

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## Передача точных сигналов частоты и времени в оптическом диапазоне

К.Ю. Хабарова, Е.С. Калганова, Н.Н. Колачевский

*Создание фемтосекундного синтезатора оптических частот, позволяющего преобразовывать частоту из оптического диапазона в радиодиапазон, привело к широкому использованию атомных оптических часов. Относительная нестабильность таких часов достигла рекордных значений в несколько единиц восемнадцатого знака, что на два порядка превосходит нестабильность цезиевых фонтанов, первичных стандартов частоты. Этому сопутствует развитие методов передачи точных сигналов частоты и времени, в том числе по оптоволоконным линиям связи. Использование оптоволоконных линий позволяет достичь относительной нестабильности передачи частот оптических сигналов, меньшей, чем  $10^{-18}$ , за время усреднения менее 1000 с при передаче на расстояние порядка 1000 км. В свою очередь точность передачи сигналов времени на расстояния до 500 км достигла 250 пс. Оптоволоконные линии связи открывают возможность сличения оптических часов и создания синхронизованной сети стандартов времени и частоты на новом уровне точности. Возникает возможность решения новых задач: определения гравитационного потенциала, измерения эффекта Саньяка в континентальном масштабе, проведения точных тестов фундаментальных физических теорий.*

**Ключевые слова:** волоконные линии связи, передача сигналов времени и частоты, фемтосекундный лазер, эрбиевый лазер, стабилизация частоты

PACS numbers: 06.20.Jr, 06.30.Ft, 12.20.Fy,  
32.10.Fn, 32.30.Jc, 42.62.Fi

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.05.038131>

### Содержание

1. Введение (221).
  2. Передача точных сигналов частоты по оптоволоконкам (223).
    - 2.1. Амплитудная модуляция оптической волны.
    - 2.2. Одновременная передача радиочастотного и оптического сигналов.
    - 2.3. Передача оптической частоты.
  3. Схема передачи фазы сигнала на оптической несущей (225).
  4. Передача сигналов частоты по интернет-каналам (227).
  5. Передача сигналов времени (228).
  6. Примеры применения метода оптоволоконной передачи точных сигналов частоты (228).
    - 6.1. Измерение гравитационного потенциала и эффект Саньяка.
    - 6.2. Спектроскопия перехода  $1S-2S$  в атоме водорода.
  7. Заключение (229).
- Список литературы (230).

К.Ю. Хабарова, Е.С. Калганова. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: [kсениаkhabarova@gmail.com](mailto:kсениаkhabarova@gmail.com)

Н.Н. Колачевский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация; Российский квантовый центр, ул. Новая 100А, 143025 Сколково, Москва, Российская Федерация; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация

Статья поступила 3 февраля 2017 г.,  
после доработки 12 мая 2017 г.

### 1. Введение

Одной из важнейших задач современной науки является формирование точных сигналов частоты и времени. Повсеместно используемые технологии в области навигации, геодезических измерений, глобальных коммуникационных сетей или высокоскоростных каналов передачи данных основываются на высокоточных сигналах времени и частоты. Можно также перечислить ещё целый ряд областей, в которых необходимы высокоточные измерения частоты и времени: глобальная космическая навигация, интерферометрия со сверхдлинной базой, определение фундаментальных констант, разработка новых стандартов физических величин для метрологии, тестирование фундаментальных физических теорий.

Создание фемтосекундного синтезатора оптических частот стимулировало развитие метрологии частот оптического диапазона ( $10^{14}-10^{15}$  Гц) [1]. Прогресс методов лазерного охлаждения, лазерной стабилизации и измерения оптических частот привёл к созданию оптических часов, относительная нестабильность которых достигла порядка  $10^{-18}$  при времени усреднения 1000 с [2, 3]. Стабильность и воспроизводимость частоты оптических часов превысили характеристики лучших микроволновых стандартов (цезиевых фонтанов) на два порядка, что вывело оптические часы на лидирующие позиции.

Одной из проблем, ограничивающих широкое практическое использование высокоточных оптических стан-

дартов частоты, является сложность их транспортировки, сличения и распространения сигналов частоты и времени без ухудшения их характеристик. На сегодняшний день основным методом, обеспечивающим наивысшую точность сличения частот в радиочастотном диапазоне, является двусторонняя спутниковая передача времени и частоты (дуплекс, TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer)) [4], которая обеспечивает относительную нестабильность передачи на уровне  $10^{-15}$  за одни сутки. Это является достаточным для сличения большинства часов микроволнового диапазона, однако совершенно не удовлетворяет новым требованиям, предъявляемым к оптическим стандартам частоты. Так, например, одно из новых направлений применения оптических часов представляют собой задачи гравиметрии [5], опирающиеся на измерение гравитационного смещения частоты. Для достижения точности измерения в 1 см по высоте необходимо выполнить сличение двух часов с относительной точностью  $10^{-18}$ , при этом расстояние между ними может достигать нескольких тысяч километров.

В настоящее время обсуждается возможность создания Системы глобальных геодезических наблюдений (СГГН) (Global Geodetic Observing System — GGOS) [6], которая позволила бы изучать и предсказывать такие явления, как землетрясения и цунами, в глобальном контексте. Геодезическим обсерваториям, расположенным по всему миру, также требуется точная временная и частотная опора. Одним из неперемных условий функционирования СГГН является наличие общего опорного уровня высоты, не подверженного приливным, геологическим и атмосферным изменениям. Это означает, что необходимы одни опорные атомные часы, частота которых определяет нулевой уровень гравитационного потенциала. Например, такими часами могли бы быть часы, размещённые на орбите. Тогда сеть наземных оптических часов — транспортируемых или связанных оптическими волокнами — с неопределённостью порядка  $10^{-18}$  могла бы связать и синхронизовать геодезические лаборатории по всему миру. Для решения этих задач уже сегодня формируется сеть атомных часов, включая оптические, с использованием различных каналов синхронизации, в том числе оптоволоконных линий связи [7–9]. Европейский проект носит название "International Timescales with Optical Clocks" (ИТОС) [10].

Для решения задач передачи времени и частоты на новом уровне точности в ряде лабораторий мира ведутся исследования возможности передачи оптических сигналов по оптоволоконным каналам с использованием оптической несущей. Для увеличения точности передачи информации используется не радиочастотная модуляция светового поля, а фаза его несущей. Требуется применение совершенно новых подходов: существенного повышения степени монохроматичности излучения лазеров телекоммуникационного диапазона [11–13], использования фемтосекундных синтезаторов оптических частот [1], а также специфических систем обратной связи, компенсирующих шумы канала [14–18].

Использование выделенных линий оптоволоконной связи оказывается не всегда возможным ввиду их высокой стоимости. Интернет-линии оптоволоконной связи являются широкодоступным и распространённым видом коммуникаций в оптическом диапазоне, однако непосредственный перенос технологии затруднён из-за



**Рис. 1.** (В цвете онлайн.) Оптоволоконные линии Европы для передачи высокоточных сигналов частоты с использованием фазы несущей. Жёлтым цветом отмечены выделенные линии, зелёным — общественные интернет-линии, белым — незадействованные линии, находящиеся на стадии обсуждения. INRIM — Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (Турин, Италия); SYRTE — SYstème de Références Temps Espace (Париж, Франция); MPQ — Max Planck Institute for Quantum Optics (Гархинг, Германия); NPL — National Physical Laboratory (Теддингтон, Великобритания); PTB — Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Брауншвайг, Германия), UNIFI-LENS — Università di Firenze – Laboratorio Europeo di Spettroscopia non lineare (Флоренция, Италия).

