

Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2

Ю. С. ДОМНИН, В. Н. БАРЫШЕВ, А. И. БОЙКО, Г. А. ЕЛКИН, А. В. НОВОСЕЛОВ,
Л. Н. КОПЫЛОВ, Д. С. КУПАЛОВ

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

Представлены конструкция и метрологические характеристики цезиевого репера частоты фонтанного типа МЦР-Ф2, разработанного во ВНИИФТРИ в 2008—2011 годах в рамках Федеральной целевой программы «ГЛОНАСС».

Ключевые слова: цезиевый репер частоты фонтанного типа, оптическое охлаждение атомов, метрологические характеристики.

The design and metrological characteristics of the fountain type cesium frequency standard MCR-F2 developed at VNIIFTRI in 2008—2011 in the frames of «GLONASS» project are presented.

Key words: fountain type cesium frequency standard, atoms optical cooling, metrological characteristics.

Начиная с 1967 г. согласно решению XIII Генеральной конференции по мерам и весам единица времени — секунда — равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего невозмущенному переходу между двумя сверхтонкими уровнями $F = 4$ и $F = 3$ (F — полный угловой момент атома) основного состояния атома ^{133}Cs . Определение секунды реализуется на практике при помощи первичных цезиевых реперов частоты, наиболее точные из них в настоящее время — реперы фонтанного типа, в которых применяются новейшие технологии лазерного охлаждения и удержания атомов в оптических ловушках. В течение последних 10 лет несколько первичных цезиевых стандартов частоты фонтанного типа было введено в эксплуатацию в ведущих метрологических лабораториях мира (в США, Франции, Германии, Италии, Японии) [1]. По причине увеличенного времени взаимодействия и уменьшенных систематических погрешностей эти стандарты значительно превосходят по метрологическим характеристикам атомно-лучевые цезиевые реперы частоты, ранее формировавшие вместе с ансамблями хранителей частоты национальные шкалы времени. Сегодня стали достижимы относительные погрешности воспроизведения частоты часового перехода значительно ниже уровня $1 \cdot 10^{-15}$ и нестабильности измерения этой частоты ниже $10^{-14} (\tau/\text{с})^{-1/2}$ [2 — 4].

В реализации проекта Федеральной целевой программы «ГЛОНАСС» в части создания метрологических цезиевых реперов частоты (МЦР) фонтанного типа с целью значительного повышения точностных характеристик государственного эталона времени и частоты, образуемого в настоящее время первичным атомно-лучевым цезиевым репером частоты [5] и ансамблем высокостабильных коммерческих водородных генераторов — хранителей частоты, участвует ВНИИФТРИ. Ниже рассмотрены конструкция и метрологические характеристики цезиевого репера частоты фонтанного типа МЦР-Ф2, разработанного во ВНИИФТРИ в 2008—2011 гг.

Конструкция МЦР-Ф2 показана на рис. 1, ее особенностью является то, что геометрия лазерных лучей в зоне оп-

тического охлаждения и удержания («оптическая трясина» — molasses) атомов цезия отличается от их геометрии в других работающих в мире МЦР фонтанного типа. Охлаждение, удержание и подбрасывание атомов вверх осуществляется с использованием четырех пар встречных лазерных лучей, расположенных в двух вертикальных взаимно-перпендикулярных плоскостях. В этих плоскостях лучи поляризованы, угол между направлениями каждого луча и вертикальной осью составляет 45° . Все восемь плоскопараллельных лучей формируются с помощью телескопических механизмов, жестко закрепленных на присоединительных фланцах оптических окон узла оптической ловушки. Узел ловушки имеет 12 оптических окон и два источника атомов цезия, находящихся при комнатной температуре.

Два фотодетектора для регистрации атомов в состояниях с $F = 4$, $F = 3$ расположены выше центра области «трясины» на 210 мм. Оптические окна фотодетекторов смещены по высоте друг относительно друга на 22 мм и находятся на противоположных сторонах узла детектирования. Детектирующие и сдувающий лазерные лучи, а также луч накачки проходят через вторую пару оптических окон, размещенных в одной зоне с фотодетекторами под углом 90° к ним.

