

Т. ФАРА, К. ГЕРЛЕН, А. ЛАНДРАЖЕН, Ф. БУЙЕ, С. ГАФФЕ, Ф. ПЕРЕЙРА ДОС САНТОС,
С. МЕРЛЕ

ТРАНСПОРТИРУЕМЫЙ ГРАВИМЕТР НА ХОЛОДНЫХ АТОМАХ РАЗРАБОТКИ LNE-SYRTE: РАБОТА В ПОДЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ В РЕЖИМЕ НАИЛУЧШЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Под землей, при низком уровне шума, создаются условия для наиболее эффективной работы высокочувствительных датчиков: акселерометров, гиromетров, сейсмометров. Эти приборы идеально подходят для наблюдения чрезвычайно слабых сигналов в рамках геофизических исследований. В подземной лаборатории малых шумов Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB), где установлен наш гравиметр на холодных атомах, обеспечены необходимые условия. В настоящей статье сообщается о достижении наилучшей кратковременной чувствительности такого прибора без использования системы виброизоляции колебаний грунта: 10^{-8} м/с² за 100 с измерения.

Введение

Прогресс в высокоточных геофизических измерениях тесно связан с развитием чувствительных приборов. Атомная интерферометрия предлагает новую концепцию построения инерциальных датчиков [1], среди которых для записи геофизических сигналов наиболее хорошо подходят абсолютные гравиметры [2]. В настоящее время атомные гравиметры демонстрируют характеристики на уровне лучших в своем классе, что подтверждается тремя последними международными сравнениями гравиметров [3, 4]. Прибор,

Фара Тристан. Лаборатория LNE-SYRTE, Парижская обсерватория (Париж, Франция).

Герлен Кристина. Лаборатория LNE-SYRTE, Парижская обсерватория.

Ландражен Арно. Лаборатория LNE-SYRTE, Парижская обсерватория.

Буйе Филипп, Лаборатория фотонных, цифровых и наноисследований, Университет Бордо (Таланс, Франция).

Гаффе Стефан. Лаборатория LSBB (Рюстрель, Франция).

Перейра дос Сантос Франк. Лаборатория LNE-SYRTE, Парижская обсерватория.

Мерле Себастьян. Лаборатория LNE-SYRTE, Парижская обсерватория.

Статья по докладу на симпозиуме по гравиметрии «IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, 2013».

Научный редактор перевода д.т.н. А.К.Вершовский.

представленный ниже в данной статье, также впервые принял участие в сравнении.

Кроме обеспечения высокочувствительных абсолютных измерений атомные инерциальные датчики обладают еще рядом преимуществ, а именно робастностью и универсальностью: им не требуется калибровка, они могут работать в самых разных условиях, как на самолете [5], так и в подземной исследовательской лаборатории на глубине 500 м (как описано в данной статье). Гравиметрические датчики на холодных атомах расширяют диапазоны шкал времени и расстояний измеряемых сигналов: частота повторения измерений доходит до 330 Гц [6], а возможность использования нескольких атомных облаков в разных положениях в общем лазерном поле [7] позволяет осуществлять длиннобазисную градиентометрию. Данный принцип лежит в основе инновационной гравитационной лазерной интерферометрической антенны на волнах материи MIGA [8] (<http://www.materwave-antenna.org>), которая установлена в подземной исследовательской лаборатории с низким уровнем шумов в Рюстреле (lsbb.eu). Устройство будет использовать преимущества спокойного окружения, характерные для этой лаборатории. Несколько атомных интерферометров будут размещены в двух галереях длиной несколько сот метров, что обеспечит возможность измерения многомерных гравитационных градиентов и моментов высокого порядка; это даст возможность изучить взаимодействие между нашей средой обитания, биосферой, внутренними слоями Земли, атмосферой, ближайшим космосом и разработать приборы с непревзойденным уровнем чувствительности.

В настоящее время качество работы атомных интерферометров ограничено внешними помехами, – наклонами, вибрациями грунта и паразитными вращениями. У акселерометров, способных измерять постоянные ускорения, чувствительность особенно сильно ограничена паразитными вибрациями, особенно при выполнении измерений в городских или промышленных районах. Для компенсации вибраций грунта были выработаны различные стратегии с использованием пассивных [9] или активных систем виброизоляции [2, 10, 11] либо беслатформенных конструкций без изоляции [12, 13]. В качестве альтернативного варианта можно производить измерения в местах с низким уровнем вибрационного шума – таких, как пустыни, заброшенные шахты [14] и другие подземные галереи. Также для испытаний атомных интерферометров можно выделить место на специализированном или естественном спутнике [15, 16, 17, 18].

В данном контексте и в рамках первого шага к проекту MIGA наш гравиметр на холодных атомах был установлен в лаборатории LSBB, чтобы оценить, какие преимущества обеспечивает такая малозумная среда. В статье представлены результаты измерений. В частности, благодаря малозумности среды была достигнута беспрецедентная кратковременная чувствительность гравиметра при работе без системы виброизоляции.