наличия в них оптических маршрутизаторов и повторителей (репитеров), сбивающих фазу несущей. Исследуется возможность создания гибридных линий связи, объединяющих стандартный интернет-протокол и выделенный канал в той же телекоммуникационной С-полосе, позволяющий осуществлять передачу сигналов частоты [19]. Уже сегодня в мире существуют оптоволоконные линии, которые соединяют лаборатории в различных городах, а иногда даже в странах, и используются для передачи ультрастабильных сигналов частоты. На рисунке 1 изображены как действующие, так и находящиеся в стадии обсуждения европейские оптоволоконные линии связи.

Достигнут существенный прогресс в области передачи сигналов не только частоты, но и времени с применением аналогичных подходов [20–24]. По стабильности полученные результаты существенно превосходят дуплексное сличение, что актуально для повышения точности глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Особенно важным для решения этой задачи является увеличение расстояния, на котором выполняется синхронизация (до нескольких тысяч километров).

Следует также отметить проведённые в 2016 г. эксперименты по передаче сигналов времени между удалёнными часами по открытому каналу на расстояние в несколько километров со стабильностью на уровне нескольких фемтосекунд [25]. Ведутся также работы по созданию открытого канала передачи сигналов частоты через спутники [7]. Метод передачи сигналов времени и частоты по открытым каналам основывается на тех же принципах, что и передача сигналов по оптоволоконным линиям связи.

В настоящей статье мы приводим обзор методов передачи сигналов времени и частоты по оптоволоконным линиям связи, примеры возможных применений

этих методов, а также представляем некоторые результаты, полученные нами ранее. В разделе 2 описываются основные методы передачи точных сигналов частоты по оптическим волокнам и отмечаются их преимущества и недостатки. В разделе 3 подробно рассматривается схема передачи оптической частоты по выделенному каналу. В разделе 4 обсуждаются возможность применения для передачи точных сигналов частоты интернет-каналов общего пользования, а также достижения последних лет в этой области. В разделе 5 описываются методы передачи по волоконным линиям связи точных сигналов времени. В разделе 6 рассматривается возможность применения представленных методов передачи сигналов частоты для задач гравиметрии и измерения эффекта Саньяка, приводятся примеры их использования в задачах спектроскопии и метрологии.

## 2. Передача точных сигналов частоты по оптоволоконным

При передаче высокостабильного сигнала частоты необходимо, чтобы передающая среда не вносила в сигнал фазовых и амплитудных шумов. На сегодняшний день разработаны оптические часы, демонстрирующие относительную нестабильность на уровне  $10^{-16}/\sqrt{\tau}$  [2, 3, 26], где  $\tau$  — время усреднения, а в области телекоммуникаций достигнуты впечатляющие результаты по исследованию оптических волокон. Во многих странах мира уже сегодня существует плотная сеть оптических волокон, которая в основном используется для интернет-трафика. Использование этих сетей для когерентной передачи оптической несущей кажется очевидным решением.

Оптические волокна являются наилучшей средой для передачи оптических сигналов на большие расстояния ввиду их гибкости, отличных шумовых характеристик и слабого затухания в них оптического сигнала ( $0,23 \text{ дБ км}^{-1}$  для излучения с длиной волны  $1550 \text{ нм}$ ). Последнее позволяет посылать сигналы без дополнительного усиления на расстояния до  $100 \text{ км}$ . Однако если необходимо передать сигнал на расстояние, намного превышающее  $100 \text{ км}$ , то требуется использовать промежуточные усилители, чтобы компенсировать затухание сигнала в волокне, поскольку простое увеличение мощности передаваемого сигнала приводит к обратному бриллюэновскому рассеянию [27–29].

Для промежуточного усиления сигнала используются различные методы. Одним из самых распространённых является применение легированных эрбием волоконных усилителей (Erbium Doped Fiber Amplifier — EDFA), в которых усиление сигнала происходит в активной части волокна, что даёт усиление до  $25 \text{ дБ}$  в широкой,  $1530–1580 \text{ нм}$ , области спектра. Ограничение усиления связано с рэлеевским рассеянием и насыщением активной среды усилителя [30], поэтому при больших расстояниях между передатчиком и приёмником необходимо использовать каскад усилителей, отстоящих друг от друга на расстояние не более  $100–120 \text{ км}$ .

Несмотря на то что излучение, проходящее по оптоволокну, испытывает значительно меньше возмущений, чем излучение, распространяющееся свободно [31], волокно вносит свои фазовые возмущения. Наиболее значительными возмущениями являются флуктуации температуры и акустические вибрации, которые приводят к изменению оптической длины волокна и флуктуациям

показателя преломления. Это вызывает фазовые сдвиги, часто называемые доплеровскими шумами.

Изменение температуры влияет на длину оптического пути в волокне, обладающем показателем преломления  $n$  и длиной  $L$ :

$$\frac{d(nL)_T}{dt} = \left( L \frac{dn}{dT} + n \frac{dL}{dT} \right) \frac{dT}{dt}. \quad (1)$$

Для плавленого кварца термооптический коэффициент  $dn/dT \approx 1 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ , а коэффициент теплового расширения  $dL/dT \approx 6 \times 10^{-7} \text{ м К}^{-1}$  [32]. Таким образом, сигнал с частотой  $\nu_0$  и вакуумной длиной волны  $\lambda_0$  будет испытывать сдвиг частоты

$$\delta y(t) = \frac{1}{c} \frac{d(nL)_T}{dt} \quad (2)$$

в относительных единицах, где  $c$  — скорость света в вакууме. Например, если температура обыкновенного одномодового волокна ( $n = 1,468$ ) длиной  $1000 \text{ км}$  изменится на  $1 \text{ К}$  в течение  $1 \text{ сут}$ , то сигнал на длине волны  $1542 \text{ нм}$  приобретёт относительный сдвиг частоты  $4 \times 10^{-13}$ , что соответствует почти  $80 \text{ Гц}$ .

Акустические волны, действующие на оптоволоконно, могут вызывать напряжения вследствие изменения давления  $P$ , что тоже приводит к флуктуациям фазы передаваемого сигнала. Так же как и флуктуации температуры, изменение давления приводит к флуктуациям длины оптического пути:

$$\frac{d(nL)_P}{dt} = \left( L \frac{dn}{dP} + n \frac{dL}{dP} \right) \frac{dP}{dt}. \quad (3)$$

Коэффициенты  $dn/dP$  и  $dL/dP$  известны — они составляют  $5 \times 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$  и  $10^{-11} \text{ м Па}^{-1}$  соответственно [34, 35]. Изменение давления в  $0,01 \text{ Па}$  вызывает относительный сдвиг частоты сигнала на длине волны  $1542 \text{ нм}$  до  $1,5 \times 10^{-14}$ , или в  $3 \text{ Гц}$  для волокна длиной  $1000 \text{ км}$ . Следует, однако, отметить, что в обоих случаях — при флуктуациях температуры и фазы — сдвиг частоты можно компенсировать с помощью активных элементов.

Кроме доплеровских шумов, приводящих к появлению белого шума фазы, в переданном сигнале могут содержаться шумы и другого происхождения. В сигнале могут присутствовать фликкер-шум фазы, возникающий в электронике со стороны излучателя и приёмника, белый шум частоты за счёт дробовых и тепловых шумов, случайные уходы частоты, а также фликкер-шум частоты. Шумы разных типов характеризуются различной зависимостью спектральной плотности мощности флуктуаций фазы от частоты и усредняются с разной скоростью. Типы шумов могут быть определены по показателю степени в зависимости девиации Аллана от времени усреднения  $\tau$  [33]:

$$\sigma(\tau) \sim \tau^\alpha. \quad (4)$$

Сегодня разработаны различные методы передачи частоты с помощью оптических сигналов. Излучение непрерывного лазера может быть амплитудно модулировано, что позволяет передавать сигналы в радиочастотном диапазоне. Передавая импульсы фемтосекундного лазера с синхронизацией мод, можно добиться одновременной передачи радиочастот и оптических частот [39]. Фемтосекундные импульсы могут также при-

меняться для передачи сигналов времени [40]. Оптические частоты можно передавать непосредственно с использованием фазовой информации несущей излучения непрерывного лазера. Далее мы рассмотрим эти методы по отдельности.

