

Перспективные квантово-оптические технологии для задач спутниковой навигации

Н. Н. Колачевский, член-корр. РАН, д. ф.-м. н., kolachevsky@lebedev.ru

Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, 119991 Москва, Российская Федерация

К. Ю. Хабарова, к. ф.-м. н., kсениakhabarova@gmail.com

Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, 119991 Москва, Российская Федерация

И. В. Заливако, zalikes@yandex.ru

Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, 119991 Москва, Российская Федерация

И. А. Семериков, ilia179@mail.ru

Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, 119991 Москва, Российская Федерация

А. С. Борисенко, alexander.borisenko@yandex.ru

Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, 119991 Москва, Российская Федерация

И. В. Шерстов, i.sherstov@skoltech.ru

Сколковский институт науки и технологий, Сколково, ул. Нобеля 3, 121205, Москва, Российская Федерация

С. Н. Багаев, академик РАН, д. ф.-м. н., bagayev@laser.nsc.ru

Институт лазерной физики СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева 15Б, 630090, Новосибирск, Российская Федерация

А. А. Луговой, lugovoy@laser.nsc.ru

Институт лазерной физики СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева 15Б, 630090, Новосибирск, Российская Федерация

О. Н. Прудников, д. ф.-м. н., oleg.nsu@gmail.com

Институт лазерной физики СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева 15Б, 630090, Новосибирск, Российская Федерация

А. В. Тайченачев, член-корр. РАН, д. ф.-м. н., taich.alex@gmail.com

Институт лазерной физики СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева 15Б, 630090, Новосибирск, Российская Федерация

С. В. Чепуров, к. ф.-м. н., svс04@ngs.ru

Институт лазерной физики СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева 15Б, 630090, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Точность навигации и позиционирования, обеспечиваемая сигналами глобальных систем спутниковой навигации, в значительной степени определяется характеристиками стандартов частоты, находящихся на борту спутников. В последние годы произошло бурное развитие новых квантово-оптических технологий с использованием компактных и стабильных по частоте лазерных систем, фемтосекундных генераторов частот, ультрахолодных атомов и ионов. Были реализованы оптические методы считывания и обработки информации с атомных систем. Это привело к существенному снижению относительной нестабильности наземных стандартов частоты вплоть до 18 знака после запятой. В Европе осуществлен ряд успешных суб-орбитальных запусков, продемонстрировавших возможность переноса части технологий в космический сегмент. В работе представлен краткий обзор последних достижений в данной области и перспективы ее развития в России.

Ключевые слова: лазерное охлаждение, ультрахолодные атомы и ионы, ионная ловушка Пауля, фемтосекундный синтезатор оптических частот, стабилизированный лазер, оптические часы

Prospective Quantum-Optical Technologies for Satellite Navigation Challenges

N. N. Kolachevsky, *Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci (Phys.-Math.), kolachevsky@lebedev.ru*

P. N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russian Federation

K. Yu. Khabarova, *Cand. Sci (Phys.-Math.), kseniakhabarova@gmail.com*

P. N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russian Federation

I. V. Zalivako, *zalikes@yandex.ru*

P. N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russian Federation

I. A. Semerikov, *ilia179@mail.ru*

P. N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russian Federation

A. S. Borisenko, *alexander.borisenko@yandex.ru*

P. N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russian Federation

I. V. Sherstov, *i.sherstov@skoltech.ru*

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow 121205, Russian Federation

S. N. Bagaev, *Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci (Phys.-Math.), bagayev@laser.nsc.ru
Institute of Laser Physics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russian Federation*

A. A. Lugovoy, *lugovoy@laser.nsc.ru*

Institute of Laser Physics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russian Federation

O.N. Prudnikov, *Dr. Sci (Phys.-Math.), oleg.nsu@gmail.com*

Institute of Laser Physics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russian Federation

A. V. Taichenachev, *Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci (Phys.-Math.), taich.alex@gmail.com*

Institute of Laser Physics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russian Federation

S. V. Chepurov, *Cand. Sci (Phys.-Math.), svc04@ngs.ru*

Institute of Laser Physics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russian Federation

Abstract. Accuracy of navigation and positioning provided by signals of global navigation satellite systems is largely determined by the frequency standards installed on board of satellites. In recent years, there has been a rapid development of new quantum-optical technologies using compact and frequency-stable laser systems, femtosecond frequency generators, ultracold atoms and ions. Optical methods of information reading and processing provided by atomic system were developed. This resulted in significant reduction of relative frequency instability of ground-based frequency standards down to 18th decimal digit. A number of successful European suborbital launches demonstrated a possibility of application of some of the technologies in the space segment. The paper provides a brief overview of the latest achievements in this field and possibility of its development in Russia.

Keywords: laser cooling, ultrastable atoms and ions, ion Paul trap, femtosecond optical frequency synthesizer, stabilized laser, optical clock

1. Введение

Глобальные системы спутниковой навигации (ГНСС) стали неотъемлемой частью нашей жизни: без них сегодня сложно представить морскую и воздушную навигацию, движение автотранспорта, грузоперевозки. Востребованность в точном позиционировании и синхронизации постоянно расширяется, охватывая сельское хозяйство, лесную и добывающую промышленность, передачу данных и фундаментальную науку. Основная задача развития любой национальной ГНСС — повышение точности и надежности позиционирования потребителя.

Одним из ключевых факторов, определяющих качество функционирования ГНСС, является точность и стабильность сигнала времени, формируемого бортовым синхронизирующим устройством (БСУ). Так, при суточной относительной погрешности частоты бортового стандарта в 1×10^{-14} соответствующая погрешность позиционирования вдоль направления на спутник составит около 0,25 м. Существует, однако, множество факторов, влияющих на характеристики сигнала, доставляемого потребителю [1], и приводящих к снижению точности. Для достижения целевых характеристик и выхода в перспективе на дециметровую точность в рамках ФЦП «ГЛОНАСС 2012–2020» решается широкий комплекс задач, затрагивающий все сегменты системы, в том числе и бортовой стандарт частоты (БСЧ). На сегодняшний день БСЧ системы ГЛОНАСС базируется на микроволновых стандартах с использованием пучка атомов цезия и на рубидиевой ячейке.

Как отмечено в докладе [2], одна из важных задач развития системы ГЛОНАСС — снижение суточной относительной нестабильности БСЧ до 5×10^{-15} к 2020 году, а в перспективе — вплоть до 1×10^{-15} . Достижение этих показателей с использованием существующих цезиевых или рубидиевых стандартов представляется фактически невозможным ввиду ряда фундаментальных ограничений.

В ближайшей перспективе в составе БСЧ планируются испытания пассивного водородного лазера [3]. Пассивные водородные лазеры с суточной нестабильностью частоты $< 1 \times 10^{-14}$ зарекомендовали себя на борту спутников GALILEO [4], а также в наземных испытаниях в России [5].

В свою очередь, активный водородный лазер более 6 лет успешно функционирует на борту космического аппарата «Спектр-Р» [6]. Учитывая значительный прогресс в разработках водородных лазеров, в том числе и для космических применений (так, в рамках проекта «Миллиметрон» созданы активные водородные стандарты с нестабильностью $< 1 \times 10^{-15}$), использование их при разработке перспективных спутниковых навигационных систем является актуальной задачей.

