

УДК 535.33/.34:621.373.826

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ ИЗБЫТОЧНОГО МИКРОДВИЖЕНИЯ ОДИНОЧНОГО ИОНА В ОПТИЧЕСКОМ СТАНДАРТЕ ЧАСТОТЫ

© 2022 г. Н. А. Павлов¹, *, С. В. Чепуров¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук”, Новосибирск, Россия

*E-mail: pna3894@gmail.com

Поступила в редакцию 17.01.2022 г.

После доработки 07.02.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2022 г.

Описан метод кросс-корреляции детектирования и компенсации избыточного микродвижения в сравнении с общепринятым методом прямого наблюдения за положением иона в ловушке с использованием УФ камеры высокой чувствительности. Чувствительность данного подхода в точности определения положения иона не хуже 20 нм, что гарантирует режим Лэмба–Дике для захваченного иона.

DOI: 10.31857/S0367676522060205

ВВЕДЕНИЕ

Оптические стандарты частоты (ОСЧ) крайне полезны в областях, связанных с метрологией частоты (например, измерения времени, длины или переопределения секунды), фундаментальной физикой (например, подтверждение физических теорий, изменение значений фундаментальных физических констант) и некоторыми практическими применениями, такими, как глобальные системы навигации, релятивистская геодезия и т.д. [1]

В настоящее время, ОСЧ являются самыми стабильными и точными стандартами среди всех остальных видов стандартов частоты. Существует две основных группы, лидирующих среди ОСЧ: основанных на одиночных захваченных ионах и нейтральные атомы в оптических решетках — и демонстрирующих долговременную нестабильность частоты на уровне менее чем 10^{-18} [2–4].

Избыточное движение иона, вызванное ВЧ полем ловушки (так называемое “микродвижение”), возникает из-за смещения иона из седловой точки нулевого потенциала в центре ловушки электростатическим полем. Поэтому, сдвигами частоты, связанными с избыточным микродвижением, нельзя пренебречь. Для решения этой проблемы необходимо применить какой-либо метод подавления электростатических полей. В этой статье описывается такой метод, также называемый методом кросс-корреляции. Этот метод основан на связи эффекта Доплера с движением иона в квадрупольной ВЧ ловушке Пауля [5]. Реализация этого

метода, при использовании микроконтроллерной платы серии STM32H7 в качестве счетчика фотонов флуоресценции, дает высокую точность в определении смещения иона и в тоже время проста.

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ СДВИГИ ЧАСТОТЫ

В данном разделе кратко описываются сдвиги частоты часового перехода, вызываемые статическим электрическим полем: эффект Доплера, квадратичный эффект Штарка и квадрупольный сдвиг.

Доплеровский сдвиг

Частота атомного перехода захваченного иона находится под влиянием эффекта Доплера из-за движения иона, описывается как:

$$\frac{\Delta\nu_D}{\nu_0} = \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = -\frac{\nu}{c} \cos\theta - \frac{\nu^2}{2c^2} + O\left(\left(\frac{\nu}{c}\right)^3\right), \quad (1)$$

где $\Delta\nu_D$ — сдвиг частоты, связанный с эффектом Доплера, относительно несмещенной частоты перехода ν_0 , ν — смещенная частота перехода, ν — абсолютное значение мгновенной скорости иона в лабораторной системе отсчета, c — скорость света, θ — угол наблюдения. Член первого порядка — это линейный эффект Доплера, в то время как, второго порядка — релятивистский. Классический эффект Доплера приводит к появлению боковых полос атомного перехода. Релятивистское соотношение второго порядка приводит только к

смещению частоты несущей. Это дает выражение для секулярных частот (которые можно отделить от микродвижения из-за их различной природы) [5]:

$$\frac{\Delta\nu_D}{\nu_0} \approx -\frac{1}{mc^2} \sum_{i=x,y,z} \frac{k_B T_D (a_i + q_i^2)}{2a_i + q_i^2} + \frac{4}{m} \left(\frac{eq_i E_i}{(2a_i + q_i^2) \Omega} \right)^2, \quad (2)$$

где e – элементарный заряд, m – масса иона, k_B – постоянная Больцмана, T_D – доплеровский предел, E_i – электростатическое поле, которое не было скомпенсировано, a_i и dq_i – a - и q -параметры ионной ловушки, Ω – частота поля ловушки (порядка $2\pi \cdot 15$ МГц).