### 2.1. Амплитудная модуляция оптической волны

Наиболее распространённый метод передачи сигналов по оптоволокну в радиочастотном диапазоне заключается в амплитудной модуляции оптической волны излучения непрерывного лазера строго периодическим сигналом на заданной радиочастоте. Удалённому пользователю в этом случае достаточно иметь быстрый фотодиод для демодуляции оптического сигнала и восстановления радиочастотного сигнала [36]. Схема такой передачи показана на рис. 2. По сравнению со стабильностью передачи с использованием спутниковых систем стабильность передачи с амплитудной модуляцией оказывается гораздо выше, а требуемые характеристики могут быть достигнуты уже за несколько минут (рис. 3).

При этом для достижения максимальной стабильности оптоволокну должно быть стабилизировано, для того чтобы компенсировать искажения радиочастотного сигнала, связанные с групповой задержкой, и другие сдвиги. Как правило, для стабилизации длины оптического пути применяются волоконные пьезокерамические элементы, влияющие на длину волокна, или терморегулируемые волоконные катушки. Данный метод чувствителен к поляризационной модовой дисперсии (ПМД), вызванной двулучепреломлением в волокне, и к хро-

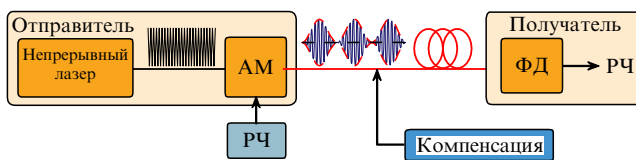


Рис. 2. Схема передачи радиочастотного сигнала с помощью амплитудной модуляции оптической волны. АМ — блок амплитудной модуляции сигнала, ФД — фотодетектор, РЧ — сигнал на радиочастоте.

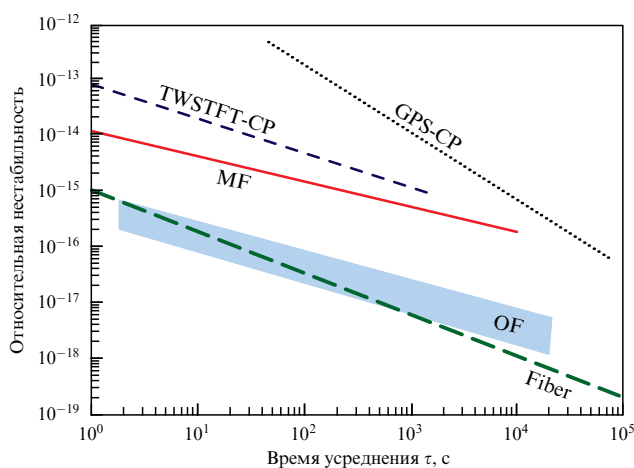


Рис. 3. Относительная нестабильность передачи сигналов частоты методом дуплекс (TWSTFT Carrier-Phase — TWSTFT CP) по несущей сигнала ГНСС (Global Positioning System Carrier Phase, GPS-CP) и по компенсированной оптоволоконной линии (Fiber) по сравнению с относительной нестабильностью частоты лучших микроволновых стандартов (MF) и оптических часов (OF).

матической дисперсии, что приводит к дополнительным фазовым шумам. Для уменьшения эффектов, связанных с ПМД, применяется перемешивание поляризаций, а эффекты хроматической дисперсии могут быть существенно подавлены сужением спектра излучения передающего лазера и стабилизацией его частоты [36].

Наиболее точная передача радиочастотного сигнала с помощью амплитудно-модулированных лазеров была продемонстрирована в Париже между Лабораторией лазерной физики (Laboratoire de Physique des Lasers, LPL) и SYRTE по оптоволокну на расстояние 86 км. Сигнал с частотой 1 ГГц был передан с относительной нестабильностью  $5 \times 10^{-15}$  за 1 с усреднения и нестабильностью несколько единиц восемнадцатого знака за 1 сут усреднения. При этом применялись такие методы, как быстрое перемешивание поляризаций и сложная фильтрация [37]. В России работы по передаче опорного радиочастотного сигнала с использованием амплитудной модуляции ведутся во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) [38].

### 2.2. Одновременная передача радиочастотного и оптического сигналов

В ряде случаев удалённому пользователю необходимо получить одновременно и радиочастотный, и оптический сигналы. Для этой цели используется передача импульсного фемтосекундного излучения со стабильной частотой повторения. В данном случае частота повторения импульсов является источником стабильного радиочастотного сигнала, а сами фурье-компоненты ультракоротких импульсов представляют собой оптический сигнал. На рисунке 4 приведена упрощённая схема передачи таких сигналов. Для достижения высокой стабильности сигналов одна из фурье-компонент сигнала фемтосекундного лазера стабилизируется по атомному стандарту частоты, что обеспечивает передачу стабильности тем компонентам, которые принадлежат телекоммуникационному диапазону и передаются по оптоволоконной линии.

В работе [39] была продемонстрирована передача фемтосекундных импульсов на расстояние в 50 км с частотой повторений 100 МГц и относительной нестабильностью частоты повторения  $4,6 \times 10^{-15} \tau^{-1}$ . На качество передаваемого сигнала в этом случае оказывает влияние хроматическая дисперсия, приводящая к спектральному уширению импульсов и их наложению друг на друга. Для подавления этого эффекта в линию встраивается компенсирующее волокно, что, как правило, позволяет получить длительность импульсов менее 200 пс. Несмотря на

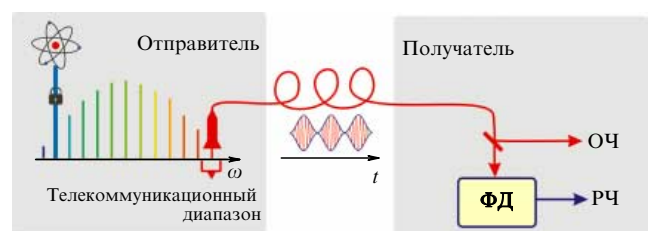


Рис. 4. Схема одновременной передачи радиочастотного и оптического сигналов с помощью фемтосекундного лазера. ФД — фотодетектор, РЧ — сигнал на радиочастоте, ОЧ — сигнал на оптической частоте.

то что последняя величина на несколько порядков больше изначальной длительности импульсов лазера, это не оказывает существенного влияния на стабильность передаваемых сигналов. Данный метод, однако, не позволяет передавать сигналы на большие расстояния из-за неизбежного расплывания импульсов и тем самым потери информации.

Ещё одним источником шумов в случае передачи импульсного излучения является детектирующая электроника. Так, при малых мощностях принимаемого сигнала существенный вклад в шумы вносят фотодетекторы. Однако увеличение мощности сигнала с помощью промежуточных усилителей может приводить к другим нежелательным эффектам, таким как преобразование электронными приборами амплитудных шумов в фазовые, т.е. амплитудной модуляции (АМ) в фазовую модуляцию (ФМ) (АМ – ФМ-конверсия) [41–43].