Другое важное направление — создание бортового оптического репера частоты (БОРЧ). Переход от микроволнового ($f = 10^{10}$ – 10^{11} Гц) к оптическому ($f = 10^{14}$ – 10^{15} Гц) диапазону частот приводит к существенному, на несколько порядков, повышению относительной стабильности осциллятора, поскольку она определяется его добротностью $Q = f/\delta f$ (f — частота перехода, а δf — ширина резонанса). У атомов в оптическом диапазоне существует ряд метрологических («часовых») переходов с естественной спектральной шириной много меньше 1 Гц. Методы лазерного охлаждения [7] и захвата атомов [8] и ионов в ловушки [9] позволяют решить две важные задачи. Во-первых, время взаимодействия с возбуждающим полем может быть увеличено до нескольких секунд, что обеспечивает фурье-ограниченную спектральную ширину резонанса вплоть до $\delta f = 1$ Гц без увеличения физических размеров системы. Во-вторых, из-за локализации холодного иона на размерах много меньше длины волны света обнуляются линейный доплер-эффект и эффект отдачи, а также обеспечивается фактически полная изоляция от нежелательных внешних полей и столкновений.

Сегодня в лабораторных условиях продемонстрирована относительная нестабильность и погрешность частоты оптических стандартов частоты на уровне единиц 18 знака после запятой как на нейтральных атомах, захваченных в оптические решетки [10], так и на одиночных ионах [11]. Отметим, что такие значения демонстрируются только при сличении стандартов непосредственно в оптическом диапазоне в крайне стабильных внешних лабораторных условиях. Для иллюстрации последнего достаточно оценить доплеровский эффект, который возникает при расширении, например, металлической платформы с характерным

размером 1 м, на которой установлены оптические элементы. Если изменение температуры составляет всего 1 градус в час, то вклад доплер-эффекта при отражении от одного зеркала будет на уровне 4×10^{-17} . Также необходимо учитывать гравитационный красный сдвиг частоты ($1 \times 10^{-16}/\text{м}$) и множество других систематических эффектов, оказывающих существенное влияние на таком уровне точности [12]. Очевидно, что уменьшение размера системы и ужесточение условий эксплуатации приводит к снижению характеристик. Тем не менее для транспортируемого образца объемом порядка 1 м^3 суточная нестабильность частоты на уровне 10^{-17} – 10^{-16} является вполне достижимой и уже продемонстрирована рядом лабораторий [13, 14]. Отметим, что этот показатель примерно на порядок превосходит нестабильность лучших образцов активных водородных лазеров и коммерчески доступных микроволновых часов фонтанного типа [15].

Естественно, возникает вопрос о возможности переноса перспективных технологий фотоники на борт космического аппарата. Интересно отметить, что если около десяти лет назад такие идеи относились к разделу «научной фантастики», то сегодня уже осуществлен ряд удачных запусков, продемонстрировавших функциональность по крайней мере части квантово-оптических технологий, включая фемтосекундные синтезаторы оптических частот (ФСОЧ) [16], стабилизированные лазеры [17], а также системы для глубокого лазерного охлаждения и бозе-конденсации атомов рубидия, на борту космического аппарата [18]. Действительно, существенной трудностью, возникающей при создании любого оптического стандарта частоты, является большое количество (обычно около 10) разнообразных лазерных систем, частота излучения которых должна быть настроена на линии переходов в атоме. Это требуется как для охлаждения и захвата атомов и ионов, так и для управления внутренними квантовыми состояниями. При этом спектральная ширина излучения лазерных систем должна составлять 0,01–1 МГц при аналогичной точности настройки. Поддержка работоспособности лазеров — трудная задача; количество сбоев зачастую не обеспечивает надежной работы оптических стандартов частоты даже на интервале нескольких часов.

Появление эрбиевых и иттербиевых оптоволоконных лазеров с диодной накачкой (непрерывных и фемтосекундных) [19, 20], а также широкой линейки полупроводниковых лазеров (Фабри–Перо, с распределенной обратной связью, на квантовых ямах, квантово-каскадных и пр.), перекрывающей очень широкий спектральный диапазон от инфракрасного до ультрафиолетового, существенно повысило компактность и надежность лазерных систем. Разработаны новые надежные схемы стабилизации частоты полупроводниковых лазеров по внешнему резонатору [21], что позволяет использовать их в условиях сильных внешних возмущений без изменения длины волны генерации. Произошел прорыв в методах стабилизации частоты т. н. «часовых лазеров», опрашивающих метрологический переход в лазере. Созданы компактные, надежные системы на основе внешнего ультрастабильного резонатора Фабри–Перо, обеспечивающие относительную нестабильность частоты лазера на уровне 10^{-16} – 10^{-15} за 1 с (что соответствует субгерцевой спектральной ширине линии) [22, 23].

Одним из основополагающих факторов, обеспечивших реальные перспективы использования оптических часов в качестве БОРЧ, стало создание ФСОЧ на основе оптоволоконного фемтосекундного лазера с пассивной синхронизацией мод [24]. В работах [25, 26] было показано, что ФСОЧ позволяет преобразовывать оптическую частоту в радиочастотный диапазон, внося лишь незначительный вклад в относительную нестабильность частоты на уровне единиц 19 знака. Открылась возможность использовать высокие характеристики стабильности часового лазера, привязанного по частоте к оптическому резонансу в атоме, в диапазоне, доступном для потребителя (1–10 ГГц). Прогресс технологии производства ФСОЧ в Европе (компания «Menlo-Systems») позволил осуществить два успешных суборбитальных запуска с компактной (22 кг) ФСОЧ на борту в 2015 и 2017 гг. [16]. Можно считать, что вопрос бортового ФСОЧ решен на принципиальном уровне и в дальнейшем требуются только работы по повышению надежности и компактности системы. В России аналогичные работы ведутся компанией «Авеста».

Последний вопрос, который хотелось бы затронуть во введении, относится к выбору атомной

или ионной системы для перспективного БСУ. Несмотря на то, что оптические стандарты на нейтральных атомах в оптических решетках показывают, несколько лучшие характеристики стабильности за счет большого (вплоть до 10^5) количества опрашиваемых атомов [10] по сравнению со стандартами на одиночных ионах [11], последние являются предпочтительными. Во-первых, глубина потенциала ионной ловушки составляет несколько электронвольт (несколько десятков тысяч кельвинов), что позволяет долго, вплоть до месяцев, удерживать одиночный ион в ловушке [27]. Основным механизмом потерь являются столкновения с фоновым газом в вакуумной камере, приводящие к перезарядке и потере иона. Во-вторых, конструкция ионной ловушки гораздо более компактна и не требует деликатных юстировок оптических пучков. В-третьих, более низкая стабильность ионных часов на коротких временах усреднения (по сравнению с часами на нейтральных атомах) не является ограничением при проектировании БСУ для навигационного спутника. Из недостатков можно перечислить высокую чувствительность к электрическим полям (требуется деликатное управление потенциалами на электродах), относительно низкий уровень сигнала люминесценции от одиночного иона и труднодоступность ультрафиолетовых переходов в некоторых ионах [28, 29].

Существенным мотивирующим фактором является создание транспортируемых оптических часов на ионе Ca^+ объемом $0,5 \text{ м}^3$, демонстрирующих относительную нестабильность в 10^{-16} на одних сутках [14]. Кроме того, кооперацией немецких институтов и компаний (PTB, Toptica, Menlo Systems) начата разработка транспортируемых часов на одиночном ионе Yb^+ [30]. Аналогичный проект стартовал во Франции [31].

В 2017 г. Министерством образования и науки РФ поддержан проект 14.610.21.0010 «Разработка генератора ультрастабильных опорных сигналов частоты на холодных ионах иттербия для повышения на порядок точности геопозиционирования, космической навигации и формирования новых сегментов массового спроса на рынке приложений глобальной спутниковой навигации», задачей которого является создание компактного (1 м^3) стандарта частоты на одиночном ионе иттербия.

