

ка. Рассмотрен детерминированный подход, в котором для уточнения параметров часов и орбит космических аппаратов необходимо решить систему уравнений на основе межспутниковых измерений и априорной информации о параметрах движения космических аппаратов. В связи с этим предложенный авторами подход обладает новизной и является расширением теоретической основы применения межспутниковых измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-07-00112).

Л и т е р а т у р а

1. **Навигационный радиосигнал** в диапазонах L1, L2 с открытым доступом и частотным разделением: ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. М.: Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008. [Электрон. версия] [http://www.russianspacesystem.ru\(bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument\)](http://www.russianspacesystem.ru(bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument)) дата обращения: 20.12.2015).

2. **Перов А. И., Харисов В. Н.** ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2005.

3. **Ступак Г. Г., Ревнивых С. Г., Игнатович Е. И., Куршин В. В., Бетанов В. В., Панов С. С., Бондарев Н. З., Чеботарев В. Е., Балашова Н. Н., Сердюков А. И., Синцова Л. Н.** Выбор структуры орбитальной группировки перспективной системы ГЛОНАСС // Космонавтика. 2013. № 3—4 (6). С. 4—11.

4. **Чубыкин А. А., Рой Ю. А., Корнишев О. М., Падун П. П.** Использование бортовых лазерных измерительно-связных средств для повышения точности и оперативности ЭВО спутников системы ГЛОНАСС // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12. № 7. С. 25—30.

5. **Шаргородский В. Д., Чубыкин А. А., Сумерин В. В.** Межспутниковая лазерная навигационно-связная система // Аэрокосмический курьер. 2007. № 1 (49). С. 88—89.

6. **Соколов С. В.** Синтез аналитических моделей пространственных траекторий и их применение для решения задач спутниковой навигации // Прикладная физика и математика. 2013. Т. 1. Вып. 2. С. 3—12.

Дата принятия: 19.02.2016.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

53.082.79

Бюджет неопределённостей цезиевого репера частоты фонтанного типа

**И. Ю. БЛИНОВ, А. И. БОЙКО, Ю. С. ДОМНИН, В. П. КОСТРОМИН,
О. В. КУПАЛОВА, Д. С. КУПАЛОВ**

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия,
e-mail: kupalova_ov@vniiftri.ru

Описаны конструкция и режим работы цезиевого репера частоты фонтанного типа CsFO2(SU), разработанного и изготовленного во ВНИИФТРИ. Приведены результаты метрологических исследований, которые позволили более точно оценить систематические сдвиги частоты репера и уточнить оценку неисключённой систематической погрешности цезиевого репера частоты фонтанного типа CsFO2(SU), оцениваемой значением порядка $2,5 \cdot 10^{-16}$.

Ключевые слова: атомные часы, цезиевый репер фонтанного типа, холодные атомы.

In the paper the design and operation mode of the CsFO2(SU) fountain-type cesium frequency standard developed at the All-Russia Research Institute of Physicotechnical and Radio Measurements(VNIIFTRI) are presented. The evaluation procedure for the systematic frequency shifts and corresponding uncertainties are shown. Currently the frequency uncertainty (type B) of CsFO2 is $2,5 \cdot 10^{-16}$.

Key words: atomic clock, fountain-type cesium frequency standard, cold atoms.

С момента изобретения первого стандарта частоты фонтанного типа на холодных атомах натрия (1989 г.) и демонстрации первого цезиевого фонтана (1991 г.) [1], точность приборов, основанных на этом принципе, была улучшена на несколько порядков. Современные цезиевые фонтаны различных национальных метрологических лабораторий обес-

печивают воспроизведение абсолютного значения частоты излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 с неисключённой систематической погрешностью (НСП) на уровне $(1,7—7,0) \cdot 10^{-16}$ [2].