### 2.3. Передача оптической частоты

В рассматриваемом методе передаваемой информацией является фаза оптической несущей. Влияние хроматической и поляризационной модовой дисперсии, а также АМ – ФМ-конверсии в данном случае минимально. Однако даже для хорошо изолированных оптоволоконных линий, находящихся глубоко под землёй, относительные сдвиги частоты за счёт колебаний температуры и давления могут составлять несколько единиц четырёхзначного знака. Поэтому для достижения лучших показателей стабильности необходимо детектировать и компенсировать флуктуации фазы, возникающие при распространении сигнала по оптическому волокну. Для этого в линию на стороне отправителя встраивается активный фазовый элемент, позволяющий корректировать фазу в соответствии с набранными фазовыми шумами, например акустооптический модулятор. Петля фазовой автоподстройки на стороне отправителя позволяет компенсировать фазовые искажения в полосе частот петли обратной связи, которая определяется временем прохождения сигнала в прямом и обратном направлении [44].

Все три описанных метода позволяют передавать сигналы частоты по оптическим волокнам. Однако в зависимости от поставленной задачи один из методов может оказаться предпочтительным. Так, для сличения оптических часов метод прямой передачи оптической несущей обладает несомненными преимуществами, поскольку он не требует широкой спектральной полосы, как в случае передачи импульсного излучения. Этот метод оказывается проще, чем метод с использованием амплитудной модуляции, и лишён недостатков последнего. В случае, когда доступна "тёмная" линия и необходимо передавать одновременно оптический и радиочастотный сигналы на небольшие расстояния, предпочтительным является метод передачи фемтосекундной последовательности импульсов. С его помощью можно передавать и сигналы времени [46].

В связи с распространением оптических часов и созданием сети оптоволоконных линий связи в континентальном масштабе вопрос передачи сигналов на расстояния порядка нескольких тысяч километров становится первостепенным. Далее будет подробно описан метод передачи сигналов частоты и времени с помощью информации о фазе оптической несущей как наиболее перспективный для решения этой задачи.

## 3. Схема передачи фазы сигнала на оптической несущей

Как упоминалось в разделе 2, в методе передачи по волоконной линии фазы оптической несущей регистрируются и компенсируются накопленные при передаче фазовые искажения сигнала. Регистрация фазовых шумов, как правило, осуществляется с помощью интерферометра Майкельсона, плечо которого собирается на стороне отправителя, как показано на рис. 5. Излучение передающего лазера расщепляется на две части. Одна часть, которая остаётся на стороне отправителя, направляясь по короткому плечу интерферометра, свободному от фазовых искажений, является опорной. Другая часть направляется в длинное плечо интерферометра, содержащее оптоволоконную линию передачи. На стороне отправителя перед оптоволоконным располагается акустооптический модулятор, который подстраивает частоту излучения передаваемого сигнала таким образом, чтобы компенсировать возникающие в сигнале фазовые искажения. На выходе из волокна на стороне удалённого пользователя находится фарадеевское зеркало, которое отражает часть переданного света назад и поворачивает поляризацию отражённого сигнала на  $90^\circ$ . При этом флуктуации поляризации, происходящие в волокне, в значительной степени компенсируются, так что амплитуда сигнала биений между прошедшим туда и обратно излучением и излучением из короткого плеча интерферометра остаётся постоянной [45]. Гетеродинный радиочастотный сигнал биений, содержащий фазовые сдвиги, регистрируется фотодетектором на стороне отправителя. Этот сигнал биений содержит информацию о накопленных фазовых шумах, внесённых оптоволоконной линией,  $\varphi_f(z, t)$ , которая используется для формирования сигнала ошибки и управления частотой АОМ, что позволяет компенсировать фазовые искажения.

В ряде случаев перед фарадеевским зеркалом устанавливается ещё один АОМ (на рис. 5 обозначенный как АОМ1), работающий на фиксированной частоте. Его наличие необходимо для того, чтобы уникальным образом выделить сигнал, отражённый от фарадеевского зеркала, на фоне других отражений, возникающих в длинных линиях (например, на входе усилителей или в области сварки оптоволоконной). Тогда выполняется следующее уравнение:

$$f_0 = 2(f_{\text{АОМ}}(t) + \Delta f_{\text{fiber}}(t) + f_{\text{АОМ1}}), \quad (5)$$

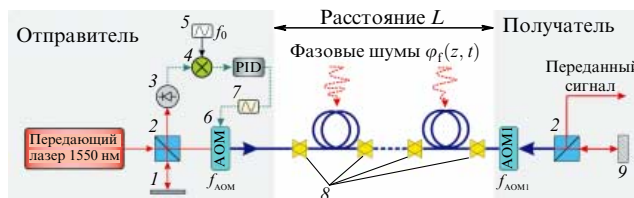


Рис. 5. Упрощённая схема передачи сигнала и компенсации фазовых шумов, вносимых оптоволоконной линией. Сигнал, проходящий по оптоволоконной линии длиной  $L$ , испытывает временную задержку  $\tau_d$ . АОМ — акустооптический модулятор, PID — пропорционально-интегрально-дифференциальный контроллер; 1 — зеркало, 2 — делитель 50:50, 3 — фотодетектор, 4 — смеситель, 5 — источник стабильной радиочастоты, 6 — сигнал управления частотой АОМ, 7 — генератор, управляемый напряжением, 8 — эрбиевые двунаправленные усилители, 9 — фарадеевское зеркало.

где  $f_0$  — регистрируемый сигнал биений,  $f_{\text{АОМ}}$  — частота АОМ-компенсации,  $\Delta f_{\text{fiber}}$  — флуктуации частоты в волокне,  $f_{\text{АОМ1}}$  — частота АОМ1.

Фундаментальное ограничение на достижимое значение подавления фазовых шумов возникает вследствие конечности скорости света в оптоволокне, поскольку шумы могут быть обнаружены только после того, как свет пройдёт по всей линии дважды. Таким образом, фазовые шумы с более высокими частотами не подавляются. Кроме того, свет попадает к удалённому пользователю прежде, чем произойдут корректировки, поэтому подавить полностью шумы сигнала после прохождения линии в одном направлении нельзя. Любое различие шумов в прямом и обратном направлениях приводит к неидеальной компенсации на принимающей стороне. Эти ограничения начинают играть важную роль при передаче сигналов на расстояния более 100 км.

Следует отметить, что для эффективного подавления шумов линии методом гетеродинирования необходимо, чтобы на сигнал биений не влияли шумы самого передающего лазера. Длина когерентности  $L_c$  лазера является функцией его спектра:  $L_c = c/(\pi\Delta\nu) = c\tau_c$ , где  $\Delta\nu$  — спектральная ширина линии лазера,  $c$  — скорость света в волокне,  $\tau_c$  — время когерентности. Если длина когерентности лазера меньше длины линии передачи, то опорный сигнал и сигнал, прошедший по линии, оказываются некоррелированными. Это означает, что сигнал биений, регистрируемый фотодетектором, содержит не только шумы линии, но и шумы самого передающего лазера, в связи с чем компенсация оказывается неэффективной. Поэтому передающий лазер, как правило, обладает узкой спектральной линией (менее 1 Гц), что соответствует длине когерентности  $\sim 10^5$  км. В этом случае информация, полученная методом гетеродинирования, может быть уверенно использована для компенсации фазовых шумов, вносимых волокном.

Обратное бриллюэновское рассеяние в оптических волокнах не позволяет повысить мощность передаваемого сигнала — максимальная мощность излучения на входе в оптическое волокно оказывается ограниченной величиной около 5 мВт [30]. Таким образом, необходимо использовать промежуточные двухпроходные усилители, которые не сбивали бы фазу сигнала. Обычно для решения этой проблемы используется каскад низкошумящих легированных эрбием усилителей, а также специально разработанные бриллюэновские усилители [30].

Для стабилизации оптоволоконной линии применяется метод автогетеродинирования. Сигнал биения между сигналом частоты  $\nu_0$  с копией его самого, но получившей временную задержку, используется для активного подавления шумов, вносимых оптоволоконной линией. Схема подавления доплеровского шума показана на рис. 5.