Для реализации этой задачи сформирован консорциум ключевых исполнителей РКС–ФИАН–«Сколтех»–ИЛФ СО РАН–«Авеста», в котором индустриальный партнер РКС играет определяющую роль в координации участников для решения задачи перехода к бортовому прототипу БСУ. Требуется комплекс новых решений в области фотонных и квантово-оптических технологий, электроники и систем управления. В статье будет представлен принцип функционирования оптических часов на одиночном ионе Yb^+ и обсуждены ключевые подходы к их реализации.

2. Основные принципы работы оптических часов на одиночном ионе Yb^+

Оптический репер частоты на одиночном ионе Yb^+ состоит из трех основных блоков. Опорный осциллятор (одиночный ион Yb^+) находится в вакуумном спектрографе оптическом (ВСО), представляющем собой вакуумную камеру с ионной ловушкой, аппаратурой для ее загрузки и компенсации внешних полей, а также оптической системой для регистрации сигнала флуоресценции иона под действием охлаждающего лазерного излучения. Вторым компонентом оптического стандарта частоты является лазерная система, которая в свою очередь делится еще на три части: систему контроля квантовых состояний (СККС), систему фотоионизации и доплеровского охлаждения (СФДО) и систему опроса часового перехода (СОЧП).

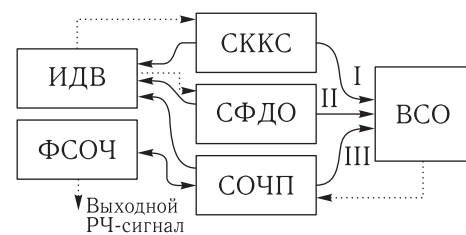


Рис. 1. Общая схема БОСЧ. ВСО — вакуумный спектрограф оптический, СККС — система контроля квантовых состояний, СФДО — система фотоионизации и доплеровского охлаждения, СОЧП — система опроса часового перехода, ФСОЧ — фемтосекундный синтезатор оптических частот, ИДВ — измеритель длин волн на основе интерферометра Физо

и систему опроса часового перехода (СОЧП). Третий основной блок состоит из измерителя длин волн, основанном на интерферометре Физо (ИДВ), а также из фемтосекундного синтезатора оптических частот (ФСОЧ) и отвечает как за стабилизацию частоты лазерных источников (ИДВ, ФСОЧ), так и за перенос стабильности и точности стандарта из оптического диапазона в радиочастотный (ФСОЧ).

СФДО формирует лазерное излучение на длинах волн 369,5 нм и 398,9 нм, которое обеспечивает (совместно с лазером из СККС, излучающим на длине волны 935 нм) лазерное охлаждение захваченных в ВСО частиц, загрузку ионов в ловушку посредством фотоионизации нейтральных атомов ^{171}Yb , а также считывание результата возбуждения часового перехода посредством метода квантовых скачков. СККС обеспечивает излучение на длинах волн 935 нм и 760 нм для приготовления необходимого квантового состояния иона перед опросом его часового перехода и замыкания цикла охлаждения. Достаточная точность стабилизации частот лазерного излучения блоков СККС и СФДО составляет 2 МГц и может быть реализована при помощи ИДВ, для чего небольшая часть их излучения заводится в последний. При помощи встроенного ПИД-контроллера ИДВ стабилизирует частоты лазеров СККС и СФДО.

СОЧП представляет собой оптическую систему, обеспечивающую излучение для возбуждения часового перехода иона и основанную на лазерном источнике, частота которого на коротких временах (меньше периода опроса иона) может стабилизироваться относительно моды высокостабильного резонатора Фабри–Перо или относительно ФСОЧ (которая сама по себе также может быть стабилизирована относительно аналогичного высокостабильного резонатора, что повышает отказоустойчивость системы). Характерная кратковременная нестабильность частоты излучения СОЧП составляет $2 \cdot 10^{-15}$ (1–10 с). Долговременная стабильность частоты СОЧП, а значит и всего стандарта в целом, обеспечивается стабилизацией относительно часового перехода в ионе.

Общая схема работы оптического стандарта частоты заключается в следующем. Сначала в ловушку, являющуюся частью ВСО, захватывается

ион $^{171}\text{Yb}^+$. После этого он циклически подвергается лазерному охлаждению для минимизации сдвига частоты часового перехода и подготавливается в исходном квантовом состоянии. Затем происходит возбуждение и считывание часового перехода, что позволяет стабилизировать частоту излучения СОЧП относительно частоты перехода в ионе. Частота СОЧП при этом делится при помощи ФСОЧ, который обеспечивает выходной радиочастотный сигнал стандарта. Кратковременная стабильность такого стандарта определяется высокостабильным резонатором, стабилизирующим СОЧП или ФСОЧ, а долговременная — частотой часового перехода иона, относительная нестабильность которой может достигать единиц 17 знака.

2.1. Ловушка Пауля

Наличие у ионов отличного от нуля электрического заряда значительно облегчает их захват и локализацию. Взаимодействие с электрическим полем позволяет удерживать ионы с помощью радиочастотных полей в так называемых ловушках Пауля [9]. Ловушка представляет собой комбинацию электродов, к которым приложены постоянные и радиочастотные (с частотой в пределах от 1 до 100 МГц) потенциалы. Эти электроды создают переменный неоднородный потенциал близкий к квадрупольному. Так, в трехмерных ловушках Пауля, которые обычно и лежат в основе оптических ионных стандартов частоты, конфигурация электродов имеет осевую симметрию и создаваемый ими потенциал в центре ловушки близок к описываемому формулой (1):

$$\Phi(r, z, t) = \frac{U_{dc} + V_{ac} \cos(\omega t)}{r_0^2 + 2z_0^2} (r^2 - 2z^2). \quad (1)$$

Здесь U_{dc} — постоянная составляющая потенциала, V_{ac} — амплитуда переменной составляющей, ω — круговая частота переменного потенциала, а r_0 и z_0 — характерные размерные параметры потенциала, определяющиеся конкретной геометрией электродов. На рис. 2 представлена конфигурация электродов, которая позволяет обеспечить потенциал близкий к заданному формулой (1), и в то же время предоставляющая хороший оптический доступ к центру ловушки, что важно

для осуществления эффективного лазерного охлаждения, манипулирования квантовым состоянием иона, а также считывания его состояния. Здесь к двум электродам-остриям, расположенным вдоль оси ловушки, прикладывается переменный потенциал с амплитудой $V_{ac} \approx 250$ В, а окружающие их полые цилиндрические электроды заземляются.

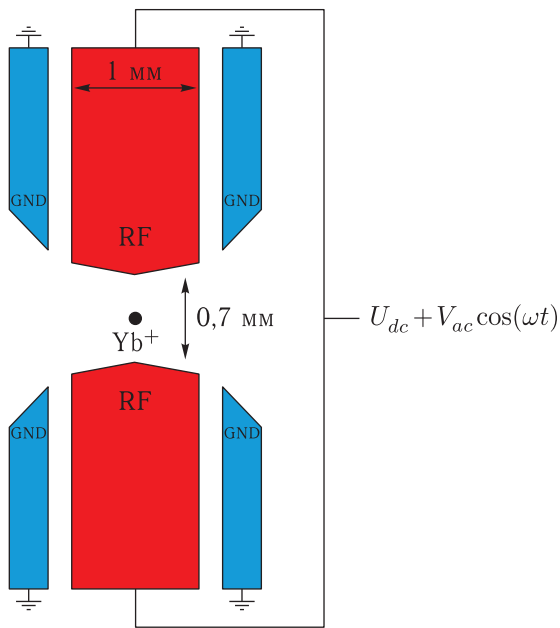


Рис. 2. Эскиз трехмерной ловушки Пауля. К электродам-остриям, обозначенным RF, прикладывается переменный потенциал, а цилиндрические электроды (GND), расположенные концентрически вокруг радиочастотных, — заземлены

Движение заряженной частицы в потенциале, задаваемом формулой (1), описывается уравнениями Матье. Анализ этих уравнений движения показывает, что при определенных значениях амплитуды V_{ac} и частоты ω напряжения на электродах ловушки ион удерживается вблизи ее центра [32]. Его движение при этом может быть представлено как суперпозиция относительно медленного (секулярного) движения иона в гармоническом псевдопотенциале вблизи точки, где амплитуда колебаний электрического поля обращается в ноль, и быстрых мелких колебаний иона с частотой поля ловушки, которые называются микродвижением. Поскольку микродвижение представляет собой вынужденные гармонические колебания частицы в поле ловушки, его амплитуда пропорциональна амплитуде удерживающего поля в данной точке траектории секулярного движения иона.

