

ОПТИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

Создание первого в России хранителя частоты и времени на основе фонтана охлажденных атомов рубидия

К.Ю.Павленко, Ю.К.Павленко, А.А.Беляев, И.Ю.Блинов, М.Н.Хромов, С.Биз, Л.Лорини

Описаны технические особенности первого в России рубидиевого стандарта частоты фонтанного типа, отличающие его от зарубежных аналогов. Представлены результаты тестирования отдельных систем, а также выходные метрологические характеристики стандарта. Достигнутая нестабильность выходной частоты составила 4×10^{-16} на интервале измерения 1 сутки и 1×10^{-16} на интервале измерения 16 суток.

Ключевые слова: стандарт частоты, ультрахолодные атомы, высоковакуумный насос, система формирования магнитного поля, термостабилизация, долговременная нестабильность.

1. Введение

Современные технологии лазерного охлаждения и управления движением атомов являются мощным инструментом для разработки и создания нового поколения сверхвысокоточных реперов частоты, а также высокостабильных хранителей – стандартов времени и частоты. Реперы частоты на холодных атомах, работающие в СВЧ диапазоне, в настоящее время имеют случайную погрешность значительно ниже 1×10^{-15} [1]. Для практического использования таких точностей необходимы хранители времени и частоты, т. е. приборы, позволяющие в течение длительного времени без калибровки хранить единицу частоты и времени с сохранением погрешности первичного стандарта.

В настоящее время в качестве наиболее стабильных хранителей используются активные водородные мазеры. Однако их нестабильность имеет фундаментальный предел и ограничена неконтролируемым изменением частоты атомной линии, вызванным старением покрытия накопительной колбы. Предельная нестабильность частоты современных водородных генераторов может достигать 3×10^{-16} за вычетом линейного дрейфа [2].

Еще одним важным направлением является синхронизация шкал перспективных бортовых синхронизирующих устройств систем навигации с нестабильностью $(1-5) \times 10^{-15}$ [3]. Для этого необходимо создание наземных хранителей времени и частоты с нестабильностью на уровне 1×10^{-16} . Наиболее перспективным для этих целей на данный момент является хранитель на основе рубидиевых

стандартов частоты на холодных атомах – рубидиевый репер частоты фонтанного типа (РРЧФТ). По сравнению с цезиевым фонтаном в рубидиевом фонтане может быть обеспечен в несколько раз больший поток рабочих атомов. Кроме того, можно максимально увеличить концентрацию рабочих атомов, т. к. спин-обменное взаимодействие, ограничивающее точность цезиевых стандартов, в рубидиевом фонтане примерно в 100 раз меньше, чем в цезиевом [4].

Для обеспечения надежной и своевременной синхронизации шкал времени бортовых синхронизирующих устройств необходима установка наземных хранителей времени и частоты в нескольких территориально разнесенных районах [5]. Поэтому важной задачей является разработка рубидиевого стандарта частоты на основе фонтана холодных атомов, который, в отличие от традиционных стандартов, созданных и функционирующих в обсерваториях мира (SYRTE, USNO и др.), мог бы быть предварительно собран и настроен крупными блоками на заводе-изготовителе, доставлен на место постоянной дислокации и после непродолжительной окончательной сборки и тонкой настройки введен в эксплуатацию.

2. Общий принцип работы стандарта частоты на основе фонтана охлажденных атомов

РРЧФТ является импульсным стандартом частоты, т. е. его функционирование состоит из непрерывно повторяющихся циклов, в конце каждого из которых стандарт выдает численное значение разности частот опорного сигнала (он формируется из частоты синтезатора, а следовательно, и частоты опорного сигнала) и частоты «часового» перехода в атоме рубидия (6834682610.904 Гц). Подробная схема энергетических уровней атома Rb представлена в [6], на рис. 1 дан общий вид РРЧФТ.

Цикл работы РРЧФТ состоит из следующих основных фаз.

1. Формирование облака охлажденных атомов и запуск его по баллистической траектории сквозь атомный спектроскоп.

К.Ю.Павленко, Ю.К. Павленко, А.А. Беляев. ЗАО «Время-Ч», Россия, 603105 Н.Новгород, ул. Ошарская, 67;
e-mail: pavlenko.k@vremya-ch.com

И.Ю.Блинов, М.Н. Хромов. Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Россия, Московская обл., 141570 Менделеево
S. Bize, L. Lorini. LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

Поступила в редакцию 3 июля 2018 г., после доработки – 1 августа 2018 г.