Сигнал по мере распространения по оптоволоконной линии длиной  $L$  аккумулирует фазовый шум  $\phi_{\text{fiber}}(z, t)$ , который определяется как [15]

$$\phi_{\text{fiber}}(t) = \int_0^L \delta\phi\left(z, t - \left(\tau - \frac{nz}{c}\right)\right) dz, \quad (6)$$

где  $n$  — показатель преломления среды,  $\tau = nL/c$  — время прохождения сигнала через волокно. Для компенсации доплеровского шума часть света отражается обратно по той же самой линии и, следовательно,

аккумулирует двойной фазовый шум за двойной проход:

$$\phi_{\text{fiberRT}}(t) = \int_0^L \left[ \delta\phi\left(z, t - \left(\tau - \frac{nz}{c}\right)\right) + \delta\phi\left(z, t - \left(2\tau - \frac{nz}{c}\right)\right) \right] dz. \quad (7)$$

В фурье-представлении временная задержка преобразуется в сдвиги фазы:

$$\tilde{\phi}_{\text{fiber}}(\omega) = \int_0^L \exp\left[i\omega\left(2\tau - \frac{nz}{c}\right)\right] \delta\tilde{\phi}(z, \omega) dz, \quad (8)$$

$$\tilde{\phi}_{\text{fiberRT}}(\omega) = \int_0^L \left\{ \exp(i\omega\tau) \cos\left[\omega\left(t - \frac{nz}{c}\right)\right] \tilde{\phi}(z, \omega) \right\} dz. \quad (9)$$

Отсюда можно получить спектральные плотности мощности фазового шума сигнала, прошедшего в одном направлении,  $S_{\text{fiber}}(\omega)$ , и сигнала, прошедшего туда и обратно,  $S_{\text{fiberRT}}(\omega)$ :

$$S_{\text{fiber}}(\omega) = \int_0^L \langle |\delta\phi(z, \omega)|^2 \rangle dz, \quad (10)$$

$$S_{\text{fiberRT}}(\omega) = 2S_{\text{fiber}}(\omega) \left(1 + \text{sinc} \frac{2Ln\omega}{c}\right). \quad (11)$$

Для низких частот  $\text{sinc} 0 \approx 1$  и фазовый шум, набираемый за двойной проход, оказывается в четыре раза больше, чем шум сигнала, который получает удалённый пользователь. Сигнал, прошедший туда и обратно по линии, сливается с копией самого себя, у которой временная задержка отсутствует, а фазовый шум пренебрежимо мал. Фазовый детектор преобразует флуктуации фазы в напряжение, которое используется для формирования сигнала ошибки в петле обратной связи компенсации шумов волокна.

Принципиальная схема сличения двух оптических частот,  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , по оптоволоконной линии включает в себя саму оптоволоконную линию, ультрастабильные непрерывные лазеры для переноса информации и два фемтосекундных синтезатора оптических частот (ФСОЧ) (рис. 6). Использование ФСОЧ позволяет свободно сличать сигналы не только разных частот в пределах окна пропускания волоконной оптической линии связи (ВОЛС), но и разных частотных диапазонов (радиодиапазон и оптический диапазон).

Наибольшее расстояние, на которое к настоящему моменту был передан ультрастабильный сигнал частоты, составляет 1840 км [18]. Сигнал на частоте 194 ТГц передавался по оптоволоконной линии, проложенной

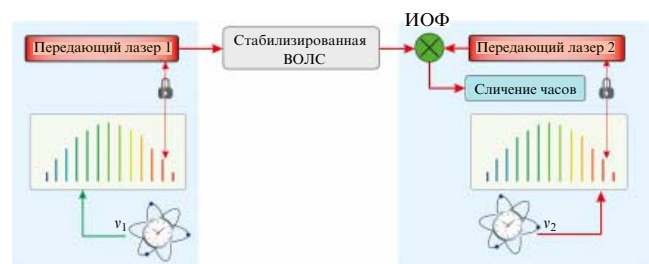


Рис. 6. Схема сличения двух атомных стандартов частоты по стабилизированной ВОЛС (см. рис. 5) с использованием ФСОЧ. ИОФ — измеритель относительной фазы лазерного излучения,  $\nu_1$  — частота первых атомных часов,  $\nu_2$  — частота вторых атомных часов.

между Институтом квантовой оптики общества Макса Планка (MPQ) в г. Гархинге и метрологическим институтом (РТВ) в г. Брауншвайге в Германии. Оптоволоконная линия проходила вдоль газового трубопровода, находящегося под землёй. В эксперименте использовались две "тёмные линии", т.е. две из резервных линий, свободных от интернет-трафика, которые передавали только исследуемый сигнал частоты. Длина линии между MPQ и РТВ 920 км. Была проведена прямая передача ультрастабильного сигнала частоты (см. раздел 5.3), в серии других экспериментов на стороне РТВ концы двух линий соединялись, тем самым расстояние, проходимое сигналом, могло удвоиться. Несмотря на большое расстояние, линия стабилизировалась как единое целое, что ограничивало максимальную частоту эффективно подавляемых шумов за счёт большого времени распространения сигнала. Так, максимальная частота шума, компенсируемая петлёй обратной связи, равнялась 27 Гц. Тем не менее относительная нестабильность частоты составила  $2 \times 10^{-14}$  за 1 с усреднения и менее  $1 \times 10^{-19}$  за 1000 с усреднения, что позволяет решать все актуальные задачи по сравнению оптических часов.

#### 4. Передача сигналов частоты по интернет-каналам

В описанном в разделе 3 методе используется выделенная "тёмная" оптоволоконная линия, по которой передаётся только один сигнал. Стоимость аренды таких линий весьма высока. В свою очередь одна линия интернета разбивается на множество частотных каналов, различающихся частотой несущей, что позволяет передавать информацию гораздо эффективнее и снижает стоимость её передачи. Ввиду повсеместной распространённости линий для интернет-трафика было бы разумно их использовать для передачи стабильных сигналов времени и частоты. Однако на пути к реализации этого решения имеются определённые трудности.

По мере распространения по ВОЛС сигнал затухает. В интернет-каналах используется другой, отличный от принципа построения аналоговой схемы на усилителях EDFA (см. рис. 5), принцип, а именно: сигнал демультиплексируется, разбивается по каналам, расшифровывается и вновь записывается на более мощную несущую. При этом фаза несущей, естественно, не сохраняется и возникают задержки, вызванные системой. Поскольку при передаче высокостабильных сигналов частоты используется информация о фазе несущей, возникает необходимость выделить сигнал из множества других сигнала

лов, передаваемых по линии, до того как он попадёт на повторитель. После этого сигнал надо вывести из линии, пропустить его через двухпроходной усилитель, сохраняющий фазу, и завести обратно в линию для дальнейшего распространения. Такую же процедуру необходимо повторить для сигнала, распространяющегося в обратном направлении (рис. 7).

В общественных интернет-сетях средние потери мощности достигают  $0,29 \text{ дБ км}^{-1}$ , что почти в полтора раза больше, чем потери в "тёмной" линии. В основном потери увеличиваются из-за наличия в линии большого количества волоконных разъемов с плоской поверхностью (стандарт РС (Physical Contact)), на которых происходит частичное отражение света, что формирует паразитные эталоны. Вследствие этих эффектов эрбиевые двухпроходные усилители не могут работать на достаточно высоком уровне усиления, поскольку превышение порога приводит к их самовозбуждению. Таким образом, с использованием только эрбиевых усилителей невозможно полностью компенсировать ослабление сигнала, если узлы линии разделены расстоянием более 50 км. Использование бриллиантовых двухпроходных усилителей [30] также оказывается невозможным, поскольку для их работы требуется оптическая накачка, которая плохо совместима с оборудованием общественных телекоммуникационных сетей.

