

УДК 539.194

ХРАНИТЕЛЬ ЕДИНИЦ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ «ФОНТАНА» АТОМОВ РУБИДИЯ

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

В статье приведены основные результаты работы по созданию хранителя единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия, изготовленного во ФГУП «ВНИИФТРИ».

The article presents the main results of the work on the creation of a keeper of time and frequency units on the basis of a “fountain” of rubidium atoms made at the FSUE “VNIIFTRI”.

Ключевые слова: единицы времени и частоты, атомный «фонтан», холодные атомы, рубидий.

Key words: units of time and frequency, atomic “fountain”, cold atoms, rubidium.

Введение

Одним из основных направлений деятельности Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), руководство которой осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, является обеспечение независимого воспроизведения, хранения и передачи единиц времени, частоты и национальной шкалы времени. Для обеспечения потребностей государства в эталонных сигналах частоты и времени (ЭСЧВ) с заданными характеристиками в ГСВЧ непрерывно ведутся работы по модернизации эталонной базы. В рамках одной из таких работ поставлена цель — создать опытный образец хранителя единиц времени и частоты на основе рубидиевых «фонтанов» со средним квадратическим относительным двухвыборочным отклонением (СКДО) $(1-2) \cdot 10^{-16}$ на интервале времени усреднения 16 суток. Такая нестабильность хранения частоты в наземном сегменте необходима для обеспечения согласования государственной шкалы времени UTC(SU) с международной шкалой времени UTC и системной шкалой времени ГЛОНАСС с погрешностью 3 и 4 нс соответственно.

Конструкция и цикл работы «фонтана» атомов рубидия

В состав хранителя единиц времени и частоты входят два рубидиевых «фонтана», каждый из которых состоит из: атомного спектрометра, лазерно-

оптической системы, системы формирования зондирующего сигнала и системы управления [1].



Рис. 1. Рубидиевый «фонтан»: 1 — атомный спектроскоп; 2 — система формирования зондирующего сигнала; 3 — лазерно-оптическая система; 4 — система управления

В спектроскопе во вспомогательной магнитооптической ловушке из паров естественной смеси рубидия (изотопы Rb^{85} и Rb^{87}) происходят селекция, и предварительное охлаждение атомов Rb^{87} , и их перенос в основную ловушку, где формируется атомное облако. Затем облако доохлаждается до температур порядка единиц мК и подбрасывается вертикально вверх. Формирование облака, его доохлаждение и подброс осуществляются посредством лазерного излучения. После этих процедур все атомы распределены по пяти энергетическим подуровням ($F2, m = -2...+2$). Во время полета вверх облако проходит через вспомогательный (селектирующий) резонатор, настроенный на частоту атомного перехода между подуровнями ($F2, m = 0$) и ($F1, m = 0$). Атомы, не совершившие этот переход, отклоняются от вертикальной траектории лазерным излучением с частотой оптического перехода $F2 \leftrightarrow F3$. После этого облако атомов в состоянии ($F1, m = 0$) 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 переходят в смешанное состояние. После этого в детекторной секции происходит регистрация состояний ($F1, m = 0$) и ($F2, m = 0$). Таким образом, с помощью отношения числа атомов в состояниях ($F1, m = 0$) и ($F2, m = 0$) частота зондирующего СВЧ сигнала сравнивается с частотой «часового» перехода атомов рубидия.

Для стабилизации частоты внешнего кварцевого генератора относительно атомного перехода фаза зондирующего сигнала меняется на $\pm 90^\circ$ в момент достижения облаком апогея. Рассчитанный системой управления разностный сигнал измерений используется в качестве сигнала ошибки для петли обратной связи СВЧ синтезатора. В случае стандарта частоты фонтанного типа подстройка выходной частоты синтезатора системы формирования зондирующего сигнала происходит по окончании 100 рабочих циклов. Также производится расчет частоты водородного генератора из состава ГЭТ 1-2018, который является опорным для системы формирования зондирующего атомного «фонтана».