Транспортируемый атомный гравиметр

Абсолютный гравиметр, разработанный в лаборатории LNE-SYRTE (код CAG-01 в Международном сравнении абсолютных гравиметров) работает с лета 2009 г. Он участвовал в трех основных последних международных и европейских сравнениях [3, 4]: ICAG'09 в Бюро мер и весов в Париже (Франция), ECAG'11 и ICAG'13 в Вальферданже (Люксембург). В период

между первыми двумя сравнениями оптический стенд [19] и две стойки с управляющей электроникой были объединены в единую систему, обеспечивающую более легкое перемещение гравиметра. Теперь прибор состоит из двух частей: «ядра» гравиметра и электронного стенда (рис. 1).

Как описано в [20], пробная масса гравиметра представляет собой облако холодных атомов ^{87}Rb при температуре 2 μK , которое падает под воздействием силы тяжести после адиабатического отключения лазерных лучей, создающих трехмерную магнитно-оптическую ловушку. Во время свободного падения последовательность из трех стимулированных рамановских переходов ($\pi/2$ - π - $\pi/2$) разделяет по двум траекториям, а затем вновь объединяет атомную волновую функцию с помощью двух вертикальных лазеров с частотами ω_1 и ω_2 и длинами волн $\vec{k}_1$ и $\vec{k}_2$. Эти лазеры возбуждают двухфотонный переход между двумя сверхтонкими подуровнями $|F=1\rangle$ и $|F=2\rangle$ основного состояния $^5\text{S}_{1/2}$. Фазовый сдвиг интерферометра $\Delta\Phi$ выводится из измерения заселенности двух выходных состояний с помощью метода маркировки состояний [21].

Полученная вероятность перехода равна $P = \frac{1}{2}(1 + C \cos \Delta\Phi)$, где C – контраст интерферометра. Период повторения цикла составляет 360 мс.

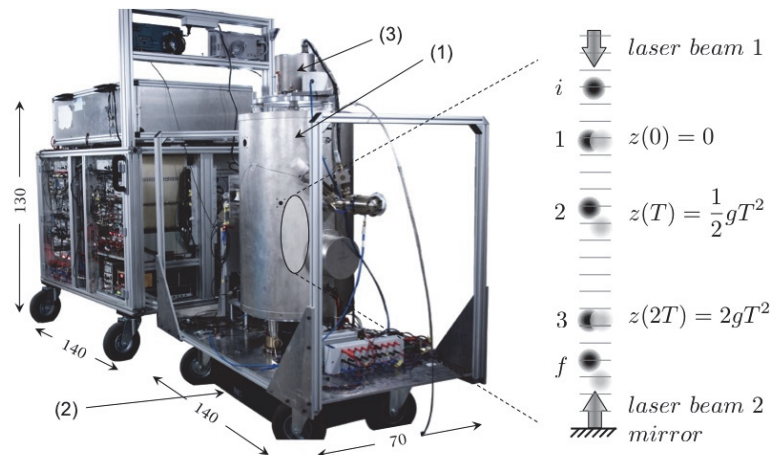


Рис. 1. Слева – изображение гравиметра. На первом плане: вакуумная камера, расположенная внутри цилиндрических магнитных экранов (1), опирается на черную изолирующую платформу (2), сейсмометр прикреплен к камере сверху (3). На втором плане: оптический стенд и электроника. Размеры даны в сантиметрах. Справа – увеличенная схема отсека свободного падения, демонстрирующая последовательные положения атомов относительно эталонной системы координат, заданной двумя лазерными лучами: (i) – начальное положение ловушки, 1) 2) 3) – положения при импульсах, (f) – окончательное положение измерения

Каждый раз при воздействии на атомы светового импульса сдвиг фаз рамановских лазеров ϕ запоминается в атомной фазе. Эта фаза зависит от положения атомов относительно поверхностей равных разностей фаз между лазерными лучами; эти поверхности образуют точную «линейку» для измерения смещения атомов. Полный фазовый сдвиг между траекториями I и II зависит от гравитационного ускорения g , разности волновых векторов $\vec{k}_{eff}$ между лазерами ($\vec{k}_{eff} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$) и изменяется пропорционально квадрату временного интервала между двумя последовательными импульсами T [22]:

$$\Delta\Phi = \Phi_{II} - \Phi_I = \varphi(0) - 2\varphi(T) + \varphi(2T) = \vec{k}_{eff} \cdot \vec{g} T^2.$$

Два лазерных луча подаются к атомам через общий коллиматор и отражаются зеркалом, помещенным на дне сверхвысоковакуумной камеры. Такая архитектура обеспечивает воздействие на атомы четырех лучей [20], что позволяет осуществить работу интерферометра на переходах, вызванных лучами, распространяющимися в одном или во встречных направлениях. Гравитационные измерения проводятся с использованием встречных волновых векторов. Благодаря сохранению углового момента и доплеровскому сдвигу, вызванному свободным падением атомов, только два из четырех лучей оказываются резонансны рамановскому переходу и способны возбудить его. Тем не менее изменение поляризации рамановских лучей и настройка разности частот между рамановскими лазерами в резонанс со сверхтонким переходом позволяет интерферометру работать и при попутных волновых векторах. Это снижает чувствительность к g и паразитным вибрациям на пять порядков при сохранении чувствительности фазы интерферометра $\Delta\Phi$ ко всем остальным источникам шума. Другое преимущество четырехлучевой рамановской геометрии состоит в обеспечении возможности выбора (за счет настройки знака доплеровского сдвига) между двумя парами лучей для реализации встречных рамановских переходов при волновом векторе, направленном вверх ($k_{\uparrow}$) или вниз ($k_{\downarrow}$).

