

УДК 539.194

**РЕПЕР ЧАСТОТЫ ФОНТАННОГО ТИПА НА ОСНОВЕ
ХОЛОДНЫХ АТОМОВ РУБИДИЯ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ****Д.С. Купалов, В.Н. Барышев, И.Ю. Блинов, А.И. Бойко, Ю.С. Домнин,
Л.Н. Копылов, О.В. Купалова, А.В. Новоселов, М.Н. Хромов**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
kupalov@vniiftri.ru

Статья посвящена первым результатам научно-исследовательской работы по созданию рубидиевого репера частоты фонтанного типа

Abstract- The design, operating parameters and the preliminary evaluation of the main systematic frequency shifts of the Rb fountain type frequency standard, developed at VNIIFTRI, are presented.

Ключевые слова: репер частоты, холодные атомы рубидия, спектроскоп

1 Введение

Все виды транспорта, строительство, геодезия и картография, службы экстренного реагирования (скорая медицинская помощь, МЧС, полиция), добывающие отрасли – немыслимы в современном мире без глобальных навигационных спутниковых систем. Спутниковая навигация основывается на принципе определения псевдодалности - разности между временем приемника в момент приема сигнала и временем спутника в момент передачи сигнала, умноженной на номинальную скорость света в вакууме. Очевидно, что использование стандартов частоты и времени с высокими метрологическими характеристиками является необходимым условием реализации высокоточных навигационных и геодезических измерений.

Начиная с 1961 года единица измерения времени – секунда определена как интервал равный 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133, находящегося в покое при температуре 0 К. На сегодняшний день с наименьшей неопределенностью, в соответствии с данным определением, секунду воспроизводят стандарты частоты фонтанного типа на холодных атомах цезия. Метрологический цезиевый репер частоты (CsF02) из состава Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени и частоты (ГЭТ 1-2012), согласно государственным приемочным испытаниям в 2012 г., имеет неисключенную систематическую погрешность (НСП) не более $5 \cdot 10^{-16}$.

Для обеспечения потребителей в эталонных сигналах частоты и времени с заданными характеристиками, а также для недопущения научного и технологического отставания России от признаваемого мирового уровня точности измерений, в Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) непрерывно ведутся работы по модернизации эталонной базы.

В 2015 году в ГСВЧ началась разработка репера частоты фонтанного типа

на основе холодных атомов рубидия. В рубидиевом фонтане, в отличие от аналогичных стандартов частоты на атомах цезия, НСП меньше из-за меньшего спин-обменного столкновительного сдвига, являющегося основной составляющей НСП. Данный факт делает рубидиевые стандарты частоты фонтанного типа теоретически более точными, чем цезиевые.

Кроме того, согласно резолюции Международного консультативного комитета по времени и частоте Международного бюро мер и весов от 2006 г. и 2012 г., атом рубидия входит в список перспективных атомарных сред для переопределения единицы времени – секунды в системе единиц СИ [1].

Данная статья посвящена первым результатам, полученным в рамках научно-исследовательской работы по созданию рубидиевого репера частоты фонтанного типа.

2. Цикл работы и составные части репера частоты фонтанного типа

Репер частоты фонтанного типа предназначен для воспроизведения частоты невозмущенного перехода между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома рубидия-87. На рис. 1 показаны составные части репера.

Рассмотрим полный цикл работы атомного «фонтана». Из источника атомы ^{87}Rb направляются к центру оптической ловушки, где формируется атомное облако. Затем облако доохлаждается до температур порядка единиц мК и подбрасывается вертикально вверх. Формирование облака, его доохлаждение и подброс осуществляется при помощи лазерного излучения. Движущиеся вверх атомы распределены по пяти энергетическим подуровням ($F2, m = -2 \dots +2$). Во время полета облако проходит через вспомогательный (селектирующий) резонатор, настроенный на частоту атомного перехода, СВЧ поле которого переводит атомы из состояния ($F2, m=0$) в состояние ($F1, m=0$). Атомы, не совершившие этот переход, отклоняются от вертикальной траектории («сдуваются») лазерным излучением с частотой оптического перехода $F2 \leftrightarrow F'3$. Таким образом формируется состояние ($F1, m=0$) атомов рубидия. После этого облако влетает в основной СВЧ резонатор (резонатор опроса), на который подается зондирующий сигнал, и часть атомов переводится в состояние ($F2, m=0$). Достигнув наивысшей точки траектории, облако под действием гравитации начинает падать вниз. Фаза зондирующего сигнала в это время меняется на $\pi/2$. Пролетая второй раз через СВЧ резонатор, атомы распределяются в равном количестве по уровням ($F1, m=0$) и ($F2, m=0$). После этого в детекторной секции происходит регистрация состояний ($F1, m=0$) и ($F2, m=0$).