Между зонами ловушки и детектирования помещен селектирующий сверхвысокочастотный (СВЧ) резонатор, выполненный в виде прямоугольного медного волновода поперечным размером 14×20 мм. В его центре сделаны отверстия для пролета облака цезия диаметром 10 мм с запредельными волноводами. Резонатор находится в титановом цилиндре. Вакуумное уплотнение для возбуждения резонатора СВЧ-сигналом имеет вид впаянного в титан керамического диска. Резонатор настроен на частоту часового перехода 9192 МГц с полосой пропускания около 25 МГц и предназначен для перевода атомов цезия из состояния

$|F = 4, m = 0\rangle$ в состояние $|F = 3, m = 0\rangle$, где m — магнитное квантовое число. Горизонтальный детектирующий лазерный луч используется для сдува атомов, остающихся на уровне $|F = 4\rangle$ после завершения процесса селекции состояний.

Зона ловушки, селектирующий резонатор и зона детектирования заключены в двухслойный магнитный экран, внутри которого с помощью трех вспомогательных катушек создается магнитное поле нужной конфигурации.

Вакуумный корпус пролетного пространства (от 330 мм выше центра резонатора до 220 мм ниже его) изготовлен из меди и окружен системой пяти-слойного магнитного экранирования. Внутренний диаметр пролетного пространства равен 20 мм. Для создания однородного магнитного поля служит двухслойный соленоид с противоположными направлениями намотки. Сверху и снизу соленоида располагаются корректирующие катушки такого же диаметра, как и соленоид. Кроме них, в области нижних слоев магнитных экранов находятся две катушки малого диаметра для корректировки магнитного поля в переходной области между нижней системой экранирования зон ловушки и детектирования и верхней системой экранирования пролетного пространства. Для обеспечения вакуума в камере используется магниторазрядный насос со скоростью откачки 20 л/с. Сила тока насоса в автономном режиме не превышает 0,01 мкА, что соответствует давлению в нижней части вакуумной камеры менее $1,5 \cdot 10^{-8}$ Па, при этом расчетное давление в пролетной области будет $4,4 \cdot 10^{-8}$ Па.

Оптическую систему МЦР-Ф2 формируют оптические пучки излучения полупроводниковых лазеров на длине волны 851 нм (соответствующей оптическим переходам D_2 спектральной линии атома цезия) с оптимальной интенсивностью не менее 2 мВт/см² для каждого из охлаждающих и детектирующих лучей. Эта система состоит из опорного — диодного лазера с внешним резонатором (ДЛВР) — и двух ведомых лазеров, каждый из которых может генерировать излучение мощностью до 300 мВт, а также лазера накачки — ДЛВР. Излучение каждого из ведомых лазеров поступает на пару акустооптических модуляторов (АОМ), выходное излучение которых после двойного прохода через них входного пучка формирует две пары нисходящих и восходящих охлаждающих лазерных пучков. Излучение каждого из этих четырех пучков по сохраняющему поляризацию оптоволоконному кабелю подводится в зону «трясины», где все они формируют охлаждающую систему тетраэдральной конфигурации (см. рис. 1, в).

Схема оптической системы МЦР-Ф2 показана на рис. 2. В системе частотной автоподстройки (ЧАП) опорного ДЛВР используется синусоидальная частотная модуляция тока инжекции на частоте около 14 кГц. Часть его выходного излучения отводится в магнитно-экранированную Cs-ячейку для проведения спектроскопии насыщенного поглощения. Обращенный пик линии циклического перехода $F = 4 \rightarrow F' = 5$ служит для частотной привязки ДЛВР [6]. Основная часть излучения опорного ДЛВР отводится на АОМ в конфигурации двойного прохода. Частота модуляции последнего может варьироваться в области 70 — 100 МГц для подходящей частотной отстройки излучения во время работы МЦР-Ф2 в фазах охлаждения, подброса облака охлажденных атомов вверх и доохлаждения. Выходное излучение АОМ заводится через фарадеевские вращатели ФВ на оба ведомых лазера с целью их оптического захвата.