Рамановские лазеры стабилизируются методом фазовой привязки к микроволновому малому шумящему эталонному источнику. Разность их частот сканируется в соответствии с формулой $\omega_2 - \omega_1 = \omega_2(0) - \omega_1(0) + \alpha t$, для того чтобы скомпенсировать доплеровский сдвиг, возникающий в результате гравитационного ускорения. В результате к фазе интерферометра добавляется член αT^2 , что обеспечивает идеальную компенсацию доплеровского сдвига. Таким образом, центральная интерференционная полоса интерферометра соответствует $\alpha_0 = \vec{k}_{eff} \cdot \vec{g}$ (рис. 2). Значение g выводится из значения линейной частотной модуляции α_0 и действительного волнового вектора.

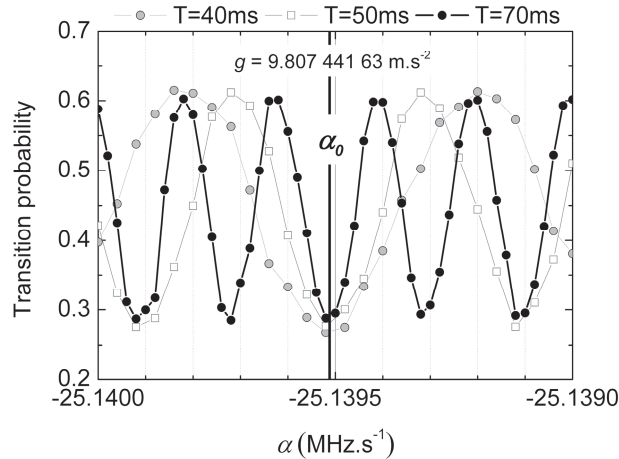


Рис. 2. Интерференционные полосы интерферометра в условиях лаборатории LSBB, полученные сканированием α для разных T . Центральная полоса α_0 , чье положение не зависит от T , соответствует скорости модуляции, которая компенсирует гравитационное ускорение.
Transition probability – Вероятность перехода

Поскольку максимальная чувствительность к фазовым колебаниям достигается при работе интерферометра на середине полосы ($\Delta\Phi = \pm\pi/2$), рамановская фаза модулируется на $\pm\pi/2$, чтобы измерение всегда производилось на половинной высоте полосы, попеременно с обеих сторон центральной полосы. По двум последовательным измерениям вероятности перехода P_i и P_{i+1} можно оценить погрешность фазы. На практике на каждом цикле к α добавляется поправка $G \times (P_i - P_{i-1})$, чтобы привести скорость модуляции к центральной интерференционной полосе [12]. Таким образом реализуется интегратор.

Отношение сигнал/шум ограничивается временными флуктуациями сдвига фаз лазеров. Влияние помех, вызванных лазерным фазовым шумом, уменьшается за счет стабилизации разностной фазы двух лазеров. Среди множества других источников помех, влияющих на чувствительность, доминируют вибрации грунта [9]. Чтобы снизить их влияние, гравиметр устанавливается на пассивной изолирующей платформе (Minus K 650BM-1 [23], вертикальная собственная частота которой составляет 0,5 Гц). Более того, в фазу интерферометра $\Delta\Phi$ вносится поправка на эффект остаточного вибрационного шума, который измеряется отдельно с помощью малошумного сейсмометра (Guralp T40), жестко закрепленного на корпусе вакуумной камеры (рис. 1). Полная схема подавления вибраций описана в [9, 12], процесс коррекции вибраций представлен на рис. 3. В [9], в частности, продемонстрировано, что эффективность подавления ограничена передаточной функцией сейсмометра.

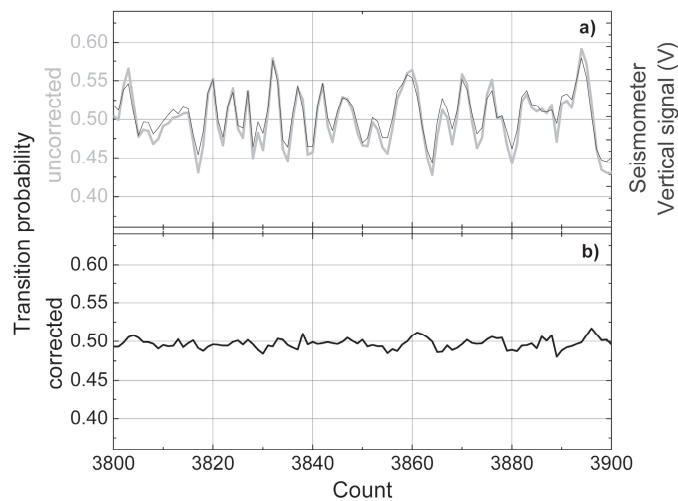


Рис. 3. Вероятность перехода в интерферометре без изолирующей платформы в условиях лаборатории LSBB: (a) Жирная светло-серая линия обозначает исходную вероятность перехода, темная серая линия – вертикальный сигнал сейсмометра. Оба сигнала коррелируются; (b) Вероятность перехода корректируется по сигналам сейсмометра. Откорректированная вероятность перехода показана жирной черной линией.