Для преодоления указанного ограничения может быть использована каскадная линия передачи: линия, разделённая на несколько отрезков, между которыми находятся промежуточные лазерные станции-повторители [19, 47]. Эти удалённые промежуточные станции являются наиболее сложным элементом линии, поскольку они должны работать автономно. По сути, каждая промежуточная станция представляет собой отдельную лазерную систему со спектрально узкой линией излучения, фаза которого привязана к фазе поступающего на неё сигнала, переданного с предыдущей станции методом фазовой автоподстройки частоты. При этом флуктуации фазы сигнала записываются в фазу излучения лазера-повторителя, находящегося на промежуточной станции  $N$ . Часть излучения лазерной системы-повторителя направляется обратно на предыдущую станцию ( $N - 1$ ), где он сливается с сигналом, который приходит на станцию  $N - 1$ , и используется для компенсации фазовых шумов, накопленных сигналом по мере его распространения от станции  $N - 1$  к станции  $N$ . Та же операция повторяется на следующей промежуточной станции ( $N + 1$ ). Таким образом происходит последовательная компенсация фазовых шумов передаваемого сигнала. Наконец, лазер-повторитель сам может слу-

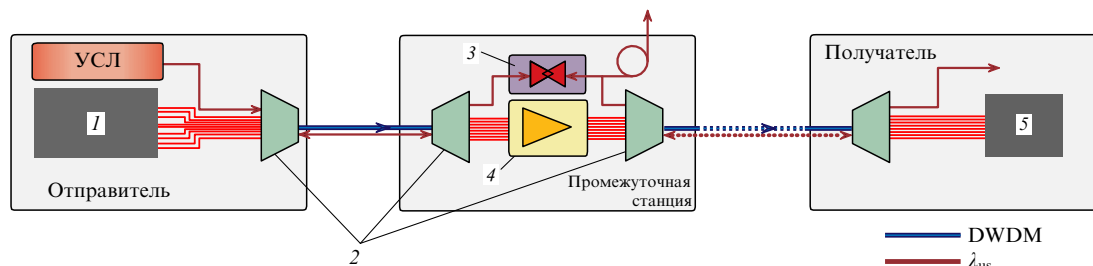


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Схема передачи сигнала частоты с использованием интернет-каналов. Расстояние между промежуточными станциями менее 50 км. 1 — передатчик, 2 — оптический мультиплексор для ввода и вывода сигнала (Optical Add Drop Multiplexor, OADM), 3 — двунаправленный эрбиевый оптический усилитель, 4 — однонаправленный оптический усилитель, 5 — приёмник. УСЛ — ультрастабильный лазер, DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) — поток данных в линии, распространяющийся по технологии спектрального уплотнения каналов,  $\lambda_{us}$  — ультрастабильный сигнал частоты.

жить источником стабильного сигнала частоты, если его излучение направить на ответитель, по которому сигнал будет доставлен пользователю по дополнительной короткой стабилизированной линии.

Вся удалённая станция, в том числе микроконтроллеры, управляется встроенным компьютером, который доступен по интернет-протоколу. Это даёт возможность удалённо оптимизировать процесс передачи сигнала. Кроме того, необходимо удалённо контролировать сигналы ошибки петели обратной связи систем компенсации фазовых шумов, чтобы оптимизировать усиление и избежать нежелательных самовозбуждений усилителей. Наконец, необходимо регистрировать возможные проскальзывания циклов в системах автоподстройки частоты.

На сегодняшний день реализована передача ультрастабильного сигнала частоты с использованием общественных интернет-сетей по следующему маршруту: LPL (Вильтанёз, северный пригород Парижа) – Нанси (восток Франции) – LPL, что составляет 1100 км. Линия была разбита на четыре отрезка, использовались два параллельных оптических волокна, принадлежащих общественной интернет-сети. Поскольку отправитель и получатель в итоге находились в одной лаборатории, это позволило исследовать стабильность передачи сигнала по каскадной линии в сравнении со стабильностью передачи того же сигнала по короткой лабораторной линии. Относительная нестабильность передачи оптического сигнала частоты по такой линии достигла  $4 \times 10^{-16}$  за 1 с усреднения и  $5 \times 10^{-20}$  за 60000 с усреднения [19].

## 5. Передача сигналов времени

Для формирования национальных шкал времени, радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) и обеспечения систем ГНСС необходимо синхронизировать часы, расположенные на больших расстояниях друг от друга. Задача, которую необходимо решить в этом случае, заключается в необходимости контроля за временной задержкой, которую получает сигнал при передаче удалённому пользователю. Методы передачи сигналов времени через спутники (ГНСС, TWSTFT), позволяющие передавать сигналы времени на расстояния до 10000 км, являются на сегодняшний день наиболее применимыми. Однако их точность ограничена из-за вызываемых тропосферой и ионосферой флуктуаций времени задержки, которые трудно компенсировать [48].

Метод передачи сигналов времени по оптоволоконным линиям связи, а также применяемые аппаратные средства в большинстве случаев аналогичны используемым при передаче сигналов времени через спутниковые каналы связи [49]. Система передачи сигналов времени по оптоволокну (Time Transfer Through Optical Fiber, TTTOF) [20] является вариантом стандартной системы TWSTFT, в котором передача сигнала происходит по оптоволоконной линии связи между двумя наземными станциями. Для генерации меток времени и их синхронизации с часами используются модемы SATRE (Satellite Time and Ranging Equipment) [50]. Эти же модемы отвечают за измерение времени задержки. К дополнительным преимуществам оптоволоконных линий можно отнести широкую полосу передачи сигналов, что позволяет использовать максимальную возможную скорость двоичной модуляции фазового сдвига и тем самым повысить точность по сравнению с точностью в стандартной передаче по TWSTFT. При этом компенсация фазовых шумов оптического волокна не является необходимой,

поскольку при передаче сигналов времени основная задача заключается в установлении контроля над временными задержками сигнала, которые накапливаются не только по мере прохождения волокна, но и на каждом отрезке на сторонах отправителя и получателя, и измерение этих задержек.

На сегодняшний день метод передачи сигналов времени по оптическим волокнам конкурирует по точности и стабильности передаваемых сигналов времени со спутниковыми методами, но уступает им по расстоянию, на которое происходит передача. Пока оно не превышает 1000 км.

Объединение технологий позволяет производить одновременную передачу точных сигналов времени и стабильных сигналов частоты с использованием информации о фазе оптической несущей по стабилизированному ВОЛС. Причём для этих целей могут быть пригодны и общественные интернет-сети [21, 51]. Группой исследователей во Франции была продемонстрирована одновременная передача сигналов времени и частоты на расстоянии 540 км. Относительная нестабильность оптической частоты в этом эксперименте достигла  $2 \times 10^{-18}$  за 30000 с усреднения. Абсолютная точность и долговременная стабильность сигналов времени составили 250 пс и 50 пс соответственно [21].

## 6. Примеры применения метода оптоволоконной передачи точных сигналов частоты

### 6.1. Измерение гравитационного потенциала и эффект Саньяка

Согласно общей теории относительности часы, расположенные вблизи массивных объектов, идут медленнее, чем часы, находящиеся вдали от них. Этот эффект носит название гравитационного замедления времени (ГЗВ). И хотя в масштабах расстояний и скоростей нашей повседневной жизни релятивистские эффекты чрезвычайно малы, их необходимо учитывать при работе с современными атомными часами. Так, релятивистская поправка на ГЗВ вводится в бортовые часы спутниковых систем навигации. При этом создание оптических часов, обладающих стабильностью на уровне восемнадцатого знака, открывает возможность наблюдать ГЗВ и непосредственно измерять изменения гравитационного потенциала при перемещении из одной точки на поверхности Земли в другую [10]. Вблизи поверхности Земли величина эффекта в относительных единицах составляет  $10^{-16}$  на 1 м.