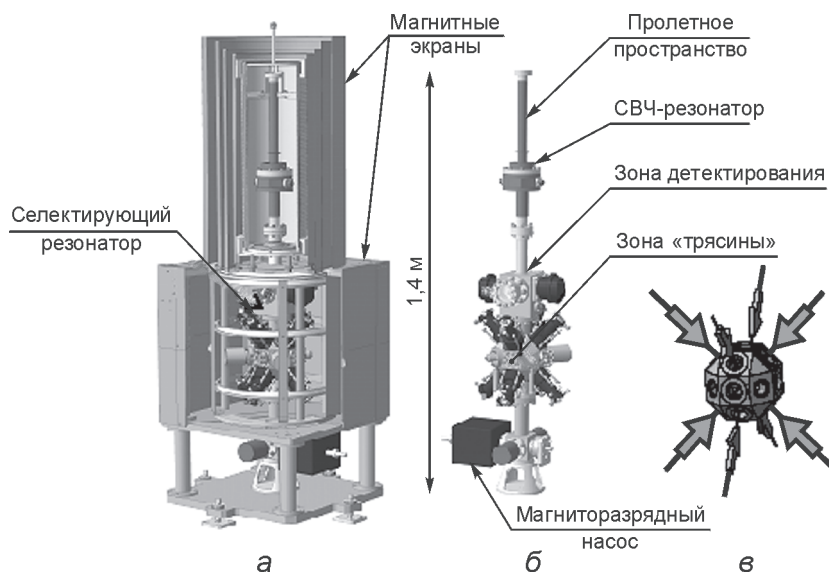


Рис. 1. Конструкция МЦР-Ф2 с магнитными экранами (а) и без них (б) и геометрия лазерных лучей, формирующих «оптическую трясины» (в)

Разного рода шумы ухудшают кратковременную стабильность частотных измерений. Чтобы достичь уровня точности в несколько единиц 10^{-16} знака при измерении таких сдвигов частоты, как столкновительный или мощностной, необходимо, чтобы системы ЧАП лазеров опорного и накачки работали непрерывно на недельных интервалах. Требуемое просветление выходной грани лазерных диодов этих ДЛВР позволяет достичь долговременной стабильности частотных сличений МЦР-Ф2.

Цилиндрический СВЧ-резонатор часового перехода с внутренними размерами $D = 48$ мм, $h = 29$ мм и типом волны TE_{011} изготовлен из меди. Возбуждение происходит симметрично с двух противоположных сторон через вспомогательный кольцевой волновод поперечными размерами $b = 23$ мм, $a = 8$ мм. Нагруженная добротность резонатора равна 3600; точная настройка выполняется путем незначительной деформации его верхней стенки. Резонатор завершается двумя запредельными волноводами длиной 80 мм. Вариация температуры резонатора и пролетного пространства не превышает 0,2 К и регистрируется в процессе измерений. При температуре в помещении 23,4 °С частота резонатора приблизительно на 90 кГц ниже частоты атомного резонанса. Для формирования зондирующего сигнала используется цезиевый синтезатор CS-1 фирмы SPECTRADYNAMICS (США).

Цикл работы репера начинается с накопления атомов в течение 600 мс в «оптической трясины», во время которого частота лазерных лучей смещается примерно на 7 МГц ниже частоты циклического резонанса $F = 4 \leftrightarrow F' = 5$. Далее в течение 0,9 мс атомы запускаются вверх и еще в течение 1 мс происходит процесс доохлаждения до температуры примерно 600 нК в вертикальном направлении. Во время доохлаждения из восьми лучей работают только четыре, образующие один тетраэдр из двух. В процессе доохлаждения частота лучей смещается на 60 МГц ниже частоты циклического перехода, и амплитуда падает практически до нуля. Сразу после доохлаждения выключаются все лучи, кроме лучей лазера накачки, которые выключаются с задержкой в не-