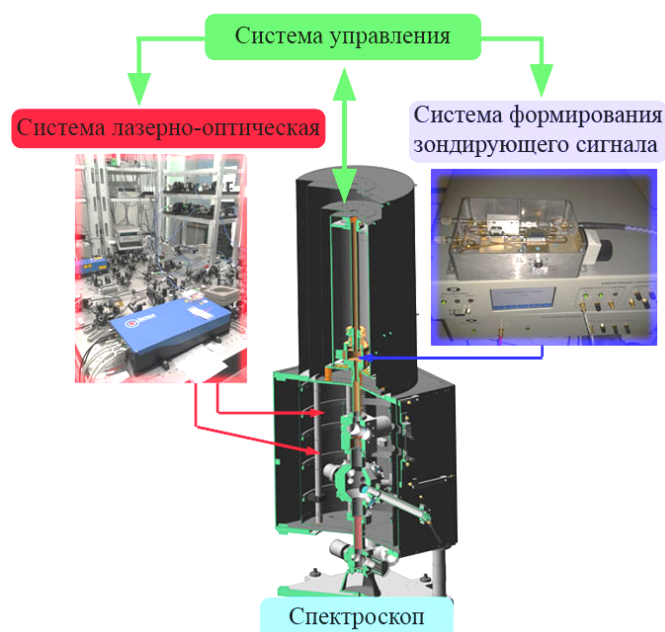


Рис. 1. Составные части репера частоты фонтанного типа на основе холодных атомов рубидия

На основе результатов измерения отношения числа атомов в состояниях $(F1, m=0)$ и $(F2, m=0)$ происходит сравнение частоты зондирующего СВЧ сигнала с частотой «часового» перехода атомов рубидия. Затем цикл повторяется. После окончания 100 циклов происходит расчет и формирование поправки для частоты опорного водородного генератора относительно частоты атомного «фонтана».

2.1 Спектроскоп

Конструкция атомного спектро스코па определяется принципом работы стандарта частоты фонтанного типа, который обеспечивает возбуждение и опрос холодных атомов в гравитационном поле Земли. На рисунке 2 представлен атомный спектроскоп рубидиевого репера, состоящий из узла вакуумной откачки, корпуса оптической ловушки, источника ^{87}Rb , блока детектирования, селектирующего резонатора, основного резонатора с пролетным пространством, магнитных экранов и катушек подмагничивания.

Вакуумная система спектроскопа, за исключением СВЧ резонатора, изготовлена из титана. Ионный насос, расположенный в нижней части спектроскопа, обеспечивает сверхвысокий вакуум порядка $3 \cdot 10^{-10}$ мбар. Атомы рубидия захватываются напрямую из пара в оптической ловушке в конфигурации (1,1,1). Для ввода лазерного излучения в ловушку, а также для визуального контроля атомного облака, используются просветленные оптические вакуумные окна.

Между ловушкой и детекторной секцией расположен вспомогательный (селектирующий) резонатор, который участвует в подготовке атомного состояния $|F=1, m=0\rangle$.

Пролетное пространство и основной СВЧ резонатор окружены катушкой «С-поля», необходимой для снятия вырождения квантовых состояний сверхтонкой структуры. Для подавления влияния внешних магнитных полей применяется система экранирования, состоящая из пяти слоев пермаллоев экранов, с коэффициентом экранирования около $2 \cdot 10^5$.

Основной СВЧ резонатор расположен на высоте 0,48 м над центром ловушки. Мода СВЧ колебаний H_{011} на частоте 6,834682611 ГГц возбуждается в резонаторе через круглые отверстия с помощью двух симметричных прямоугольных волноводов. Нагруженная добротность резонатора составляет $Q_c \sim 28\,600$.