Transition probability – Вероятность перехода
До коррекции/После коррекции
Вертикальный сигнал сейсмометра
Отсчеты

Условия измерений в лаборатории LSBB

Подземная лаборатория с низким уровнем шума LSBB (lsbb.eu) расположена в городе Рюстрель на юге Франции. Ранее лаборатория была частью инфраструктуры национальной системы ядерных ракет наземного базирования. Сегодня это междисциплинарная подземная лаборатория [24], которую отличают удаленное местоположение и прочная конструкция (здание построено так, что выдержит даже ядерный взрыв). В таком здании можно осуществлять научные измерения в условиях ультранизкого шума. В частности, в лаборатории установлено несколько сейсмометров сейсмической антенны 3D RUSF [25, 26]. Задача всей этой установки состояла в защите «капсулы» пускового поста – клетки Фарадея, размещенной в самой глубокой зоне 3,5-километрового туннеля на глубине более 500 м ниже уровня земли. Рядом с капсулой оборудована комната R10 площадью 10 м^2 для размещения гравиметра. Чтобы скомпенсировать неровности грунта, камера гравиметра была установлена на специальной бетонной колонне размером $1,6 \times 1,6 \times 0,17\text{ м}$ (рис. 4).

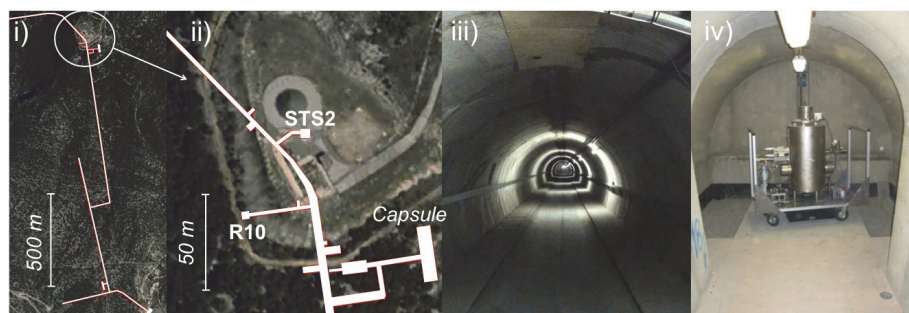


Рис. 4. Лаборатория LSBB. Слева направо: i) Аэроснимок горы, где находится лаборатория LSBB; ii) Увеличенное изображение зоны комнаты R10, где установлен гравиметр. На расстоянии 50 м сейсмометр STS2 (RUSF.01) постоянно записывает вибрации грунта; iii) Фото туннеля; iv) Камера гравиметра, установленная в комнате R10

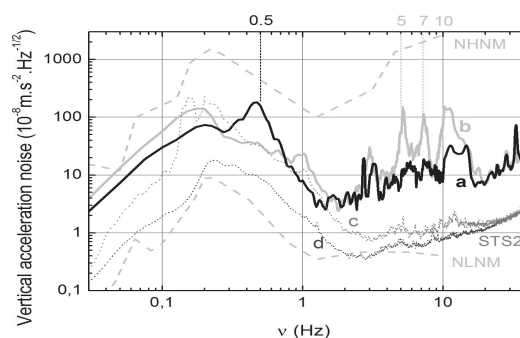


Рис. 5. Спектр шума вертикального ускорения в условиях лаборатории LSBB. Кривые *a* и *b* обозначают спектры шума, полученные с использованием (или без использования) изолирующей платформы, измеренные в дневное время сейсмометром гравиметра. Спектр *c* получен в то же время при использовании расположенного неподалеку сейсмометра STS2 (RUSF.01), спектр *d* получен в мае 2012 г. и демонстрирует еще лучшие вибрационные условия.

На графике также изображены модели Петерсона

На рис. 5 показаны спектры вертикальных вибраций, измеренные сейсмометром гравиметра в течение дня с использованием (или без использования) изолирующей платформы (жирные линии *a* и *b*). При использовании пассивной платформы с соответствующей резонансной частотой на частоте 0,5 Гц появляется широкий резонанс. Как ни странно, за исключением частот 5, 7 и 10 Гц, не наблюдается значительного снижения шума на высоких частотах, которые платформа должна отфильтровывать. Мы проверили, что измерения не ограничиваются ни шумом анализатора БПФ (HP 3561A), ни собственным шумом сейсмометра (который начинает доминировать только выше 40 Гц). Мы приписываем этот шум акустическим помехам и воздушному потоку, генерируемому управляющей электроникой гравиметра (компьютерные вентиляторы, регулируемые источники питания и т.д.).¹

Влияние двух этих факторов на камеру было минимизировано за счет удаления электронных блоков от камеры на максимальное расстояние, ограниченное длиной оптоволокну (около 2 м), соединяющего управляющую электронику с камерой гравиметра. За счет этих мер удалось добиться значительного снижения помех в диапазоне от 1 до 10 Гц.