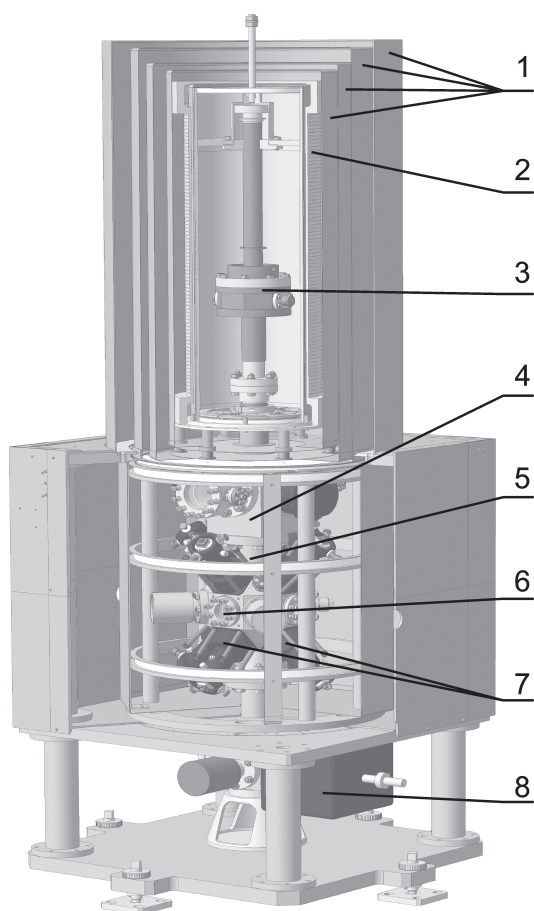


Рис. 1. Компьютерная модель атомного спектрографа цезиевого репера частоты фонтанного типа:

1 — магнитные экраны; 2 — соленоид С-поля; 3, 5 — основной и селектирующий СВЧ-резонаторы, соответственно; 4 — детекторная секция; 6 — оптическая тряпина; 7 — формирователи охлаждающих лучей; 8 — магнитоэлектрический насос

Работы по созданию репера частоты фонтанного типа на холодных атомах цезия (цезиевого фонтана) начались в России в 2000 г. во ВНИИФТРИ. В 2012 г. в эксплуатацию введен и включен в состав государственного эталона времени и частоты (ГЭВЧ) опытный образец цезиевого фонтана CsFO2(SU), который заменил цезиевый репер на тепловом пучке. Это позволило уменьшить НСП определения секунды ГЭВЧ на два порядка. В 2012 г. по результатам аттестации ГЭВЧ относительная погрешность воспроизведения единиц времени и частоты в Международной системе единиц (СИ) посредством цезиевого репера CsFO2(SU) была оценена как $5 \cdot 10^{-16}$ [3].

В процессе эксплуатации проводились метрологические исследования, направленные на уточнение НСП цезиевого фонтана. Более точно были определены оценки сдвигов частоты, обусловленные мощностью зондирующего СВЧ-сигнала и наклоном атомного спектрографа, а также оценки вклада спин-обменного сдвига. Результатом исследований стал пересмотренный бюджет погрешностей для CsFO2(SU). Новая оценка НСП определяется значением $2,4 \cdot 10^{-16}$.

Начиная с апреля 2014 г. результаты внутренних сличений CsFO2(SU) с Н-мазером из ансамбля водородных ге-

нераторов ГЭВЧ регулярно передаются в Международное бюро мер и весов (МБМВ), где их учитывают при формировании Международной шкалы атомного времени (TAI) и публикуют в Циркуляре Т [4].

Конструкция и режим работы цезиевого фонтана. Цезиевый фонтан состоит из следующих основных систем: лазерно-оптической; формирования зондирующего сигнала; управления; атомного спектрографа. Все манипуляции с атомами (уменьшение их тепловой скорости (охлаждение), формирование атомного облака, доохлаждение до температуры порядка 0,3 мК и подброс облака) осуществляются в вакуумной секции спектрографа с помощью лазерного излучения (рис. 1).