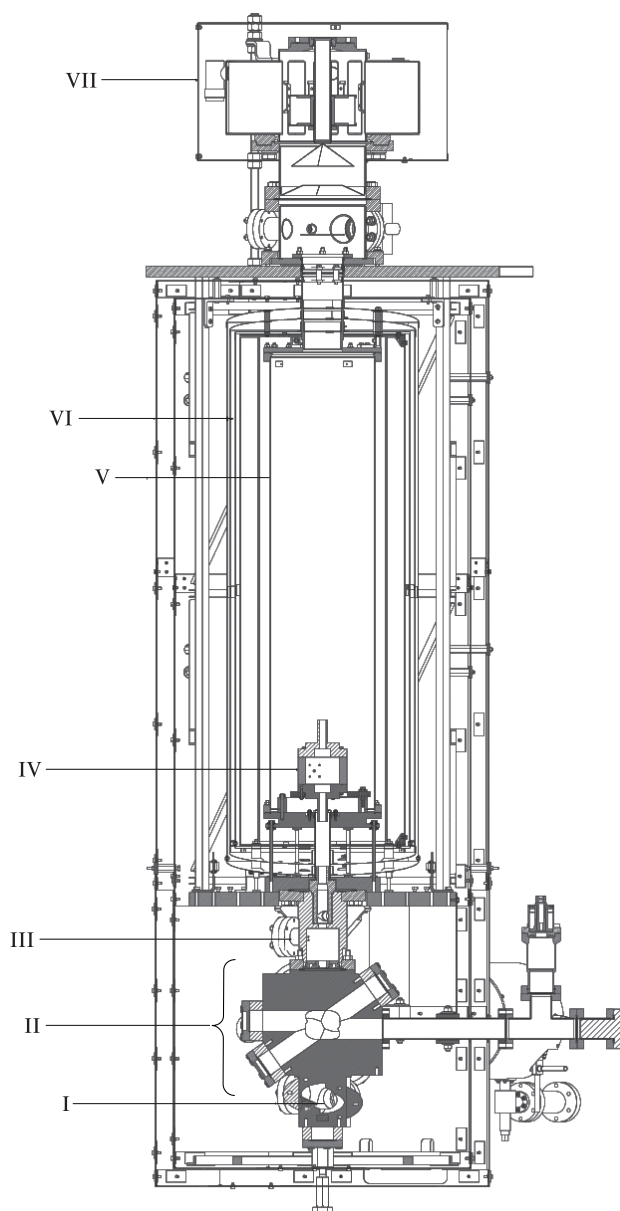


Рис.1. Общий вид РРЧФТ:

I – область детектирования; II – область охлаждения атомов; III – селектирующий резонатор; IV – резонатор Рэмси; V – вакуумный объем пролетной области; VI – магнитные экраны; VII – высоковакуумный насос.

Взаимодействие атомов с СВЧ полем по схеме Рэмси позволяет получить очень узкий резонансный пик, ширина которого обратно пропорциональна временному интервалу между первым и вторым взаимодействиями. При этом критически важно, чтобы между двумя взаимодействиями атомов с СВЧ полем оно не имело скачков фазы, а атомы рубидия не потеряли свою когерентность, т.е. атомы не должны взаимодействовать ни с полем, ни со стенками резервуара, а должны находиться в свободном полете. Однако при комнатной температуре атомы хаотично движутся в пространстве со скоростью ~ 4000 км/ч, и чтобы сохранить их локализованными в пределах области однородного поля резонатора (~ 10 мм) на время 0.5 с (такой интервал между взаимодействиями обеспечивает ширину линии 1 Гц) атомы необходимо охладить до температур ~ 1 мкК. Это достигается с помощью многосту-

пенчатого лазерного охлаждения в так называемой «оптической патоке» в области охлаждения II (рис.1).

После охлаждения достаточного количества атомов рубидия в оптической патоке сформированное облако холодных атомов запускается вертикально вверх подобно воде в фонтане (отсюда название этого класса приборов). Таким образом осуществляется двойное последовательное взаимодействие атомного облака с опросным сигналом в резонаторе (так называемый резонатор Рэмси) на пути вверх и вниз.

2. Селектирование активных атомов при взаимодействии с СВЧ полем и оптическим излучением.