Спектр, полученный в тот же день с помощью сейсмометра RUSF.01 (STS2), удаленного на 50 м (линия *c* на рис. 5) на низких частотах аналогичен, но нечувствителен к акустическим шумам, генерируемым в помещении, где находится гравиметр. Этот уровень вибрационного шума – не самый низкий из записанных в этом месте. Линия *d* на рис. 5 обозначает спектр, записанный в мае 2012 г. с помощью того же сейсмометра STS2; этот спектр демонстрирует существенно более низкий уровень шума, приближающийся к предсказаниям «Новой модели низких шумов Петерсона» [28].

Измерения, проведенные с помощью атомного гравиметра

Для представленных здесь измерений реализованы два чередующихся цикла интегрирования, соответствующих противоположным волновым векторам. В реальности направление волнового вектора $\vec{k}_{eff}$ менялось в каждом цикле. Совмещая результаты двух интегрирований, мы получили гравиметрические измерения, скорректированные с учетом фазового сдвига, связанного с однофотонным световым сдвигом (*т.е. со световым сдвигом, вызванным нерезонансными однофотонными виртуальными переходами – A.V.*), а также их флуктуациями на временах, больших, чем продолжительность цикла [2, 20]. Таким образом, была существенно снижена чувствительность к флуктуациям мощности рамановских лазеров. В соответствии с обычно используемым нами для точных измерений g [20] протоколом измерения не вводилась поправка на эффект, связанный с двухфотонным световым сдвигом [29], так как это потребовало бы дополнительных измерений, отрицательно влияющих на кратковременную чувствительность гравиметра.

На рис. 6 показаны примеры измерений, полученных в ночное время и на выходных с помощью изолирующей платформы при использовании двух интегрирований с противоположными волновыми векторами, что приводит к

¹ Чтобы защитить камеру гравиметра от акустического шума в нашей лаборатории [27], мы обычно помещаем ее в деревянный контейнер, покрытый плотной изоляционно-акустической пеной. Контейнер был слишком велик для помещения на бетонную колонну, поэтому мы его не использовали.

продолжительности цикла 2×360 мс. На рис. 6 каждая точка данных соответствует 720 мс. Поскольку резонансная частота пассивной изолирующей платформы составляет 0,5 Гц, она эффективно отфильтровывает вибрационный шум выше 1 Гц за счет небольшого усиления шума в диапазоне 0,1–1 Гц.

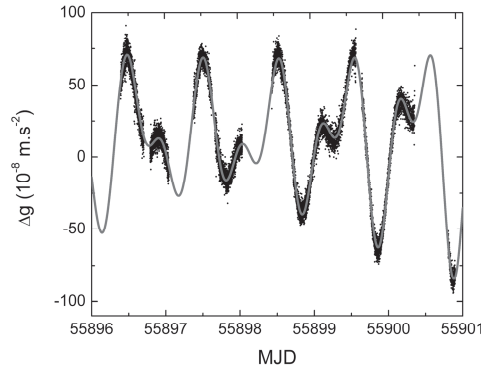


Рис. 6. Некорректированные измерения приливных сил гравиметром с 01/12/2011 до 06/12/2011 в условиях лаборатории LSBB (MJD – Modified Julian Day). Одна черная точка соответствует двум падениям атомного облака (720 мс). Вариация предсказания приливов показана серым цветом

Поскольку в лаборатории LSBB шум выше 1 Гц крайне низок (см. рис. 4), также были выполнены измерения без изолирующей платформы. Результаты представлены на рис. 7, где приведена стандартная девиация Аллана для флуктуаций силы тяжести, т.е. статистическая неопределенность как функция времени осреднения. Четыре линии на графике соответствуют измерениям с изолирующей платформой (a) и без нее (b) с применением последующих коррекций (черная линия) или без них (серая линия).

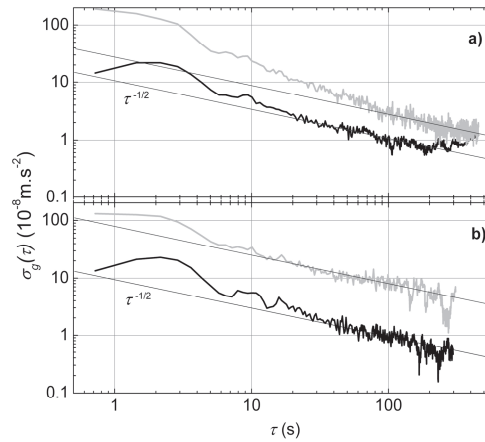


Рис. 7. Стандартное отклонение Аллана, полученное при использовании изолирующей платформы (a) и без нее (b) в условиях лаборатории LSBB. Черные линии: гравитационная чувствительность при использовании последующих коррекций по наземным вибрациям. Серые линии: чувствительность соответствующих сигналов сейсмометра.