живающего поля в данной точке траектории секулярного движения иона.

Важными особенностями ионных ловушек являются большая глубина потенциальной ямы (вплоть до нескольких эВ), что позволяет захватывать в них ионы даже при комнатной температуре без предварительного охлаждения, а также то, что ион локализуется вблизи точки, где амплитуда удерживающего поля обращается в ноль. Последнее приводит к тому, что частота часового перехода частицы слабо подвержена сдвигу из-за эффекта Штарка, а также к минимизации сдвига из-за эффекта Доплера второго порядка, связанного с наличием микродвижения. Размер области локализации одиночных ионов в таких ловушках при наличии лазерного охлаждения составляет несколько десятков нанометров, что приводит к реализации режима Лэмба–Дике [33], а значит — к полному подавлению эффекта Доплера первого порядка. Также подавляется эффект отдачи, который в случае свободных атомов приводит к расщеплению и асимметрии линии часового перехода.

Важно отметить, что эффективное подавление штарковского и доплеровского сдвига второго порядка достигается только в случае, если потенциал ловушки близок к описываемому формулой (1). Если же в области захвата, к примеру, присутствуют паразитные статические электрические поля, то минимум псевдопотенциала будет сдвинут в область с ненулевой амплитудой электрического поля, что приведет к значительному усилению влияния описанных выше эффектов на частоту часового перехода. По этой причине конструкция ловушек также обычно предусматривает наличие нескольких компенсирующих электродов, которые позволяют устранить паразитные поля. Методы поиска оптимальных параметров компенсирующих полей подробно описаны, например, в [34].

Загрузка иона в ловушку может осуществляться при помощи ударной ионизации атомов иттербия электронным пучком или путем фотоионизации непосредственно в области захвата ловушки. Для этого на несколько секунд включается атомная печька, представляющая собой трубку, заполненную металлическим иттербием и снабженную электрическим нагревателем, которая создает атомный пучок, проходящий через центр ловушки,

а также источник ионизации (лазер фотоионизации или электронный пучок). Фотоионизация является более предпочтительной, так как обеспечивает загрузку только ионов данного элемента и конкретного изотопа, а также, в отличие от электронного пучка, ее использование не приводит к появлению паразитных зарядов вблизи ловушки.

Время жизни ионов в ловушке за счет высокого уровня вакуума ($< 10^{-10}$ мбар) и большой глубины потенциала обычно составляет несколько суток. При этом основной канал потерь — обмен зарядом иона иттербия с атомами фонового газа при столкновениях. В случае потери иона, что может быть обнаружено по отсутствию флуоресценции частицы под действием охлаждающего излучения в течение нескольких циклов охлаждения, ион повторно загружается в ловушку; это занимает порядка секунды и не оказывает существенного влияния на характеристики стабильности.

2.2. Лазерная система

Важнейший элемент БОРЧ — лазерные источники, обеспечивающие излучение для охлаждения иона, фотоионизации, манипулирования квантовым состоянием частицы и возбуждения часового перехода. Данные источники должны быть постоянно настроены на соответствующие линии переходов в ионе, быть стабильными и компактными. Наиболее стабильными и надежными источниками сегодня являются волоконные лазеры с распределенной обратной связью [35]. Волоконные лазеры генерируют только в узком диапазоне длин волн (1530–1560 нм для лазеров, легированных ионами эрбия [36]; 1030–1050 нм для лазеров, легированных ионами иттербия [37]). Высокой стабильностью частоты также обладают полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью [38] (например, изготавливаемые НПО «Полюс», 780 нм и 850 нм) и с вертикальными резонаторами [39]. К сожалению, большинство перечисленных типов лазеров генерируют в диапазонах длин волн (с учетом второй гармоники), отличающихся от необходимых для квантовых манипуляций с ионом иттербия в ловушке (369 нм, 398 нм, 739 нм, 760 нм, 871 нм, 935 нм).

Перспективные лазерные источники, в том числе и для использования в космических прило-

жениях, — это полупроводниковые лазеры с внешним резонатором. Они обладают широким диапазоном перестройки длины волны, высокой стабильностью частоты и узостью спектра излучения. Их компактность, простота конструкции и эксплуатации сделали их сегодня основными лазерными источниками в спектроскопических лабораториях в мире, а доступные сегодня лазерные диоды покрывают значительную часть ближней инфракрасной, видимой и ближней ультрафиолетовой областей спектра. Конструкция коммерчески доступных диодных лазеров обладает высокой надежностью [40].

Большинство используемых сегодня полупроводниковых лазеров с внешним резонатором изготовлены либо по схеме Литтрова [41], либо по схеме Литтмана [42]. В обеих схемах резонатор лазера образован задней отражающей поверхностью диода и отражающим элементом, а дискриминация длин волн, обеспечивающая одночастотную генерацию, — дифракционной решеткой. При этом перестройка лазера осуществляется изменением длины резонатора и углом дифракции решетки. Главный недостаток этих схем — высокая чувствительность лазера к юстировке отражающего элемента.

Более предпочтительна для использования в БОРЧ схема, предложенная в [43] и изображенная на рис. 3, где в качестве отражателя используется отражатель типа «кошачий глаз», а для дискриминации длин волн — интерференционный фильтр. Особенностью отражателя типа «кошачий глаз», который реализуется при помощи линзы и зеркала, расположенного в ее фокальной плоскости, является отражение пучка точно в обратном направлении.

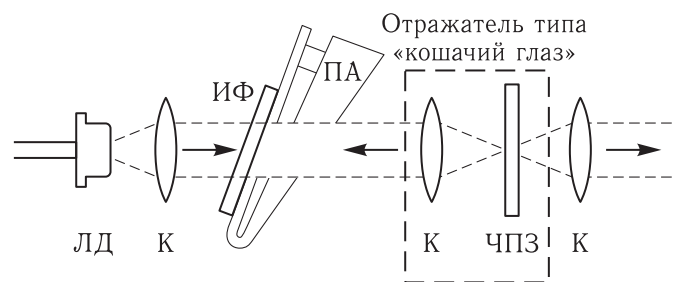


Рис. 3. Схема полупроводникового лазера с внешним резонатором на основе интерференционного фильтра (ИФ) и отражателя типа «кошачий глаз». Здесь ЛД — лазерный диод, К — коллиматор, ПА — пьезоактуатор, ЧПЗ — частично пропускающее зеркало

Это снижает чувствительность схемы к вибрациям и изменениям температуры. Настройка частоты на атомный резонанс осуществляется изменением тока лазера, температуры, а также поворотом интерференционного фильтра при помощи пьезоактюатора. Экспериментальное исследование лазеров такого типа подтверждает их высокую стабильность. Мощность излучения составляет 5–50 мВт в зависимости от длины волны, а спектральная ширина линии — порядка 1 МГц (зависит от длины резонатора).