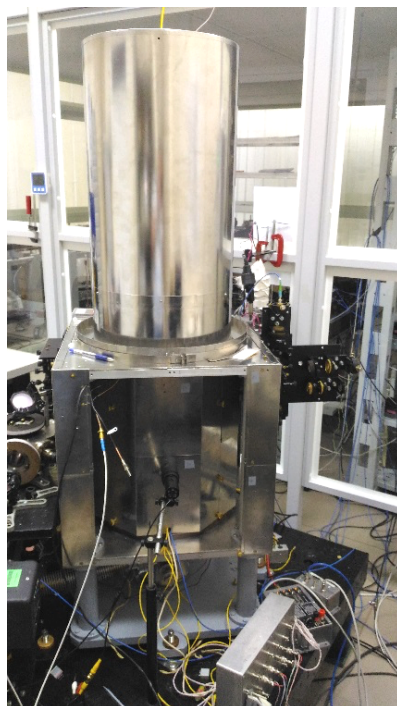


Рис. 2. Фото спектроסקопа

2.2 Лазерно-оптическая система

Лазерно-оптическая система репера построена на основе двух лазеров. Первый диодный лазер Toptica TA pro с выходной мощностью 1 Вт генерирует излучение для охлаждения и детектирования квантовых состояний атомов. Стабилизация частоты лазерного излучения происходит по оптическому циклическому переходу $F = 2 \rightarrow F' = 3$ ^{87}Rb D_2 линии методом переноса спектра модуляции. Луч из лазера Toptica TA pro делится на три

части: из первой формируется детектирующий луч, а из второй и третьей — лучи для охлаждения атомов: три луча, направленные вверх, и три луча, направленные вниз. Управление частотой и мощностью лазерного излучения всех лучей происходит с помощью акустооптических модуляторов (АОМов) в конфигурации двойного прохода «кошачий глаз».

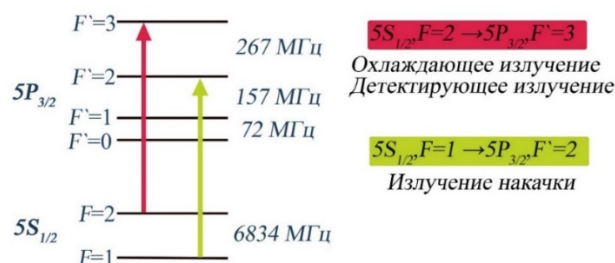


Рис. 3. Схема энергетических уровней D₂ линии ⁸⁷Rb

Для предотвращения ухода атомов из процесса охлаждения в оптической ловушке, а также для детектирования квантового состояния ($F1, m=0$) необходимо лазерное излучение, которое «перекачивает» атомы со сверхтонкого подуровня $F = 1$ на подуровень $F = 2$ основного состояния. Для этого используется второй диодный лазер Toptica DL 100 pro design, частота которого стабилизируется по перекрестному оптическому переходу $F = 1 \rightarrow F' = 1, 2$ с помощью частотно-модуляционной спектроскопии. Смещение стабилизированной частоты на переход $F = 1 \rightarrow F' = 2$ «перекачивающего» лазера осуществляется также АОМом. Излучение из лазерно-оптической системы распространяется по одномодовым сохраняющим поляризацию оптоволоконным к коллиматорам, которые жестко фиксируются на корпусе ловушки.

2.3 Система формирования зондирующего сигнала и система управления

Система формирования зондирующего сигнала состоит из устройства двухплечевой запитки СВЧ резонатора, позволяющее возбудить максимально симметричное поле в полости резонатора, и коммерческого синтезатора RB-1 (SpectraDynamics, Inc), который стабилизируется по внешнему сигналу от водородного генератора.

Система управления репера, построенная на базе шасси PXIe-1085 от National Instruments, обеспечивает управление АОМами, прием и оцифровку сигналов фотодетекторов, управление синтезатором, а также обработку полученных результатов.