Прямые с наклоном $\tau^{-1/2}$ соответствуют осреднению белого шума

Черная линия на рис. 7, a представляет результаты, полученные в обычном рабочем режиме: с применением изолирующей платформы и последующих коррекций. На малых временах осреднения стандартное отклонение Аллана фильтруется постоянной времени интегратора, примерно равной длительности

нескольких циклов, но она все равно содержит изгибы, имеющие тенденцию к осреднению, происхождение которых мы приписываем колебаниям грунта. По прошествии 20 с стандартное отклонение Аллана начинает уменьшаться со временем интегрирования как $\tau^{-1/2}$, что характерно для белого шума измерений. Оно достигает 10^{-8} м/с² уже после 100 с и уменьшается до ровного уровня 7×10^{-9} м/с². Такая долговременная стабильность сравнима со стабильностью, которую мы продемонстрировали в [20]. Соответствующая серая линия обозначает вибрационный шум, выведенный из данных 3D-сейсмометра, используемого для корректировки гравиметрических данных. Разница между двумя кривыми иллюстрирует эффективность подавления вибраций от 5 до 3 раз в зависимости от временного масштаба.

Кривые на рис. 7, *b* отображают результаты, полученные через несколько минут без использования изоляции. Примечательно, что чувствительность гравитационных измерений (черная линия) осталась прежней, в то время как вибрационный шум (серая линия) стал значительно выше. В частности, мы наблюдаем гораздо более высокую восьмикратную эффективность подавления вибраций, практически независимую от времени осреднения. Достижение такой низкой чувствительности (*к вибрациям* – *A.V.*) без изоляции вибрационного шума – это замечательный результат, подтверждающий высокое качество гравиметра и условий в лаборатории LSBB. Полученная чувствительность в два раза ниже, чем обычно получаемая в лаборатории LNE при использовании изолирующей платформы и антиакустического контейнера. Она сравнима с самой лучшей чувствительностью 14×10^{-8} м/с²/√Гц (полученной в лаборатории LNE-SYRTE в Париже ночью при выключенном кондиционере [8]). Данный показатель в два раза выше наилучшей зарегистрированной в Ухане кратковременной чувствительности на уровне $4,2 \times 10^{-9}$ м/с²/√Гц [30] (где была реализована очень эффективная активная система изоляции на основе суперструн).

Главное различие между двумя измерениями заключается в долговременном остаточном вибрационном шуме (серые линии на рис. 6). В частности, при использовании изолирующей платформы, вибрационный шум осредняется до 100 с быстрее, чем белый шум, и достигает меньшего значения, чем в случаях, когда платформа не используется. В обоих случаях шум осредняется и на долгих периодах измерений приобретает свойства белого шума, изменяясь, как $\tau^{-1/2}$. Последнее может быть объяснено эффектами сглаживания: чувствительность ухудшается за счет компонентов вибрационного шума на частотах, кратных частоте следования импульсов, в данном случае равной 3 Гц [31]. Сравнительно низкий уровень белого шума, полученный нами при использовании платформы, доказывает, что вибрационный шум на высоких частотах действительно фильтруется пассивной платформой. Что касается кратковременного шума, здесь доминирующую роль играет вибрационный шум в диапазоне 0,1–1 Гц, который достаточно хорошо дискретизируется и осредняется быстрее, чем белый шум, благодаря высокой частоте следования импульсов.

Вызывает удивление следующий момент: использование платформы модифицирует «цвет» спектра вибраций, но не влияет на уровень чувствительности. Это говорит о том, что мы достигли собственного лимита прибора.

Используя спектр собственного шума спектрометра, предоставленный его производителем, мы рассчитали, что его вклад в гравиметрическое измерение оказывается ниже, чем чувствительность, оговариваемая в данной статье ($4 \times 10^{-8} \text{ м/с}^2$) после 1 с измерения. Независимые измерения собственного шума могут быть полезны для оценки данного предела, если сейсмометр используется для коррекции гравиметрических данных. Также интерес представляют измерения других сейсмометров.

Собственный шум атомного гравиметра оценивался независимо (за исключением вибрации). Вклад в гравиметрическую чувствительность оценивается на уровне $3 \times 10^{-8} \text{ м/с}^2$ за 1 с, что значительно ниже полученного нами результата².

Нельзя исключить вероятность того, что достижение одинаковых параметров вне зависимости от использования платформы – не более чем совпадение. Спектры вибрационного шума при/без использования платформы несколько различаются, и эффективность подавления, которая ограничивается частотной характеристикой сейсмометра, зависит от частоты [12]. Возможно также, что такая ситуация связана с осреднением сигнала сейсмометра на частотах ниже его частоты излома, что может объяснить подобие стандартных отклонений Аллана на длинных периодах осреднения.

Заключение и перспективы на будущее

Мы провели измерения мобильным атомным гравиметром, достигающим рекордной чувствительности 10^{-8} м/с^2 за 100 с в лаборатории LSBB. Такая чувствительность была достигнута без использования систем виброизоляции, но за счет коррекции вибрационного шума по одновременным сейсмическим измерениям движения грунта. Используя приборы с подобной чувствительностью, можно в рамках международных сравнений гравиметров производить измерения в течение одного дня, тогда как согласно обычному протоколу требуются три независимых измерения на трех разных станциях. В сравнении с протоколом измерения, обычно используемому с уголковым отражателем свободного падения, эта чувствительность соответствует разбросу 10^{-8} м/с^2 при времени осреднения каждого блока данных, равном 100 с.