В основной ловушке в области пересечения четырех пар встречных лазерных пучков происходит предварительное (доплеровское ~ 120 мК) охлаждение и накопление атомов. Ловушка содержит пары атомов цезия. Лазерные пучки генерируются лазерно-оптической системой и образуются с помощью формирователей охлаждающих лучей. Затем в результате расстройки по частоте встречных лазерных лучей атомное облако подбрасывается вверх. В процессе подбрасывания атомное облако доохлаждается до температуры порядка 0,3 мК (сизифово охлаждение), при этом атомы находятся в квантовых состояниях $F = 4$ с магнитными проекциями $m = -4 \dots 4$.

При пролёте атомов через селектирующий сверхвысокочастотный (СВЧ) резонатор происходит перевод атомов из состояния ($F = 4, m = 0$) в состояние ($F = 3, m = 0$) и удаление из облака всех остальных атомов ($F = 4, m = \pm 4; \pm 3; \pm 2; \pm 1$). Это достигается воздействием на атомы импульса СВЧ-поля, которое возбуждается (на время пролёта через него облака) сигналом с частотой часового перехода $f = 9\,192\,631\,770$ Гц. Амплитуда этого сигнала подобрана так, чтобы атомы в состоянии ($F = 4, m = 0$) полностью перешли в состояние ($F = 3, m = 0$). Атомы, оставшиеся в состояниях ($F = 4, m \neq 0$), удаляются из облака бегущей волной оптического перехода $F4 \leftrightarrow F'5$ при пролёте через лазерный пучок в детекторной секции.

Облако атомов цезия в состоянии ($F = 3, m = 0$) влетает в основной СВЧ-резонатор. Амплитуда сигнала СВЧ-поля в резонаторе подбирается таким образом, чтобы при точном равенстве частот зондирующего сигнала и часового перехода все атомы цезия в облаке после пролёта резонатора вверх перешли в смешанное состояние ($F = 4, m = 0; F = 3, m = 0$).

После достижения облаком атомов высшей точки траектории, фаза зондирующего сигнала переключается на $\pi/2$. При повторном пролёте через СВЧ-резонатор по пути вниз, происходит переход атомов цезия в равных пропорциях в состояния $F = 4, m = 0$ и $F = 3, m = 0$. Затем в детекторной секции по сигналам флуоресценции атомов в детектирующих лучах регистрируются квантовые состояния атомов, а программой системы управления вычисляется отношение количества атомов в облаке совершивших переход ($F = 3, m = 0 \rightarrow F = 4, m = 0$) к общему числу атомов. Таким образом реализуется сравнение частоты зондирующего сигнала с часовым переходом атомов цезия. Длительность одного фонтанного цикла составляет 1,5 с. Детальное описание цезиевого фонтана ВНИИФТРИ приведено в [3].

Сдвиги частоты и погрешности их определения. Основной характеристикой цезиевого фонтана CsFO2(SU) является НСП воспроизведения единиц времени и частоты в соответствии с их определением в системе СИ.

В 2011 г. в ходе предварительных испытаний с целью включения CsFO2(SU) в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1—2012 были определены систематические сдвиги частоты и погрешности (табл. 1). В результате суммарная НСП CsFO2(SU) на момент введения его в эксплуатацию составила $4,8 \cdot 10^{-16}$.

Метрологические исследования и опытная эксплуатация CsFO2(SU) в составе ГЭВЧ. Из табл. 1 следует, что наибольший вклад в НСП CsFO2(SU) вносят спин-обменный сдвиг и сдвиг от мощности СВЧ-сигнала. В процессе эксплуатации были проведены метрологические исследования CsFO2(SU) с целью уточнения оценки НСП.