3. Результаты и предварительные оценки систематических сдвигов частоты

На рис. 4 изображена резонансная картина Рэмси рубидиевого репера,

которая показывает зависимость вероятности перехода атомов рубидия от отстройки частоты. Во врезке изображен центральный пик резонанса шириной < 1 Гц. Контраст резонанса, выраженный как $C = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$, составил 0,92.

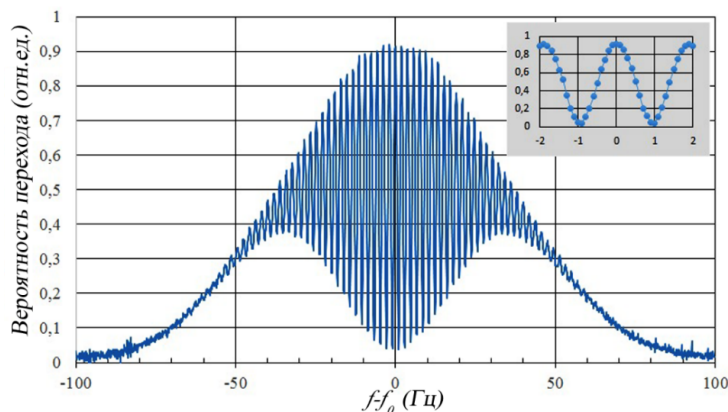


Рис. 4. Вероятность перехода атомов рубидия в репере в зависимости от отстройки частоты (высота подброса 0,8 м, без усреднения)

По результатам лабораторных исследований репера, было получено значение эффективной температуры атомного облака, равное 4 мК, определяемое как:

$$T_{эфф} = \frac{g^2 M_{Rb} V_d}{16K V_3} (t_1^2 - t_2^2), \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, M_{Rb} – масса атома рубидия, V_d – скорость атомного облака при пролете вверх на уровне детектора, K – постоянная Больцмана, V_3 – скорость запуска атомного облака, t_1 – ширина сигнала фотодетектора от атомного облака при пролёте вверх по уровню полувысоты, t_2 – ширина сигнала фотодетектора от атомного облака при пролёте вниз по уровню полувысоты (рис. 5).

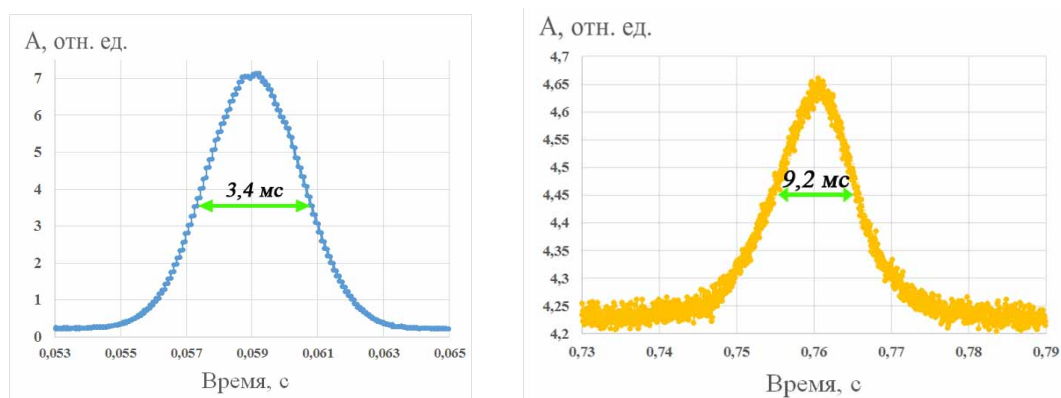


Рис. 5. Сигналы фотодетектора от атомного облака при пролете вверх (слева) и вниз (справа)

На рис. 6 приведен график среднеквадратического двухвыборочного отклонения частоты (СКДО) относительно водородного генератора как функция от времени усреднения τ . Из графика видно, что нестабильность репера составила $1,4 \cdot 10^{-15}$ после одного дня усреднения. Измеренные значения хорошо укладываются в модель белого шума и интерполируются выражением $\sigma_y(\tau) = 4,0 \cdot 10^{-13} \cdot \tau^{-1/2}$.