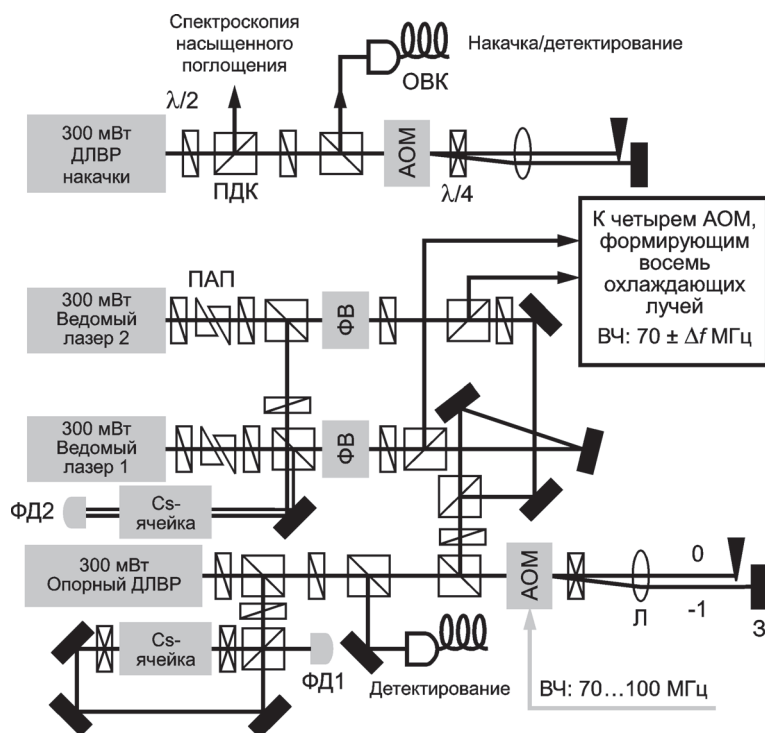


Рис. 2. Упрощенная схема оптической системы МЦР-Ф2:

ОВК — оптоволоконный кабель; ФВ — фарадеевский вращатель; АОМ — акустооптический модулятор; ПАП — пара анаморфных призм; ПДК — поляризующий делительный кубик; ФД — фотодетектор; $\lambda/2$, $\lambda/4$ — полуволновая и четвертьволновая пластинки; Л — линза; 3 — зеркало

сколько миллисекунд. Из зоны «оптической трясины» атомы вылетают в состоянии $F = 4$ и попадают в селектирующий резонатор, осуществляющий перевод атомов из состояния $|F = 4, m = 0\rangle$ в состояние $|F = 3, m = 0\rangle$. Остальные атомы на высоте 20 см подвергаются действию детектирующего луча на частоте циклического перехода. Под влиянием бегущей волны на этой частоте все остальные атомы в состояниях $|F = 4, m \neq 0\rangle$ удаляются из облака.

На высоте 52,5 см рабочие атомы в состоянии $|F = 3, m = 0\rangle$ попадают в опросный резонатор, СВЧ-мощность которого подобрана так, чтобы при двукратном прохождении через него максимальное число атомов переходило из состояния $F = 3$ в состояние $F = 4$. После прохождения атомами резонатора вверх фаза зондирующего сигнала переключается на $\pi/2$, а после их прохождения вниз включаются детектирующие лучи. Интенсивность циркулярно поляризованного детектирующего излучения примерно 1 мВт/см^2 , что приводит к рассеянию порядка 10000 фотонов на атом во время их пролета через детектирующий луч. Эффективность

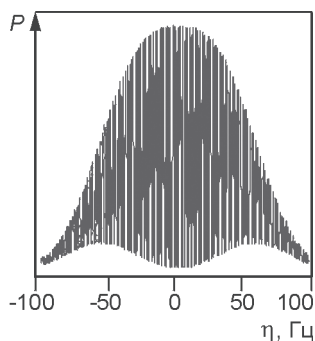


Рис. 3. Линия Рэмси часового перехода в МЦР-Ф2; P — вероятность перехода; частота перехода 9192631770 Гц