Зависимость от мощности СВЧ-сигнала. Измерения производились при многократном последовательном изменении мощности СВЧ-сигнала от $\pi/2$ до $7\pi/2$ с шагом π через каждые 100 «выстрелов». При этом с помощью программного комплекса системы управления репера вычисляли: относительную частоту водородного хранителя, измеренную метрологическим цезиевым репером Δ_j ; стандартное отклонение единичного измерения от среднего значения δ_j ; погрешности результата измерения $\delta_j / \sqrt{N_j}$, где $j = 1, 3, 5, 7$; относительную амплитуду СВЧ-сигнала, выраженную в единицах $\pi/2$.

По двум парам частот (Δ_1 ; Δ_5) и (Δ_3 ; Δ_7) находили значение пары частот при «нулевой» мощности:

$$\Delta_1^0 = \Delta_{1-5} = 5\Delta_1/4 - \Delta_5/4; \delta_{1-5} = \sqrt{(5\delta_1/4)^2 + (\delta_5/4)^2}; \quad (1)$$

$$\Delta_2^0 = \Delta_{3-7} = 7\Delta_3/4 - 3\Delta_7/4; \delta_{3-7} = \sqrt{(7\delta_3/4)^2 + (3\delta_7/4)^2}. \quad (2)$$

Вычисляли среднее значение частоты при «нулевой» мощности:

$$\Delta_0 = (w_{1-5} \Delta_{1-5} + w_{3-7} \Delta_{3-7}) / (w_{1-5} + w_{3-7}). \quad (3)$$

Погрешность частоты при нулевой мощности определяется следующим выражением:

$$\delta_0 = \sqrt{(w_{1-5} \delta_{1-5} / (w_{1-5} + w_{3-7}))^2 + (w_{3-7} \delta_{3-7} / (w_{1-5} + w_{3-7}))^2}, \quad (4)$$

где $w_{1-5} = (1/\delta_{1-5})^2$ и $w_{3-7} = (1/\delta_{3-7})^2$ — весовые коэффициенты.

Величина поправки на сдвиг частоты для рабочей мощности зондирующего сигнала $\pi/2$:

$$\Delta_{\text{СВЧ}} = \Delta_1 - \Delta_0 = \alpha_1 \Delta_1 + \alpha_3 \Delta_3 - \alpha_5 \Delta_5 - \alpha_7 \Delta_7; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta f_P}{f_0} = \Delta_1 - \Delta_0 = & \left(\frac{\delta_{3-7}^2}{\delta_{1-5}^2 + \delta_{3-7}^2} \frac{5}{4} - 1 \right) \Delta_1 + \frac{\delta_{1-5}^2}{\delta_{1-5}^2 + \delta_{3-7}^2} \frac{7}{4} \Delta_3 - \\ & - \frac{\delta_{3-7}^2}{\delta_{1-5}^2 + \delta_{3-7}^2} \frac{1}{4} \Delta_5 - \frac{\delta_{1-5}^2}{\delta_{1-5}^2 + \delta_{3-7}^2} \frac{3}{4} \Delta_7. \end{aligned} \quad (6)$$

В табл. 2 представлены результаты измерений при разной мощности СВЧ-сигнала. Для исключения дрейфа

Таблица 1

Систематические сдвиги частоты и погрешности их определения

Физический эффект	Сдвиг $\Delta f / f \cdot 10^{16}$, отн. ед.	Погрешность, $\sigma_j \cdot 10^{16}$, отн. ед.
Эффект Зеемана 2-го порядка	1088,7	0,1
Спин-обменный (столкновительный сдвиг)	−5,2	2,3
Излучение чёрного тела	−165,87	0,7
Гравитационный сдвиг	244,3	0,1
Зависимость от мощности СВЧ-сигнала	0,39	3,8
Затягивание резонатором	—	0,1
Амплитудно-фазовая модуляция зондирующего сигнала	—	0,1
Электроника	—	1
Световой сдвиг	—	0,1
Градиент фазы в СВЧ-резонаторе	—	0,7
Микроволновая утечка	—	0,1
Столкновения с остаточным газом	—	1
НСП $\sigma = \left[\sum (\sigma_j)^2 \right]^{1/2}$	—	4,8

водородного генератора данные приведены к одной дате и обработаны согласно формулам (1)—(6).