Перед первым взаимодействием с опросным сигналом в резонаторе Рэмси облако охлажденных атомов проходит через так называемый «селектирующий» резонатор III (рис.1), в котором из облака удаляются все атомы в состоянии, отличном от состояния $5^2S_{1/2}$ ($F = 1, m_F = 0$), поскольку только они участвуют в последующем взаимодействии в резонаторе Рэмси и формируют «часовой» переход. Остальные атомы не участвуют во взаимодействии и лишь уширяют резонансную линию за счет столкновительного уширения и, кроме того, уменьшают отношение сигнал/шум, т.к. дополнительно выбивают атомы из облака в процессе свободного полета.

Селектирование атомов в состоянии $5^2S_{1/2}$ ($F = 1, m_F = 0$) происходит путем их взаимодействия с СВЧ полем и оптическим излучением. В тот момент, когда атомное облако покидает область охлаждения, в нем находятся атомы Rb в состояниях $5^2S_{1/2}$ ($F = 2, m_F = \pm 2, \pm 1, 0$). В селектирующем резонаторе облако взаимодействует с СВЧ полем, резонансным переходу $5^2S_{1/2}$ ($F = 2, m_F = 0$) \leftrightarrow $5^2S_{1/2}$ ($F = 1, m_F = 0$), при этом атомы, находящиеся на подуровне $5^2S_{1/2}$ ($F = 2, m_F = 0$), совершают вынужденный переход на подуровень $5^2S_{1/2}$ ($F = 1, m_F = 0$), а все остальные атомы остаются на уровне $5^2S_{1/2}$ ($F = 2$). Сразу же после этого атомное облако попадает в лазерный пучок, резонансный циклическому переходу $5^2S_{1/2}$ ($F = 2$) \leftrightarrow $5^2P_{3/2}$ ($F = 3$). Этот лазерный пучок (назовем его нескомпенсированным) оказывает давление на атомное облако только с одной стороны и поэтому «разогревает» атомы, находящиеся на уровне $5^2S_{1/2}$ ($F = 2$), и выталкивает их из облака. Таким образом, в итоге в облаке остаются лишь атомы, находящиеся на подуровне $5^2S_{1/2}$ ($F = 1, m_F = 0$), которые в дальнейшем участвуют во взаимодействии Рэмси.

3. Двойное последовательное взаимодействие с СВЧ полем опросного сигнала в резонаторе на пути атомного облака вверх и вниз (взаимодействие Рэмси).

Для получения спектральной картины с узким центральным пиком, представленной на рис.2 (интерференционная картина Рэмси), необходимо осуществить двойное последовательное взаимодействие атомного облака с СВЧ полем. При этом ширина центрального пика, используемого для стабилизации опорного генератора, обратно пропорциональна величине временного интервала между взаимодействиями. Одними из главных требований для осуществления взаимодействия Рэмси являются свободная (невозмущенная) эволюция квантового состояния атомов в облаке и непрерывность фазы СВЧ сигнала между взаимодействиями. Наиболее эффективный способ выполнения этих требований – запуск облака охлажденных атомов вертикально вверх сквозь резонатор Рэмси IV (см. рис.1), в котором и происходит взаимодействие атомного облака с опросным сигналом. В этом случае облако атомов взаимодействует с полем в резона-

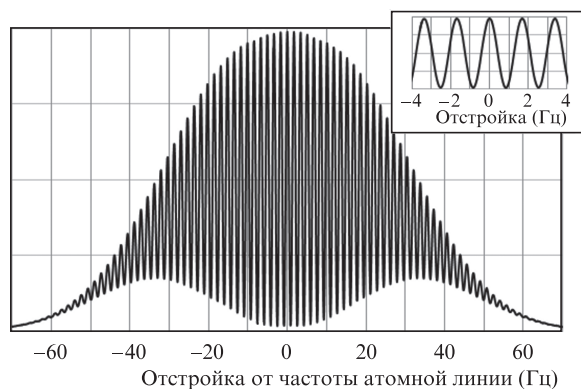


Рис.2. Интерференционная картина Рэмси. На вставке – центральные пики интерференционной картины, ширина центрального пика 0.8 Гц.

торе дважды – на пути вверх и вниз, а между взаимодействиями квантовое состояние атомов в облаке эволюционирует свободно, т.к. СВЧ поле не выходит за пределы резонатора в результате использования запредельных волноводов. В такой конфигурации интервал между взаимодействиями, а следовательно, и ширина центрального пика, определяются начальной скоростью атомного облака или высотой его подброса.