А) Атомный спектроскоп

Конструкция атомного спектроскопа определяется принципом работы стандарта частоты фонтанного типа, который обеспечивает возбуждение и опрос холодных атомов в гравитационном поле Земли. На рисунке 2 представлен атомный спектроскоп «фонтана», состоящий из узла вакуумной откачки, корпуса оптической ловушки, источника ^{87}Rb , блока детектирования, селектирующего резонатора, резонатора Рэмси 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 из пучка атомов, сформированного источником на основе магнитооптической ловушки. Для ввода лазерного излучения в ловушку, а также для визуального контроля атомного облака, используются просветленные оптические вакуумные окна.

Над ловушкой расположен селектирующий резонатор. СВЧ поле, резонансное $|F = 2, m = 0\rangle \rightarrow |F = 1, m = 0\rangle$ сверхтонкому переходу, включается в тот момент, когда атомы пролетают через селектирующий резонатор по направлению вверх. Амплитуда и длительность СВЧ импульса устанавливаются таким образом, чтобы вызвать π -переход между двумя сверхтонкими состояниями. Вырождение между переходами с различными магнитными моментами снимается дополнительным статическим магнитным полем, создаваемым магнитными катушками в зоне селектирующего резонатора. Таким образом, СВЧ-поле резонатора не влияет на населенность всех других

магнитных подуровней $|F = 2, m = -2, -1, 1, 2\rangle$, которые при пролете облака через блок детектирования отклоняются от вертикальной траектории лазерным излучением. Таким образом, после пролета через селектирующий резонатор все оставшиеся атомы подготовлены в начальном состоянии $|F = 1, m = 0\rangle$, которое является наименее чувствительным к окружающему магнитному полю.

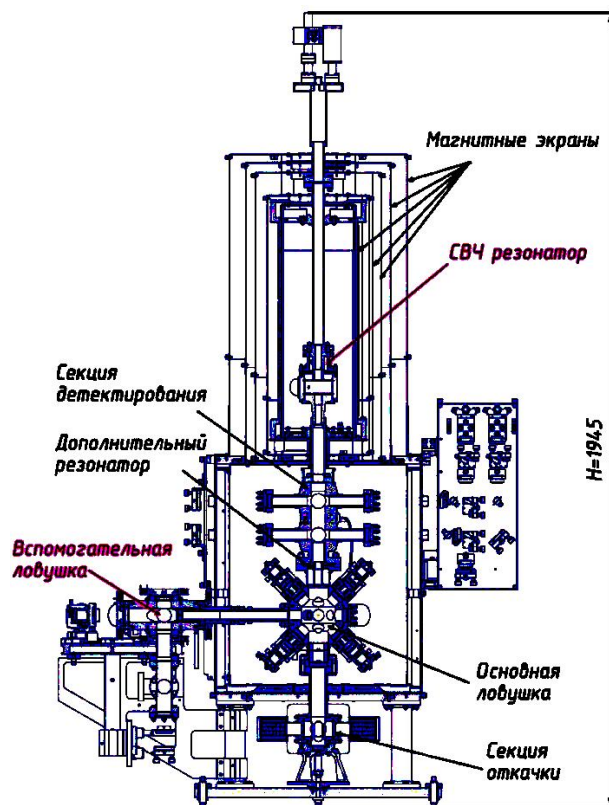


Рис. 2. Спектроскоп «фонтана» атомов рубидия

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 пятислойный магнитный экран, изготовленный из пермаллоя и с коэффициентом экранирования около $2 \cdot 10^5$.

На высоте 0,48 м над ловушкой расположен основной СВЧ резонатор. Мо-да СВЧ колебаний H_{011} на частоте 6,834682 611 ГГц возбуждается в резонаторе через круглые отверстия с помощью двух симметричных прямоугольных волноводов. Нагруженная добротность резонатора составляет $Q_c \sim 28\,600$.

Б) Лазерная система

Лазерно-оптическая система репера основывается на двух лазерах. 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 D₂ линии методом переноса спектра модуляции. Управление частотой и мощностью лазерного излучения всех лучей происходит с помощью акустооптических модуляторов (АОМов) в конфигурации двойного прохода «кошачий глаз».