Сдвиг составляет $\Delta_1 - \Delta_0 \approx 5 \cdot 10^{-17}$, а погрешность его определения $\delta_{\text{СВЧ}} = \delta_P = \sqrt{\alpha_1^2 \delta_1^2 + \alpha_3^2 \delta_3^2 + \alpha_5^2 \delta_5^2 + \alpha_7^2 \delta_7^2} \approx 1,8 \cdot 10^{-16}$.

Столкновительный сдвиг. Каждая сессия измерений проводится при пяти разных значениях плотности атомов в облаке с целью учёта столкновительного сдвига. Изменение плотности атомного облака достигается изменением амплитуды СВЧ-сигнала селектирующего резонатора.

Для каждой плотности определяется частота и стандартное квадратичное отклонение (СКО) её определения. Частота за сессию определяется как средневзвешенное значение из пяти серий измерений. В вычисленном значении ча-

Таблица 2

Результаты измерений частоты при разных значениях мощности СВЧ-сигнала

Относительная мощность, в единицах $\pi/2$	Относительная частота $\Delta f / f$ [CL403818—CsFO2] $\cdot 10^{15}$, отн. ед.	Погрешность результата измерений $\delta \cdot 10^{16}$, отн. ед.
1	7,56	2,49
3	8,43	4,14
5	4,10	5,89
7	1,56	4,94

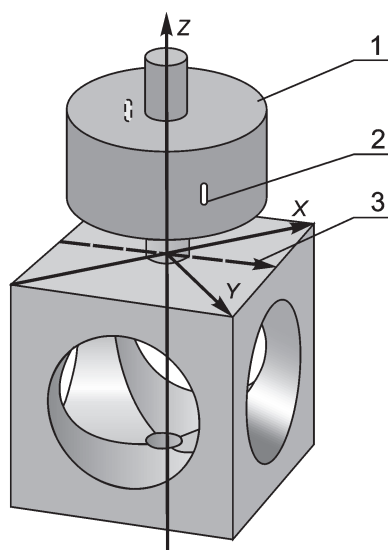


Рис. 2. Ориентация наклонов оси Z спектрографа относительно отверстий основного СВЧ-резонатора и детекторной секции:

1 — резонатор Рэмси; 2 — отверстия для возбуждения СВЧ-колебаний в резонаторе; 3 — детектирующий луч

стоты содержится поправка на столкновительный сдвиг, а погрешность из-за этого сдвига входит в статистическую погрешность [5], поэтому погрешность его определения исключается из НСП. Приведённый к средневзвешенному значению частоты спин-обменный сдвиг составляет порядка $2,6 \cdot 10^{-16} \pm \pm 0,9 \cdot 10^{-16}$. Данная оценка получена обработкой результатов годовых измерений. Сдвиг невелик, что может быть связано с тем фактом, что по оценкам [6] сдвиг и его знак зависят от температуры облака, и при температурах порядка 100 нК направление сдвига должно из-

меняться [7]. В рассматриваемом случае, при количестве рабочих атомов $N_p \sim 1 \cdot 10^5$ в облаке и при рабочей температуре облака примерно 350—550 нК, сдвиг может быть на уровне $(2-3) \cdot 10^{-16}$. Например, для фонтана NIST: $N_p \sim 5 \cdot 10^5$, $T_{\text{обл}} \sim 0,5$ мК, $\Delta_{\text{сп-обм}} \sim (4-10) \cdot 10^{-16}$ [8].