При начальной скорости атомного облака 4.1 м/с, обеспечивающей высоту подброса 87 см, ширина центрального пика составляет менее 1 Гц (см. рис.2).

4. Детектирование атомов и определение вероятности перехода атома рубидия с уровня $5^2S_{1/2}$ ($F = 1, m_F = 0$) на уровень $5^2S_{1/2}$ ($F = 2, m_F = 0$).

Для определения вероятности перехода атома Rb с уровня $5^2S_{1/2}$ ($F = 1, m_F = 0$) на уровень $5^2S_{1/2}$ ($F = 2, m_F = 0$) в результате СВЧ взаимодействия Рэмси, которая, как указывалось ранее, зависит от отстройки частоты опросного сигнала от частоты «часового» перехода, необходимо измерить населенности уровней $5^2S_{1/2}$ ($F = 1, m_F = 0$) и $5^2S_{1/2}$ ($F = 2, m_F = 0$).

Для этого в финальной фазе цикла работы РРЧФТ атомное облако попадает в область детектирования I (см. рис.1), в которой с помощью системы призм и зеркал формируется специальная конфигурация оптического поля. В первой зоне лазерное излучение взаимодействует с атомами, находящимися на уровне $5^2S_{1/2}$ ($F = 2, m_F = 0$), а фотодетектор регистрирует интенсивность люминесценции, пропорциональную населенности данного уровня. Затем во второй зоне нескомпесированный лазерный пучок, подобно пучку в селекционирующем резонаторе, «разогревает» атомы, находящиеся на уровне $5^2S_{1/2}$ ($F = 2$), и выталкивает их из облака. В третьей области лазерное излучение, резонансное переходу $5^2S_{1/2}$ ($F = 1$) \leftrightarrow $5^2P_{3/2}$ ($F = 2$), в результате циклической накачки и спонтанной релаксации переводит все атомы из состояния $5^2S_{1/2}$ ($F = 1$) в состояние $5^2S_{1/2}$ ($F = 2$). В итоге в четвертой зоне происходит детектирование, аналогичное детектированию в первой зоне, однако в этот раз сигнал люминесценции пропорционален количеству атомов, изначально находившихся на уровне $5^2S_{1/2}$ ($F = 1, m_F = 0$). Таким образом определяются населенности обоих уровней «часового» перехода и, соответственно, вероятность перехода в результате СВЧ взаимодействия Рэмси.

После осуществления детектирования отработанное атомное облако поглощается дополнительным высоко-

вакуумным насосом в нижней части стандарта, а цикл работы РРЧФТ начинается заново.

3. Основные конструктивные отличия фонтана атомов производства компании «Время-Ч» от мировых аналогов

Достижение выдающихся метрологических характеристик потребовало применения знаний и опыта передовых компаний и институтов, лидирующих в своей области. В частности, лазерная система, обеспечивающая оптическим излучением все составные части РРЧФТ (область охлаждения, селекционирующий резонатор и область детектирования), полностью состоит из волоконно-оптических компонентов, что повышает ее надежность и устойчивость к внешним воздействиям.

Основные блоки РРЧФТ проходили предварительную сборку, испытания и настройку в Нижнем Новгороде, а затем транспортировались во ВНИИФТРИ, где осуществлялись финальная сборка и тонкая настройка комплекса. Такая сложная логистическая схема проекта потребовала внести существенные изменения и доработки в традиционную конструкцию стандарта частоты на основе фонтана охлажденных атомов:

- усилить механическую конструкцию для обеспечения ее стойкости в процессе транспортировки к заказчику;
- изменить вакуумную часть спектрометра для обеспечения повышенной виброустойчивости и технологичности;
- применить многосекционную систему термостатирования, позволяющую значительно ослабить требования к стабильности температуры в лаборатории, в которой находится РРЧФТ;
- внести изменения в систему формирования и стабилизации магнитного поля в атомном спектрометре (пять слоев магнитных экранов, соленоид с компенсирующими катушками, система активной стабилизации магнитного поля в области охлаждения атомов), что позволит снизить требования к нестабильности техногенного магнитного поля в области расположения РРЧФТ.

Каждое из разработанных и примененных нововведений описано подробнее ниже.