Примечательно, что низкочастотный вибрационный шум осредняется быстрее, чем белый шум, благодаря высокой частоте следования импульсов прибора. Это очевидное преимущество гравиметров на холодных атомах перед гравиметрами со свободно падающими уголковыми отражателями, которые работают на более низкой частоте следования импульсов, что приводит к субдискретизации микросейсмического шума.

Для представленных здесь измерений электронная система управления гравиметра является важным источником высокочастотного шума. Тем не менее влияние этого шума было эффективно скорректировано и ослаблено с помощью пассивной изолирующей платформы. Чтобы еще сильнее ослабить влияние шума, можно отдалить систему управления от вакуумной камеры, использовать более длинное оптоволокно, а также/или используя конструкцию, наилучшим образом снижающую выработку акустического шума. Чтобы

² Эта оценка получена при измерениях с конфигурацией с попутными векторами и при частотном шуме излучения главного лазера, который, как показано в [9], лимитирует чувствительность на уровне $4 \times 10^{-8} \text{ м/с}^2$ при времени осреднения 1 с.

максимально воспользоваться малозумными условиями лаборатории LSBB, можно также установить акустическое ограждение вокруг камеры, например, в виде деревянного контейнера.

В заключение следует отметить, что благодаря идеальным шумовым условиям лаборатория LSBB является подходящим местом для проведения высокочувствительных гравиметрических измерений. Благодаря своему размеру лаборатория пригодна для организации больших сравнений гравиметров, а также для реализации крупномасштабной гравитационной антенны. Такая антенна, MIGA, будет развернута в течение следующих пяти лет в лаборатории LSBB и будет измерять гравитационные градиенты на длинной базе с помощью набора атомных интерферометров. Определение градиентов будет основано на дифференциальных измерениях, что обеспечит дополнительное подавление синфазных вибрационных помех и позволит достичь беспрецедентной чувствительности при измерении напряжений.

Благодарности

Данный проект реализован при поддержке Action Spécifique GRAM (Gravitation Références Astronomie et Métrologie). Авторы благодарят Кристофа Сюдре, Мишеля Огюста, Алена Кавайу, Жюльена Пупени и Даниэля Буйе из Лаборатории SBB за неоценимую помощь при проведении измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kasevich, M. and Salomon, C.**, 2006, Special Issue: "Quantum Mechanics for Space Application: From Quantum Optics to Atom Optics and General Relativity", Appl. Phys. B , 84 , Issue 4, 543-544, and all following articles .
2. **Peters, A., Chung, K.Y. and Chu, S.**, 2001, High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia , 38 , 25-61.
3. **Jiang, Z. et al**, 2012, The 8th International Comparison of Absolute Gravimeters 2009 - The First Metrological Key Comparison CCM.G-K1, Metrologia, 49, 666-684.
4. **Francis, O. et al**, 2013, The European Comparison of Absolute Gravimeters 2011 (ECAG-2011) in Walferdange, Luxembourg: results and recommendations, Metrologia, 50, 257-268.
5. **Geiger, R., Ménot, V., Stern, G., Zahzam, N., Cheinet, P., Battelier, B., Villing, A., Moron, F., Lours, M., Bidel, Y., Bresson, A., Landragin, A. and Bouyer, P.**, 2011, Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry, Nature Communications 2 , 474.
6. **McGuinness, H. J., Rakholia, A. V., Biedermann, G. W.**, 2012, High data-rate atom interferometer for measuring acceleration, Appl. Phys. Lett., 100, 011106
7. **McGuirk, J. M., Foster, G. T., Fixler, J. B., Snadden, M. J. and Kasevich, M.**, 2002, Sensitive absolute-gravity gradiometry using atom interferometry, Phys. Rev. A, 65, 033608
8. **Barrett, B., Gominet, P.-A., Cantin, E., Antoni-Micollier, L., Bertoldi, A., Battelier, B., Bouyer, P., Lautier, J., Landragin, A.**, 2013, Mobile and remote inertial sensing with atom interferometers, arXiv:1311.7033v1 .
9. **Gouët Le, J., Mehlstäubler, T. E., Kim, J., Merlet, S., Clairon, A., Landragin, A. and Pereira Dos Santos, F.**, 2008, Limits to the sensitivity of a low noise compact atomic gravimeter, Appl. Phys. B, 92, 133-44.
10. **Schmidt, M., Senger, A., Hauth, M., Freirer, C., Schkolnik, V., and Peters, A.**, 2011, A Mobile High-Precision Absolute Gravimeter Based on Atom Interferometry, Gyroscopy and Navigation, Vol 2, No 3, 170-177.
11. **Zhou, M-K., Hu, Z-K., Duan, X-C., Sun, B-L., Chen, L-L., Zhang, Q-Z. and Luo, J.**, 2012, Performance of a cold-atom gravimeter with an active vibration isolator Phys. Rev. A 86 043630.
12. **Merlet, S., Le Gouët, J., Bodart, Q., Clairon, A., Landragin, A., Pereira Dos Santos, F. and Rouchon, P.**, 2009, Operating an atom interferometer beyond its linear range, Metrologia , 46 , 87-94.