После прохождения ряда оптических элементов (изоляторов, акусто-оптических модуляторов, поляризационной оптики) излучение заводится в оптическое волокно и направляется в ВСО. Такая схема снижает чувствительность конструкции к юстировкам и вибрациям.

Лазерная система управления квантовыми состояниями (СККС) включает два лазера с длинами волн 935 нм и 760 нм (рис. 4). Лазер на 935 нм служит для перемешивания населенности $^2D_{3/2}$ - и $^3[3/2]_{1/2}$ -уровней. При прикладывании охлаждающего излучения ион может распасться в метастабильное $^2D_{3/2}$ -состояние и выпасть из цикла охлаждения. Для возвращения исследуемого иона в цикл охлаждения производится возбуждение в $^3[3/2]_{1/2}$ -состояние. Лазер на 760 нм служит для перемешивания $^2F_{7/2}$ - и $^1[3/2]_{1/2}$ -уровней. Эта связь необходима для быстрого возвращения иона

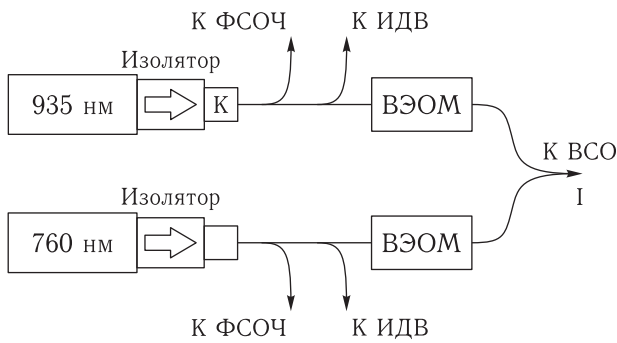


Рис. 4. Лазерная система управления квантовыми состояниями (СККС) на основе диодных лазеров с внешним резонатором (рис. 3). К — коллиматор, ВЭОМ — волоконный электрооптический модулятор, ФСОЧ — фемтосекундный генератор оптических частот, сплошные толстые линии — оптические волокна, ИДВ — измеритель длин волн на основе интерферометра Физо

в исходное состояние в случае перехода на метастабильный уровень $^2F_{7/2}$. Ввиду наличия сверхтонкого расщепления необходима модуляция частоты излучения, которая реализуется на основе волоконных электрооптических модуляторов (ВЭОМ). Стабилизация частоты лазеров СККС может производиться как при помощи ФСОЧ, так и при помощи ИДВ.

СФДО состоит из трех лазеров: двух с длиной волны 369,5 нм и одного с длиной волны 398,9 нм. Два лазера на 369,5 нм используются для доплеровского охлаждения и подготовки начального состояния исследуемого иона. Частота этих лазеров отличается на 14,75 ГГц для эффективного возбуждения двух сверхтонких компонент основного состояния. Лазер на 398,9 нм используется для фотоионизации иттербия. Все лазеры в системе СФДО оснащены волоконными акустооптическими модуляторами (ВАОМ) для возможности быстрого включения и выключения излучения. Частота лазеров СФДО стабилизируется при помощи ИДВ или ФСОЧ.

В системе опроса часового перехода (СОЧП, рис. 6) излучение диодного лазера на длине волны 871 нм проходит сначала через волоконный акустооптический модулятор для возможности перестройки частоты с полосой 100 МГц, а затем через

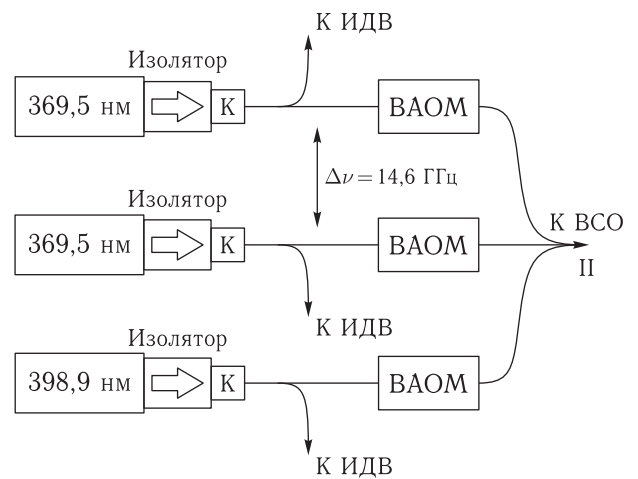


Рис. 5. Лазерная система фотоионизации и доплеровского охлаждения (СФДО). Излучение получается при помощи диодных лазеров с внешним резонатором в схеме с интерференционным фильтром (рис. 3). К — коллиматор, ВАОМ — волоконный акустооптический модулятор, сплошные толстые линии — оптические волокна, ИДВ — измеритель длин волн на основе интерферометра Физо

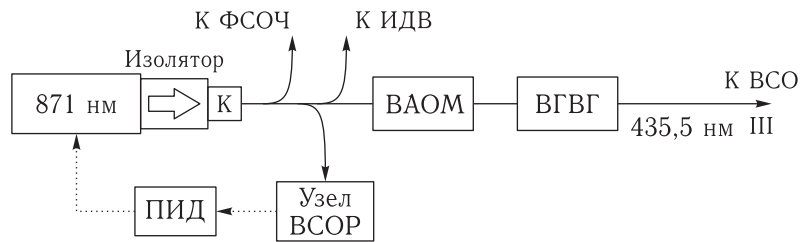


Рис. 6. Система опроса часового перехода (СОЧП). Излучение получается при помощи диодного лазера с внешним резонатором (рис. 3). К — коллиматор, ВАОМ — волоконный акустооптический модулятор, ВГВГ — волоконный генератор второй гармоники, ВСО — высокостабильный оптический резонатор, ПИД — пропорционально-интегрально-дифференциальный контроллер, сплошные толстые линии — оптические волокна, пунктирные линии — электрические сигналы, ИДВ — измеритель длин волн на основе интерферометра Физо

волоконный генератор второй гармоники на основе периодически поляризованного нелинейного кристалла [44], где частота лазерного излучения удваивается. После чего по оптическому волокну излучение подводится к ВСО. Часть излучения на длине волны 871 нм отщепляется для калибровки волномера и стабилизации частоты повторения ФСОЧ.

2.3. Часовой лазер и считывание информации с одиночного иона

Для стабилизации лазера СОЧП на коротких временах (1–10 с) используется ультрастабильный оптический резонатор Фабри–Перо, который конструктивно состоит из тела резонатора (ТР) и двух зеркал с диэлектрическим покрытием, закрепленных на торцах рабочего тела методом оптического контакта. Зеркала и тело резонатора изготавливаются из особого сорта стекла с нулевым коэффициентом теплового расширения (Ultra Low Expansion — ULE). Оптический резонатор помещен в вакуумную камеру для уменьшения влияния флуктуаций коэффициента преломления и температуры окружающей среды.

Для стабилизации частоты лазера относительно собственной частоты резонатора используется метод Паунда–Драйвера–Холла [45]. Принципиальная схема такой привязки изображена на рис. 7. Излучение стабилизируемого лазера по волокну доставляется к электрооптическому модулятору и модулируется по фазе, после чего отражается от ВСОП и отраженный сигнал детектируется фотодиодом. При этом комплексный коэффициент отра-

жения излучения от резонатора зависит от частоты. Сигнал с фотодиода сбивается с сигналом модуляции. Сигнал биений приобретает зависимость от частоты лазера, при этом при совпадении частоты лазера с частотой резонанса ВСОП сигнал равен нулю.