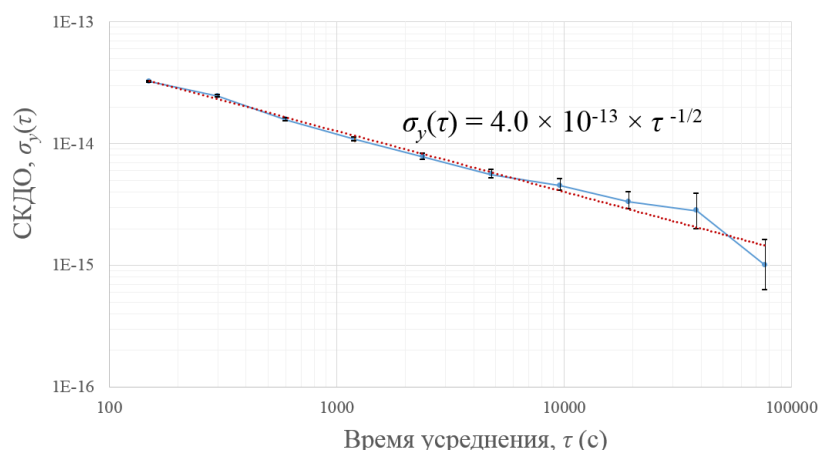


Рис. 6. Среднеквадратическое двухвыборочное отклонение (СКДО) рубидиевого репера относительно водородного генератора

Эффективность применения атомных стандартов частоты зависит прежде всего от степени воздействия факторов, возмущающих энергетические уровни и смещающих частоту «часового» перехода относительно ее номинального значения в идеальном случае, т.е. относительно частоты перехода в изолированной и покоящейся атомной системе. Далее мы перечислим основные факторы и физические эффекты, вызывающие сдвиг частоты атомного перехода и погрешность в ее измерении.

Сдвиг частоты из-за эффекта излучения «черного тела» является наибольшим систематическим сдвигом в стандартах частоты фонтанного типа. Во время полета атомов в СВЧ резонаторе на них воздействует электромагнитное поле, излучаемое стенками пролетного пространства. Этот эффект приводит к смещению частоты «часового» перехода, относительное значение которого может быть вычислено по формуле [2]:

$$\frac{\Delta f_{BBR}}{f_0} = \beta \left(\frac{T}{300K} \right)^4 \left[1 + \varepsilon \left(\frac{T}{300K} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где f_0 – частота «часового» перехода ^{87}Rb , неопределенность в расчете коэффициентов $\beta = -1.256(4) \cdot 10^{-14}$ и $\varepsilon = 0.011$, взятых из [3, 4], приводит к неопределенности относительного сдвига частоты величиной $4 \cdot 10^{-17}$.

В настоящее время рубидиевый репер частоты находится в лабораторном помещении, где температура воздуха поддерживается на уровне $(299,4 \pm 0,5)$ К. СВЧ резонатор и пролетная труба имеют ту же температуру. Постоянный

контроль температуры осуществляется тремя платиновыми термодатчиками TP100: два установлены на корпусе СВЧ резонатора и один за магнитными экранами. Градиент температуры вдоль пролетного пространства не превышает 0,15 К. Таким образом, сдвиг частоты, вызванный эффектом излучения «черного тела», составляет:

$$\frac{\Delta f_{BBR}}{f_0} = (-12.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-15}.$$

Относительный сдвиг частоты «часового» перехода вследствие постоянного магнитного поля (эффект Зеемана) вычисляется по формуле Брайта-Раби [5]. Согласно этому, относительный сдвиг частоты «часового» атомного перехода $|F=1, m=0\rangle \rightarrow |F=2, m=0\rangle$ в магнитном поле B определяется как:

$$\frac{\Delta f_{Z2}}{f_0} = \frac{(g_J - g_I)^2 \mu_B^2}{2h^2 f_0^2} \cdot B^2, \quad (3)$$

где $g_J = 2.00233113$ и $g_I = -0.0009951414$ g -фактор электрона и ядра для ^{87}Rb [6], μ_B – магнетон Бора, h – постоянная Планка.