Механическая конструкция РРЧФТ. Поскольку предварительная сборка спектрометра и подготовка вакуумной части проводились на территории ЗАО «Время-Ч», а затем спектрометр транспортировался во ВНИИФТРИ, будучи предварительно вакуумированным, в классическую конструкцию спектрометра были внесены значительные изменения для обеспечения его виброустойчивости в процессе транспортировки.

В первую очередь были полностью разделены вакуумные соединения и несущие конструкции. Вакуумная часть спектрометра не связана конструктивно с несущими шестигранными опорами и верхней плитой, на которой расположен массивный высоковакуумный насос. Это позволило снять значительную нагрузку (общий вес атомного спектрометра с системой магнитных экранов составляет более 200 кг) с вакуумных соединений и перенести большую часть вибрационных нагрузок, возникающих в процессе транспортировки, с вакуумной части спектрометра на жесткие несущие опоры.

Кроме того, вся вакуумная часть атомного спектрометра изготовлена из титана, что значительно повышает

ее прочность, уменьшает вес и позволяет добиться значительно более высокой степени вакуумной чистоты внутри спектроскопа без дополнительной полировки (в отличие от использования алюминия). Применение титана позволяет также использовать в конструкции высоковакуумные фланцевые соединения с металлическими прокладками (индиевыми или медными), а следовательно, избежать применения сложных технологий сварки разнородных материалов.

Вакуумная система РРЧФТ. Уровень остаточного вакуума в атомном спектрокопе является одним из ключевых факторов для достижения высоких метрологических характеристик стандарта, поскольку он влияет как на число охлажденных атомов, попадающих в область детектирования, а соответственно на отношение сигнал/шум, так и на уширение атомной линии за счет столкновительных эффектов.

Наибольшее влияние давление остаточных газов в спектрокопе оказывает именно на число охлажденных атомов, попадающих в зону детектирования, поскольку столкновения молекул остаточных газов с охлажденными атомами рубидия ускоряют последние и они покидают облако, не попадая в зону детектирования. Экспериментально установлено, что при давлении остаточных газов в спектрокопе на уровне 1×10^{-8} мбар облако охлажденных атомов полностью рассеивается на пути к зоне детектирования. Таким образом, для нормального функционирования стандарта на фонтане охлажденных атомов необходимо поддерживать в вакуумной части В спектроскопа (см. рис.1) давление ниже 1×10^{-9} мбар.

В классической схеме стандарта частоты на основе фонтана охлажденных атомов для достижения необходимого уровня вакуума в спектрокопе используются несколько высокопроизводительных магниторазрядных насосов. Однако они обладают рядом критичных для данного проекта недостатков. Прежде всего, в состав магниторазрядных насосов входят мощные магниты, которые создают вокруг себя магнитное поле высокой напряженности. Для того чтобы уменьшить влияние поля рассеяния насосов на атомы в области охлаждения и в пролетной области, необходимы сложные системы экранирования и компенсации магнитных полей. Кроме того, магниторазрядные насосы с высокой скоростью откачки, требуемой для поддержания в спектрокопе давления остаточных газов ниже 1×10^{-9} мбар, очень массивны, что не является проблемой для лабораторного оборудования, однако в рамках данного проекта при транспортировке от места сборки до заказчика создает значительные сложности.

Для решения перечисленных проблем компанией «Время-Ч» был разработан и применен комбинированный высоковакуумный насос (рис.3), в состав которого входят откачивающие элементы трех типов. Основную скорость откачки, более 2000 л/с по N_2 , обеспечивает секция из нераспыляемого TiV-геттера. Такой насос обладает высокой скоростью откачки для большинства атомов и молекул, однако в силу физических принципов не откачивает инертные газы. Для откачки инертных газов из атомного спектроскопа РРЧФТ (в основном аргона, проникающего в спектроскоп из окружающей атмосферы) используется магниторазрядная секция с относительно небольшой скоростью откачки (~ 67 л/с по N_2). Для повышения скорости откачки инертных газов часть электродов магниторазрядной секции насоса изготовлена из тан-

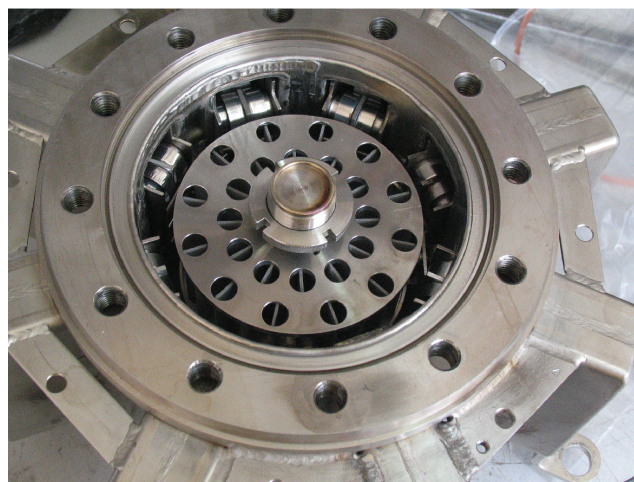


Рис.3. Основной комбинированный высоковакуумный насос.