Сдвиг частоты, вызванный градиентом фазы в основном СВЧ-резонаторе (чувствительность к наклону). Чтобы оценить сдвиг, вызванный градиентом фазы СВЧ-поля в основном резонаторе, была проведена серия измерений частоты с изменением положения вертикали спектрографа. Для этого спектроскоп наклоняли по осям X, Y (рис. 2), где ось Y соответствует оси, проходящей через отверстия возбуждения основного СВЧ-резонатора. Для контроля углов наклона на несущем каркасе фонтана CsFO2(SU) был установлен инклинометр Leica Nivel 210 с разрешающей способностью в 1 мкрад.

В ходе эксперимента были произведены наклоны оси Z вокруг оси Y на $-2,12$ и $+1,41$ мрад. Анализ результатов измерений частоты в зависимости от наклона оси Z показал, что относительная чувствительность к наклонам по оси Y составляет $(1,2 \pm 4,8) \cdot 10^{-17}$.

По оси X были выполнены наклоны на $-0,71$ и $+1,41$ мрад. Относительная чувствительность по оси X при оптимальной СВЧ-мощности $\pi/2$ составила $(3,5 \pm 5,4) \cdot 10^{-17}$.

По изменению амплитуды сигнала фонтана при наклонах было установлено, что можно устанавливать вертикальное положение фонтана с точностью $\pm 0,2$ мрад по обоим осям. Суммарный сдвиг частоты из-за наклона по двум осям при погрешности установки по вертикали $\pm 0,2$ мрад не превышает $(3,7 \pm 7,3) \cdot 10^{-17}$.

Линзовый эффект. В [9] показано, что в бюджет неопределённостей может давать вклад сдвиг частоты из-за линзового эффекта (СВЧ-поле в резонаторе действует на атомы как линза). Так как во всех атомных фонтанах геометрия основного резонатора (резонатора Рэмси) практически одинакова, то и плотность СВЧ-поля, и распределение векторов СВЧ-поля, также практически одинаковы для всех резонаторов. Соответственно линзовый эффект у фонтанов сопоставим и не превышает $1 \cdot 10^{-16}$.

В табл. 3 приведён уточнённый по результатам метрологических исследований перечень систематических сдвигов частоты и погрешностей их определения.

По результатам метрологических исследований уточнённая НСП воспроизведения единиц времени и частоты составила $2,4 \cdot 10^{-16}$.

С марта 2012 г. единица времени в национальной шкале атомного времени определяется на основе регулярных сличений водородных хранителей частоты относительно цезиевого фонтана CsFO2(SU). В 2013 г. в качестве источника опорного сигнала для функционирования цезиевого фонтана использовали разные Н-мазеры из ансамбля водородных генераторов. По результатам измерений, водородный генератор CL403818 показал лучшую кратковременную стабильность порядка $7 \cdot 10^{-14} / \sqrt{\tau}$ [10]. Кратковременная стабильность задающего генератора такого уровня позволяет в 3—4 раза сократить время измерений для достижения заданной (одной и той же) точности, по сравнению с любым другим водородным генератором из состава ГЭВЧ.

Таблица 3

Бюджет систематических сдвигов и погрешностей их определения

Физический эффект	Сдвиг $\Delta f / f \cdot 10^{16}$, отн. ед.	Погрешность, $\sigma_i \cdot 10^{16}$, отн. ед.
Эффект Зеемана 2-го порядка	-1068,8	0,10
Излучение чёрного тела	-165,5	0,7
Гравитационный сдвиг	244,3	0,5
Столкновительный сдвиг	4**	3*
Зависимость от мощности СВЧ-сигнала	0,54	1,8
Затягивание резонатором	0,014	0,1
Чистота спектра зондирующего сигнала	0,0	0,1
Световой сдвиг	0,00	0,01
Градиент фазы в основном СВЧ-резонаторе (чувствительность к наклону)	0,37	0,73
Микроволновая утечка	0,0	0,1
Линзовый эффект	1	1
Столкновения с остаточным газом	0,0	0,1
НСП $\sigma = \left[\sum (\sigma_i)^2 \right]^{1/2}$	—	2,4

Примечание: * — столкновительный сдвиг для максимальной плотности в одной из серий измерений; ** — погрешность определения столкновительного сдвига; значения приведены только для справки и погрешность столкновительного сдвига в НСП не включается.