В большинстве современных экспериментов и приложений гравитационные поправки вычисляются на основе измерений разности высот, выполненных классическими геодезическими методами (нивелирование и дальнометрия). Однако появление оптических часов позволяет "обратить" задачу и использовать точные измерения частоты для вычисления разности высот. Первые эксперименты такого рода выполнены группами Д. Вайнланда [52] и Х. Каттори [53].

Использование оптоволоконных линий связи для сличения сверхстабильных оптических часов открывает возможность для создания нового метода картографирования гравитационного потенциала Земли. Располагая сетью базовых станций, на которых находятся оптические часы, сличаемые между собой по оптоволоконным линиям связи, и возимым (транспортируемым) стандартной частоты, также подключаемым к оптоволоконной



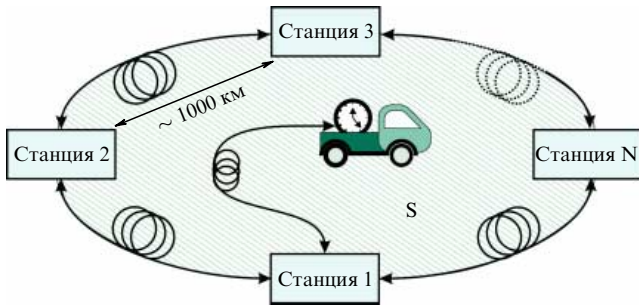


Рис. 8. Схема метода картографирования гравитационного потенциала с помощью мобильных часов и сети базовых станций с использованием компенсированных оптоволоконных линий связи.

сети, можно измерять изменение гравитационного потенциала от точки к точке (рис. 8). Уже сегодня стабильность возимого стандарта частоты на атомах стронция достигла  $8 \times 10^{-17}$  [7], что достаточно для определения изменения высоты с точностью, лучшей чем 1 м.

Другим релятивистским эффектом, который может быть обнаружен с помощью оптоволоконных линий связи, является эффект Саньяка. Во вращающейся системе времени распространения электромагнитного излучения по замкнутому контуру в прямом и обратном направлении различаются на величину:

$$\Delta t_{\Omega} = \frac{4\Omega S}{c^2}, \quad (12)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме,  $\Omega$  — вектор угловой скорости вращения системы,  $S$  — вектор площади, охватываемой контуром.

Оптоволоконные линии связывают между собой лаборатории, находящиеся на расстоянии более 1000 км друг от друга. Создание замкнутого контура (см. рис. 1) позволит создать кольцевой интерферометр, охватывающий площадь в несколько миллионов квадратных километров. По измерению фазового сдвига встречного оптического излучения, обусловленного эффектом Саньяка, можно будет с высокой точностью определять некоторые параметры вращения Земли.

## 6.2. Спектроскопия перехода 1S–2S в атоме водорода

На протяжении последних 20 лет авторы настоящей статьи принимали участие в экспериментах по спектроскопии перехода 1S–2S в атоме водорода, проводимых группой Т.В. Хэнша в Гархинге, в том числе для уточнения значения постоянной Ридберга  $R_{\infty}$  [54]. В 1999 г. точность измерения частоты перехода 1S–2S в атоме водорода превысила точность любых коммерчески доступных цезиевых часов, поэтому в период 1999–2011 гг. для измерений использовался транспортируемый цезиевый фонтан FOM (FONtaine Mobile) [55], с помощью которого были проведены серии экспериментов [56–58] в 1999, 2003 и 2010 гг. В конце 2010 г. после успешной демонстрации передачи стабильных сигналов частоты с помощью оптической несущей по оптоволоконной линии, соединяющей МРQ и РТВ, спектроскопия перехода 1S–2S в атоме водорода была осуществлена по опорному сигналу цезиевого фонтана FO1, расположенного в РТВ [59]. При этом учитывалась разность высот над уровнем моря лабораторий МРQ и РТВ, составляющая около 150 м. Дифференциальный красный сдвиг между удаленными атомами водорода и цезиевым стандартом частоты определялся из GPS-измерений с

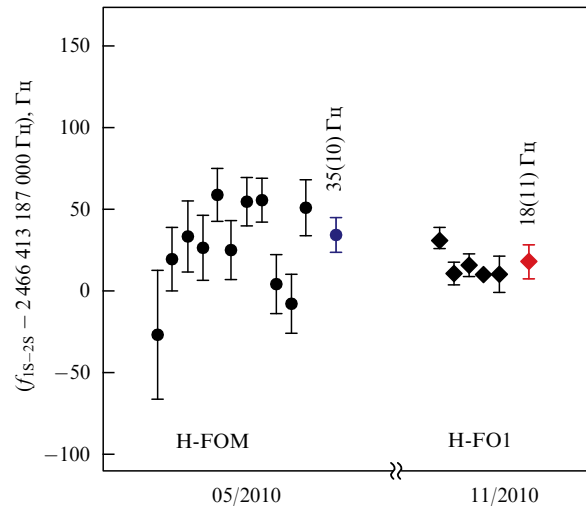


Рис. 9. (В цвете онлайн.) Сравнение результатов измерения частоты центра перехода 1S–2S в атоме водорода, полученных с использованием транспортируемого цезиевого стандарта частоты FOM (показанные синим цветом) и удаленного цезиевого фонтана FO1 (показанные черным цветом). Каждый чёрный символ представляет результат усреднения измерений в течение 1 сут. Красный ромб — среднее значение, включая неопределённость. (Данные из работы [59].)

использованием модели геоида EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008), а его погрешность измерялась по приливным эффектам.

Результаты абсолютных измерений частоты перехода 1S–2S, полученные в перечисленных выше работах, представлены на рис. 9. Шумы, вносимые волоконной линией, эффективно компенсировались и не оказывали влияния на стабильность и точность сигнала цезиевого фонтана FO1, которые превосходили стабильность и точность транспортируемого стандарта FOM, что позволило уменьшить неопределённость абсолютной частоты перехода 1S–2S.

Совместный анализ результатов, полученных в 2010 и 2013 гг., позволил наложить ограничение на линейную комбинацию параметров нарушения лоренцевской симметрии в рамках расширенной Стандартной модели [60]:

$$c_{(TX)} = (3,1 \pm 1,9) \times 10^{-11}, \quad (13)$$

$$0,92c_{(TY)} + 0,40c_{(TZ)} = (2,6 \pm 5,3) \times 10^{-11}. \quad (14)$$

Исследование ограничений на возможное нарушение лоренц-инвариантности с помощью оптических часов является одной из актуальных задач современной физики [61, 62].

Выполненные эксперименты показали возможность проведения прецизионных измерений между лабораториями, разделёнными расстояниями в несколько тысяч километров.

## 7. Заключение

В представленной статье описаны существующие сегодня методы передачи стабильных сигналов времени и частоты по оптоволоконным линиям связи. Современные оптические стандарты частоты, обладающие рекордно высокой точностью и стабильностью на уровне  $10^{-18}$ , накладывают новые требования к стабильности передачи сигналов и открывают новые возможности их применения. Оптоволоконные линии связи, включая

общественные интернет-сети, полностью отвечают этим требованиям и позволяют передавать ультрастабильные сигналы частоты на расстояния в несколько тысяч километров. Открываются новые возможности использования оптических стандартов частоты для решения прикладных и фундаментальных задач: картографирования гравитационного потенциала Земли, определения параметров вращения Земли по измерению эффекта Саньяка, осуществления экспериментов по прецизионной спектроскопии спектрально узких переходов. Учитывая повсеместную распространённость волоконнооптических линий связи, можно ожидать, что метод передачи точных сигналов времени и частоты по ВОЛС скоро будет использоваться наравне со спутниковыми методами, дополняя и расширяя их возможности.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 15-02-03936, 16-29-11723) и Министерства образования и науки РФ (программа повышения конкурентоспособности ведущих российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров "5 топ 100").