Стоит отметить, что при помощи такой техники можно стабилизировать частоту как диодного, так и волоконного лазеров [22, 46]. В случае стабилизации частоты волоконного лазера после него обычно устанавливают акустооптический модулятор и сервосигнал для компенсации шумов фазы лазера подается на него, так как частота таких лазеров в отличие от полупроводниковых не может быть быстро модулирована при помощи тока накачки. Целевая относительная нестабильность частоты СОЧП составляет $2 \cdot 10^{-15}$ (1 с), что достаточно для уверенного опроса иона и подтверждается серией экспериментов [47, 48].

Для считывания информации о возбуждении часового перехода в ионах обычно используется метод квантовых скачков (рис. 8). Он заключается в том, что после цикла возбуждения часового перехода (рис. 8, I) ион облучается охлаждающим излучением на длине волны 369,5 нм. В этот момент начинается регистрация сигнала флуоресценции иона при помощи фотоэлектронного умножителя. Если во время возбуждения часового перехода ион перешел в состояние $^2D_{3/2}$, то ион не будет переизлучать фотоны 369,5 нм (рис. 8, IIa). Если же возбуждение часового перехода не произошло, будет наблюдаться сигнал флуоресценции иона (рис. 8, IIб). Эта схема позволяет осуществить стабилизацию частоты опрашиваемого лазера часового перехода по частоте перехода в ионе.

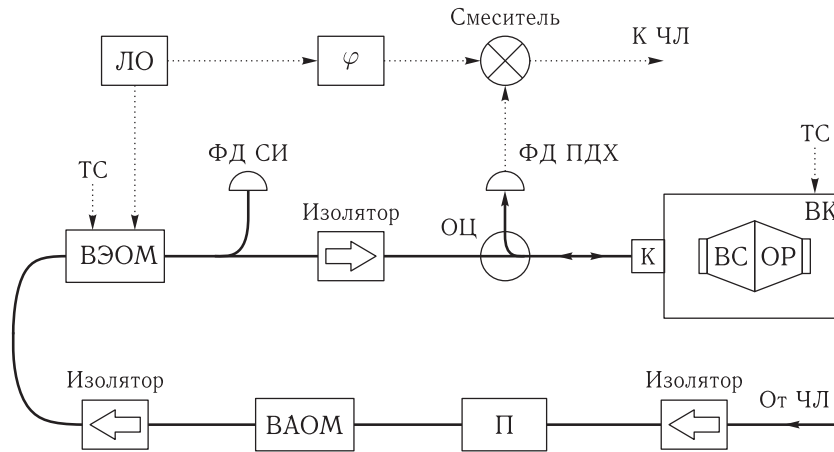


Рис. 7. Узел высокостабильного оптического резонатора ОР. ЧЛ — часовой лазер, П — волоконный поляризатор, ВАОМ — волоконный акустооптический модулятор, ВЭОМ — волоконный электрооптический модулятор, ТС — петля температурной стабилизации, ФД СИ — фотодиод стабилизации интенсивности, ОЦ — волоконный оптический циркулятор, ФД ПДХ — фотодиод в схеме Паунда–Дривера–Холла, К — коллиматор, ВСОР — высокостабильный оптический резонатор, ВК — вакуумная камера, ЛО — локальный осциллятор, φ — фазовращатель, сплошные толстые линии — оптические волокна

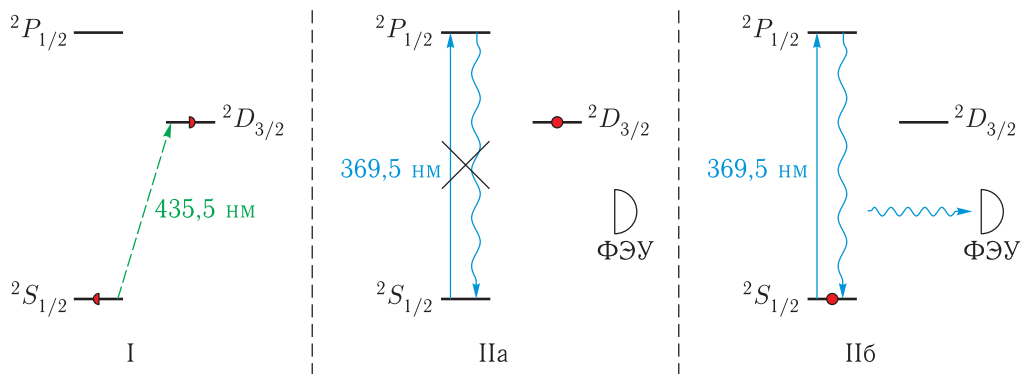


Рис. 8. Считывание квантовой информации с иона. I — возбуждение часового перехода, IIa — отсутствие флюоресценции при переходе иона в состояние $^2D_{3/2}$, IIб — детектирование флюоресценции в случае не возбуждения часового перехода. ФЭУ — фотоэлектронный умножитель

2.4. Фемтосекундный синтезатор оптических частот

Важнейшим элементом оптического стандарта частоты является ФСОЧ. Часовой переход в ионе и мода ультрастабильного резонатора, относительно которых стабилизирован лазер СОЧП, формируют стабильность стандарта в оптическом диапазоне частот. При этом практические применения требуют высокостабильного и точного репера частоты в радиочастотном диапазоне. ФСОЧ осуществляет перенос точности и стабильности стандарта из оптического диапазона в радиочастотный.

Для создания БОРЧ на базе ионов иттербия предполагается использовать ФСОЧ на основе фемтосекундного волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод с генератором суперконтинуума. Спектр такого лазерного источника простирается в пределах 1000–2000 нм. Особенность такой системы заключается в том, что спектр состоит из набора эквидистантных продольных лазерных мод, частоты которых задаются формулой $f_n = f_{\text{CEO}} + n \times f_{\text{REP}}$, где f_{CEO} — частота смещения волнового пакета относительно несущей, f_{REP} — частота повторения импульсов лазера (f_{CEO} и f_{REP} обычно находятся в диапазоне 50–250 МГц), n — номер