тала. Кроме описанных выше проблем, характерных для любых стандартов частоты с вакуумной частью, в случае стандартов частоты на рубидии дополнительные сложности создает откачка остаточных паров рубидия. Данный химический элемент входит в группу щелочных металлов и обладает высокой химической активностью, поэтому, попадая на открытые поверхности, в том числе на пластины магниторазрядного насоса и вакуумные окна, он вступает в химическую реакцию с материалом поверхности и образует стойкую пленку. Эта пленка препятствует дальнейшему процессу откачки в магниторазрядном насосе и блокирует лазерные пучки, проходящие через вакуумные окна. С целью предотвращения этих деструктивных последствий критичные элементы в составе спектроскопа защищены элементами из высокочистого графита с высокой скоростью откачки по Rb. Для откачки рубидия, образующегося в результате рассеяния из охлажденного облака, в примененном в РРЧФТ комбинированном насосе установлены геттерные вкладки из высокочистого графита.

Система термостатирования РРЧФТ. Поддержание стабильной, заранее заданной температуры атомного спектроскопа и его составных частей очень важно для получения требуемых метрологических характеристик РРЧФТ. Прежде всего, тепловое расширение меди вследствие изменения температуры оказывает влияние на частоту резонатора Рэмси: температурный коэффициент частоты резонатора составляет 110 кГц/°С. За счет эффекта затягивания изменение частоты резонатора Рэмси приводит к изменению выходной частоты РРЧФТ. Коэффициент влияния температуры на выходную частоту РРЧФТ зависит от добротности резонатора и добротности атомной линии, которая, в свою очередь, зависит от количества охлажденных атомов в облаке. Для добротности резонатора 10000 и количества охлажденных атомов 1×10^7 (параметры, достигнутые в РРЧФТ) коэффициент влияния температуры на выходную частоту РРЧФТ вследствие изменения частоты резонатора составляет $7 \times 10^{-16}/^\circ\text{C}$.

Таким образом, для исключения влияния изменения температуры резонатора на нестабильность выходной частоты РРЧФТ и достижения нестабильности менее 4×10^{-16} на интервале измерения 1 сутки необходимо поддерживать температуру резонатора в пределах ± 0.2 °С.

На выходную частоту РРЧФТ влияет также температура «окружения» атомного облака (стенки вакуумной

камеры, резонаторов и т. п.), поскольку тепловое излучение этого «окружения» смещает частоту атомной линии за счет влияния излучения абсолютно черного тела. Коэффициент чувствительности частоты часового перехода к изменению температуры за счет этого сдвига для атома рубидия составляет $1.7 \times 10^{-16}/^\circ\text{C}$. Таким образом, при заданной выше стабильности температуры сдвиг частоты атомной линии, обусловленный влиянием излучения абсолютно черного тела, будет вносить вклад в бюджет нестабильности РРЧФТ, не превышающий 1×10^{-16} на интервале измерения 1 сутки.

Кроме того, в случае использования РРЧФТ в качестве репера, а не хранителя частоты, критичными становятся не только стабильности температурных сдвигов, но и их абсолютные значения. Эти значения определяются как интегралы от сдвигов частоты в каждой точке траектории со сложной весовой функцией, поскольку скорость пролета атомного облака внутри атомного спектроскопа не постоянна и время прохождения каждого отрезка траектории различно. Таким образом, для того чтобы наиболее точно вычислить результирующий температурный сдвиг частоты атомной линии и не учитывать весовую функцию, необходимо обеспечить максимальную пространственную однородность температуры «окружения» атомного облака вдоль траектории его пролета в атомном спектроскопе.