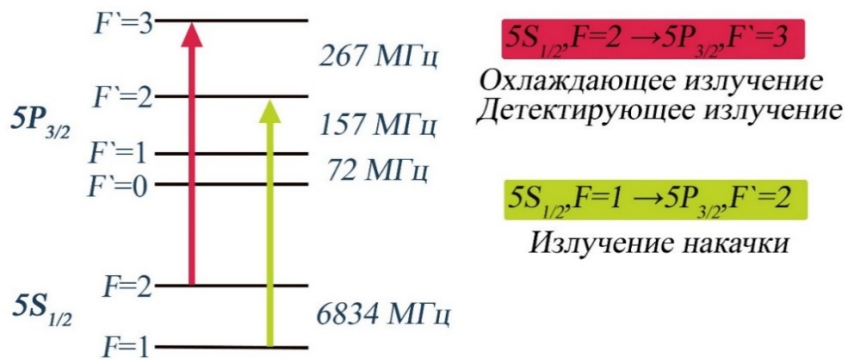


Рис. 3. Схема энергетических уровней D₂ линии ^{87}Rb

Для предотвращения ухода атомов из процесса охлаждения в оптической ловушке, а также для детектирования квантового состояния ($F=1, m=0$) 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.

Лазерное излучение поступает в ловушку спектроскопа через одномодовое оптоволокно, сохраняющее поляризацию.

В) Система формирования зондирующего сигнала и система управления

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

Нестабильность (СКДО) рубидиевых «фонтанов»

Количественной характеристикой нестабильности меры частоты является среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение (СКДО) [2]. Для оценки нестабильности стандарта времени и частоты применяется выражение (1), в которое входит рабочий параметр «фонтана» — время цикла ($T_{ц}$), и экспериментально измеренные характеристики: добротность атомного перехода и отношение сигнал-шум ($Q_{ат}$, $C/Ш$) [3]:

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\pi Q_{ат}} \cdot \frac{1}{C/Ш} \cdot \sqrt{\frac{T_{ц}}{\tau}}. \quad (1)$$

Чтобы определить добротность атомного перехода ($Q_{ат} = f_{ат}/\Delta f$), была исследована зависимость вероятности атомного перехода от отстройки частоты сигнала опроса (резонанс Рэмси, рис. 4). Для этого производилось сканирование частоты синтезатора опросного сигнала в диапазоне от -100 до $+100$ Гц относительно частоты «часового» перехода атома рубидия.

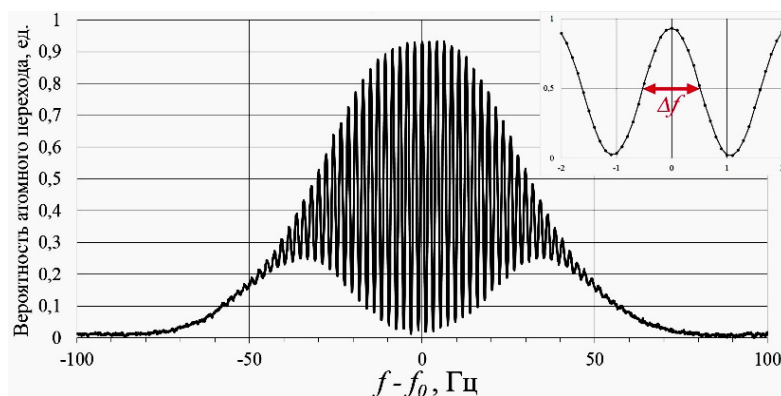


Рис. 4. Зависимость вероятности атомного перехода от отстройки частоты опросного сигнала (резонанс Рэмси). В правом верхнем углу — центральный пик в увеличенном масштабе

Ширина на уровне полувысоты центрального пика резонанса Рэмси (Δf), при рабочей высоте подброса атомного облака (0,8 м), составила 0,98 Гц, что соответствует добротности атомного перехода $Q_{ат} = 7,1 \cdot 10^9$.

Отношение сигнал-шум, рассчитанное по формуле

$$C/Ш|_{P=1/2} = \frac{\sigma(S_C - S_{Ж})}{2(S_C + S_{Ж})}, \quad (3)$$

где $\sigma(S_c - S_j)$ — СКО разность интегралов сигналов фотодетекторов, вычисляемых системой управления; $\langle S_c + S_j \rangle$ — среднее значение сумм сигналов, составило порядка 750.