Квадрупольный сдвиг

Другой тип сдвига, зависящий от градиента электрического поля, взаимодействующего с ионом. Частотный сдвиг, являющийся результатом такого взаимодействия с квадрупольным моментом иона, называется квадрупольным сдвигом. Поскольку, амплитуда и симметричность градиента статического электрического поля неизвестна, а методика его определения довольно сложна, имеется возможность измерить квадрупольный сдвиг для различных направлений магнитного поля [6].

Квадратичный эффект Штарка

Так как ион имеет избыточные микродвижения из-за нескомпенсированных электростатических полей и колеблется вокруг точки отличной от центра ловушки, взаимодействие квадрата величины электростатического поля и атомного дипольного момента иона приводит к квадратичному штарковскому сдвигу спектра часового перехода иона. Такое взаимодействие может быть описано, как [7]:

$$h\Delta\nu_S = \left(2\Delta\alpha_S + \alpha_T (3\cos^2\beta - 1) \right) \frac{E^2}{4}, \quad (3)$$

где $\Delta\alpha_S = \alpha_S(S, 1/2) - \alpha_S(D, 3/2)$ – разница скалярных электрических поляризуемостей уровней $^2S_{1/2}$ и $^2D_{3/2}$, $\alpha_T = \alpha_T(D, 3/2)$ – тензорная поляризуемость уровня $^2D_{3/2}$, β – угол между статическим магнитным и электрическим полями, E – амплитуда электростатического поля.

МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МИКРОДВИЖЕНИЯ (КОНТРОЛЬ СМЕЩЕНИЯ ИОНА)

Наблюдение за положением иона в ловушке с помощью высокочувствительной камеры – это

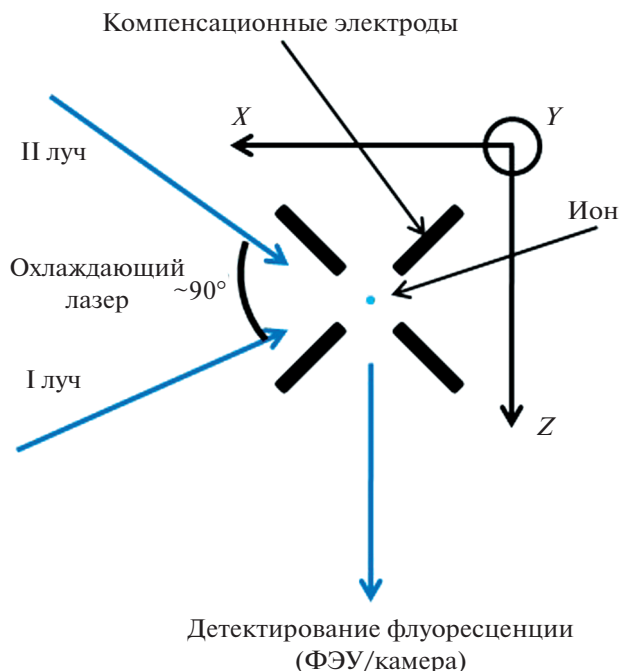


Рис. 1. Сечение ловушки в радиальной плоскости. 4 компенсационных электрода с постоянным напряжением. Два луча охлаждения направленные на ион под углом около 90° позволяют компенсировать микродвижения в почти перпендикулярных направлениях. ФЭУ или камера используются для детектирования флуоресценции иона.

один из наиболее популярных методов. Данный метод имеет ряд недостатков: ограничение разрешения камеры, высокая сложность контроля положения иона в направлении перпендикулярном плоскости матрицы камеры (смещение она может быть обнаружено, когда ион находится вне фокальной плоскости камеры, а величина смещения при этом связана с диаметром изображения иона).