сбора рассеянных атомов составляет около 6 %. В конце пролета через детектирующий луч атомы попадают в бегущую волну, которая удаляет атомы в состоянии $F = 4$ из области взаимодействия. Далее атомы из состояния $F = 3$ переводятся в состояние $F = 4$ и регистрируется сигнал N_3 , пропорциональный числу атомов в состоянии $F = 3$. Соотношение $P = N_4/(N_3 + N_4)$ определяет вероятность перехода под действием электромагнитного поля СВЧ-резонатора. Типичная линия Рэмси, записанная при сканировании частоты сигнала, подаваемого на опросный СВЧ-резонатор, и соответствующая часовому переходу $F = 3, m = 0 \leftrightarrow F = 4, m = 0$ (частота перехода $f_0 = 9192631770 \text{ Гц}$), показана на рис. 3. Длительность одного фонтанного цикла составляет 1,5 с.

В настоящей статье приведем первую оценку точности воспроизведения частоты часового перехода репером МЦР-Ф2. Рассмотрим только те физические эффекты, которые приводят к наибольшим сдвигам частоты часового перехода и (или) вносят наиболее существенный вклад в суммарную неисключенную систематическую погрешность $4,8 \cdot 10^{-16}$.

Относительное смещение частоты часового перехода из-за постоянного магнитного поля вычисляется по формуле [7]:

$$f_C/f_0 = -427,46 \cdot 10^8 (\bar{B}_C)^2 / f_0 = -8 (F_Z/f_0)^2,$$

где f_C — частотный сдвиг в цезиевом стандарте под воздействием С-поля; $\bar{B}_C$ — среднее значение индукции магнитного поля в пролетном пространстве; $F_Z = f_{\sigma+1} - f_0$ — зеемановская частота.

Для определения квадратичного эффекта Зеемана и влияния неоднородности магнитного поля в пролетном пространстве выполняли измерения магнитного поля путем подбрасывания атомов на разную высоту с дискретностью шага подбрасывания $0,5 - 1 \text{ см}$. Среднее значение индукции магнитного поля в пролетном пространстве

$$\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i = 1,518 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}.$$

Относительное смещение частоты часового перехода из-за эффекта Зеемана $f_C/f_0 = -1,06769 \cdot 10^{-13}$. Среднее квадратическое отклонение (СКО) относительного смещения частоты от его среднего значения, обусловленное дрейфом индукции С-поля во времени, около $1 \cdot 10^{-17}$. Среднеквадратическая неоднородность индукции магнитного поля в пролетном пространстве

$$\overline{\Delta B^2} = \sum_i (B_i - \bar{B})^2 / n = 2,2 \cdot 10^{-19} \text{ Тл}^2.$$

Неопределенность поправки, связанная с неоднородностью С-поля, выражается как

$$\delta_C = 4,2746 \cdot 10^{10} \overline{\Delta B^2} / f_0 = 1,04 \cdot 10^{-18}.$$

Резонатор Рэмси и пролетное пространство цезиевого репера выполнены из меди, и их температуру контролируют

при помощи платинового термометра. Типичная вариация температуры в помещении составляет 0,2 К. Оценку смещения частоты проводят в предположении, что в пределах 0,2 К температура одна и та же на всем пути следования атомов. Температуру регистрировали и определяли ее среднесуточные значения T_i в помещении. По результатам измерений находили:

среднесуточный сдвиг частоты МЦР-Ф2 из-за эффекта излучения черного тела (ЧТ)

$$\Delta_{Ti} = \delta f/f_0 = \beta (T_i/T_0)^4 [1 + \varepsilon (T_i/T_0)^2],$$

где $\beta = (-1,7100 \pm 0,0061) \cdot 10^{-14}$; $\varepsilon = 0,014 \pm 0,001$ [1, 8];

средний сдвиг частоты репера за весь интервал измерений

$$\Delta_T = \langle \Delta f/f \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta f}{f} \right)_i = -1,65 \cdot 10^{-14};$$

СКО сдвига частоты из-за эффекта излучения ЧТ на выбранном интервале

$$\sigma_{\text{ЧТ}} = \sqrt{\sum_i \left(\left(\frac{\Delta f}{f} \right)_i - \langle \frac{\Delta f}{f} \rangle \right)^2} / n \approx 6,4 \cdot 10^{-18},$$

что на два порядка меньше погрешности $0,7 \cdot 10^{-16}$ из-за неопределенности коэффициента β .