## Список литературы

- Udem Th, Holzwarth R, Hänsch T W *Nature* **416** 233 (2002)
- Hinkley N et al. *Science* **341** 1215 (2013)
- Bloom B J et al. *Nature* **506** 71 (2014)
- Bauch A et al. *Metrologia* **43** 109 (2006)
- Müller J et al. *Space Sci. Rev.* **214** 5 (2018)
- Boucher C, Pearlman M, Sarti P *Adv. Space Res.* **55** 24 (2015)
- Riehle F *Nature Photon.* **11** 25 (2017)
- Koller S B et al. *Phys. Rev. Lett.* **118** 073601 (2017)
- Cao J et al. *Appl. Phys. B* **123** 112 (2017)
- ITOC. International Timescales with Optical Clocks. REG Gravity potential for optical clock comparisons, <http://projects.npl.co.uk/itoc/project-structure/reg/gravity-potential/>
- Świerad D et al. *Sci. Rep.* **6** 33973 (2016)
- Alnis J et al. *Phys. Rev. A* **77** 053809 (2008)
- Wu L et al. *Sci. Rep.* **6** 24969 (2016)
- Jiang H et al. *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 2029 (2008)
- Williams P A, Swann W C, Newbury N R J. *Opt. Soc. Am. B* **25** 1284 (2008)
- Grosche G et al. *Opt. Lett.* **34** 2270 (2009)
- Predehl K et al. *Science* **336** 441 (2012)
- Droste S et al. *Phys. Rev. Lett.* **111** 110801 (2013)
- Chiodo N et al. *Opt. Express* **23** 33927 (2015)
- Rost M et al. *Metrologia* **49** 772 (2012)
- Lopez O et al. *Appl. Phys. B* **110** 3 (2013)
- Kodet J, Pánek P, Procházka I *Metrologia* **53** 18 (2016)
- Śliwczynski L et al. *Metrologia* **50** 133 (2013)
- Zhang H et al. *IEEE Photon. J.* **7** 7600208 (2015)
- Deschênes J-D et al. *Phys. Rev. X* **6** 021016 (2016)
- Ludlow A D et al. *Rev. Mod. Phys.* **87** 637 (2015)
- Brillouin L *Ann. Physique* **9** (17) 88 (1922)
- Ippen E P, Stolen R H *Appl. Phys. Lett.* **21** 539 (1972)
- Kobyakov A, Sauer M, Chowdhury D *Adv. Opt. Photon.* **2** 1 (2010)
- Terra O, Grosche G, Schnatz H *Opt. Express* **18** 16102 (2010)
- Giorgetta F R et al. *Nature Photon.* **7** 434 (2013)
- Hocker G B *Appl. Opt.* **18** 1445 (1979)
- Allan D W *Proc. IEEE* **54** 221 (1966)
- Ghosh G *Phys. Rev. B* **57** 8178 (1998)
- Riehle F *Frequency Standards — Basics and Applications* (Weinheim: Wiley-VCH, 2004); Пер. на русск. яз.: Риле Ф *Стандарты частоты. Принципы и приложения* (М.: Физматлит, 2009)
- Foreman S M et al. *Rev. Sci. Instrum.* **78** 021101 (2007)
- Lopez O et al. *Eur. Phys. J. D* **48** 35 (2008)
- Fedorova D M et al. *Measur. Tech.* **58** 994 (2015)
- Marra G et al. *Opt. Lett.* **35** 1025 (2010)
- Lessing M et al., in *Proc. of the Conf. on Lasers and Electro-Optics, CLEO, Science and Innovations, San Jose, Calif., USA, 10–15 May 2015, Conf. Papers* (OSA Technical Digest) (Washington, DC: Optical Society of America, 2015) p. STh3N.2
- Ivanov E N, Diddams S A, Hollberg L *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control* **52** 1068 (2005)
- Ivanov E N, Diddams S A, Hollberg L *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **9** 1059 (2003)
- Ivanov E N et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control* **54** 736 (2007)
- Ma L-S et al. *Opt. Lett.* **19** 1777 (1994)
- Kersey A D et al. *Electron. Lett.* **27** 518 (1991)
- Löhl F et al. *Phys. Rev. Lett.* **104** 144801 (2010)
- Lopez O et al. *Opt. Express* **20** 23518 (2012)
- Piester D, Schnatz H *PTB-Mitteilungen* (Special Issue) **119** 33 (2009)
- Hanson D W, in *Proc. of the 43rd Annual Symp. on Frequency Control, 31 May–2 June 1989, Denver, CO, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 1989) p. 174
- SATRE (Satellite time and ranging equipment) TWSTFT (Tway satellite time and frequency transfer) TimeTech GmbH, <http://www.timetechnology.com>
- Wang B et al. *Sci. Rep.* **2** 556 (2012)
- Chou C W et al. *Science* **329** 1630 (2010)
- Takano T et al. *Nature Photon.* **10** 662 (2016)
- Mohr P J, Taylor B N, Newell D B *Rev. Mod. Phys.* **84** 1527 (2012)
- Lemondé P et al., in *Frequency Measurement and Control. Advanced Techniques and Future Trends* (Topics in Applied Physics, Vol. 79, Ed. A N Luiten) (Berlin: Springer-Verlag, 2000) p. 131
- Niering M et al. *Phys. Rev. Lett.* **84** 5496 (2000)
- Fischer M et al. *Phys. Rev. Lett.* **92** 230802 (2004)
- Parthey C G et al. *Phys. Rev. Lett.* **107** 203001 (2011)
- Matveev A et al. *Phys. Rev. Lett.* **110** 230801 (2013)
- Colladay D, Kostelecký V A *Phys. Rev. D* **58** 116002 (1998)
- Hohensee M A et al. *Phys. Rev. Lett.* **111** 050401 (2013)
- Pruttivarasin T et al. *Nature* **517** 592 (2015)

## Accurate frequency and time dissemination in the optical domain

K.Yu. Khabarova<sup>(1)</sup>, E.S. Kalganova<sup>(1)</sup>, N.N. Kolachevsky<sup>(1,2,3)</sup>

<sup>(1)</sup> Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation

<sup>(2)</sup> International Center for Quantum Optics and Quantum Technologies (the Russian Quantum Center), ul. Novaya 100A, 143025 Skolkovo, Moscow, Russian Federation

<sup>(3)</sup> National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation  
E-mail: kseniakhabarova@gmail.com

The development of the optical frequency comb technique has enabled a wide use of atomic optical clocks by allowing frequency conversion from the optical to the RF range. Today, the fractional instability of such clocks has reached the record eighteenth digit level, two orders of magnitude better than for cesium fountains representing the primary frequency standard. This is paralleled by the development of techniques for transferring accurate time and optical frequency signals, including fiber links. With this technology, the fractional instability of transferred frequency can be lowered to below  $10^{-18}$  with an averaging time of 1000 s for a 1000 km optical link. At a distance of 500 km, a time signal uncertainty of 250 ps has been achieved. Optical links provide the opportunity for comparing optical clocks and creating a synchronized time and frequency standard network at a new level of precision. Prospects for solving new problems arise, including the determination of the gravitational potential, the measurement of the continental Sagnac effect and the precise testing of fundamental theories.

**Keywords:** fiber links, optical frequency and time dissemination, femtosecond laser, erbium doped laser, frequency stabilization

PACS numbers: 06.20.Jr, 06.30.Ft, 12.20.Fv, 32.10.Fn, 32.30.Jc, 42.62.Fi

Bibliography — 62 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **188** (2) 221–230 (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.05.038131>

Received 3 February 2017, revised 12 May 2017

*Physics – Uspekhi* **61** (2) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.05.038131>