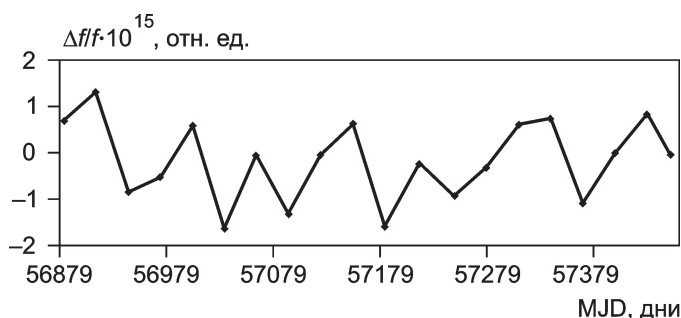


Рис. 3. Относительная разность между единицей частоты SI(SU), определяемой посредством CsFO2(SU), и единицей частоты SI(BIPM), задаваемой группой первичных и вторичных стандартов частоты, публикуемых в Циркуляре Т

На регулярной основе ВНИИФТРИ отправляет отчёты в Отделение времени МБМВ, содержащие значения частоты CL403818 на фиксированную дату, определённые по результатам его сравнений с первичным метрологическим репером CsFO2(SU). Эти результаты используются при формировании международной атомной шкалы TAI. В ежемесячном Циркуляре Т МБМВ приводится разность единиц времени в шкале TAI и SI_{BIPM}, полученная МБМВ пересчётом всех имеющихся первичных и вторичных стандартов частоты.

На рис. 3 представлена оценка, приведённая к месячным интервалам разности $\Delta f/f$ [CL403818 – CsFO2(SU)] – $\Delta f/f$ [CL403818 – SI(BIPM)] = $\Delta f/f$ [SI(BIPM) – CsFO2(SU)], где $\Delta f/f$ [CL403818 – CsFO2(SU)] – кривая CL403818 – CsFO2(SU), аппроксимированная полиномом 4-го порядка. Среднее значение разности на интервале измерений около двух лет (20 мес.) составило $(-8,8 \pm 4,2) \cdot 10^{-17}$.

В Циркуляре Т публикуются данные разности единиц времени и частоты национальных фонтанов и TAI, в том числе CsFO2(SU). На рис. 4 представлена разность частот [TAI – SI_{BIPM}] и [TAI – CsFO2(SU)] в течение года.

Средняя относительная разность частот SI_{BIPM} и CsFO2(SU) на годовом интервале исследований составила $(1,0 \pm 2,8) \cdot 10^{-16}$. Приведённые данные основаны на результатах МБМВ и представляют независимое подтверждение нового бюджета погрешностей, представленного в данной статье.

Заключение. По результатам метрологических исследований цезиевого фонтана CsFO2(SU) и сличений его с ансамблем первичных стандартов установлено, что НСП первичного цезиевого репера CsFO2(SU) составляет $2,4 \cdot 10^{-16}$.

Введение в состав ГЭВЧ цезиевого фонтана CsFO2(SU) позволило усовершенствовать эталонную базу системы обеспечения единства измерений в России и снизить погрешность воспроизведения единиц времени и частоты до $2,4 \cdot 10^{-16}$. Обмен данными с МБМВ по измерению частоты водородного генератора CL403818 показывает совпадение (в пределах заявленных погрешностей) результатов МБМВ и CsFO2(SU).

Первая публикация вклада CsFO2(SU) в формирование единицы времени СИ в Циркуляре Т МБМВ состоялась в апреле 2014 г. С этого момента результаты измерений частоты с помощью CsFO2(SU) регулярно учитываются при формировании TAI.

Литература

1. Clairon A., Salomon C., Guellati S., Phillips W. D. Ramsey resonance in a Zacharias fountain // *Europhys. Lett.* 1991. N. 16. P. 165–170.