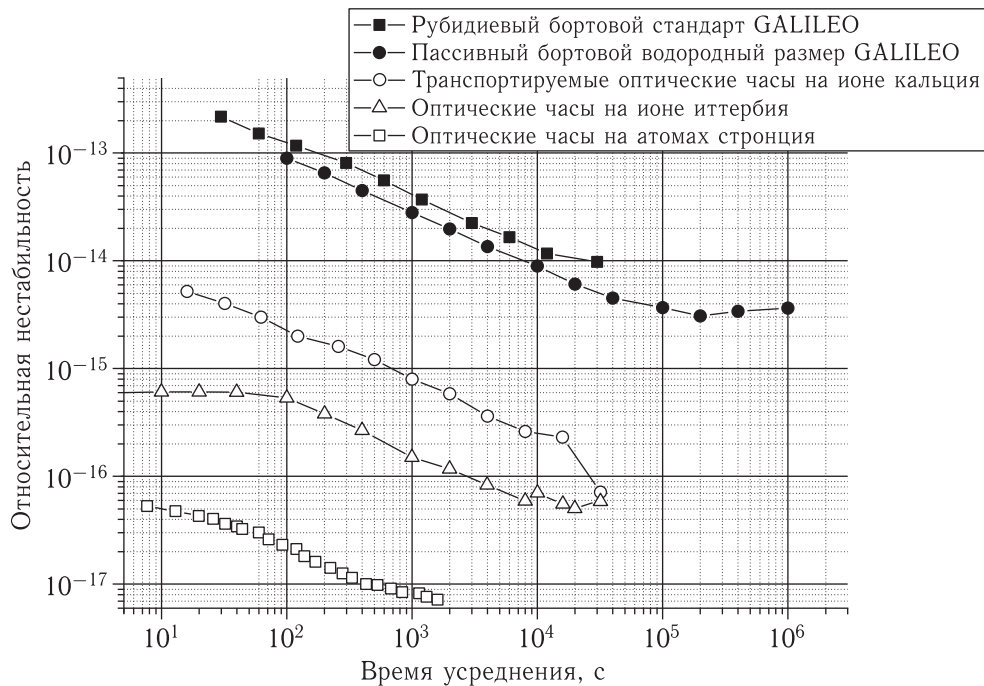


Рис. 9. Относительная нестабильность (девиация Аллана) различных атомных стандартов частоты в зависимости от времени усреднения: рубидиевый бортовой стандарт, используемый на спутниках GALILEO [56], пассивный бортовой водородный мазер для спутников GALILEO [56], транспортируемые оптические часы на одиночном ионе $^{40}\text{Ca}^+$ [14], оптические часы на одиночном ионе $^{171}\text{Yb}^+$ [57], оптические часы на основе атомов ^{87}Sr в оптической решетке [10]

моды [49]. Для использования ФСОЧ в диапазоне длин волн менее 1000 нм обычно применяется преобразование во вторую гармонику с использованием нелинейных кристаллов ППЛН (периодически поляризованный кристалл ниобата лития).

Таким образом, ФСОЧ осуществляет преобразование частот из радиочастотного диапазона в оптический и наоборот без потери характеристик стабильности [50]. Бортовая реализация ФСОЧ была осуществлена компанией Menlo-Systems и успешно протестирована на борту суборбитального космического аппарата в 2016 г. [16]. Изготовлением волоконных ФСОЧ в России занимается компания «Авеста»; лабораторные системы ФСОЧ также созданы в ФИАН и ИЛФ СО РАН.

Перспективно создание ФСОЧ с исключенной из структуры спектра частотой f_{CEO} (безофсетная схема, $f_{\text{CEO}} = 0$). Это достигается путем нелинейного процесса генерации разностных частот (ГРЧ) между двумя участками исходной ФСОЧ [51–53]. Такая схема облегчает стабилизацию ФСОЧ отно-

сительно оптических реперов частоты и перенос их стабильности и точности в радиодиапазон [54].

При создании иттербиевого БОРЧ планируется использовать волоконный ФСОЧ, который при помощи нелинейных преобразований обеспечивает выходное излучение на длинах волн вблизи 871 нм (частота осциллятора СОЧП) и 1560 нм. Стабилизация ФСОЧ на коротких временах будет осуществляться при помощи высокостабильного волоконного лазера, излучающего на длине волны 1560 нм. Долговременная стабильность ФСОЧ обеспечивается привязкой к частоте часового перехода в ионе при помощи СОЧП. ФСОЧ будет обладать радиочастотным выходом 1 ГГц.

3. Заключение

Революционные изменения, произошедшие в последнее десятилетие в области синтеза высокостабильных сигналов частоты, привели к безусловной

приоритетной роли квантово-оптических технологий на горизонте следующих 10 лет как в наземных, так и в бортовых системах [55]. На сегодняшний день оптические часы превосходят цезиевые фонтаны по показателям относительной нестабильности и погрешности более чем на порядок величины (рис. 9) и продолжают эволюционировать в сторону повышения компактности, надежности и улучшения характеристик.

Несомненно, создание прототипа надежного и компактного устройства БОРЧ, интегрирующего перечисленные технологии и модули, является сложнейшей научно-технической задачей. Помимо научной составляющей, для ее реализации в бортовом варианте требуется развитие линейки технологий фотоники (твердотельные излучатели, волоконно-оптические компоненты, электронно-оптические элементы технологии нанесения покрытий). Представленный проект открывает возможность интегрировать существующий научно-технологический задел и на его основе составить объективную дорожную карту развития данного направления в России.

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта МОН 2017-14-582-0001.

Список литературы

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasele E. GNSS — Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more // Springer–Wien–NewYork, 2008. С. 109–138. ISBN 978-3-211-73012-6
2. <http://gpsworld.com/directions-2017-new-glonass-capabilities-for-users>
3. Медведев С., Беляев А., Мясников А., Павленко Ю., Сахаров Б., Смирнов П., Сторожев Е., Тюляков А. Пассивный водородный мазер — часы будущего поколения спутников ГЛОНАСС // Метрология времени и пространства, Доклады 6-го Международного симпозиума, 2013. С. 279–282.
4. Steigenberger P., Montenbruck, O. Galileo status: orbits, clocks, and positioning // GPS Solutions, 2017, № 21(2). С. 319–331.
5. Демидов Н.А., Беляев А.А., Сахаров Б.А. Перспективный бортовой водородный стандарт частоты космического применения, VIII Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», 14–16 сентября 2016 г., Санкт-Петербург.
6. Уткин А.Г., Беляев А.А., Павленко Ю.К. Квантовый водородный генератор бортового космического радиотелескопа «Радиоастрон» (конструкция и результаты испытаний) // Метрология времени и пространства, Материалы 6-го Международного симпозиума, 2012. С. 85–87.
7. Lett P.D., Phillips W.D., Rolston S.L., Tanner C.E., Watts R.N., Westbrook C.I. Optical molasses // Journal of the Optical Society of America B, 1989, № 6(11). P. 2084–2107.
8. Jessen P.S., Deutsch I.H. Optical lattices // Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics, 1996, № 37. P. 95–138.
9. Werth G., Gheorghe V.N., Major F.G. Charged Particle Traps II, Applications // Springer, 2009.
10. Nicholson T.L. et al. Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty // Nature Communications, 2015, vol. 6.
11. Huntemann N. et al. Single-ion atomic clock with 3×10^{-18} systematic uncertainty // Physical Review Letters, 2016, vol. 116, № 6. С. 063001.
12. Ludlow A.D., Boyd M.M., Ye J. Optical atomic clocks // Reviews of Modern Physics, 2015, № 87. P. 637–701.
13. Vogt S., Häfner S., Grotti J., Koller S., Al-Masoudi A., Sterr U., Lisdat C. A transportable optical lattice clock // Journal of Physics: Conference Series, 2016, № 723. P. 012020.
14. Cao J., Zhang P., Shang J., Cui K., Yuan J., Chao S., Huang X. A transportable 40Ca^+ single-ion clock with 7.7×10^{-17} systematic uncertainty // arXiv preprint, 2016, arXiv:1607.03731.
15. <https://www.muquans.com/index.php/products/mclock>
16. Lezius M. et al. Space-borne frequency comb metrology // Optica, 2016, vol. 3, № 12. P. 1381–1387.
17. Schkolnik V., Hellmig O., Wenzlawski A., Grosse J., Kohfeldt A., Döringshoff K., Krutzik M. A compact and robust diode laser system for atom interferometry on a sounding rocket // Applied Physics B, 2016, № 122(8). P. 217.
18. Lachmann M. et al. Creating the first Bose-Einstein Condensate in Space // Bulletin of the American Physical Society, 2017.