В большинстве метрологических лабораторий мира для решения данной проблемы используется стабилизация температуры в помещении, в котором находится стандарт фонтанного типа. Однако это накладывает очень жесткие ограничения на систему термостатирования помещения, приводит к ее существенному усложнению и удорожанию. Для обеспечения возможности работы РРЧФТ в лабораториях без систем высокоточной термостабилизации, компанией «Время-Ч» в конструкции РРЧФТ использовалась собственная система термостабилизации.

Данная система построена на основе многосекционного нагревателя и управляющего нагревателями блока управления, который получает информацию от датчиков температуры, установленных на поверхности спектроскопа. Многосекционный (10 полностью независимых секций) нагреватель позволяет избавиться от градиентов температуры «окружения» вдоль траектории пролета атомного облака. Для исключения паразитного магнитного поля нагреватели выполнены с помощью бифилярной намотки, а их питание осуществляется псевдослучайной шумовой последовательностью. Дополнительно в систему включены четыре прецизионных калиброванных датчика РТ100, которые позволяют измерять абсолютную температуру стенок вакуумного объема с точностью менее 0.3°C для последующего вычисления сдвига выходной частоты РРЧФТ за счет излучения абсолютно черного тела.

Система формирования и стабилизации магнитного поля в РРЧФТ. Одним из основных источников нестабильности выходной частоты РРЧФТ является магнитное поле в пролетной области, влияющее на часовой переход через квадратичный эффект Зеемана:

$$\Delta\nu_{00} = K_Z^{(2)} B^2,$$

$$K_Z^{(2)\text{Rb}} = 475.14 \times 10^8 \text{ Гц} \cdot \text{Тл}^{-2},$$

где $\Delta\nu_{00}$ – изменение частоты «часового» перехода; B – индукция магнитного поля; $K_Z^{(2)}$ – коэффициент Зеемана второго порядка.

В связи с этим для обеспечения высоких метрологических характеристик необходимо поддерживать магнитное поле в пролетной области с высокой точностью и стабильностью. Прежде всего, следует экранировать пролетную область от магнитного поля Земли и его изменений. Поскольку частота атомного перехода зависит от квадрата индукции магнитного поля, то при одинаковом абсолютном изменении индукции ΔB величина изменения частоты атомной линии $\Delta\nu_{00}$ будет тем больше, чем больше индукция магнитного поля B . Таким образом, для уменьшения влияния вариаций внешнего магнитного поля на частоту атомной линии необходимо минимизировать магнитное поле в пролетной области. Для этого в конструкции РРЧФТ использовалась система магнитных экранов VI (см. рис.1), состоящая из пяти слоев магнитомягкого материала и суммарно обеспечивающая коэффициент экранирования внешнего магнитного поля более 10^5 .

Однако, при строгом равенстве индукции магнитного поля нулю, подуровни с различными магнитными квантовыми числами m_F становятся вырожденными и возникают так называемые переходы Майорана. При этом часть атомов покидает подуровни с магнитным квантовым числом $m_F = 0$ и перестает участвовать во взаимодействиях Рэмси, уменьшая таким образом отношение сигнал/шум и стабильность выходной частоты РРЧФТ. Для того чтобы исключить этот эффект, в пролетной области создается специальное ненулевое поле подмагничивания. Аналогично эффектам влияния температуры на выходную частоту РРЧФТ, магнитное поле также создает накопительный эффект вдоль траектории движения атомного облака. Поэтому для точного вычисления величины сдвига атомной линии, вызванного эффектом Зеемана, необходимо создать максимально однородное магнитное поле вдоль траектории пролета атомного облака. Для решения этой задачи используется соленоид. Поскольку он обладает конечной длиной, то для компенсации краевых эффектов, а также для устранения локальных неоднородностей используются компенсирующие катушки, намотанные поверх основного соленоида. В конструкции РРЧФТ их четыре.

Таким образом, применение сложной системы экранирования внешнего магнитного поля и формирования поля подмагничивания в пролетной области позволяет использовать РРЧФТ в лабораториях со сложной магнитной обстановкой, имеющей как геологическую, так и техногенную природу.

4. Результаты примененных технических решений

В результате проделанной работы было изготовлено, смонтировано у заказчика и запущено два рубидиевых стандарта частоты фонтанного типа. В процессе настройки этих стандартов был осуществлен ряд исследований, подтверждающих правильность тех или иных технологических решений.