Для определения предельно достижимой нестабильности атомного стандарта, вызванной флуктуациями измеренного количества рабочих атомов в искомом квантовом, была учтена нестабильность СВЧ синтезатора, формирующего сигнала опроса, так как

$$\left(\frac{1}{\text{С/Ш}}\right)_{\text{дет}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\text{С/Ш}}\right)_{\text{ат}}^2 + \left(\frac{1}{\text{С/Ш}}\right)_{\text{синт}}^2}. \quad (4)$$

При нестабильности сигнала опроса $\sim 0,9 \cdot 10^{-13}$ ($\tau = 1$ с) вклад флуктуаций атомов составляет $5,8 \cdot 10^{-14}$. Тогда оценочная нестабильность атомного «фонтана» в приближении «белого шума» составляет $1 \cdot 10^{-16}$ за время измерения 16 суток.

Для подтверждения оценки кратковременной нестабильности производился расчет СКДО частоты разработанного атомного «фонтана» относительно опорного водородного генератора. Схема измерения изображена на рис. 5.

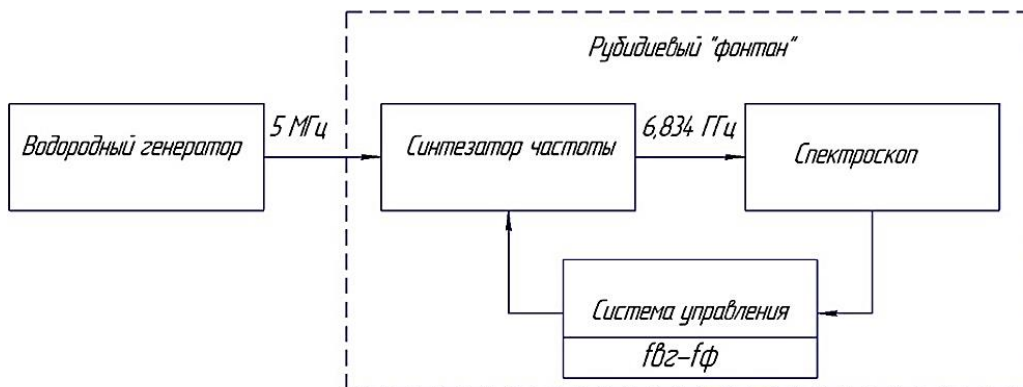


Рис. 5. Схема измерения СКДО рубидиевого «фонтана» относительно водородного генератора

На вход синтезатора рубидиевого «фонтана» подавался опорный сигнал водородного генератора (5 МГц) из состава ГЭТ 1-2018. Далее этот сигнал домножался до частоты «часового» атомного перехода и подавался на СВЧ резонатор спектроскопа. После взаимодействия холодных атомов с СВЧ полем и детектирования атомных переходов системой управления вычислялась разность частот водородного генератора и стандарта частоты фонтанного типа.

На рисунке 6 представлен график СКДО рубидиевого стандарта частоты фонтанного типа относительно опорного водородного генератора, построенный на основании измерительной информации, полученной на интервале времени наблюдения 5 месяцев. Следует отметить, что на временах измерения до 3 суток экспериментальные точки экстраполируются прямой с наклоном, характеризующим «белый» шум.