Для вычисления гравитационной поправки сотрудниками Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского были выполнены абсолютные измерения ускорения силы тяжести g_F и определена высота h_F рабочей точки МЦР-Ф2 в Балтийской системе высот, которые составили $9,8157724 \text{ м/с}^2$ и $223,70 \pm 0,03 \text{ м}$, соответственно.

Относительная гравитационная поправка выражается как

$$\Delta_G = \Delta f_h/f_0 = -gh/c^2,$$

где h — высота пролетного пространства (усредненного по времени его пролета атомами цезия) МЦР-Ф2 над геоидом; g — общее ускорение свободного падения (гравитационное и центробежное), $g = g_F$; $c = 299792458 \text{ м/с}$ — скорость света.

При $h_F = h = (223,7 \pm 0,03) \text{ м}$ гравитационная поправка $\Delta_G = -24,43 \cdot 10^{-15}$, а погрешность ее определения $\delta_G \approx 7 \cdot 10^{-18}$.

Расстройка СВЧ-резонатора Δ_p относительно номинальной частоты $f_0 = 9,2 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ вызывает смещение частоты, воспроизводимой МЦР-Ф2, которое оценивают из соотношения

$$\Delta_p = (\Delta_{Cs}/\Delta f_p)^2 [(f_p - f_0)/f_0].$$

Здесь $\Delta f_p \approx 2,6 \text{ МГц}$ — полоса пропускания резонатора; $\Delta_{Cs} = 0,94 \text{ Гц}$ — ширина центрального пика линии Рэмси. Частота резонатора в пределах 90 кГц совпадает с частотой атомного резонанса, и затягивание резонатором составляет $\delta f/f_0 \approx 1,4 \cdot 10^{-18}$.

Столкновительный сдвиг находят путем измерения частоты водородного хранителя при двух значениях плотности атомов в облаке. Изменение плотности атомов проводится

поочередно в группе измерений по 100 единичных циклов в последовательности изменения плотности малая — большая — малая. В каждом цикле отдельно вычисляются значения частоты для каждого значения плотности при следующих длительностях 100 единичных циклов:

малая плотность N_0 — 150 с;

большая плотность $3N_0$ — 300 с.

Плотность атомов уменьшают, изменяя частоту СВЧ-сигнала, подаваемого на вспомогательный резонатор, так чтобы амплитуды сигналов на выходе детекторов при этом снизились в 3 раза. Совокупность этих измерений составляет единичную серию. После завершения измерений текущей серии результат записывается, и запускается следующая серия. Заданный режим воспроизводится в течение всего цикла измерений.

Столкновительный сдвиг частоты при плотности атомов в облаке, соответствующей штатному режиму работы МЦР-Ф2, будет

$$\Delta_{\text{ст}} = (\alpha - 1)^{-1} (\Delta_6 - \Delta_M) \approx 5,3 \cdot 10^{-16},$$

где $\alpha = A_6/A_M = \bar{\alpha} + \delta_\alpha \approx 3 \pm 0,1$ — относительное изменение плотности атомов в облаке; Δ_M , Δ_6 , A_M , A_6 — измеренные разности частот и амплитуды сигнала детектора при малой и большой плотности атомов, соответственно; δ_α — погрешность определения α .