13. **Geiger R., Ménoret V., Stern G., Zahzam N., Cheinet P., Battelier B., Villing A., Moron F., Lours M., Bidel Y., Bresson A., Landragin A. and Bouyer P.**, 2011, Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry, *Nature comm.*, 2 474.
14. **D'Oreye, N., Van Dam, T., Francis, O.**, 2000, An International Reference Station for Inter-comparison of Absolute Gravimeters (ISIAG) in Walferdange, Luxembourg: the GRAVILUX Project, *Bull. D'Inf. Du BGI* (86) 27-36
15. **Dimopoulos, S., Graham, P. W., Hogan, J. M., Kasevich, M., A., and Rajendran, S.**, 2008, Atomic gravitational wave interferometric sensor, *Phys. Rev. D*, 78, 122002.
16. **Ertmer, W. et al.**, 2009, Matter wave explorer of gravity (MWXG), *Exp. Astron.*, 23, 611649
17. **Wolf, P. et al.**, 2009, Quantum physics exploring gravity in the outer solar system, *Exp. Astron.*, 23, 651-687.
18. **Schubert, C. et al.**, 2013, Differential atom interferometry with 87Rb and 85Rb for testing the UFF in STE-QUEST, *arXiv:1312.5963*.
19. **Cheinet, P., Pereira, Dos Santos, F., Petelski T., Le Gouët, J., J. Kim, K. T. Therkildsen, Clairon A., and Landragin A.**, 2006 Compact laser system for atom interferometry *App. Phys. B* 84 643-646.
20. **Louchet-Chauvet, A., Farah T., Bodart Q., Clairon A., Landragin A., Merlet S., and Pereira Dos Santos, F.**, 2011 Influence of transverse motion within an atomic gravimeter *New J. Phys.* 13 065025.
21. **Bordé, Ch. J.**, 1989 Atom interferometry with internal state labelling *Phys. Lett. A* 140, 10
22. **Bordé, Ch. J.**, 2001 Theoretical tools for atom optics and interferometry *C.R. Acad. Sci. Paris, t.2, Série IV* 509-30.
23. <http://www.minusk.com>
24. **S. Gaffet, Y. Guglielmi, J. Virieux, G. Waysand, A. Chwala, R. Stolz, C. Emblanch, M. Auguste, D. Boyer and A. Cavaillou** 2003 Simultaneous seismic and magnetic measurements in the Low-Noise Underground Laboratory (LSBB) of Rustrel, France, during the 2001 January 26 Indian earthquake *Geophys. J. Int.* 155 981-990.
25. **Gaffet, S., Wang, J.S.Y., Yedlin, M., Nolet, G., Maron, C., Brunel, D., Cavaillou, A., Boyer, D., Sudre, C., and Auguste, M.** 2009 A 3D broadband seismic array at LSBB IRIS DMS Electronic Newsletter 11 3.
26. **Wang, J.S.Y., Guglielmi, Y., and Gaffet, S.** 2010 Collaborative projects between two USA-France national subsurface laboratories to improve imaging of fractured-porous rocks properties and coupled THMCB processes *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering* 857-860, Zhao, Labiouse, Dudt & Mathier (eds), 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-58654-2, 864 pp.
27. **Merlet, S. Kopaev A., Diament M., Genevès G., Landragin A., Pereira Dos Santos F.**, 2008 Microgravity investigations for the LNE watt balance project *Metrologia* 45 265-274
28. **Peterson, J.** 1993 Observations and modeling of seismic background noise *USGS Open file Rept* 93-322.
29. **Gauguet, A., Mehlstäubler, T. E., Lévêque, T., Le Gouët, J., Chaibi, W., Canuel, B., Clairon, A., Pereira Dos Santos, F. and Landragin, A.** 2008 Off-resonant Raman transition impact in an atom interferometer *Phys. Rev. A* 78 043615.
30. **Zhong-Kun Hu, Bu-Liang Sun, Xiao-Chun Duan, Min-Kang Zhou, Le-Le Chen, Su Zhan, Qiao-Zhen Zhang, and Jun Luo**, 2013, Demonstration of an ultra-high sensitivity atom interferometry gravimeter, *Phys. Rev. A* 88, 043610.
31. **Cheinet, P., B. Canuel, Pereira Dos Santos, F., Gauguier, A., Yver-Leduc F., and Landragin, A.**, 2008 Measurement of the Sensitivity Function in a Time-Domain Atomic Interferometer *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.* 57 no 6 1141-1148.

Abstract. Low noise underground environments offer conditions allowing to assess ultimate performance of high sensitivity sensors such as accelerometers, gyrometers, seismometers... Such facilities are for instance ideal for observing the tiny signals of interest for geophysical studies. Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) in which we have installed our cold atom gravimeter, provides such an environment. We report here the best short term sensitivity ever obtained without any ground vibration isolation system with such an instrument: 10^{-8} m.s^{-2} in 100 s measurement time.

Key words. Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB), cold atom gravimeter, geophysical studies, accelerometers, gyrometers, seismometers