Другой метод детектирования смещения иона – метод кросс-корреляции, основанный на наблюдении эффекта Доплера, вызванного взаимодействием между высокочастотным электрическим полем ловушки и захваченным ионом в цикле охлаждения.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО КОМПЕНСАЦИИ МИКРОДВИЖЕНИЯ

Экспериментальная установка

Рисунок 1 показывает схематическое изображение разреза ловушки в радиальной плоскости (на этом рисунке не изображены аксиальные электроды – кольцевые и торцевые). Четыре компенсирующих электрода, на которые подается постоянное напряжение, необходимы для компенсации электростатических полей. Оси X и Z выбраны

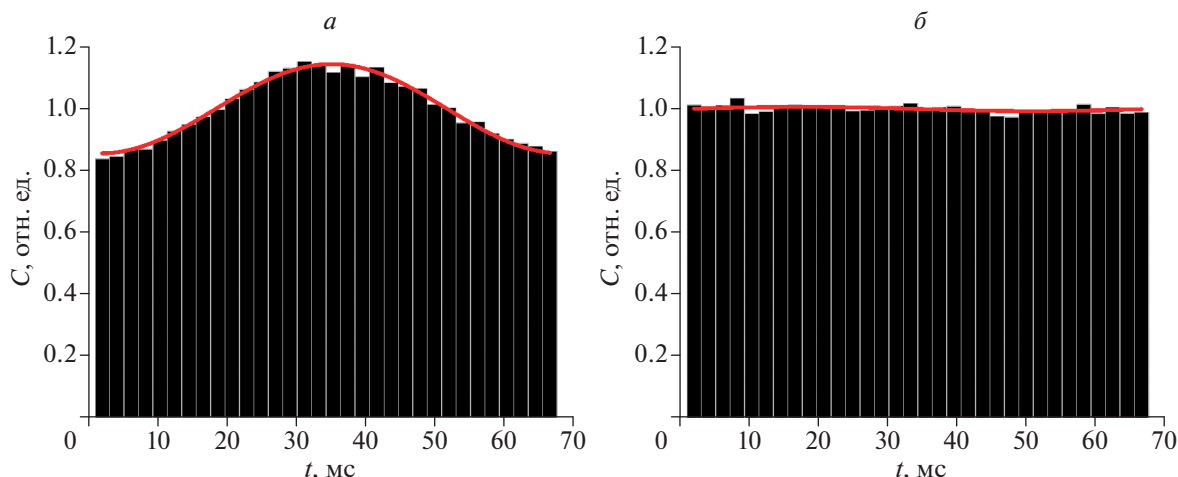


Рис. 2. Гистограммы сигналов кросс-корреляции и приближения синусом центров и высот столбцов: гистограмма сигнала без компенсации поля (*а*); с компенсацией поля (*б*). C – нормированное количество фотонов, t – время прилета фотона.

для удобства компенсации микродвижения при помощи камеры. Изменение напряжения на одном из электродов дает изменение потенциала вдоль оси X или Z на значение, деленное на $\sqrt{2}$.

Фотоэлектронный умножитель используется для регистрации фотонов, испущенных ионом в цикле охлаждения. Сигнал, полученный счетчиком от ФЭУ, является стартовым импульсом для начала счета времени. Остановка счета происходит, когда фаза поля ловушки становится равной нулю. В качестве счетчика выступает отладочная плата Nucleo на базе микроконтроллера серии STM32H7 с таймером высокого разрешения, который имеет триггер захвата входящего сигнала, с частотой тактирования 480 МГц. Поскольку частота работы нашей ловушки $\Omega \approx 15$ МГц, таймер может разрешить временную задержку между событиями получения фотона и событием, когда фаза поля ловушки становится равной нулю, с точностью примерно $480/15 = 32$ такта, что дает временное разрешение порядка 67 нс.

Метод кросс-корреляции

Плата STM32 Nucleo использовалась для сбора временных интервалов (которые в действительности являются количеством тактов таймер с частотой тактирования 480 МГц) в массив целочисленных значений на протяжении 0.5 с. В среднем число фотонов, которые излучает в цикле охлаждения ион, было около 14000 с^{-1} . Затем эти данные передаются через USB кабель на программу на ПК, которая строит график. Для получения качественной выборки, мы собирали данные на протяжении около 15 с (около 200000 фотонов были подсчитаны). На рис. 2 можно увидеть статистически собранные данные (гистограмму) и

