 мин измерений, долговременное разрешение — 1 мкГал за 10 ч. Неисключенная систематическая погрешность (НСП) измерений — 2 мкГал. Низкая частота повторения циклов измерений увеличивает чувствительность гравиметра на уголкового отражателе к низкочастотным шумам.

В атомном интерферометре [5] детектируется сигнал, пропорциональный изменению положения атомов, произошед-

шему за времена между рамановскими импульсами 0 и  $T$ ,  $T$  и  $2T$ . Разность в положении пропорциональна ускорению  $g$ . Частота циклов измерений составляет 2–3 Гц, продолжительность одного измерения — 200 мсек. Кратковременное разрешение — 3 мкГал за 1 мин измерений, долговременное разрешение — 0,1 мкГал за 48 ч. Достижение такого продолжительного времени усреднений, определяемого бесперебойной работой лазерной системы интерферометра, в настоящее время не является большой проблемой. Например, лазерная система цезиевого репера частоты фонтанного типа, разработанного во ВНИИФТРИ [9], способна функционировать без срывов частотной автоподстройки на протяжении нескольких недель. НСП измерений гравиметра составляет 3 мкГал. Высокая частота циклов измерений позволяет проводить усреднение на более коротких временных интервалах.

До недавнего времени атомные гравиметры конструктивно и функционально представляли более сложные и громоздкие системы по сравнению с классическими, в частности, на уголковых отражателях. Однако с развитием техники охлаждения атомов и появлением новых высокостабильных лазерных систем конструкция атомных гравиметров постепенно упрощалась.

В [3, 10, 11] показано, что использование в гравиметре техники охлаждения атомов в компактных магнитооптических ловушках (МОЛ) (рис. 3) и применение высокостабильных оптоволоконных лазерных и оптоэлектронных систем позволяет реализовать компактный атомный гравиметр, размеры которого уменьшены с сотен до нескольких литров объема по сравнению с размерами гравиметров фонтанного типа. Подобные приборы, снабженные системами компенсации остаточных вибрационных шумов с помощью сигналов коррекции от вспомогательного механического сейсмометра, открывают новые возможности их использования в гравиметрии, выполняемой на местности или на борту космического аппарата. Несмотря на уменьшение длительности опросного цикла в гравиметрах на свободно падающих из МОЛ медленных атомах по сравнению с гравиметрами фонтанного типа, первые сохраняют превосходную кратковременную стабильность измерения  $g$  на уровне нескольких единиц  $10^{-8} g$  в интервале усреднения 1 с. Этот результат достигается, в первую очередь, вследствие применения высокостабильной лазерной системы с низкими фазовыми шумами, эффективных схем детектирования атомной фазы и подавления вибрационных шумов. Шум при измерениях вероятности перехода, определяемой по разности заселенностей сверхтонких уровней основного состояния щелочных атомов, ограничен квантовым проекционным шумом:  $\sigma \sim N^{-1/2}$ , где  $\sigma$  — стандартное отклонение измеряемой вероятности перехода  $P_{|a\rangle}$  (1),  $N = N_{|a\rangle} + N_{|b\rangle}$  — общее число детектируемых атомов [12]. При детектировании большого количества атомов, которое достигается применением МОЛ и вспомогательных источников медленных атомов, этот шум становится доминирующим над другими, такими как дробовой шум фотодетекторов, также пропорциональный  $N^{-1/2}$ , шум детектирующей системы, пропорциональный  $N^{-1}$ , фазовые шумы частотной разности рамановского лазерного излучения.

Таким образом, в настоящее время создание атомных гравиметров на холодных атомах с точностными характеристиками, сравнимыми с характеристиками классических гравиметров, является решаемой и реально осуществимой за-

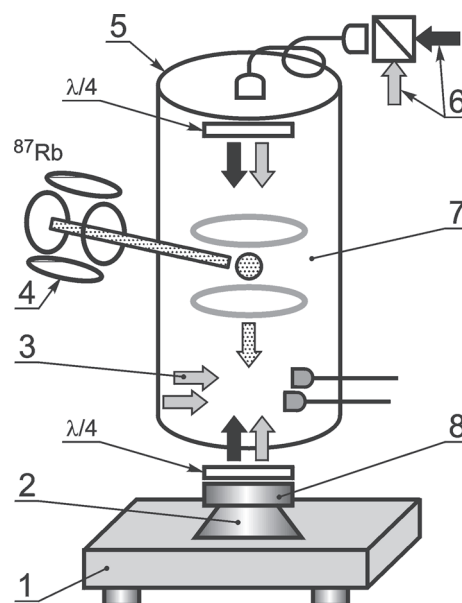


Рис. 3. Схема гравиметра на медленных атомах в магнитооптических ловушках:

1 — изолирующая платформа; 2 — сейсмометр; 3 — детектирующие лучи; 4 — 2D-МОЛ; 5 — магнитные экраны; 6 — рамановские пучки; 7 — 3D-МОЛ; 8 — зеркало

дачей. Лазерные технологии охлаждения атомов, разработанные во ВНИИФТРИ при создании микроволновых реперов частоты фонтанного типа, а также новые конструктивные подходы по созданию компактных атомных интерферометров с расширенным спектром функциональных возможностей, могут быть использованы при создании атомных интерференционных гравиметров.