Среднее значение амплитуды магнитной индукции, создаваемой соленоидом С-поля, которую испытывают летящие атомы, с наибольшей точностью можно определить с помощью линейного сдвига частоты магниточувствительного перехода $|F=1, m=1\rangle \rightarrow |F=2, m=1\rangle$ вследствие эффекта Зеемана первого порядка, который эквивалентен

$$\Delta f_{Z1} = \frac{(g_J - g_I) \mu_B}{2h} B \quad (4)$$

Для расчета магнитного поля вдоль траектории полета атомов была измерена зависимость сдвига частоты из-за эффекта Зеемана первого порядка от высоты подброса атомов. Основываясь на этих данных, была найдена функция пространственного распределения магнитного поля $B(z)$, из которой было определено среднее значение магнитной индукции. Согласно формуле (3), относительный сдвиг частоты «часового» перехода составил $127,4 \cdot 10^{-15}$.

Для определения неисключенной систематической погрешности из-за эффекта Зеемана второго порядка, было рассчитано среднеквадратическое отклонение магнитной индукции вдоль траектории полета атомов: $\sigma^2 = \langle B(z)^2 \rangle - \langle B(z) \rangle^2 = 0,17$ (нТ). Таким образом, сдвиг частоты из-за эффекта Зеемана второго порядка составил:

$$\frac{\Delta f_Z}{f_0} = (127.4 \pm 0.1) \cdot 10^{-15}.$$

Поскольку определение секунды основано на истинном времени, при сравнении частот двух стандартов, находящихся в разных точках, необходимо учитывать влияние гравитационного потенциала Φ на частоту осциллятора, как показано в [7]. Согласно общей теории относительности на поверхности Земли возникает частотный сдвиг $\Delta\nu = -\nu\Phi/c^2$, где в потенциале

учитываются вклады гравитационного ускорения и центростремительного ускорения, связанного с вращением рассматриваемого стандарта. Если система отчета вращается вместе с геоидом, потенциал (в данном случае только гравитационный) можно выразить, как $\Phi = gh/c^2$, где $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$ – местное значение ускорения свободного падения, а h – высота над поверхностью геоида.

Экспериментальный образец репера частоты фонтанного типа на основе холодных атомов рубидия располагается на высоте $(222,3 \pm 0,5) \text{ м}$ над геоидом в балтийской системе координат, таким образом, сдвиг частоты «часового» перехода вследствие гравитационного эффекта равен: $(24,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-15}$.

4 Выводы

Во ВНИФТРИ разработан экспериментальный образец репера частоты фонтанного типа на основе холодных атомов рубидия. В ходе лабораторных исследований изготовленного образца была измерена эффективная температура атомного облака (4 мК), прописан резонанс Рэмси с шириной центрального пика $< 1 \text{ Гц}$ и произведена оценка сдвигов частоты из-за эффекта излучения «черного тела», эффекта Зеемана и гравитации. В дальнейшем планируются работы, направленные на доработку конструкции рубидиевого репера с целью создания опытного образца. Также будет составлен бюджет неопределенностей для уточнения уже рассмотренных физических эффектов и добавления новых, вносящих менее значительный вклад в определение неисключенной систематической погрешности. Таким образом, полученные результаты позволили создать задел по реализации нового возможного определения единицы времени Международной системы единиц – секунды, отвечающего требованиям Международных метрологических организаций.

Литература

1. Recommendation Adopted by the International Committee for Weights and Measures, Session I of the 102nd meeting of the CIPM. - 2013.
2. Pal'chikov V.G., Domnin Yu.S., Novoselov A.V. Black-body radiation effects and light shifts in atomic frequency standards// J. Opt. B: Quantum and Semiclass. Opt. 5, p. 131–135, 2003.
3. Angstmann E. J., Dzuba V. A. and Flambaum V. V.// *Phys. Rev.*, A 74 023405.
4. Safronova M. S., Jiand D. and Safronova U. I. 2010, arXiv:physics.atom-ph/1007.0462, 2006.
5. Breit G. and Rabi I. I., 1931// *Phys. Rev.*, 38 2082–3.
6. Arimondo E., Inguscio M. and Violino P.// *Rev. Mod. Phys.* 49, 1977, p. 31–75.
7. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. М.: Физматлит, 2009.