соответствующая аппроксимация синусом вершин столбцов гистограммы. Эти графики представляют начальный этап использования метода кросс-корреляции, когда электростатические поля не скомпенсированы (рис. 2*а*) и конечный результат (рис. 2*б*), когда они почти полностью устранены. По вертикальной шкале отложены относительные единицы полученные делением общего числа фотонов на среднее значения в каждом столбце. Четыре электрода, описанные в предыдущем разделе, используются для компенсации электростатических полей. Изменением напряжений на электродах можно добиться минимальной амплитуды сигнала кросс-корреляции. К примеру, относительная амплитуда для не скомпенсированных полей и после процедуры компенсации (на рис. 2*а* и 2*б* соответственно) синусоидального сигнала 14.4 и 0.7% соответственно, при среднем числе фотонов в столбце около 6000. Данный метод позволяет собирать сколько угодно большое количество фотонов и дает почти неограниченную точность компенсации статических электрических полей. В нашем случае точность ограничивается точностью вольтметра, измеряющего напряжения на компенсационных электродах. (~ 0.1 В). Поскольку, оси X и Z повернуты относительно осей, формируемых компенсационными электродами, минимальный шаг напряжения будет $(0.1 + 0.1)/\sqrt{2} \approx 0.141$ В для каждой из осей.

Калибровка кросс-корреляционного сигнала со значением смещения иона

Мы использовали УФ камеру для изначальной калибровки смещения иона с различными значениями амплитуды синусоидального приближе-

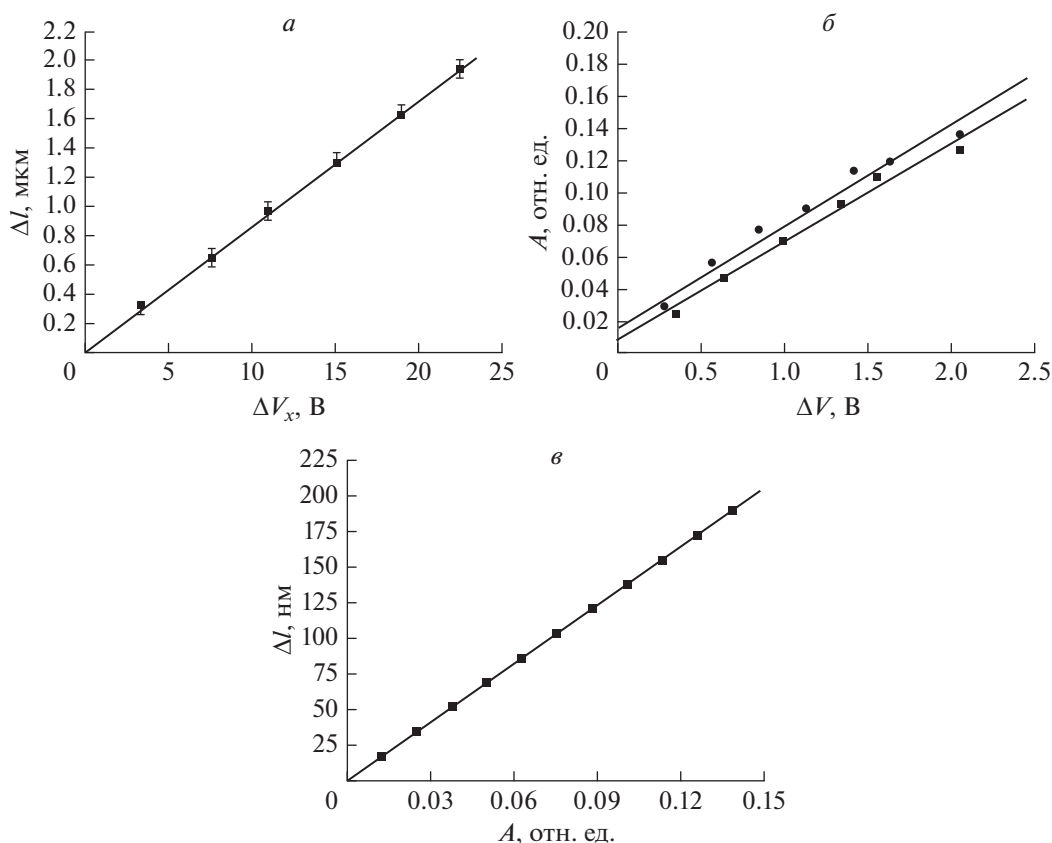


Рис. 3. Изменение напряжения (ΔV_X) относительно нулевой точки в зависимости от смещения иона из центра ловушки Δl (а). Кружками показана амплитуда синуса A для смещения по оси X , квадратами — по оси Z (б). Прямые линии соответствуют аппроксимации. Зависимость смещения иона из центра ловушки от амплитуды сигнала кросс-корреляции (в).