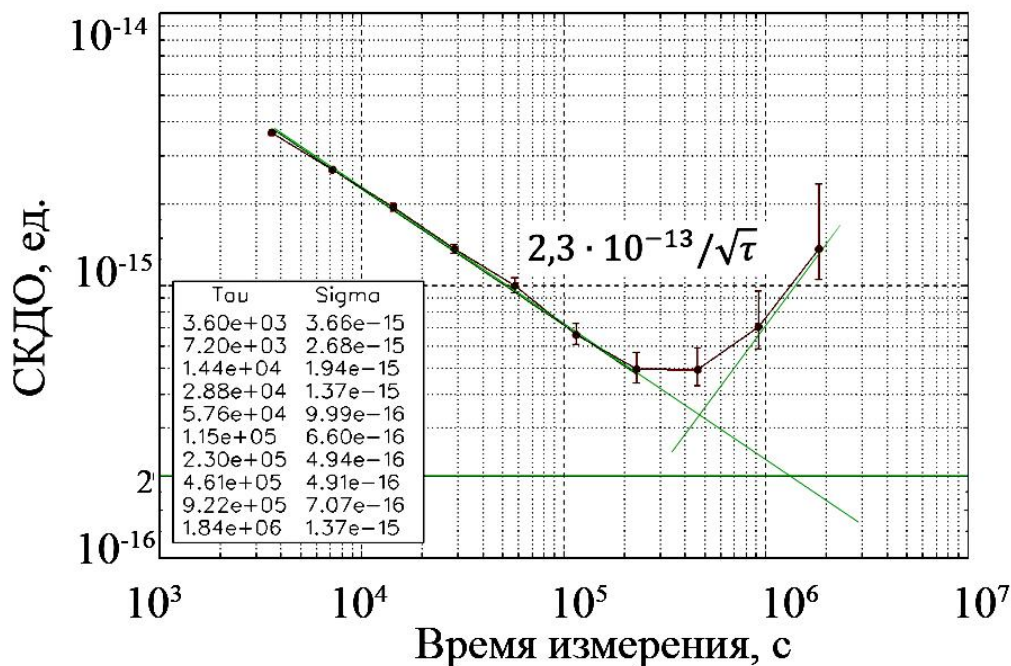


Рис. 6. СКДО рубидиевого «фонтана» относительно водородного генератора

На временах измерения более 3 суток нестабильность (СКДО) увеличивается из-за дрейфа водородного генератора ($\mu = -2$) [4].

Для учета дрейфа водородного генератора вычислялось СКДО разности частот двух рубидиевых «фонтанов» идентичных конструкций и с близкими метрологическими характеристиками. Схема эксперимента изображена на рисунке 7. Данная схема измерений позволила исключить из измерительного процесса нестабильность водородного генератора и оценить СКДО рубидиевого «фонтана».

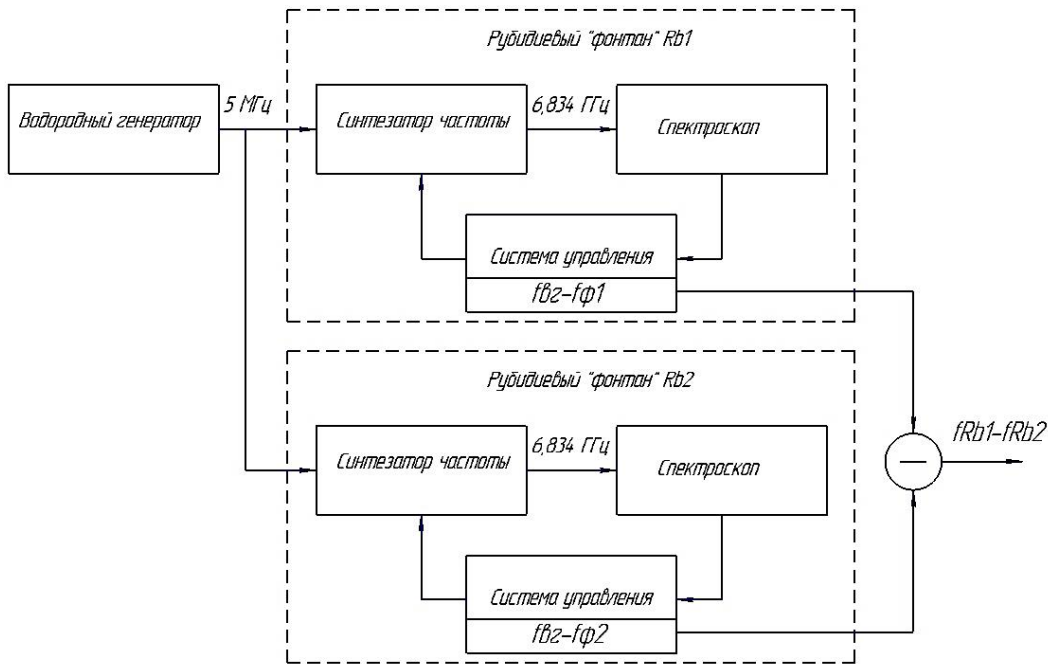


Рис. 7. Схема измерения СКДО рублидиевого «фонтана» Rb1 относительно рублидиевого «фонтана» Rb2

Согласно схеме, на вход синтезатора каждого рублидиевого «фонтана» подавался идентичный сигнал водородного генератора (5 МГц) из состава ГЭТ 1-2018, и производилось независимое измерение частоты. Затем вычислялась разность полученных значений, на основании которых вычислялось СКДО [2]. Для расчета нестабильности одного стандарта частоты фонтанного типа, входящего в состав измерительной схемы рисунка 7, разность частот делится на $\sqrt{2}$.