Погрешность определения столкновительного сдвига

$$\delta_{\text{ст}} = (\bar{\alpha} - 1)^{-1} \sqrt{\delta_6^2 + \delta_M^2 + \delta_\alpha^2 (\Delta_6 - \Delta_M)^2} \approx 2,3 \cdot 10^{-16}.$$

Влияние майорановских переходов на частоту репера проявляется при неравенстве вероятностей переходов ($F = 3, m = -1$) $\rightarrow$ ($F = 3, m = 0$) и ($F = 3, m = 1$) $\rightarrow$ ($F = 3, m = 0$). Система магнитного экранирования в области ловушки и детектора должна обеспечивать условия плавного изменения индукции магнитного поля от ловушки к детекторной секции и далее в область пролетного пространства. При этом вдоль всей траектории пролета облака направление магнитного поля не должно меняться на противоположное.

Критерий плавности изменения магнитного поля формулируется из условия отсутствия майорановских переходов для атомов, пролетающих в неоднородном магнитном поле. Относительное изменение магнитного поля за время одно-

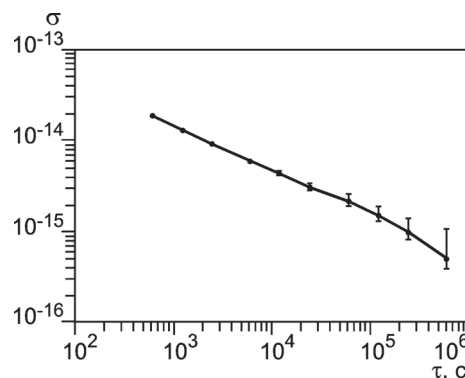


Рис. 4. Стабильность МЦР-Ф2 (вариация Аллана σ) относительно высокостабильного водородного генератора

го периода прецессии в нем атома (ларморовской прецессии), должно быть много меньше единицы [9]:

$$B'T_L / B \ll 1,$$

где $B' = \partial B / \partial z$; v — скорость пролета атомов в данной точке траектории; $T_L = (2\pi\gamma B)^{-1}$ — период Ларморовской прецессии; γ — ядерное гиромагнитное отношение.

Максимальные значения составляют $B' = 22$ нТл/с, $T_L \approx 0,001$ с. Критерий выполняется. Разность населенностей состояний с $m = +1$ и $m = -1$ не превышает 1 %. Майорановский сдвиг не больше $1 \cdot 10^{-17}$; Раби- и Рэмси-затягивания меньше $1 \cdot 10^{-18}$ [10].

Исследование зависимости частоты репера от мощности СВЧ-сигнала осуществляют путем измерения частоты водородного хранителя последовательно при четырех значениях мощности зондирующего сигнала, соответствующих оптимальным величинам для $\pi/2$, $3\pi/2$, $5\pi/2$ и $7\pi/2$. Значение $\pi/2$ соответствует оптимальной мощности. При измерениях многократно последовательно изменяли мощность от $\pi/2$ до $7\pi/2$ после каждой группы измерений по 100 циклов (единичных измерений) на протяжении не менее двух суток.

С помощью программного комплекса «Фонтан» устанавливают заданный режим работы и выполняют измерения и вычисления: относительной разности частоты между водородным хранителем и цезиевым репером Δ_j ; стандартного отклонения единичного измерения от среднего δ_j ; погрешности результата измерений $\delta_j / \sqrt{N_j}$. Здесь $j = 1, 3, 5, 7$ — относительная амплитуда СВЧ-сигнала, выраженная в единицах $\pi/2$. По двум парам частот ($\Delta_1; \Delta_5$) и ($\Delta_3; \Delta_7$) находят пару частот при «нулевой» мощности. Поправка на мощностной сдвиг для рабочей мощности зондирующего сигнала $\pi/2$ будет $\Delta_{\text{СВЧ}} \approx -3,9 \cdot 10^{-17}$. Неисключенная систематическая погрешность частоты МЦР-Ф2, зависящая от мощности зондирующего СВЧ-сигнала, $\delta_{\text{СВЧ}} \approx 3,8 \cdot 10^{-16}$.