ния сигнала кросс-корреляции. Сначала, необходимо поместить ион в центр ловушки с максимальной доступной точностью, ограниченной точностью вольтметров компенсационных электродов. Затем при различных значениях напряжения возможно измерить амплитуду сигнала кросс-корреляции и соответствующую ему величину смещения иона с помощью камеры. Размер пикселя камеры $6.5 \times 6.5 \mu\text{км}^2$, увеличение объектива $20\times$ дает ограничение $6.5/20 = 0.325 \mu\text{км}$ точности метода определения смещения по камере в нашей системе. Рис. 3а показывает семь точек, соответствующих 0–6 пикселям (на камере матрицы) или 0–1.95 $\mu\text{км}$ смещения иона из центра ловушки. Наклон аппроксимирующей прямой около 86 нм/В дает около 12 нм на шаг напряжения 0.141 В. Точка нулевого смещения получена с помощью метода кросс-корреляции, остальные — камеры.

Следующий шаг — соотносить эти значения с амплитудой кросс-корреляции, что и отображено на рис. 3б. На этом графике показана относительная амплитуда синуса в зависимости от напряжения при значениях, которые не могут быть разрешены при помощи камеры. Наконец, на ри-

сунке 3в изображено смещение иона из центра ловушки при использовании предыдущих двух графиков (рис. 3а и 3б). В результате данный метод дает точность определения центра ловушки не хуже, чем 20 нм для осей X и Z , что намного меньше, чем при использовании высокочувствительной камеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен метод кросс-корреляции в сравнении с методом компенсации электростатических полей при помощи камеры. При этом возможна только грубая подстройка методом камеры по оси Z , которая зависит от объектива, расстояния до матрицы, глубины резкости и прочих параметров камеры. Для оси X матрица камеры и увеличение объектива ограничивают данный метод, и, в нашем случае, его точность не лучше чем в 325 нм. Но, при использовании вышеописанного метода кросс-корреляции возможно достичь точности не хуже, чем в 20 нм в смысле смещения иона из седловой токи поля ловушки. Это значение дает

возможность локализовать иона в режиме Лэмба–Дике с большим запасом точности.

Важным преимуществом данного метода детектирования и компенсации смещения иона в ловушке по сравнению с общепринятым методом при использовании высокочувствительных (и довольно дорогих) ПЗС-камер являются более высокая чувствительность и точность позиционирования (а также дешевизна компонентов для его реализации). В дополнение, при использовании некомпланарных лучей охлаждения, имеющих ненулевые проекции на все три оси ловушки, появляется возможность компенсировать микродвижения иона по всем направлениям.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-32-90135).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hong F.-L.* // Meas. Sci. Technol. 2017. V. 28. Art. No. 012002.
2. *Huntemann N., Sanner C., Tamm C. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. Art. No. 063001.
3. *Cao J., Zhang P., Shang J. et al.* // Appl. Phys. B. 2017. V. 123. P. 112.
4. *Brewer S.M., Chen J.-S., Hankin A.M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123. Art. No. 033201.
5. *Berkland D.J., Miller J.D., Bergquist J.C.* // Appl. Phys. V. 83. P. 5025.
6. *Schneider T.* Optical frequency standard with a single $^{171}\text{Yb}^+$ ion. PhD thesis. Hanover: University of Hanover, 2005. 110 p.
7. *Li Z.S., Svanberg S., Quinet P. et al.* // J. Phys. B. 1999. V. 32. P. 1731.

Detection and compensation of the excess ion micromotion in the single ion optical frequency standard

N. A. Pavlov^{a, *}, S. V. Chepurov^a

^a Institute of Laser Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: pna3894@gmail.com

We describe cross-correlation method of detection and compensation of the excess ion micromotion in comparison with conventional method using direct determination of ion position using high sensitive UV camera. Sensitivity of this technique to determine the ion position is not worse than 20 nm what guarantees Lamb–Dicke regime for the trapped ion.