На рисунке 8 изображен график СКДО рублидиевого «фонтана» Rb1 относительно рублидиевого «фонтана» Rb2, построенный на основании измерительной информации, полученной на интервале времени наблюдения 5 месяцев. Экспериментальные точки аппроксимируются прямой с наклоном, характеризующим «белый» шум [4], с кратковременной нестабильностью $1,76 \cdot 10^{-13} 1\sqrt{\tau}$. Очевидно, что на интервале времени измерения 16 суток СКДО стандарта частоты фонтанного типа не превышает $2 \cdot 10^{-16}$.

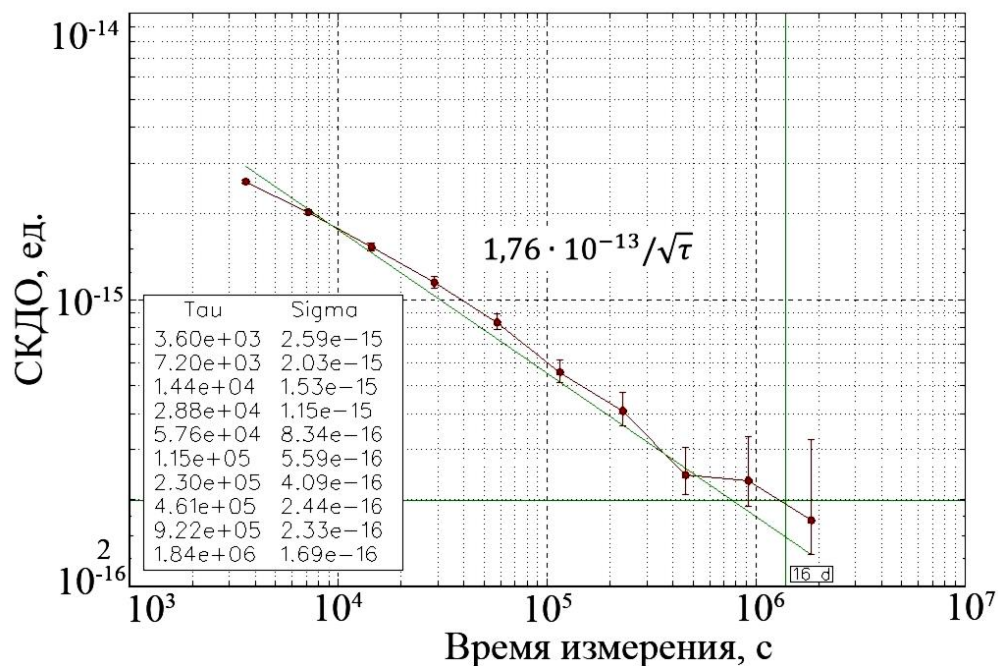


Рис. 8. СКДО рубидиевого «фонтана» Rb1 относительно рубидиевого «фонтана» Rb2

Заключение

За период 2012–2016 гг. во ВНИИФТРИ разработан и создан хранитель единиц времени и частоты нового поколения на основе «фонтана» атомов рубидия с нестабильностью менее $2 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 16 суток. В 2018 году хранитель включен в состав ГЭТ 1-2018 с целью улучшения его метрологических характеристик. Полученные научно-технические результаты позволили существенно модернизировать эталонную базу координатно-временного и навигационного обеспечения, отвечающую современным мировым тенденциям.

Литература

1. Домнин Ю.С., Барышев В.Н., Бойко А.И., Ёлкин Г.А., Новоселов А.В., Копылов Л.Н., Купалов Д.С. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 // Измерительная техника. — 2012. — № 10. — С. 26–30.
2. ГОСТ 8.567-2014 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения времени и частоты. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2014.

3. Santarelli G., Laurent Ph., Lemonde P., Clairon A. Quantum Projection Noise in an Atomic Fountain: A High Stability Cesium Frequency Standard // Phys. Rev. Lett. — 1999. — 82. — P. 4619–4622.
4. Безменов И.В., Блинов И.Ю. Теоретические основы построения моделей для описания современных шкал времени и стандартов частоты. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015. — 529 с.