## Л и т е р а т у р а

1. **Atom interferometry.** Ed. Berman P. R. San Diego: Academic press, 1997.
2. **Sorrentino F. e. a.** Sensitive gravity-gradiometry with atom interferometry: progress towards an improved determination of gravitational constant // *New J. Phys.* 2010. V. 12. P. 095009-096009.
3. **Stern G. e. a.** Light-pulse atom interferometry in microgravity // *Eur. Phys. J. D.* 2009. V. 53. P. 353—357.
4. **Robinson I., Kibble B.** An initial measurement of Planck's constant using the NPL Mark II watt balance // *Metrologia.* 2007. V. 44. P. 427—440.
5. **Peters A., Chung K., Cho S.** High-precision gravity measurements using atom interferometry // *Metrologia.* 2001. V. 38. P. 25—61.
6. **Muller T. e. a.** A compact dual atom interferometer gyroscope based on laser-cooled rubidium // *Eur. Phys. J. D.* 2009. V. 53. P. 273—281.
7. **Hinderer J. e. a.** Tides, earthquakes and ground noise as seen by the absolute gravimeter FG5 and its superspring; comparison with a superconducting gravimeter and a broadband seismometer // *Metrologia.* 2002. V. 39. P. 495—501.
8. **Vitushkin L. e. a.** Results of the Sixth International Comparison of Absolute Gravimeters, ICAG-2001 // *Metrologia.* 2002. V. 39. P. 407—424.

9. Домнин Ю. И. и др. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 26—30;  
Domnin Yu. S. e. a. The MTsR-F2 fountain-type cesium frequency standard // Measurement Techniques. 2012. V. 55. № 10. P. 1155—1162.

10. Bodart Q. e. a. Cold atom pyramidal gravimeter with a single laser beam // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 134101.

11. Le Gouet J. e. a. Limits to the sensitivity of a low noise compact atomic gravimeter // Appl. Phys. B. 2008. V. 92. P. 133—144.

12. Santarelli G. e. a. Quantum Projection Noise in an Atomic Fountain: A High Stability Cesium Frequency Standard // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. № 23. P. 4619—4622.

Дата принятия 04.09.2014 г.

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

621.3.088

### Анализ достоверности измерительного контроля энергопроизводительности фотоэлектрических модулей

С. А. БОГОМОЛОВА\*, Ю. Е. ЛУКАШОВ\*\*, М. З. ШВАРЦ\*\*\*

\* Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия,  
e-mail: s\_bogomolova@mail.ru

\*\* Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,  
Москва, Россия, e-mail: luksh103@vniims.ru

\*\*\* Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург,  
Россия, e-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

Представлена методика анализа результатов измерений нормируемых выходных характеристик фотоэлектрических модулей при описании системы контроля их энергопроизводительности. Определены статистические характеристики распределений вероятностей нормируемых параметров и погрешностей оценок их значений. Сформирована математическая модель описания вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода в зависимости от стандартных неопределенностей трех основных нормируемых фотоэлектрических параметров. При заданном показателе достоверности контроля (суммарном риске потребителя) определены стандартные неопределенности фотоэлектрических параметров.

**Ключевые слова:** измерительный контроль, достоверность, фотоэлектрический модуль, энергопроизводительность, фотоэлектрические параметры.

A procedure of data analysis at description of the system of measuring control of photoelectric module power generation — is presented. The statistical characteristics of probability distributions for normalized parameters and for errors of their values estimation have been determined. A mathematical model for describing the probabilities of I and II type errors depending on standard uncertainties for three basic photoelectric parameters has been formed. At the preset value of control reliability indicator (consumer total risk) the values of standard uncertainties of photoelectric parameters have been determined.

**Key words:** measuring control, reliability, photoelectric module, power generation, photoelectric characteristics.

Целью контроля качества фотоэлектрических приборов, равно как и любых других технических устройств, является получение информации для принятия решения об их соответствии требованиям, установленным технической документацией на изделия. При этом результат оценки установленного параметра или определенной характеристики изделия сравнивается с заранее определенными допусковыми границами. Рекомендации по организации и проведению подобных процедур контроля рассмотрены в ряде нацио-

нальных и международных документов [1—4]. Очевидно, что если все значения оцененных характеристик изделия лежат в допустимых пределах, изделие считается годным, в противном случае — бракованным. Решение о соответствии или несоответствии изделия установленным требованиям принимает оператор или автоматическое решающее устройство. В любом случае результат оценки обусловлен как разбросом действительных значений контролируемой величины, так и погрешностью (неопределенностью) измерений.