1. Число охлажденных атомов в облаке превысило 10^7 для обоих стандартов. При этом число атомов, достигших области детектирования, составило 10^6 . Два этих показателя, а также измеренное время жизни атомного об-

лака в оптической паточке (более 1 с) свидетельствуют о том, что давление остаточных газов не превышало 1×10^{-9} мбар как в области охлаждения, так и в пролетной области. Достичь такого уровня остаточного вакуума удалось за счет тщательной подготовки составных частей и использования высоковакуумных фланцев собственной разработки, а также применения комбинированного высоковакуумного насоса.

2. Применение соленоида специальной конструкции и тщательная настройка компенсирующих катушек позволили достичь неоднородности магнитного поля вдоль траектории пролета атомного облака ± 2 нТл. Такая неоднородность не является предельной для разработанной системы формирования магнитного поля в пролетной области, но на данном этапе ограничивается чувствительностью датчика магнитного поля, использованного для предварительной настройки. В дальнейшем измерение частоты магниточувствительного перехода $5^2S_{1/2} (F = 1, m_F = 1) \leftrightarrow 5^2S_{1/2} (F = 2, m_F = 1)$ позволит провести дополнительную подстройку компенсирующих катушек и достичь неоднородности магнитного поля в пределах 1 нТл.

5. Заключение

После установки двух рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа во ВНИИФТРИ и их окончательной настройки они были введены в Государственную службу времени и частоты Российской Федерации и в данный момент используются для хранения государственной единицы времени. Полученные характеристики нестабильности разностного сигнала от двух РРЧФТ демонстрируют выдающиеся результаты в части нестабильности выходного сигнала (рис.4): менее 4×10^{-16} на интервале измерения 1 сутки и менее 1×10^{-16} на интервале измерения 16 суток. Эти результаты соответствуют мировым аналогам и даже превосходят их.

Необходимо также отметить, что взаимный дрейф сигналов двух РРЧФТ меньше доверительного интервала

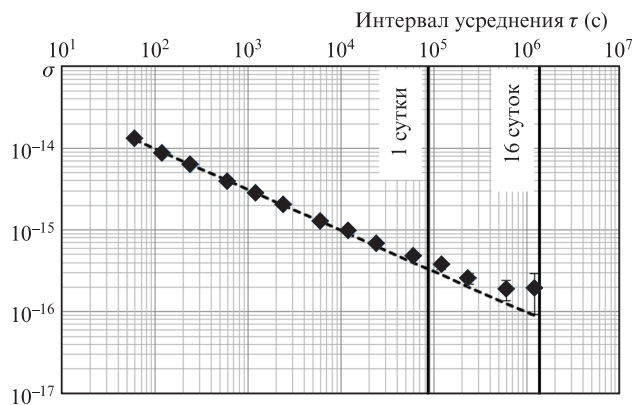


Рис.4. Среднеквадратичное двухвыборочное отклонение σ разностного сигнала двух РРЧФТ (точки – измеренные данные, штриховая кривая – аппроксимация $\sigma = 9.22 \times 10^{-14} \sqrt{\tau}$).

на доступных в данный момент интервалах измерения и не превышает 3×10^{-17} в сутки. Кроме того, абсолютная разность частот выходных сигналов двух РРЧФТ меньше 1×10^{-14} , что полностью укладывается в неопределенность поля подмагничивания в пролетной области РРЧФТ (± 2 нТл). Такая неопределенность поля через эффект Зеемана дает неопределенность выходной частоты РРЧФТ, равную 1.1×10^{-14} .

1. Домнин Ю.С., Барышев В.Н., Бойко А.И., Ёлкин Г.А., Новосёлов А.В., Копылов Л.Н., Купалов Д.С. *Мир измерений*, **134**, 30 (2012).
2. Беляев А.А., Блинов И.Ю., Демидов Н.А., Медведев С.Ю., Пастухов А.В., Сахаров Б.А. *Вестник метролога*, № 2, 14 (2015).
3. Богданов П.П., Дружин В.Е., Нечаева О.Е., Тюляков А.Е., Феоктистов А.Ю., Шупен К.Г. *Вестник СибГАУ*, **52**, 38 (2013).
4. Wynands R., Weyers S. *Metrologia*, **42**, 64 (2005).
5. Безменов И.В., Блинов И.Ю. *Теоретические основы построения моделей для описания современных шкал времени и стандартов частоты* (Менделеево: изд. «ВНИИФТРИ», 2015).
6. Sansonetti J.E. *J. Phys. Chem. Reference Data*, **37**, 1183 (2008).