19. Jeong Y. et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power // Optics Express, 2004, № 12(25). P. 6088–6092.
20. Jang H. et al. Polarization maintaining linear cavity Er-doped fiber femtosecond laser // Laser Physics Letters, 2015, № 12(10). P. 105102.
21. Leibrandt D.R., Thorpe M.J., Notcutt M., Drullinger R.E., Rosenband T., Bergquist J.C. Spherical reference cavities for frequency stabilization of lasers in non-laboratory environments // Optics Express, 2011, № 19(4). P. 3471–3482.
22. Alnis J. et al. Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Pérot cavities // Physical Review A, 2008, № 77(5). P. 053809.
23. Legero T. et al. 1.5 μm Lasers with Sub10 mHz Linewidth // CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2017. P. SW1J. 1.
24. Washburn B.R. et al. Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared // Optics Letters, 2004, vol. 29, № 3. P. 250–252.
25. Ma L. S., Bi Z., Bartels A., Robertsson L., Zucco M., Windeler R. S., Diddams S. A. Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10^{-19} level // Science, 2004, № 303(5665). P. 1843–1845.
26. Wang B., Gao C., Chen W.L., Miao J., Zhu X., Bai Y., Wang L.J. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level // Scientific Reports, 2012, 2.
27. Huang Y. et al. A comparison of two 40Ca^+ single-ion optical frequency standards at the 5×10^{-17} level and an evaluation of systematic shifts // Applied Physics B, 2017, vol. 123, № 5. P. 166.
28. Chou C. et al. Frequency comparison of two high-accuracy Al^+ optical clocks // Physical Review Letters, 2010, vol. 104, № 7. P. 070802.
29. Zhang J. et al. Direct Laser Cooling Al Ion Optical Clocks // Chinese Physics Letters, 2017, vol. 34, № 5. P. 050601.
30. <http://www.opticlock.de/en/info>
31. Clement Lacroute et al. Compact Yb^+ optical atomic clock project: design principle and current status // J. Phys. Conf. Series, 2016, vol. 723. P. 012025.
32. Leibfried D., Blatt R., Monroe C., Wineland D. Quantum dynamics of single trapped ions // Review of Modern Physics, 2003, № 75(1). P. 281–324.
33. Dicke R.H. The effect of collisions upon the Doppler width of spectral lines // Phys. Rev., 1953, № 89. P. 472–473.
34. Berkeland D.J., Miller J.D., Bergquist J.C., Itano W.M., Wineland D.J. Minimization of ion micro-motion in a Paul trap // Journal of Applied Physics, 1998, № 83(10). P. 5025–5033.
35. Qi H., Song Z., Guo J., Ni J., Wang C., Peng G. Narrow-linewidth distributed feedback fiber laser with MOPA // Chinese Optics Letter, № 13(S2). P. 21404.
36. https://www.rp-photonics.com/erbium_doped_fiber_amplifiers.html
37. https://www.rp-photonics.com/ytterbium_doped_gain_media.html
38. Журавлева О.В., Иванов А.В., Леонович А.И., Курносов В.Д., Курносов К.В., Чернов Р.В., Шишков В.В., Плешанов С.А. Одночастотный лазер с подстройкой длины волны для накачки цезиевых стандартов частоты // Квантовая электроника, 2006, № 36(8). С. 741–744.
39. Serkland D.K., Keeler G.A., Geib K.M., Peake G.M. Narrow linewidth VCSELs for high-resolution spectroscopy // Proc. SPIE 7229, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XIII., 2009. P. 722907.
40. Raab C., Neuhaus R., Falke S., Nölleke C., Stuhler J., Kaenders W. 53 Years Tunable Semiconductor Laser — Past, Present and Future // Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (online), Optical Society of America, 2017, paper AM.3A.2.
41. Hawthorn C.J., Weber K.P., Scholten R.E. Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam // Review of scientific instruments, 2001, № 72(12). P. 4477–4479.
42. Liu K., Littman M.G. Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers // Optics Letters, 1981, № 6(3). P. 117.
43. Zorabedian P., Trutna W.R. Interference-filter-tuned, alignment-stabilized, semiconductor external-cavity laser // Optics Letters, 1988, № 13(10). P. 826–828.
44. Iwai M., Yoshino T., Yamaguchi S., Imaeda M., Pavel N., Shoji I., Taira T. High-power blue generation from a periodically poled $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ ridge-type waveguide by frequency doubling of a diode end-pumped Nd: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ laser // Applied Physics Letters, 2003, № 83(18). P. 3659–3661.

45. *Drever R. W. P., Hall J. L., Kowalski F. V., Hough J., Ford G. M., Munley A. J., Ward H.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // *Applied Physics B*, 1983, № 31(2). P. 97–105.
46. *Kessler T., Hagemann C., Grebing C., Legero T., Sterr U., Riehle F., Ye J.* A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity // *Nature Photonics*, 2012, № 6(10). P. 687–692.
47. *Golovizin A. A., Kalganova E. S., Sukachev D. D., Vishnyakova G. A., Semerikov I. A., Soshenko V. V., Tregubov D. O., Akimov A. V., Kolachevsky N. N., Khabarova K. Yu., Sorokin V. N.* Detection of the clock transition (1.14 μm) in ultra-cold thulium atoms // *Quantum Electronics*, № 45(5). P. 482–485.
48. *Sukachev D., Fedorov S., Tolstikhina I., Tregubov D., Kalganova E., Vishnyakova G., Golovizin A., Kolachevsky N., Khabarova K., Sorokin V.* Inner-shell magnetic dipole transition in Tm atoms: A candidate for optical lattice clocks // *Physical Review A*, № 94(2). P. 1–13.
49. *Reichert J., Holzwarth R., Udem T., Hänsch T. W.* Measuring the Frequency of Light with Mode-Locked Lasers // *Optics Communications*, 1999, № 172. P. 59–68.
50. *Xie X., Bouchand R., Nicolodi D., Giunta M., Hänsel W., Lezius M., Joshi A., Datta S., Alexandre C., Lours M., Tremblin P.-A., Santarelli G., Holzwarth R., Le Coq Y.* Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise // *Nature Photonics*, 2016, № 11(1). P. 44–47.
51. *Puppe T., Sell A., Kliese R., Hoghooghi N., Zach A., Kaenders W.* Characterization of a DFG comb showing quadratic scaling of the phase noise with frequency // *Optics Letters*, 2016, № 41(8). P. 1877–1880.
52. *Губин М. А., Киреев А. Н., Конященко А. В., Крюков П. Г., Таусенев А. В., Тюриков Д. А., Шелковников А. С.* Реализация компактных оптических часов // *Квантовая электроника*, 2008, № 38(7). С. 613–614.
53. *Zimmermann M., Gohle C., Holzwarth R., Udem T., Hänsch T. W.* Optical clockwork with an offset-free difference-frequency comb: accuracy of sum- and difference-frequency generation // *Optics Letters*, 2004, № 29(3). P. 310.
54. *Kireev A. N., Tausenev A. V., Tyurikov D. A., Shelkovnikov A. S., Shepelev D. V., Konyashchenko A. V., Gubin M. A.* Femtosecond optical-to-microwave frequency divider with a relative instability of 10^{-4} – 10^{-16} ($\tau = 1$ –100 s) // *Quantum Electronics*, 2016, № 46(12). P. 1139–1141.
55. *Arias E. F.* New Technologies and the Future of Time-keeping // *Arias E. F., Combrinck L., Gabor P., Hohenkerk C., Seidelmann P. K.* The Science of Time 2016: Time in Astronomy & society, past, present and future, 2017, Springer International Publishing. P. 379–389.
56. *Rochat P., Droz F., Wang Q., Froidevaux S.* Atomic clocks and timing systems in global navigation satellite systems // *In Proceedings of 2012 European navigation conference*, 2012. P. 25–27.
57. *Huntemann N.* High-accuracy optical clock based on the octupole transition in Yb+171 // *PhD thesis at Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover*, 2014.