Систематические сдвиги частоты и их погрешности

Физический эффект	Сдвиг $\Delta f \cdot 10^{-15}$	Погрешность $\sigma_j \cdot 10^{-15}$
Эффект Зеемана 2-го порядка	107,24	0,01
Спин-обменный (столкновительный) сдвиг	– 0,52	0,23
Излучение черного тела	– 16,587	0,07
Гравитационный сдвиг	24,43	0,01
Зависимость от мощности СВЧ-сигнала	0,039	0,38
Затягивание резонатором	0,0014	0,01
Чистота спектра зондирующего сигнала	0	0,01
Влияние электронного оборудования	0	0,10
Световой сдвиг	0	0,01
Градиент фазы в резонаторе СВЧ	0	0,07
Микроволновая утечка	0	0,01
Столкновения с остаточным газом	0	0,10
Неисключенная систематическая погрешность $\sigma = \left[\sum (\sigma_j)^2 \right]^{1/2} = 0,48$		

Частотные измерения с применением МЦР-Ф2 продемонстрировали кратковременную нестабильность $2 \cdot 10^{-13}(\tau/c)^{-1/2}$ по отношению к высокостабильному водородному генератору (рис. 4). Перечень систематических сдвигов частоты и погрешностей их определения приведен в таблице.

В период 55834 — 55864 MJD были проведены частотные сличения МЦР-Ф2 с международной атомной шкалой времени (TAI), формируемой в Международном Бюро мер и весов. Относительная разность частот, воспроизводимых МЦР-Ф2 и TAI, составила $(5,36 \pm 0,5) \cdot 10^{-15}$. За тот же период относительная разность частот, воспроизводимых репером FO2-Cs фонтанного типа, созданным в лаборатории LNE-SYRTE (Франция), и TAI составила $(4,79 \pm 0,5) \cdot 10^{-15}$. Неисключенная систематическая погрешность FO2-Cs оценивается как $2,1 \cdot 10^{-16}$. Таким образом, частоты, воспроизводимые МЦР-Ф2 и FO2-Cs, совпадают в пределах их установленных неисключенных систематических погрешностей.

В настоящее время российский национальный эталон времени и частоты имеет погрешность $5 \cdot 10^{-14}$. Введение в состав эталона разработанного во ВНИИФТРИ метрологического цезиевого репера МЦР-Ф2 повысит его точность на два порядка до уровня $5 \cdot 10^{-16}$.

Л и т е р а т у р а

1. **Wynands R., Weyers S.** Atomic fountain clocks // Metrologia. 2005. V. 42. N 3. P. 64—79.
2. **Vian C. e. a.** BNM-SYRTE fountains: recent results // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 2005. V. 54. N 2. P. 833—836.
3. **Heavner T. e. a.** NIST-F1: recent results and accuracy evaluations // Metrologia. 2005. V. 42. P. 411—422.
4. **Levi F. e. a.** IEN-CsF1 primary frequency standard at INRIM: accuracy evaluation and TAI calibrations // Metrologia. 2006. V. 43. P. 545—555.
5. **Елкин Г. А. и др.** Опыт длительной эксплуатации МЦР102 и МЦР103 в составе Госэталона // Метрология времени и пространства: Труды 5-го Рос. симп. Менделеево, 1994. С. 116—119.
6. **Domnin Y. S. e. a.** Sub-doppler polarization spectroscopy on F4-F'5 transition in Cs // Proc. 6-th Symp. on Frequency Standards and Metrology. University of St. Andrews. Fife. Scotland, 2001. P. 600—602.
7. **Ramsey N. F.** Molecular beams. Oxford: Oxford University Press, 1956.
8. **Simon E., Laurent P., Clairon A.** Measurement of the Stark shift of the Cs hyperfine splitting in an atomic fountain // Phys. Rev. 1998. V. 57. P. 436.
9. **Таунс Ч., Шавлов А.** Радиоспектроскопия. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
10. **Vanier J., Audoin C.** The quantum physics of atomic frequency standards. Bristol: Hilger, 1989.

Дата принятия 13.07.2012 г.