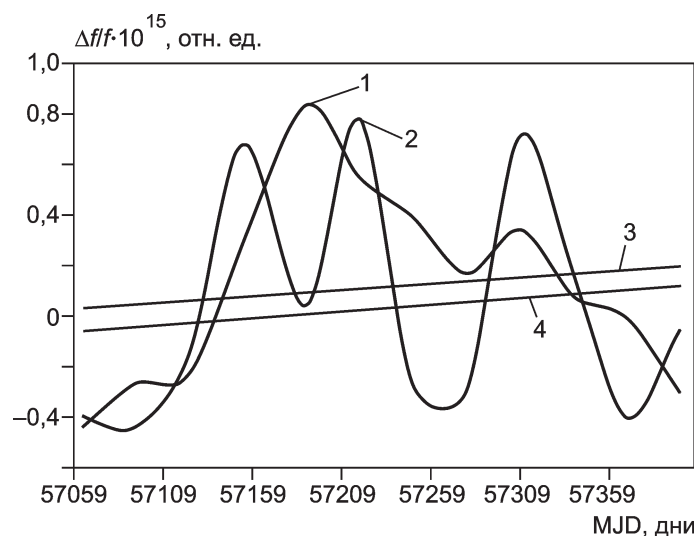


Рис. 4. Относительная разность частот [TAI – SI_{BIPM}] (1), [TAI – CsFO2(SU)] (2) на интервале MJD 57049–MJD 57414; линии тренда (3, 4) для каждой кривой параллельны и разница между их средними значениями составляет $0,85 \cdot 10^{-16}$

2. Levi F., Calonico D., Claudio E. Calosso, Godone A., Micalizio S., Costanzo A. G. Accuracy evaluation of ITCsF2: a Nitrogen cooled Cesium Fountain // *Metrologia*. 2014. V. 51. N. 3. P. 270–284.

3. Домнин Ю. С., Барышев В. Н., Бойко А. И., Ёлкин Г. А., Новосёлов А. В., Копылов Л. Н., Купалов Д. С. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 // *Измерительная техника*. 2012. № 10. С. 26–30.

4. Circular T 315. 4 — Duration of the TAI scale interval, Bureau International des Poids et Mesures, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Metre, Pavillon de Breteuil. [Электрон. версия] <ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/Circular-T/cirt/cirt.315> (дата обращения: 05.10.2016).

5. Parker T. E., Jefferts S. R., Heavner T. P., Donley E. A. Operation of the NIST-F1 caesium fountain primary frequency standard with a maser ensemble, including the impact of frequency transfer noise // *Metrologia*. 2005. V. 42. N. 5. P. 423–430.

6. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. М.: ФИЗМАЛИТ, 2009. С. 220–222.

7. Leo P. J., Jullien P. S., Mies F. H., Williams C. J. Collisional frequency shifts in ¹³³Cs fountain clock // *Phys. Rev. Lett.* 2001. N. 86. P. 3743–3746.

8. Thomas P. H., Donley E. A., Levi F., Costanzo G., Parker T. E., Shirley J. H., Ashby N., Barlow S., Jefferts S. R. First Accuracy Evaluation of NIST-F2 // *Metrologia*. 2014. V. 51. N. 3. P. 174–182.

9. Li R., Gibble K., Szymaniec K. Improved accuracy of the NPL-CsF2 primary frequency standard: evaluation of distributed cavity phase and microwave lensing frequency shifts // *Metrologia*. 2011. V. 48. N. 5. P. 283–289.

10. Воронцов В. Г., Демидов Н. А., Беляев А. А., Домнин Ю. С. Разработка активного водородного стандарта частоты и времени с улучшенной кратковременной стабильностью частоты и низкими фазовыми шумами // *Метрология времени и пространства: 7-й Междунар. симпозиум. Суздаль, 2014*. С. 80–82.

Дата принятия: 02.06.2016.